

Avaliação das relações entre propriedades de forma de agregados, compactação, parâmetros do esqueleto mineral e textura de revestimentos asfálticos aeroportuários a partir do Processamento Digital de Imagens (PDI)

Evaluation of the relations between aggregates' shape properties, compaction, mineral skeleton parameters, and texture of airport asphalt surfaces using Digital Image Processing (DIP)

Victor Mosca de Carvalho Araujo¹, Renan Santos Maia², Verônica Teixeira Castelo Branco³, Aldaianny de Oliveira Maia⁴, Camilla Bezerra Rodrigues⁵

¹Universidade Federal do Ceará, Brasil, victor.mosca@insttale.com.br

²Universidade Federal do Ceará, Brasil, renanmaia@det.ufc.br

³Universidade Federal do Ceará, Brasil, veronica@det.ufc.br

⁴Universidade Federal do Ceará, Brasil, aldaiannymaia@det.ufc.br

⁵Universidade Federal do Ceará, Brasil, camillabrodrigues6@gmail.com

Recebido:

18 de outubro de 2018

Aceito para publicação:

22 de março de 2019

Publicado:

30 de abril de 2021

Editor de área:

Francisco Thiago Sacramento
Aragão

Palavras-chave:

Pavimento aeroportuário.
Processamento Digital de Imagens.
Compactação.
Esqueleto mineral.
Textura.

Keywords:

Airport pavement.
Digital Image Processing,
Compaction.
Mineral skeleton.
Texture.

DOI:10.14295/transportes.v29i1.1875



RESUMO

Este trabalho busca contribuir, na fase de projeto, para a previsão de macro e microtextura de misturas asfálticas aeroportuárias, relacionando-as com propriedades de forma dos agregados, métodos de compactação e parâmetros do esqueleto mineral. Para tanto, foi validado o uso do Processamento Digital de Imagens (PDI), a partir do equipamento AIMS2, cujas avaliações de macro e microtextura apresentam correspondência satisfatória com o ensaio de Mancha de Areia (MA) e a textura superficial da matriz pé-trea, respectivamente. Observou-se que o aumento do Grau de Compactação (GC) e a utilização de rolos tandem provocam uma redução na macrotextura e uma melhoria nas características do esqueleto mineral. Além disso, a compactação em laboratório pode dar suporte à previsão da macrotextura em campo, porém a microtextura pode ser melhor prevista a partir da análise isolada da textura superficial dos agregados, sendo necessário para isso o desenvolvimento de correspondências entre classificações estatísticas e físicas.

ABSTRACT

This work aims to support the prediction of macro and microtexture in the design phase of airport asphalt mixtures, relating them to aggregates' shape properties, compaction methods, and mineral skeleton parameters. In order to do so, the use of Digital Image Processing (DIP) was validated using AIMS2, whose macro and microtexture evaluations were satisfactorily correlated with the Sand Patch test and the stone matrix surface texture, respectively. Increasing the Compaction Degree and using tandem rollers cause a reduction of the macrotexture, and an improvement in the mineral skeleton characteristics. In addition, laboratory compaction can provide a prediction of macrotexture in the field, but microtexture can be better predicted from the isolated analysis of aggregates' surface texture, being necessary the development of correspondences between statistical and physical classifications for so.

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A segurança em operações de pouso e decolagem de aeronaves depende das propriedades de aderência na interface pneu-pavimento, entretanto, inexistem meios satisfatórios que permitam prever, em laboratório, propriedades de textura e atrito durante a fase de projeto das misturas asfálticas aeroportuárias. Como há elevada complexidade em transpor a realidade laboratório-campo, textura e atrito são, em geral, avaliados apenas em campo, após a construção de trechos experimentais. Segundo a norma DNIT ES-031/06, revestimentos de Concreto Asfáltico (CA) recém-executados devem apresentar resistência à derrapagem maior ou igual a 45 BPN (no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, o valor mínimo sugerido é 55) e altura de mancha areia entre 0,6 e 1,2 mm, obtidos dos ensaios de Pêndulo Britânico (PB) e de Mancha de Areia (MA) (parâmetro *Mean Texture Depth*, MTD), respectivamente. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), na IAC 4302/01, sugeria um valor de MTD mínimo de 1,0 mm, enquanto a Resolução 236/12 sustenta que o valor de MTD de um revestimento aeroportuário não deverá, sob pena de multa ao aeródromo, ser inferior a 0,60 mm.

Para atingir a condição de resistência à derrapagem exigida, cabe ao projetista avaliar a escolha dos materiais que irão compor a mistura asfáltica, observando granulometria e propriedades de forma dos agregados, por exemplo. Há de se observar também que Grau de Compactação (GC), tipos e sequência de rolos compactadores utilizados interferem diretamente em características volumétricas, bem como na textura do revestimento. Para dar suporte a esse processo de escolha, este estudo objetiva contribuir para que sejam definidas relações entre propriedades de forma de agregados, grau e métodos de compactação de campo e laboratório, parâmetros do esqueleto mineral, macro e microtextura de misturas asfálticas que compõem revestimentos de pavimentos aeroportuários. Para tanto, serão utilizadas técnicas tradicionais (Mancha de Areia e Pêndulo Britânico) e técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), a partir do uso do *Aggregate Image Measurement System 2* (AIMS2), para a obtenção das características de textura mencionadas.

Ensaio convencionais para análise de propriedades de forma de agregados ou de textura de misturas asfálticas utilizam equipamentos simples, porém demandam tempo e, em muitos casos, determinam índices baseados em médias, desconsiderando a distribuição cumulativa de propriedades (Masad, 2005). Técnicas mais avançadas, como o PDI, utilizam câmeras ou *scanners* para capturar imagens, além de *softwares* que realizam o tratamento estatístico de dados, como é o caso do AIMS2. Sabe-se que a textura de misturas asfálticas é fortemente influenciada por características dos agregados, como granulometria e forma. Hall *et al.* (2009) sustentam relações como: (i) o aumento da quantidade de material retido entre as peneiras de 9,50 e 2,36 mm gera uma menor a macrotextura e (ii) a microtextura dos revestimentos asfálticos está diretamente relacionada à resistência dos agregados ao polimento. Outro fator a ser considerado é a resistência dos agregados à degradação (abrasão/quebra) (Mahmoud, 2005). Fatores como as propriedades de forma podem ser melhor controlados ainda no processo de produção de agregados (Bessa *et al.*, 2011; Diógenes, 2018), uma vez que, por exemplo, agregados provenientes de diferentes fontes mineralógicas podem apresentar propriedades semelhantes em função da similaridade entre processos de britagem (Bessa, 2012).

Atingir um equilíbrio entre aderência pneu-pavimento e desempenho mecânico é uma das complexidades que residem nos processos de seleção de materiais e de compactação de misturas asfálticas, especialmente na transição laboratório-campo. Na especificação aeroportuária DIRENG 04.05.610/02, afirma-se que pavimentos aeroportuários devem apresentar valores de

GC superiores a 96,3%, sendo necessária a construção de trechos experimentais, com a retirada de Corpos de Prova (CPs) para fiscalização do cumprimento de requisitos normativos como GC e textura. No contexto rodoviário (DNIT ES-031/06) e em alguns termos de referência para contratação de serviços de pavimentação aeroportuária, sugere-se GC mínimo de 97,0%.

Masad *et al.* (1999) relacionaram a estrutura interna de misturas asfálticas com a compactação em campo e laboratório, no Compactador Giratório Superpave (CGS), por meio da tomografia computadorizada. CPs compactados pelo CGS apresentaram maior Vv nas regiões próximas às faces superiores e inferiores. Já nas amostras de campo, o Vv chegou a cerca de 17% na face superior, enquanto na face inferior tal valor foi de aproximadamente 2%. Ribas (2016) avaliou o esqueleto mineral de misturas asfálticas compactadas em campo e em laboratório, por meio do CGS (com diferentes ângulos de inclinação do eixo de rotação), do Compactador Marshall (CM) e da Mesa Compactadora (MC). A autora aplicou o PDI, a partir do *software* iPas2, que permite avaliar, a partir de um escaneamento de faces internas da mistura, a quantidade, o comprimento e a direção dos contatos entre agregados. Os resultados mostraram que os agregados estavam aleatoriamente orientados no sentido horizontal para todos os métodos de compactação. Além disso, as misturas asfálticas compactadas com o CM e o CGS apresentaram um número de contatos entre agregados similar ao de misturas compactadas em campo. Ibiapina *et al.* (2018) avaliaram, por meio do iPas2, a formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas, indicando que a previsão do intertravamento deve considerar não apenas propriedades de forma, mas também granulometria e parâmetros de dosagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Seleção de materiais

Neste estudo, utilizou-se um Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) classificado por penetração como CAP 50/70, produzido na Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste – Lubnor (Petrobras). Utilizaram-se agregados minerais de origem granítica, coletados em uma pedreira localizada na cidade de Maranguape/CE. As frações utilizadas na composição das misturas asfálticas apresentaram Tamanho Máximo Nominal (TMN) 1", 3/4", 1/2", além do pó de pedra.

2.2. Análise das propriedades de forma dos agregados

Utilizou-se o Processamento Digital de Imagens (PDI), por meio do *Aggregate Image Measurement System 2* (AIMS2). Para os agregados graúdos, o AIMS2 realiza a análise dos parâmetros forma tridimensional, angularidade, textura e lamelaridade, sendo as partículas dispostas em bandejas específicas para os tamanhos 25,4, 19,0, 12,5, 9,5 e 4,75 mm. Para os agregados miúdos, analisam-se as frações 2,36, 1,18, 0,6, 0,3, 0,15 e 0,075 mm, obtendo-se os parâmetros forma bidimensional e angularidade. Para tanto, partículas de cada fração são dispostas na bandeja de 19 mm, realizando-se uma única digitalização. Ao final do ensaio, os resultados obtidos podem ser confrontados com diferentes sistemas de classificação, como Al Rousan (2004), Mahmoud *et al.* (2010) e Ibiapina (2018), sendo o último desenvolvido para agregados brasileiros.

2.3. Dosagem das misturas asfálticas

Foram avaliadas duas misturas asfálticas utilizadas em revestimentos aeroportuários, dosadas segundo o método Marshall e os parâmetros adotados pela Especificação Geral DIRENG 04.05.610/02, sendo elas: (i) Concreto Asfáltico (CA) enquadrado na Faixa 2 (CA2); (ii) CA enquadrado na Faixa 3 (CA3) da referida especificação. As duas misturas também variam quanto

ao método e ao Grau de Compactação (GC): A mistura asfáltica CA2 foi executada em campo e em laboratório, enquanto CA3 foi executada apenas em campo. A Figura 1 apresenta a granulometria e os parâmetros de dosagem encontrados para as misturas avaliadas.

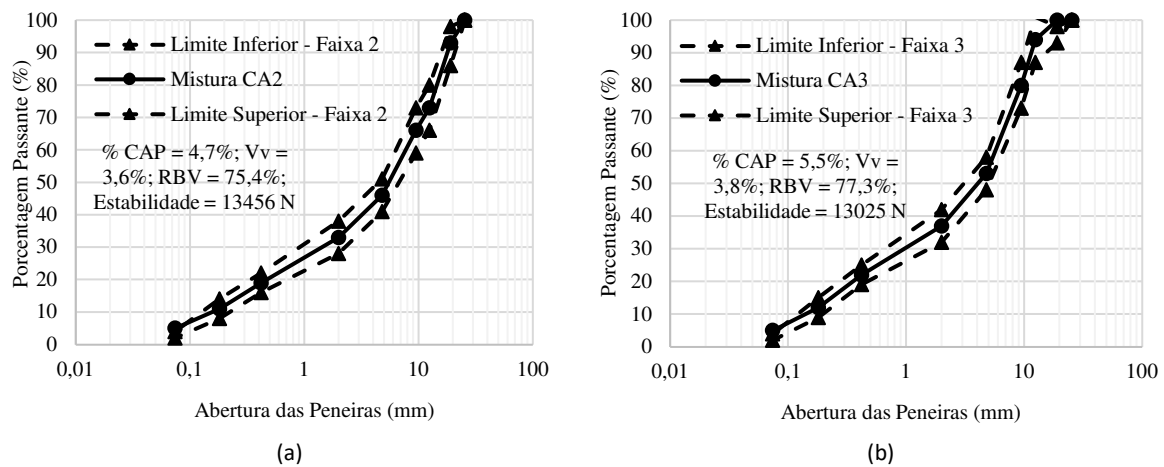


Figura 1. Curvas granulométricas e parâmetros de dosagem das misturas asfálticas CA2 (a) e CA3 (b)

2.4. Métodos de compactação

A mistura CA2 foi compactada em trechos monitorados em campo, na cidade de Maracanaú-CE, por diferentes métodos. Já a mistura CA3 foi executada em uma obra de um aeródromo particular, localizado na cidade do Eusébio-CE. As misturas foram produzidas em uma usina de produção contínua (*drum-mixer*), com tambor secador de contra fluxo e capacidade de produção nominal de massa asfáltica de 80 toneladas/hora. O procedimento de usinagem foi o mesmo para as duas misturas avaliadas, com a mistura final atingido 170°C, dada a temperatura imposta aos agregados durante a usinagem. Na compactação, a temperatura da massa asfáltica foi de 160°C. O processo foi realizado com os equipamentos vibroacabadora (modelo Leeboy 8510) e rolos de pneus (modelo Dynapac CP221) e duplo tandem (modelo Hamm HD75).

CA2 foi executada em 8 subtrechos de, aproximadamente, 20,0 × 3,0 × 0,05 m, enquanto CA3 foi executada em trecho único de 520,0 × 32,0 × 0,05 m. Em todos, a passagem dos rolos foi monitorada com a extração de CPs para verificação do GC. As soluções de compactação adotadas estão expostas na Tabela 1. A especificação DIRENG 04.05.610/02 transfere ao construtor a determinação da quantidade de passagens e dos tipos de rolos, características sujeitas a variações em virtude da temperatura, do tipo de mistura asfáltica, dos modelos e da velocidade de operação dos rolos utilizados. Além da compactação em campo, CA2 foi coletada após a usinagem e levada para avaliação em laboratório, para que fossem moldados CPs com o uso do CM e do CGS, com GC de 94,0% e 97,0%. Para atingi-los, a massa solta de CA2 foi compactada a 160°C, em 15 e 30 golpes por face com o CM, e em 10 e 30 giros com o CGS, respectivamente.

2.5. Avaliação de textura de misturas asfálticas a partir de ensaios convencionais

A caracterização convencional de textura compreendeu a realização dos ensaios de Mancha de Areia (ASTM E-965/01) e Pêndulo Britânico (ASTM E-303/98). No primeiro, determina-se a profundidade média (MTD) da macrotextura, a partir do preenchimento da superfície do pavimento por 2.500 mm³ ± 150 mm³ de areia limpa e seca, composta por grãos arredondados de

0,15 mm a 0,30 mm, espalhada em movimentos circulares por um disco. No segundo, avalia-se a resistência à derrapagem por meio de um pêndulo padronizado com base de borracha, lançado de uma altura específica sobre o revestimento molhado, que desliza e volta a subir até uma nova altura, inferior à inicial. O resultado é expresso no valor de BPN, lido diretamente no aparelho. Neste trabalho, macro e microtextura foram classificadas de acordo com os limites propostos no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006).

Tabela 1 – Soluções de compactação em campo adotadas

| Mistura Asfáltica | Subtrecho | Número de Passadas | | GC (%) | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|-------------|--------|--|
| | | Rolo de Pneus | Rolo Tandem | | |
| CA2 | | | | | |
|  <p>Vista Superior</p> | 1 | 8 | 4 | 97,3 | |
| | 2 | 8 | - | 96,1 | |
| | 3 | 4 | 2 | 95,1 | |
| | 4 | 4 | - | 96,0 | |
| | Execução (Vibroacabadora e Rolo de Pneus) | | | | |
| | 5 | - | 4 | 95,0 | |
| | Execução (Rolo Duplo Tandem) | | | | |
| | 7 | - | 2* | 90,0 | |
| 8 | - | 1* | 87,7 | | |
| CA3 | | | | | |
|  | Único | 8 | 4 | 96,8 | |

*Sem vibração do rolo tandem durante as passadas

2.6. Avaliação de textura de misturas asfálticas a partir do PDI

O AIMS2 realiza a análise conjunta de macro e microtextura de misturas asfálticas. A primeira ocorre por meio de leituras de distâncias entre a câmera e os CPs, moldados em laboratório ou extraídos de campo, e a segunda por meio da análise de *pixels* nas imagens capturadas. A primeira varredura de imagens é realizada com o máximo *zoom*, tendo várias medidas de altura realizadas ao longo de um eixo. Para tanto, o equipamento define o primeiro foco do microscópio sobre a bandeja iluminada como altura de referência do vertical. Para capturar as imagens, o microscópio é elevado até receber um sinal de alta frequência indicando que uma imagem de alta resolução em escala de cinza foi detectada. As diferenças de altura entre a localização do microscópio na altura zero e nas alturas das demais imagens do CP fornecem um perfil bidimensional de profundidade da superfície da mistura asfáltica (Rezaei *et al.*, 2011). Nas varreduras seguintes, o AIMS2 utiliza os *zooms* referentes à avaliação da textura superficial dos agregados retidos nas peneiras de aberturas 4,75, 9,5 e 19 mm. A avaliação da microtextura é baseada no método de *wavelets* (Masad, 2004), a partir da média e do desvio padrão dos valores de *pixels* das imagens analisadas.

Foram avaliados 24 CPs extraídos dos 8 subtrechos revestidos por CA2 e 3 do trecho revestido por CA3. Além deles, foram analisados ainda 4 CPs de CA2 compactados em laboratório por meio do CM e do CGS, com GC de 94 e 97%. Para cada CP, foi avaliada a média dos resultados obtidos para 4 eixos diferentes, dispostos a 45° um do outro. De acordo com a norma ASTM E-1845/09, o ensaio de Mancha de Areia gera o parâmetro *Mean Texture Depth* (MTD), uma aproximação da profundidade média de macrotextura. Entretanto, o parâmetro usualmente obtido da análise de perfis no AIMS2 é o *Mean Profile Depth* (MPD), calculado pela média de dois picos por eixo bidimensional analisado. Suprimida a inclinação do CP por meio de uma correção em torno de uma linha de tendência linear, é possível encontrar a altura de qualquer ponto analisado em relação ao CP nivelado, o que permite o cálculo do MPD. De acordo com a norma ASTM E-1845/09, é possível obter uma estimativa de MTD a partir de MPD ($MTD_{est} = 0,2 + 0,8 * MPD$).

2.7. Avaliação da estrutura interna de misturas asfálticas a partir do PDI

A avaliação de parâmetros do esqueleto mineral foi realizada a partir do *software* iPas2 (Sefidmazgi, 2011; Coenen, Kutay e Bahia, 2012), que permite obter parâmetros como: (i) número e comprimento dos contatos entre agregados e (ii) orientação de agregados e contatos em misturas asfálticas, além das segregações radial e vertical, nas quais é avaliada a quantidade de agregados por tamanho de partículas em regiões diferentes. Para tanto, amostras dos 7 trechos de CA2 com maior GC foram serradas verticalmente, escaneadas e submetidas à análise do *software*, sendo observadas as relações dos parâmetros fornecidos com a compactação e a textura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades de forma dos agregados

Os resultados de propriedades de forma dos agregados, obtidos a partir do AIMS2, são expostos na Tabela 2, na qual foram classificados segundo os sistemas propostos por Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018). Eventuais diferenças na classificação de um mesmo agregado segundo os dois sistemas são explicadas em função dos diferentes limites de classes, definidos a partir da *clusterização* de dados oriundos de agregados que compõem um banco de dados nacional, sujeitos à variabilidade da mineralogia e do processo de beneficiamento em cada país.

Tabela 2 – Média e classificação das propriedades de forma dos agregados

| Propriedade | Parâmetro/Sistema de Classificação | TMN do agregado | | | |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | | 1" | 3/4" | 1/2" | Pó de Pedra |
| Forma 2D | Média | - | - | 8,10 | 8,29 |
| | Desvio padrão | - | - | 2,10 | 2,01 |
| | CV (%) | - | - | 25,93 | 24,25 |
| | AI Rousan (2004) | - | - | <i>Semialongado</i> | <i>Semialongado</i> |
| | Ibiapina (2018) | - | - | <i>Semicircular</i> | <i>Semicircular</i> |
| Esfericidade | Média | 0,69 | 0,68 | 0,69 | 0,62 |
| | Desvio padrão | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,09 |
| | CV (%) | 15,75 | 14,31 | 12,92 | 15,11 |
| | AI Rousan (2004) | Baixa esfericidade | Baixa esfericidade | Baixa esfericidade | Baixa esfericidade |
| | Ibiapina (2018) | Baixa esfericidade | Baixa esfericidade | Baixa esfericidade | Baixa esfericidade |
| Angularidade | Média | 2.768,90 | 2.883,70 | 3.279,30 | 3.739,80 |
| | Desvio padrão | 656,20 | 634,20 | 787 | 1.151,50 |
| | CV (%) | 23,70 | 21,99 | 24 | 30,79 |
| | AI Rousan (2004) | Subarredondado | Subarredondado | Subarredondado | Subarredondado |
| | Ibiapina (2018) | Subarredondado | Subarredondado | Subarredondado | Subarredondado |
| Textura Superficial | Média | 287,80 | 197,30 | 215,20 | 185,50 |
| | Desvio padrão | 153,38 | 113,90 | 136,10 | 111 |
| | CV (%) | 53,29 | 57,73 | 63,24 | 59,84 |
| | AI Rousan (2004) | <i>Baixa rugosidade</i> | <i>Macio</i> | <i>Macio</i> | <i>Macio</i> |
| | Ibiapina (2018) | <i>Macio</i> | <i>Polido</i> | <i>Polido</i> | <i>Polido</i> |

*Nenhum dos agregados apresentou mais que 10% das partículas com lamelaridade superior a 5:1 (comprimento: espessura).

Destacam-se dos resultados expostos na Tabela 2: (i) a tendência de aumento da angularidade com a redução do TMN, explicada pelo fato de partículas menores passarem por mais etapas de britagem, elevando o número de faces fraturadas (Diógenes *et al.*, 2016); (ii) os parâmetros angularidade e textura superficial apresentaram os maiores valores de CV, o que decorre, para angularidade, do fato de esta ser a única característica avaliada para agregados graúdos e miúdos, e, para textura, de mudanças na superfície de diferentes frações em função da britagem (Bessa, 2012).

A análise inicial dos agregados permite previsões acerca da textura e das características do esqueleto mineral das misturas CA2 e CA3: (i) mantidos os mesmos processos de compactação, espera-se que CA3 apresente menor macrotextura, por apresentar 43% de material retido entre as peneiras de 9,50 e 2,36 mm, enquanto CA2 apresentou 33%, e, segundo Hall *et al.* (2009), à medida que tal proporção aumenta, menor é a macrotextura e (ii) dados os resultados de textura superficial dos agregados (polidos/macios/de baixa rugosidade), esperam-se resultados relativos a uma microtextura reduzida em CA2 e CA3.

Quanto a parâmetros do esqueleto mineral, espera-se que CA3 apresente um maior número de pontos de contato, assim como uma elevação da macrotextura (Hall *et al.*, 2009), visto que esta mistura apresenta uma maior porcentagem de Pó de Pedra (50% *versus* 44%) e Brita 1/2" (32% *versus* 26%), resultando-se em uma angularidade da matriz pétreia ligeiramente maior que a de CA2. Entretanto, o estudo conduzido por Ibiapina *et al.* (2018) sugere cautela quanto a impactos intuitivos a partir da configuração da matriz pétreia, uma vez que diversos outros parâmetros variam entre CA2 e CA3, como %CAP e Vv.

3.2. Textura das misturas asfálticas a partir de ensaios tradicionais

Para cada subtrecho experimental, foram avaliados três pontos nos quais foram feitos ensaios tradicionais e retirados CPs para avaliação de macro e microtextura no AIMS2. Os resultados obtidos (média) para MA e PB são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios tradicionais

| Mistura Asfáltica | Subtrecho | Número de Passadas | | GC (%) | MA - MTD (mm) | Classificação Macrotextura | PB - BPN | Classificação Microtextura |
|-------------------|-----------|--------------------|-------------|--------|---------------|----------------------------|----------|----------------------------|
| | | Rolo de Pneus | Rolo Tandem | | | | | |
| CA2 | 1 | 8 | 4 | 97,3 | 0,35 | Fina | 68 | Rugosa |
| | 2 | 8 | - | 96,1 | 0,84 | Medianamente Grossa | 73 | Rugosa |
| | 3 | 4 | 2 | 95,1 | 0,38 | Fina | 76 | Muito Rugosa |
| | 4 | 4 | - | 96,0 | 0,90 | Medianamente Grossa | 79 | Muito Rugosa |
| | 5 | - | 4 | 95,0 | 0,35 | Fina | 85 | Muito Rugosa |
| | 6 | - | 2 | 92,4 | 0,48 | Medianamente Fina | 76 | Muito Rugosa |
| | 7 | - | 2* | 90,0 | 0,45 | Medianamente Fina | 84 | Muito Rugosa |
| | 8 | - | 1* | 87,7 | 0,47 | Medianamente Fina | 77 | Muito Rugosa |
| CA3 | 1 | 8 | 4 | 97,3 | 0,35 | Fina | 70 | Rugosa |
| | 2 | 8 | 4 | 97,0 | 0,37 | Fina | 73 | Rugosa |
| | 3 | 8 | 4 | 97,4 | 0,39 | Fina | 70 | Rugosa |

*Sem vibração do rolo tandem durante as passadas

Do ensaio de MA (MTD), foi possível verificar que a macrotextura de todos os subtrechos avaliados foi classificada como Fina ou Medianamente Fina, com exceção dos subtrechos 2 e 4 da mistura CA2, onde não se utilizaram rolos tandem, os quais apresentaram macrotextura Medianamente Grossa. Estes foram os únicos subtrechos que se aproximaram da recomendação IAC 4302/01, que sugere um MTD mínimo de 1,0 mm para revestimentos asfálticos novos. Também apenas os subtrechos mencionados cumpriram o requisito da Resolução 236 (ANAC, 2012), que exige um valor de MTD superior a 0,60 mm.

A utilização do rolo tandem provoca uma redução na macrotextura porque o equipamento aplica uma carga contínua e linearmente uniforme em toda extensão dos cilindros sobre o revestimento, diminuindo possíveis irregularidades deixadas pelo rolo de pneus e acomodando as partículas. A utilização do mesmo método de compactação pode gerar valores próximos de macrotextura, mesmo que as misturas asfálticas possuam distribuições granulométricas diferentes, bem como diferenças nas propriedades de forma da matriz pétreia, como é o caso do subtrecho 1 da mistura CA2 e dos trechos construídos com a mistura CA3, cujos métodos de compactação foram iguais. Nesse caso, o valor médio de MTD dos trechos da mistura CA3 foi 7% superior ao do subtrecho 1 de CA2, entretanto, realizando-se um teste de hipóteses com 95% de confiança, não foram encontrados indícios suficientes para a rejeição da hipótese de igualdade entre as médias de MTD desses dois trechos, corroborando com a ideia de que o mesmo método de compactação (número de passadas e tipos de rolos) pode gerar macrotexturas iguais para granulometrias e propriedades de forma da matriz pétreia diferentes.

Quanto ao GC, os trechos 6, 7 e 8 (CA2) foram os que mais se afastaram da recomendação normativa ($GC > 96,3\%$), sugerindo-se que a ausência de compactação por rolo de pneus, o reduzido número de passadas e a não vibração do rolo tandem podem comprometer tal característica. Os resultados encontrados para os trechos 6 e 7 (CA2) permitem afirmar que a vibração do rolo tandem é importante para que um maior GC seja obtido, porém não promoveu alteração relevante na textura de CA2. As relações de GC com os parâmetros dos ensaios de MA e PB são expostas na Figura 2, divididas por: (i) conjunto de todos os trechos (independente dos equipamentos utilizados) e (ii) apenas os trechos finalizados com o mesmo tipo de rolo (tandem).

Baseando-se na classificação subjetiva proposta por Witczak *et al.* (2002), há uma boa correlação ($R^2 = 0,72$) entre GC e MTD quando o trecho é finalizado com o mesmo tipo de rolo

(tandem). Desconsiderando-se o fator “tipo de rolo”, a correlação entre GC e MTD é muito fraca. Já a correlação entre GC e BPN é fraca e independente do tipo de rolo utilizado na finalização da camada (R^2 entre 0,3 e 0,4 nos dois conjuntos de dados). As correlações obtidas corroboram em parte com o defendido por Hall *et al.* (2009): a macrotextura é mais influenciada por granulometria e propriedades volumétricas das misturas, enquanto a microtextura é mais ligada à textura dos agregados, justificando-se a proximidade dos valores de R^2 entre GC e BPN nos dois conjuntos de dados, dada a similaridade da textura da matriz pétreo, apesar dos diferentes métodos de compactação. Cabe, entretanto, estabelecer a ressalva de que a correlação de macrotextura com as propriedades volumétricas só é satisfatória quando o método de finalização da camada ocorre a partir da utilização do mesmo tipo de rolo compactador e que a aplicação de um mesmo método de compactação (GC, número de passadas e tipos de rolos) pode aproximar a macrotextura de misturas diferentes em granulometria, propriedades volumétricas e propriedades de forma da matriz pétreo.

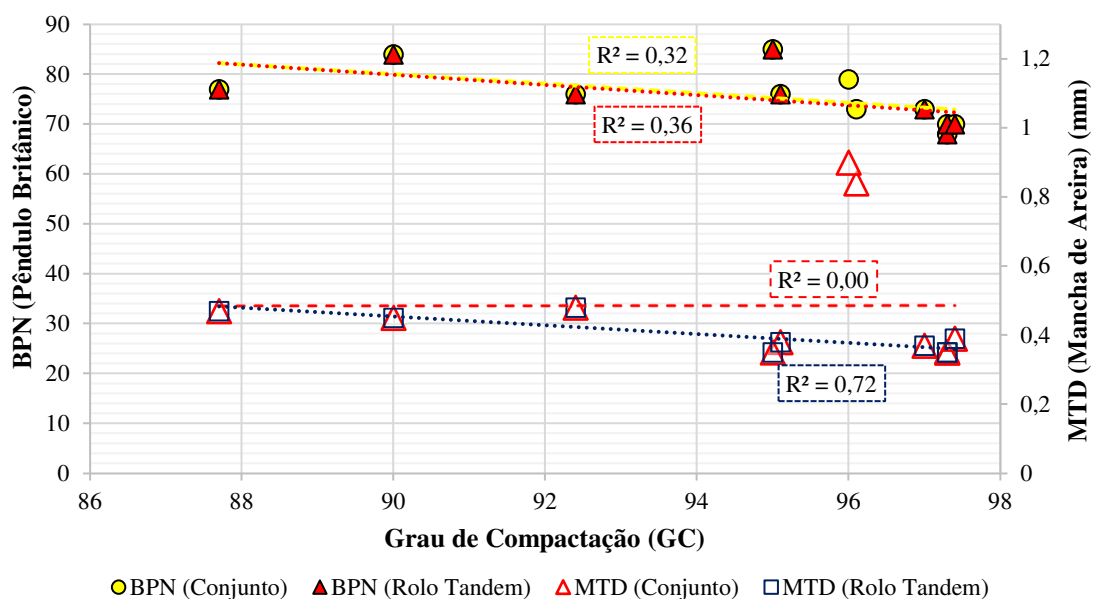


Figura 2. Relações entre GC, MTD e BPN

Quanto à microtextura, todos os trechos cumpriram o requisito de $BPN > 45$. Cabe ressaltar, entretanto, que existe uma variabilidade dos resultados do ensaio de PB, em função do operador, da calibração do equipamento e da perda de contato entre a borracha e a superfície avaliada, no caso de elevadas macrotexturas, por exemplo. Além disso, percebe-se que existe um descompasso entre os resultados de textura dos agregados por meio do AIMS2 (polidos/macios/de baixa rugosidade) e de microtextura por meio do PB (rugosas/muito rugosas), facilmente explicado pelo fato de que o primeiro representa uma classificação estatística baseada em um banco de dados nacional, enquanto o segundo representa um parâmetro físico relativo à energia dissipada na fricção borracha-superfície.

3.3. Textura das misturas asfálticas a partir do Processamento Digital de Imagens (PDI)

Para o primeiro CP extraído de cada trecho analisado, foram realizadas análises de textura por meio do AIMS2 variando-se o parâmetro de distância entre leituras no *zoom* máximo.

Assim, foi possível verificar que a correlação entre os valores de MTDest e MTD (obtida no ensaio de MA) obtida quando a distância adotada foi de 0,30 mm ($R^2 = 0,71$) foi maior que as relativas às distâncias de 0,45 mm ($R^2 = 0,62$) ou de 0,60 mm ($R^2 = 0,64$). Os resultados de microtextura, por sua vez, não sofreram variações, dado que a análise de microtextura no AIMS2 é realizada por meio de imagens coletadas apenas nas três últimas varreduras.

Estabelecendo-se um espaçamento entre leituras de 0,30 mm no zoom máximo, obtiveram-se os valores médios de MTDest (mm) expostos na Figura 3. Observou-se que apenas os subtrechos 2 e 4 (CA2), sem utilização dos rolos tandem, apresentaram MTDest médio acima do mínimo de 1,00 mm proposto na IAC 4302/01, apesar de que, a partir de testes de hipóteses (*T-Student*) para 95% de confiança, rejeita-se a hipótese, para todos os subtrechos de CA2, de que a média populacional do parâmetro MTDest seja maior ou igual a 1,00 mm. Por outro lado, há indícios suficientes para a não rejeição da hipótese de que todas as amostras dos subtrechos CA2 sejam oriundas de uma população cuja média de MTDest seja superior a 0,60 mm, cumprindo-se, assim, o requisito da Resolução 236 (ANAC, 2012). Para a mistura CA3, rejeitam-se ambas as hipóteses de média populacional superior a 0,60 e 1,00 mm.

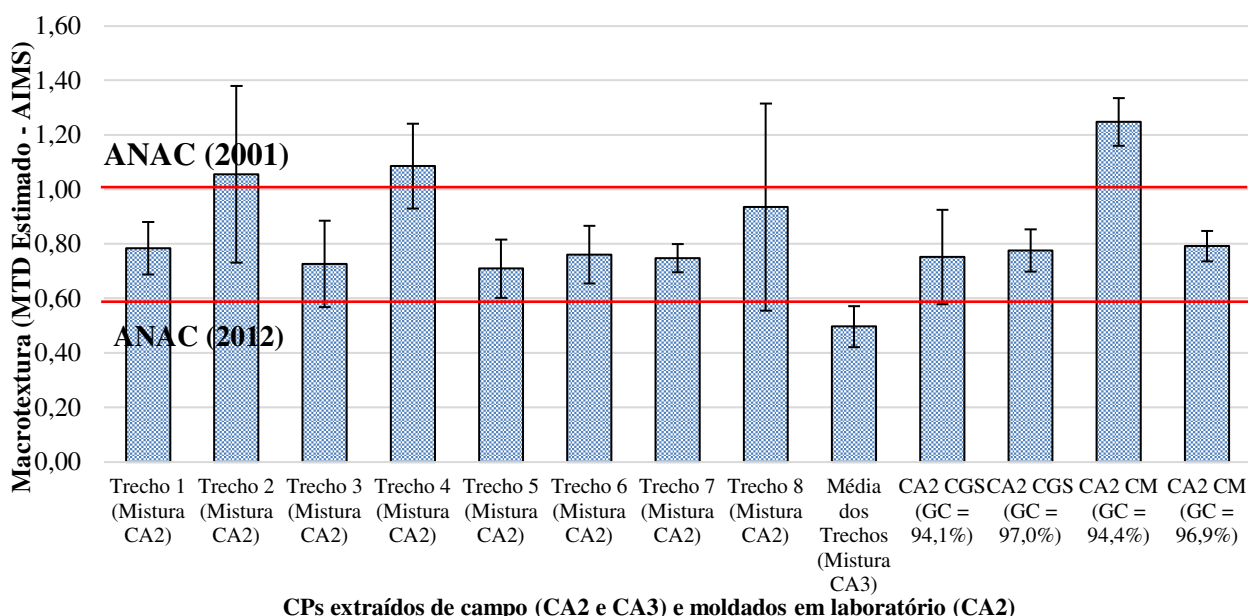


Figura 3. Macrotextura (misturas CA2 e CA3) obtida a partir do AIMS2

As diferenças na magnitude dos valores de MTDest (AIMS2) e MTD (MA) incorrem de fatores como as limitações do ensaio de MA em virtude do empirismo, do fato de que MTDest é apenas uma estimativa baseada numa equação proposta na norma ASTM E-1845/09 e da avaliação pelo AIMS2 de um perfil por vez, com MTDest calculado a partir dos picos da macrotextura, o que tende a elevar tal magnitude. Ainda assim, existe uma boa correlação AMIS2 *versus* MA ($R^2 > 0,71$ para espaçamento de 0,3 mm entre leituras) e o PDI permite uma avaliação conjunta com a microtextura, podendo-se aproveitar os CPs que necessitam ser extraídos durante o processo de construção. Além desses pontos positivos, o AIMS2 permite a reconstrução de perfis com maior detalhe e outros parâmetros podem ser obtidos a partir deles.

Comparando-se os valores obtidos de amostras da mistura CA2 compactadas em laboratório e em campo, também expostos na Figura 3, é possível perceber que os CPs compactados pelo

CGS geraram valores de MTDest da ordem de 0,7 mm, similarmente ao que ocorreu para os trechos que foram finalizados com o uso de rolo tandem. Já para os CPs compactados com o uso do CM, quando o GC foi inferior (94,4%), os valores de MPD e MTDest foram superiores a 1,0 mm, similares aos trechos onde não foi usado o rolo tandem (trechos 2 e 4), porém, com o aumento do GC (96,9%), os resultados se aproximaram daqueles obtidos para os trechos onde houve compactação finalizada com o uso do rolo tandem.

As correlações entre Microtextura (AIMS e PB) são classificadas como muito fracas. Entretanto, ao se comparar apenas os valores obtidos para os trechos de CA2 executados com $GC > 95\%$, obteve-se correlação razoável (Witczak *et al.*, 2002). Para ambas as misturas, a classificação final de microtextura é contemplada dentro dos limites de 1 desvio padrão em relação à média da textura superficial da matriz pétreo, como mostra a Figura 4, corroborando com o defendido por Hall *et al.* (2009). Salienta-se que a maior %CAP presente na mistura CA3 contribui para que as faces dos agregados sejam menos expostas na superfície, explicando-se, assim, o motivo pelo qual para tal mistura existe uma maior diferença entre as médias de textura relativas à matriz pétreo e à mistura asfáltica. Além disso, conforme anteriormente discutido, a classificação das misturas dentro dos limites polido-macio é um fenômeno estatístico oriundo de uma *clusterização* de um banco de dados nacional de agregados, portanto não faz referência direta ao fenômeno físico, podendo tais misturas apresentarem um satisfatório valor de resistência quanto à fricção.

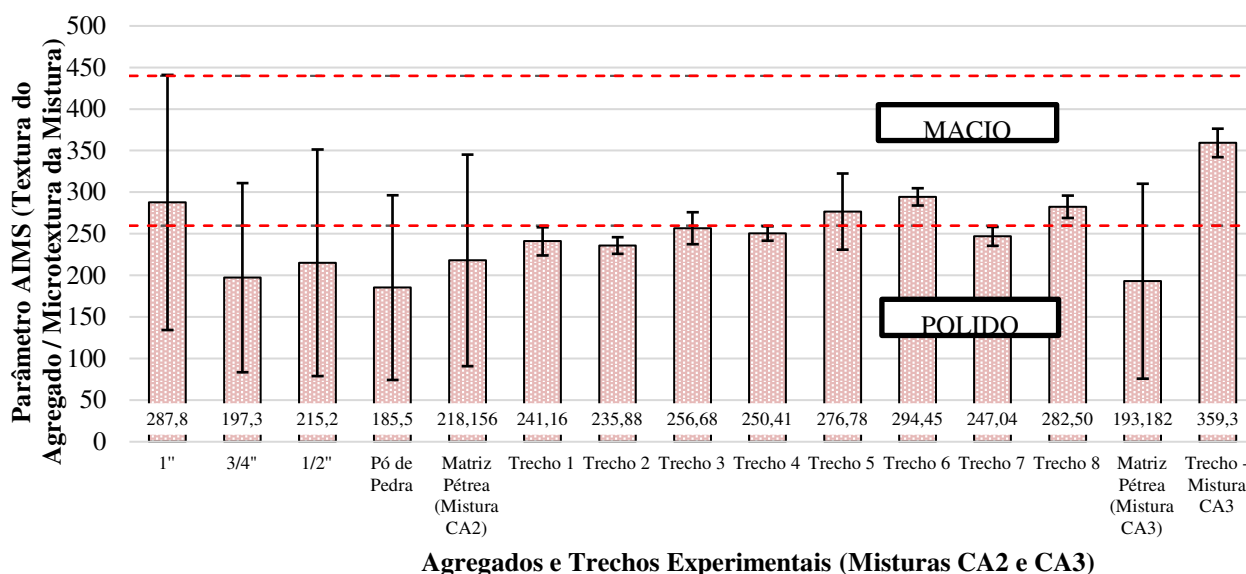


Figura 4. Textura superficial (agregados/matriz pétreo) e microtextura (misturas CA2 e CA3) obtidas a partir do AIMS2

Para todos os CPs compactados em laboratório (mistura CA2), constatou-se que a microtextura avaliada pelo AIMS não variou consideravelmente (entre 616 e 656) com os diferentes graus e tipos de compactação (impacto – CM e amassamento - CGS). Entretanto, tais valores se distanciaram dos referentes aos agregados/matriz pétreo e às misturas compactadas em campo. Dessa forma, acredita-se que os processos de compactação pelo CM e CGS podem gerar especificidades nas superfícies na escala da microtextura diferentes daquelas geradas pela compactação de campo, sendo assim captadas com maior sensibilidade pelo processamento das imagens a partir do AIMS2. Assim, acredita-se que a previsão da microtextura em campo se

aproxima mais da textura superficial dos agregados/matriz p etra do que da superfície gerada em misturas compactadas por equipamentos de compacta o de laboratório como o CM e o CGS.

3.4. Estrutura Interna

A análise dos resultados obtidos a partir do uso do iPas2 apresentados na Figura 5 foi baseada na classifica o subjetiva de correla es utilizada por Witczak *et al.* (2002), segundo a qual existe correla o ruim do GC com o número de contatos ($R^2 = 0,36$) e razoável com o comprimento dos contatos ($R^2 = 0,45$). Quando apenas as misturas finalizadas com a passagem do rolo tandem foram avaliadas, as correla es obtidas entre GC e o número de contatos ($R^2 = 0,75$) e entre GC e o comprimento dos contatos ($R^2 = 0,58$) foram maiores, classificadas como boa e razoável, respectivamente. Assim, observa-se que existe uma tendência similar de crescimento dos parâmetros de contato com o aumento do GC. Pode-se afirmar também que, quanto mais próximo o método de compacta o empregado, mais visível   a influência do GC no intertravamento e na acomoda o dos agregados, o que se reflete em seu comportamento mecânico quanto   resistência   deforma o permanente, por exemplo. Já as baixas m dias e os elevados CV de orienta o dos agregados e dos contatos demonstram o caráter aleatório da distribui o dos mesmos no sentido vertical do CP, independentemente do GC ou dos tipos de rolos utilizados.

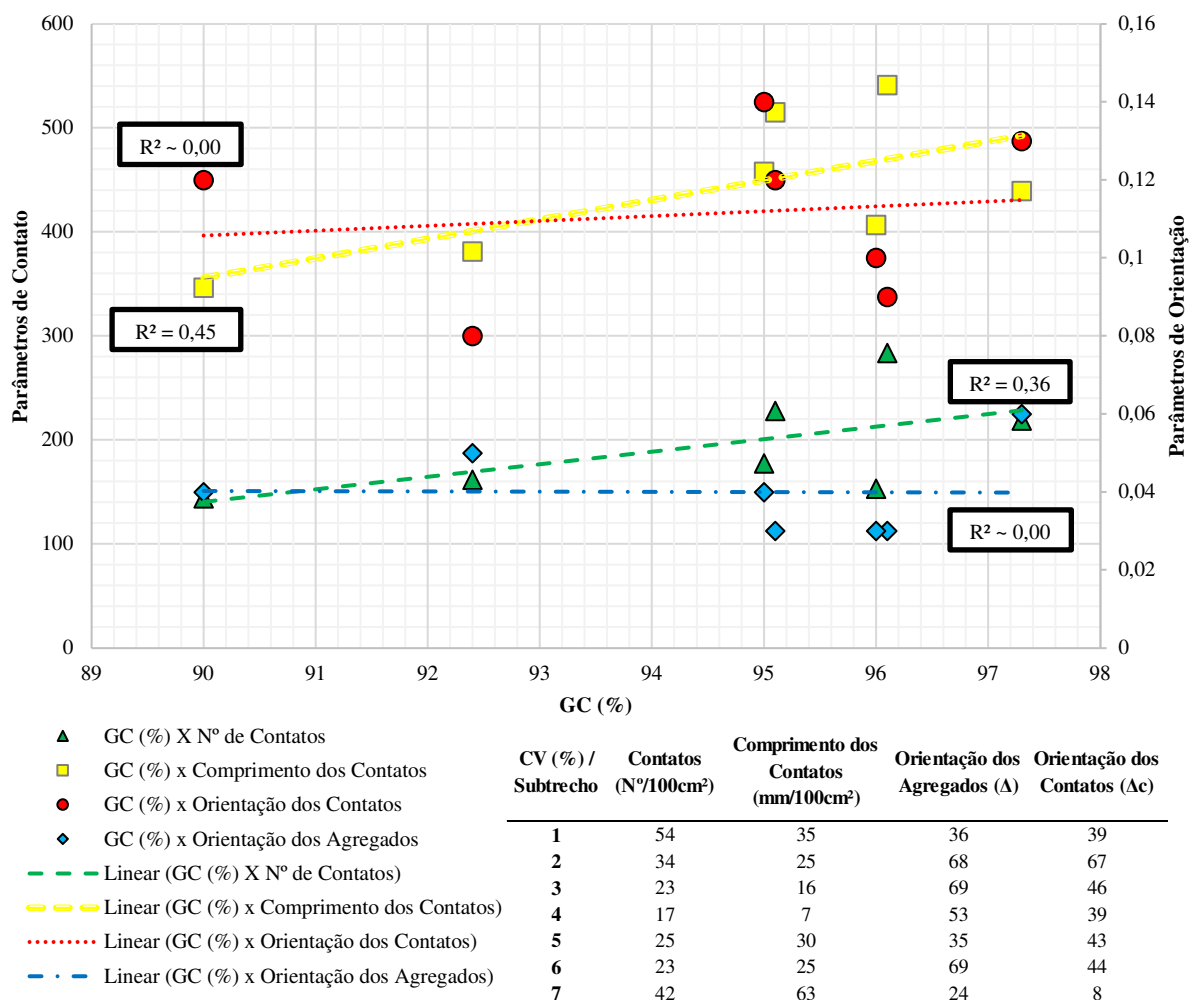


Figura 5. Correla es entre GC e parâmetros do esqueleto mineral (subtrechos de CA2)

As correlações entre parâmetros do esqueleto mineral e macro/microtextura variaram em termos de qualidade do valor de R^2 , sendo observado: (i) Razoável aumento da macrotextura (MA) com a redução do número e do comprimento de contatos em pistas finalizadas com o rolo tandem ($R^2 = 0,49$ e $0,54$ respectivamente); (ii) Boa correlação ($R^2 = 0,74$) entre aumento da macrotextura (MA) e aumento da aleatoriedade de contatos em pistas finalizadas com rolo tandem, sendo tal correlação razoável ($R^2 = 0,41$) quando considerados todos os processos de compactação (os resultados de macrotextura oriundos do AIMS apresentaram a mesma tendência, porém com correlações mais fracas, R^2 máximo de $0,29$); (iii) Razoável relação de crescimento de microtextura (PB) com redução do número de contatos (R^2 varia de $0,40$ a $0,45$, sendo o maior valor referente às pistas finalizadas com rolo tandem). Não foram observadas relações conclusivas quanto à relação entre orientação dos contatos e dos agregados e os resultados de microtextura (PB e AIMS), bem como com relação à orientação dos agregados e macrotextura.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, foram relacionadas características de forma dos agregados, compactação, parâmetros do esqueleto mineral, macro e microtextura de misturas asfálticas em pavimentos aeroportuários. Quanto ao método aplicado, destacam-se a utilização do PDI, por meio do AIMS2, e a obtenção de dados de campo e laboratório. Dentre os principais resultados, estão:

- Desde que apresentem uma mesma origem mineralógica, a utilização de agregados de maior TMN representa um aumento de textura superficial da matriz pétreia (relacionada à microtextura). Além disso, agregados classificados, segundo o AIMS2, como polidos, macios ou de baixa rugosidade podem originar misturas com satisfatória capacidade de resistência à derrapagem, indicando que existem diferenças sensíveis entre sistemas de classificação baseados em estatística e em respostas físicas de ensaios.
- Misturas asfálticas aeroportuárias diferentes em granulometria e dosagem apresentam macrotextura semelhante quando finalizadas pelo mesmo tipo de rolo compactador e misturas iguais apresentam macrotextura diferente quando finalizadas por rolos compactadores diferentes (a finalização com rolo tandem leva à redução da macrotextura). Por outro lado, o tipo de rolo não provoca alterações significativas na microtextura, avaliada segundo o PB e o AIMS2.
- A utilização do rolo tandem é importante para que sejam retirados possíveis defeitos deixados pela vibrocabadora ou pelo rolo de pneus, acomodando os agregados no pavimento. Partículas expostas podem ser pontos de fragilidade, causando desagregação no revestimento e diminuindo sua vida útil. Da mesma forma, a não utilização de rolos de pneus, a reduzida quantidade de passadas e a ausência de vibração do rolo tandem podem comprometer o atingimento de GC próximo ou superior a 96%. A vibração do rolo tandem, porém, não apresentou ligação com a textura da mistura asfáltica.
- Quando avaliadas misturas finalizadas com rolo tandem, há boa correlação ($R^2=0,72$) entre aumento da macrotextura e queda do GC. Assim, em casos de escassez de agregados ou dificuldade para atingir os parâmetros de macrotextura, a diminuição do GC surge como alternativa, desde que atendidos parâmetros volumétricos e mecânicos exigidos.
- É válido o uso do PDI para a avaliação de textura de misturas asfálticas aeroportuárias, apresentando uma boa correlação ($R^2=0,71$) com os resultados de MA, de caráter empírico. Além disso, o AIMS2 fornece uma reconstrução de perfis, que podem ser analisados

de forma mais aprofundada. Em termos da compactação em campo, o AIMS2 apresenta uma análise de microtextura que corrobora com sua relação com a textura dos agregados. Neste caso, existe a limitação da falta de correspondência objetiva entre classificações estatísticas e respostas físicas do material, porém com potencial para suplantar variabilidades da execução de ensaios como o PB.

- Na fase de projeto, misturas aeroportuárias compactadas pelo CGS e pelo CM (GC=97%) podem apresentar macrotextura semelhante à de misturas finalizadas com o rolo tandem, enquanto as misturas compactadas com o CM com menor GC (94%) apresentam macrotextura da magnitude de misturas nas quais não ocorre finalização por rolo tandem. Pode-se prever melhor a microtextura de campo a partir da textura dos agregados avaliados isoladamente, em comparação com CPs compactados em laboratório e avaliados no AIMS2.
- Para métodos de compactação semelhantes, parâmetros de intertravamento do esqueleto mineral crescem com o aumento do GC. Entretanto, quanto à orientação de agregados e contatos, atingiu-se um caráter aleatório dos mesmos, independentemente do método e grau de compactação. Quanto à textura, observaram-se tendências de aumento da macrotextura com o aumento da aleatoriedade e a redução do número e comprimento de contatos.

Sugere-se como estudos futuros avaliar a correlação entre resultados de textura a partir de novas técnicas de PDI, como a modelagem tridimensional, com os resultados de ensaios de atrito realizados com equipamentos de caráter menos empíricos, além de incorporar análises mecânicas à avaliação da modificação da volumetria das misturas asfálticas para fins de elevação da macrotextura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq, pelo suporte financeiro, bem como à Insttale Engenharia LTDA, pela construção dos trechos experimentais avaliados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANAC (2001) Instrução de Aviação Civil (IAC) 4302 (Requisitos de Resistência à Derrapagem para Pistas de Pouso e Decolagem), Portaria DAC nº 896/DGAC, 28/05/2001, Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.
- ANAC (2012) Resolução Nº 236 (Requisitos de Aderência para Pistas de Pouso e Decolagem), Diário Oficial da União Nº 111, 11/06/2012, S.1, P. 6-8, Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.
- Al Rousan, T. M. (2004) *Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System*. Tese (doutorado), Texas A&M University, College Station-TX, EUA.
- Bessa, I. S.; V. T. F. Castelo Branco e J. B. Soares (2011) Avaliação do Processo de Produção de Agregados por Meio da Utilização Processamento Digital de Imagens. *Anais do XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*, Belo Horizonte, MG.
- Bessa, I. S. (2012) *Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE.
- Coenen, A.; M. E. Kutay e H. U. Bahia (2012) Aggregate Structure Characterization of Asphalt Mixtures Using 2-Dimensional Image Analysis. *Road Materials and Pavement Design*, 13(3): 433-454. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.711923>
- DNIT (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*, 2ª Edição, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- Diógenes, L. M. (2015) *Avaliação da Influência da Britagem nas Propriedades de Forma dos Agregados por Meio do Processamento Digital de Imagens*. Monografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Diógenes, L. M.; I. S. Bessa e V. T. F. Castelo Branco (2016) Análise das Alterações das Propriedades de Forma de Agregados ao longo do Processo de Britagem. *Anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*, Rio de Janeiro, RJ.
- Diógenes, L. M. (2018) *Avaliação das Relações entre Propriedades de Agregados Minerais com base nas Características do Processo de Britagem e da Rocha de Origem*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- DIRENG (2002) *Especificação Geral para Obras de Infra-Estrutura Aeroportuária 04.05.610 – Concreto Betuminoso Usinado a Quente*. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica, Brasília, DF.

- Hall, J. W.; K. L. Smith; L. Titus-Glover; J. C. Wambold; T. J. Tager e Z. Rado (2009) Final Report for NCHRP Project 01-43: Guide for Pavement Friction. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington-DC, EUA.
- Ibiapina, D. S. (2018) *Proposição de um Sistema de Classificação das Propriedades de Forma de agregados caracterizados com o uso do Processamento Digital de Imagens para a seleção de materiais brasileiros*. Tese (doutorado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Ibiapina, D. S.; V. T. F. Castelo Branco e L. M. G. Oliveira (2018) Avaliação do Impacto da Mudança das Propriedades de Forma de Agregados na Formação do Esqueleto Mineral de Misturas Asfálticas. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*, Gramado, RS.
- Mahmoud, E. M. (2005) *Development of Experimental Methods for the Evaluation of Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage*. Dissertação (mestrado), Texas A&M University, College Station-TX, EUA.
- Masad, E. A.; B. Muhunthan; N. Shashidhar e T. Harman (1999) Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 13(2): 88-95. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1999\)13:2\(88\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1999)13:2(88))
- Masad, E. A. (2005) Report No. FHWA/TX-05/5-1707-01-1: Aggregate Imaging Measurement System (AIMS): Basics and Applications. Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station-TX, EUA.
- Rezaei, A.; D. Hoyt e A. E. Martin (2011) Simple Laboratory Method for Measuring Pavement Macrottexture. *Transportation Research Record*, 2227: 146-152. DOI: <https://doi.org/10.3141/2227-16>
- Ribas, C. R. (2016) *Avaliação da Influência do Método de Compactação na Macroestrutura de Misturas Asfálticas Densas Utilizando o Processamento Digital de Imagens*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Sefidmazgi, N. R. (2011) *Defining Effective Aggregate Skeleton in Asphalt Mixture Using Digital Imaging*. Dissertação (mestrado), University of Wisconsin – Madison, Madison-WI, EUA.
- Witczak, M. W.; K. Kaloush; T. Pellinen; M. El-Basyouny e H. Von Quintus (2002) NCHRP – Report 465: Simple performance test for Superpave Mix Design. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington-DC, EUA.