

CONSIDERAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL AVALIADA A PARTIR DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS (PDI) NA SELEÇÃO DE AGREGADOS MINERAIS PARA USO EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Renan Santos Maia

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

O uso do *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), baseado no Processamento Digital de Imagens (PDI), oferece a possibilidade de se avaliar a textura superficial de agregados e a microtextura de misturas asfálticas. Existe, entretanto, um descompasso entre a forma de classificação dessas propriedades e o fenômeno físico do atrito pneu-pavimento. Este trabalho busca associar tais propriedades e indicar como se considerar a textura superficial para uma seleção de agregados com foco na segurança viária. Avaliou-se a textura de pistas aeroportuárias de escala real e dos agregados empregados, a partir de ensaios tradicionais e de duas técnicas de PDI: AIMS e modelagem tridimensional, sendo esta associada a modelos de previsão de atrito. Observou-se uma significância estatística da microtextura do agregado mineral no atrito desenvolvido na superfície, sugerindo-se uma matriz de texturas superficiais mínimas para a matriz pétreia de agregados minerais, de forma a atender limites propostos de rugosidade do revestimento asfáltico.

ABSTRACT

The use of the *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), based on Digital Image Processing (DIP), offers the possibility to evaluate the surface texture of aggregates and the microtexture of asphalt mixtures. There is, however, an incompatibility between the classification of these properties and the physical phenomenon of tire-pavement friction. This work seeks to associate such properties and indicate how to consider the surface texture for selecting aggregates with focus on road safety. It was evaluated the texture of real-scale airport runways and the aggregates used, based on traditional tests and two DIP techniques: AIMS and three-dimensional modeling, which is associated with models of friction prediction. It was observed a statistical significance of the mineral aggregates' microtexture in the friction developed in the surface, thus it was suggested a table of minimum surface textures for the mineral aggregates' matrix, in order to meet proposed limits of roughness of the asphalt mixture.

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A segurança, tanto em operações de pouso e decolagem de aeronaves, quanto na frenagem de veículos rodoviários, depende da aderência na interface pneu-pavimento. Visando a garantir que os revestimentos executados apresentem condições aceitáveis de segurança, diversas normas brasileiras tratam de parâmetros de textura e atrito. 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 de Areia (MA) entre 0,6 e 1,2 mm, obtidos dos ensaios de Pêndulo Britânico (PB) e de 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 esse valor não deverá ser inferior a 0,60 mm. A mesma resolução apresenta uma série de limites aceitáveis para Coeficientes de Atrito (μ) obtidos a partir de diferentes equipamentos, como o *Grip Tester*, exigindo-se μ mínimo de 0,43 para ensaios realizados a 65 km/h.

Cumprir requisitos de textura e atrito em campo é uma atividade complexa, uma vez que são incipientes os meios de previsão de tais propriedades durante a fase de projeto de misturas asfálticas, em laboratório. Tais propriedades são impactadas por fatores relacionados à seleção de materiais, como distribuição granulométrica e propriedades de forma (forma, angularidade e textura) de agregados, bem como por fatores relacionados à construção em campo, como o

grau e os equipamentos utilizados para compactação. A microtextura dos revestimentos asfálticos está diretamente relacionada à resistência dos agregados ao polimento (Hall *et al.*, 2009) e à textura superficial da matriz pétreo, sendo a classificação final de microtextura da mistura asfáltica contemplada dentro dos limites de 1 desvio padrão em relação à média da textura superficial da matriz pétreo, avaliada segundo o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) (Araujo *et al.*, 2019). Já na fase construtiva, há dificuldades em compatibilizar os fatores de compactação e textura, dada a correlação ($R^2 = 0,72$) entre queda na macrotextura e o aumento do Grau de Compactação (GC), em misturas aeroportuárias brasileiras de mesma granulometria (Faixa II – DIRENG) executadas a partir de processos de compactação semelhantes (Araujo *et al.*, 2019).

Ensaio convencionais para análise de propriedades de forma de agregados ou de textura de misturas asfálticas utilizam equipamentos simples, porém podem demandar tempo elevado e, em muitos casos, determinam índices baseados em médias, desconsiderando a distribuição cumulativa de propriedades (Masad, 2005). Técnicas mais avançadas, como o Processamento Digital de Imagens (PDI), utilizam câmeras ou *scanners* para capturar imagens, além de pacotes computacionais que realizam o tratamento estatístico de dados, como é o caso do AIMS e da visão computacional. Na seara dos estudos de textura a partir do PDI, diversas lacunas persistem e demandam respostas. Dentre elas, está o fato de que agregados classificados, segundo o AIMS, como polidos, macios ou de baixa rugosidade podem originar misturas com satisfatória capacidade de resistência à derrapagem, avaliada segundo o ensaio de PB, indicando que existem diferenças sensíveis entre a textura classificada segundo sistemas baseados na *clusterização* estatística e as respostas físicas de ensaios de atrito (Araujo *et al.*, 2019).

Dada a lacuna em questão, este trabalho busca atribuir ao parâmetro de textura superficial de agregados minerais e microtextura de misturas asfálticas obtidos a partir do AIMS uma relação mais próxima ao fenômeno físico do atrito pneu-pavimento. Para tanto, podem ser utilizadas relações já estabelecidas entre parâmetros obtidos da análise de modelos tridimensionais e o valor de atrito (μ ou *Grip Number* - GN, no caso do oriundo da utilização do *Grip Tester*). Assim, podem ser fornecidas indicações de como se considerar de forma mais racional a textura superficial no momento da seleção de agregados minerais para revestimentos asfálticos, especialmente para aqueles cujo foco seja promover uma maior segurança de operações.

2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

2.1. *Aggregate Image Measurement System* (AIMS)

Tradicionalmente associado à análise de propriedades de forma de agregados, o AIMS também apresenta a função de análise da macrotextura de misturas asfálticas, a partir de leituras de distâncias entre uma câmera e um Corpo de Prova (CP) de mistura asfáltica, moldado em laboratório ou extraído de campo. Além disso, o AIMS realiza a análise da microtextura do CP por meio de uma análise de *pixels* das imagens capturadas. Para isso, o equipamento realiza cinco varreduras de imagens da superfície de cada CP, nas quais se capturam imagens em diferentes magnitudes de *zoom*. A primeira varredura de imagens ocorre com a utilização de um *zoom* máximo, na qual o equipamento reconstrói um perfil de profundidade, analisado como macrotextura, por meio da movimentação do microscópio para detectar a obtenção de imagens de alta resolução em escala de cinza (Rezaei *et al.*, 2011). Nas varreduras seguintes, aplicam-se as mesmas magnitudes de *zoom* de avaliação da textura superficial de agregados retidos nas frações granulométricas de 4,75 mm, 9,5 mm e 19 mm. Para avaliar a microtextura do CP, realiza-se uma técnica de processamento baseada no método das *wavelets*, sendo o parâmetro

de textura função da média e do desvio padrão dos valores dos *pixels* das imagens processadas, conforme mostrado na Equação 1 (Masad, 2005).

$$\text{Textura Superficial} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2 \quad (1)$$

Onde: D é uma função de decomposição;

n é o nível de decomposição da imagem;

N é o número total de coeficientes em uma imagem detalhada;

i é a direção da textura;

j é o índice *wavelet*;

x, y são a localização dos coeficientes no domínio transformado.

Na literatura, são reportadas correlações variáveis entre os parâmetros de textura obtidos com o uso do AIMS e ensaios tradicionais como MA e PB. Para CA com diferentes parâmetros volumétricos (a quente, a frio e com diferentes teores de material reciclado), obteve-se R² variável entre a microtextura obtida com o uso do AIMS e o atrito medido por meio do PB (de 0,39 a 0,88), e quanto à macrotextura, as correlações foram insignificantes (Araujo *et al.*, 2015). Já na análise de revestimentos de CA oriundos de uma mesma dosagem e com diferentes métodos de compactação em campo, encontrou-se correlação de razoável a boa (R² superior a 0,6) entre os parâmetros de macrotextura fornecidos pelo AIMS e pelo ensaio de MA, porém a correlação entre a microtextura medida no AIMS e o atrito medido no PB (R²) foi inferior a 0,2 (Araujo, 2017). A variabilidade desses resultados sugere a necessidade de melhorias na qualidade das avaliações de textura baseadas no AIMS.

Há indícios de que misturas diferentes em granulometria e dosagem podem apresentar macrotextura semelhante quando finalizadas pelo mesmo tipo de rolo compactador e que misturas iguais apresentam macrotextura diferente quando finalizadas por rolos compactadores diferentes, nesses casos, a finalização com rolo tandem leva à redução da macrotextura (Araujo *et al.*, 2019). Por outro lado, o tipo de rolo não provoca alterações significativas na microtextura, avaliada segundo o AIMS e indiretamente pelo PB, influenciada fortemente pela textura superficial dos agregados (Hall *et al.*, 2009; Araujo *et al.*, 2019). A bibliografia que reporta a utilização do AIMS sugere ainda que o processo de beneficiamento de agregados pode ser manipulado de forma a potencializar as qualidades dos materiais quanto às propriedades de forma, uma vez que, por exemplo, agregados provenientes de diferentes fontes mineralógicas podem apresentar propriedades semelhantes em função da similaridade entre processos de britagem (Bessa *et al.*, 2011; Bessa, 2012; Diógenes, 2018).

2.2. Modelagem tridimensional

A visão computacional, baseada na técnica de estereofotogrametria, é vista como uma das abordagens mais promissoras para simplificar e reduzir o empirismo das avaliações de textura já consolidadas como estado da prática. A estereofotogrametria se baseia na incorporação de várias imagens de diferentes ângulos para estimar coordenadas 3D de um objeto, por meio de um processo chamado triangulação (Hartley e Sturn, 1997). Câmeras comuns podem ser utilizadas para tal objetivo, na chamada fotogrametria de próximo alcance, associada à sigla CRP (*close-range photogrammetry*) (Mcquaid *et al.*, 1997). A CRP consiste, basicamente, na calibração de parâmetros da câmera e em processos de sobreposição que visam a definir as posições relativas entre imagens capturadas de forma subsequente, aplicando fatores de escala e corrigindo distorções das lentes. Embora aparentemente complexo, o processo em questão pode ser simplificado usando pacotes computacionais que incorporam algoritmos de

autocalibração, desde que um número considerável de imagens subsequentes seja tomado (Tiggs *et al.*, 2000). Dentre as ferramentas que contribuem para a geração e análise de mapas topográficos de superfícies de forma simplificada estão programas computacionais comercialmente disponíveis, como o *Recap Photo* (Autodesk), o *3D Flow Zephyr Pro* e o *Digital Surf MountainsMap* (Kogbara *et al.*, 2018; Maia *et al.*, 2018).

Quando a superfície de pavimentos é reconstruída por modelo tridimensional a partir da técnica de CRP, parâmetros de textura como os propostos pelas *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *International Organization for Standardization* (ISO) podem ser obtidos a partir do processamento dos modelos gerados. Há relatos de que os parâmetros obtidos da CRP se correlacionam bem com os resultados de ensaios de MA ($R^2 = 0,9$), dependendo de fatores como precisão de equipamentos e calibração de *software* (Kogbara *et al.*, 2016). Além disso, avança-se na proposição de modelos de predição de atrito a partir de parâmetros de textura. Medidas de fricção a partir do equipamento *Grip Tester* podem ser previstas a partir de parâmetros como densidade e volume dos picos na topografia do modelo 3D (R^2 de aproximadamente 0,75). Para a obtenção do *Grip Number* (GN), isolam-se os 2 mm do topo do modelo para o cálculo das duas variáveis independentes do modelo de previsão, normatizadas na ISO 25178: (i) parâmetro volumétrico - V_{mp} e (ii) parâmetro de distribuição de picos - Sp_d (Kogbara *et al.*, 2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Atingir um equilíbrio entre a aderência pneu-pavimento e o desempenho mecânico é uma das complexidades que residem nos processos de seleção de materiais e de compactação de misturas asfálticas para composição de pavimentos, especialmente na transição laboratório-campo. Dada a importância dessa questão para o meio aeroportuário, no Brasil, a especificação aeroportuária DIRENG 04.05.610/02 orienta que seja realizada a construção de pistas experimentais em escala real para a obtenção de Corpos de Prova (CPs), com a finalidade de análise e fiscalização do cumprimento de requisitos normativos como GC e textura superficial de acordo com os materiais e métodos de compactação aplicados. Como parte de um esforço da comunidade científica para investigar questões como as citadas anteriormente, misturas asfálticas para composição de pavimentos aeroportuários foram executadas em campo em 8 trechos experimentais em escala real, aplicando-se diferentes métodos de compactação, na região de Fortaleza-CE (Brasil). Os trechos citados basearam avanços expostos em estudos recentes (Araujo, 2017; Araujo *et al.*, 2019).

O programa experimental presente neste trabalho tem como base os 8 trechos experimentais em escala real citados anteriormente, cujas características, em resumo, incluem a utilização de um Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) classificado por penetração como CAP 50/70 e de agregados minerais de origem granítica, nas frações de Tamanho Máximo Nominal (TMN) 1", 3/4", 1/2", além de pó de pedra como material complementar. O Concreto Asfáltico (CA) aplicado nos trechos foi dosado segundo o método Marshall, com granulometria enquadrada na Faixa 2 e demais parâmetros dentro dos limites sugeridos na Especificação Geral DIRENG 04.05.610/02 (4,7% de CAP e 3,6% de vazios), específica para revestimentos aeroportuários. Neste trabalho, são expostas as características mais relevantes dos materiais e dos métodos construtivos empregados. Expõe-se na Tabela 1 a textura superficial das frações de agregados empregadas nas misturas asfálticas (Araujo *et al.*, 2019), classificadas segundo dois diferentes sistemas, um brasileiro (Ibiapina, 2018) e um norte-americano (Al Rousan, 2004). Já a Tabela 2 apresenta os diferentes procedimentos de compactação em campo e os resultados obtidos após

a execução para ensaios de macrotextura (MA) e microtextura (indiretamente, por meio do ensaio de PB) (Aps, 2006; Araujo, 2017; Araujo *et al.*, 2019).

Tabela 1: Textura superficial dos agregados (Fonte: Araujo *et al.*, 2019)

Propriedade	Parâmetro/Sistema de Classificação	TMN do agregado			
		1"	3/4"	1/2"	Pó de Pedra
Textura Superficial	Média	287,8	197,3	215,2	185,5
	Desvio padrão	153,4	113,9	136,1	111,0
	Coefficiente de Variação (%)	53,3	57,7	63,2	59,8
	Al Rousan (2004)	Baixa rugosidade	Macio	Macio	Macio
	Ibiapina (2018)	Macio	Polido	Polido	Polido

Tabela 2: Procedimentos de compactação resultados dos ensaios de MA e PB (Fonte: Araujo *et al.*, 2019)

Trecho	Número de Passadas		GC (%)	Altura de MA (mm)	Classificação - Macrotextura	PB (BPN)	Classificação - Microtextura (Indireta)
	Rolo de Pneus	Rolo Tandem					
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

*Sem vibração do rolo tandem durante as passadas

Dos trechos experimentais executados, foram obtidas 8 médias de microtextura de misturas asfálticas a partir do uso do AIMS. Os resultados obtidos são expostos na Figura 1, assim como os referentes à textura superficial de agregados em cada fração e na matriz pétre. Observa-se a compatibilidade entre a textura superficial da matriz pétre (média ponderada das texturas superficiais das frações dos agregados para a curva granulométrica de projeto da mistura asfáltica em estudo) e a microtextura das misturas asfálticas executadas em campo. A textura superficial da matriz pétre é a mesma para os 8 trechos, uma vez que estes apresentam a mesma distribuição granulométrica de agregados minerais. Na Figura 1, expõe-se também o parâmetro de microtextura das misturas asfálticas obtido para cada um dos 8 trechos experimentais com o uso do AIMS (Araujo *et al.*, 2019). Além disso, a Figura 1 apresenta os intervalos de 1 desvio padrão em relação à média de textura superficial/microtextura. Revela-se que a variabilidade na textura superficial de agregados é maior do que a obtida para a análise de microtextura nos CPs extraídos dos trechos experimentais com a misturas asfáltica em estudo.

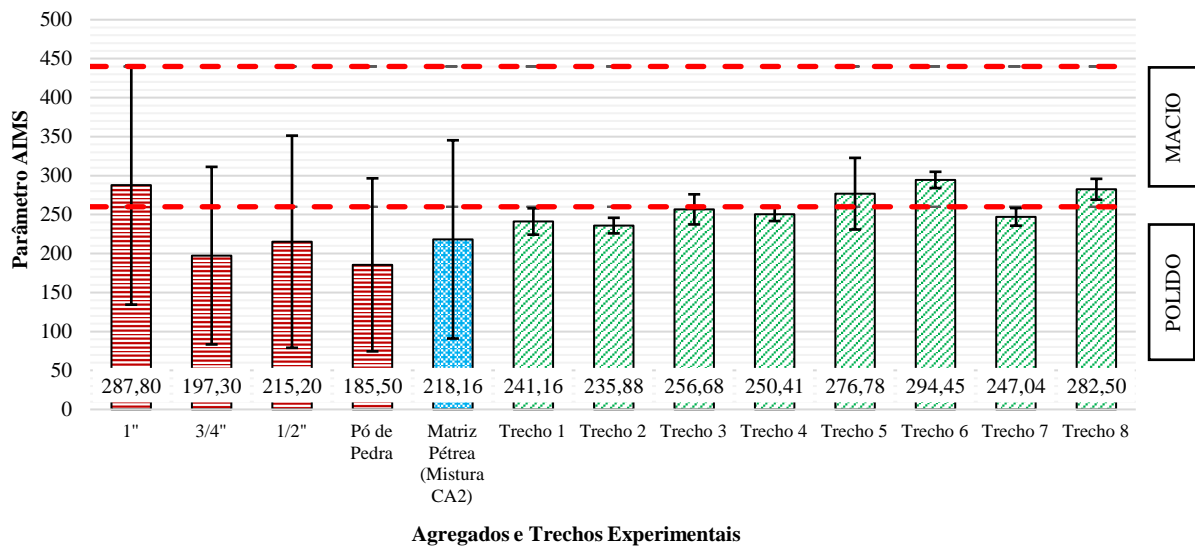


Figura 1: Textura superficial das frações de agregados, da matriz pétreo e microtextura das misturas asfálticas compactadas em campo em trechos experimentais (Fonte: Araujo *et al.*, 2019)

Foram produzidos modelos tridimensionais a partir da técnica de CRP para cada trecho avaliado. A criação dos modelos 3D apresentada neste artigo diz respeito ao uso de uma câmera digital semiprofissional e um *software* comercial, para criar mapas de textura digital das superfícies das pistas experimentais. Uma vez definidos os pontos de análise, fotos de diferentes posições no sentido anti-horário (em relação às direções X ou Y e direção Z) foram tomadas. Os modelos tridimensionais foram gerados no *software* Recap Photo e processados por meio das ferramentas computacionais *MeshLab* e *MountainsMap Premium*. Dos parâmetros obtidos no último, foram selecionados os necessários à previsão do GN, sendo eles o V_{mp} (volume de material referente às 10% maiores alturas na malha tridimensional) e o S_{pd} (densidade de picos na superfície avaliada), referentes ao filtro de análise dos 2 mm superiores do modelo. O GN previsto foi calculado segundo o modelo mostrado na Equação 2 (Kogbara *et al.*, 2018). O modelo proposto por Kogbara *et al.* (2018) representa um coeficiente de atrito calibrado para 50 km/h, podendo-se, assim, ser harmonizado para demais velocidades a partir do método do *International Friction Index* (IFI) (Wambold *et al.*, 1995).

$$GN_{\text{previsto}} = 0,187 + 2,656 \times V_{mp} + 1,834 \times S_{pd} \quad (2)$$

Dada a observada variabilidade dos resultados do ensaio de PB, que pode ocorrer em função do operador, da calibração do equipamento e da perda de contato entre a borracha e a superfície avaliada, decidiu-se por estabelecer modelos de regressão apenas em relação ao GN_{previsto} . Assim, por regressão linear, foram desenvolvidos modelos simplificados de associação do GN_{previsto} aos parâmetros de microtextura (AIMS) e macrotextura, selecionando-se o modelo com maior R^2 , combinado à comprovação de significância do modelo (elevado valor F na análise de variância – ANOVA) e das variáveis independentes (valor $p < 0,05$ para refutação da hipótese de coeficientes iguais a 0).

Criado o modelo, construiu-se uma matriz de valores mínimos de microtextura (AIMS) para: (i) limites de macrotextura (MA) propostos pelo Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (DNIT, 2006) e (ii) limites de atrito (*Grip Tester*) referidos na literatura

(Amarante Jr. *et al.*, 2005). Os valores encontrados podem ser uma boa aproximação de como selecionar uma matriz pétreo devidamente adequada quanto à resistência à derrapagem ainda na fase de projeto, em função da representatividade da textura superficial da matriz pétreo em relação à mistura asfáltica finalizada em campo e da representatividade dos métodos de compactação Marshall e Superpave em relação à macrotextura de campo, de acordo com o tipo de compactação (impacto e amassamento) e do GC (%) (Araujo *et al.*, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez tabulados os dados referentes à microtextura (AIMS) (variável independente 1) e à altura de MA (variável independente 2), obteve-se um modelo de regressão ao GN cuja correlação (R^2) apresentou um valor excelente (0,99) (Witczak *et al.*, 2002), bem como uma elevada significância (F elevado na análise de variância ANOVA). Além disso, atesta-se a significância de ambas as variáveis independentes a partir dos valores p encontrados inferiores à 0,05, o que indica que os coeficientes de multiplicação apresentam um valor diferente de zero. Quando as variáveis foram comparadas com o GN, isoladamente, obtiveram-se correlações menos significantes (0,12 a 0,74, respectivamente). A análise estatística do modelo é resumida na Tabela 3. Estabelecido o modelo associativo entre os parâmetros de macro e microtextura e um parâmetro fisicamente associado a atrito (μ a partir do GN), foram calculados valores mínimos de microtextura oriundos de valores de macrotextura e atrito indicados em publicações técnicas (Amarante Jr. *et al.*, 2005; Aps, 2006; DNIT, 2006), conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 3: Modelo de previsão do GN a partir da microtextura (AIMS) e da macrotextura (MA)

Estatística de Regressão	
GN = (5,37E-04) x Microtextura (AIMS) + (2,87E-01) x Altura de MA (mm)	
R^2	0,99
F	767,42
F de significação	3,22E-14
Valor P (Mic.AIMS)	1,14E-05
Valor P (MA)	2,25E-05

Tabela 4: Previsão da microtextura (AIMS) mínima para enquadramento em limites de macrotextura/atrito

Coeficiente de Atrito (Grip Number)			Macrotextura (Altura de MA)						
			Muito Fina	Fina	Med. Fina	Média	Med. Grossa	Grossa	Muito Grossa
Limites Inferior/Superior			-	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20
			0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	-
Perigosa	-	0,24	-	-	-	-	-	-	-
Muito Lisa	0,24	0,30	447	340	233	126	19	-	-
Lisa	0,31	0,37	577	470	363	256	149	42	-
Insuf. Rugosa	0,38	0,44	707	600	494	387	280	173	66
Med. Rugosa	0,45	0,51	838	731	624	517	410	303	196
Rugosa	0,52	0,72	968	861	754	647	540	433	326
Muito Rugosa	0,72	-	1340	1233	1126	1020	913	806	699

A Tabela 4 pode ser associada a diferentes sistemas de classificação estatísticos (Al Rousan, 2004; Ibiapina, 2018), de forma a dar suporte à seleção de agregados, assumindo-se a proximidade entre a matriz pétreo e a mistura asfáltica quanto à microtextura avaliada por meio do AIMS (Araujo *et al.*, 2019). Neste caso, opta-se por enquadrar os resultados ao sistema de classificação brasileiro (Ibiapina, 2018), expostos de forma sumarizada na Tabela 5. Convém

mencionar que os limites de 1 desvio-padrão acima ou abaixo da textura superficial média da matriz pétreo representam bem a microtextura das misturas asfálticas em campo, independentemente do método de compactação utilizado, que pode representar uma maior variabilidade para outros parâmetros, como aqueles relativos à macrotextura (Araujo *et al.*, 2019).

Tabela 5: Textura superficial sugerida para a matriz pétreo de misturas asfálticas de acordo com a matriz de possibilidades para enquadramento em limites de macrotextura/atrito

Coeficiente de Atrito (<i>Grip Number</i>)	Macrotextura (Altura de MA)						
	Muito Fina	Fina	Med. Fina	Média	Med. Grossa	Grossa	Muito Grossa
Perigosa	Polido	Polido	Polido	Polido	Polido	Polido	Polido
Muito Lisa	Baixa Rugosidade	Macio	Polido	Polido	Polido	Polido	Polido
Lisa	Baixa Rugosidade	Baixa Rugosidade	Macio	Polido	Polido	Polido	Polido
Insuf. Rugosa	Rugosidade Moderada	Rugosidade Moderada	Baixa Rugosidade	Macio	Macio	Polido	Polido
Med. Rugosa	Alta Rugosidade	Rugosidade Moderada	Rugosidade Moderada	Baixa Rugosidade	Macio	Macio	Polido
Rugosa	Alta Rugosidade	Alta Rugosidade	Rugosidade Moderada	Rugosidade Moderada	Baixa Rugosidade	Macio	Macio
Muito Rugosa	Alta Rugosidade	Alta Rugosidade	Alta Rugosidade	Alta Rugosidade	Alta Rugosidade	Rugosidade Moderada	Rugosidade Moderada

No que se refere a revestimentos aeroportuários, exige-se uma macrotextura mínima (altura de MA) de 0,60 mm. A autoridade nacional sugere a execução de ensaios para a obtenção do GN a 65 ou 95 km/h (ANAC, 2012), enquanto a equação utilizada no presente estudo é calibrada para ensaios realizados a 50 km/h (Kogbara *et al.*, 2018) e os limites de coeficiente de atrito, em geral, fazem referência à velocidade de 60 km/h (método IFI). Para 50 km/h, utilizando-se as correções propostas para o equipamento *GripTester* no método IFI (Wambold *et al.*, 1995), estima-se a necessidade de obtenção de um GN de 0,46 para que se atenda o requisito de 0,43 a 65 km/h. Sugere-se, para revestimentos aeroportuários no limite inferior de macrotextura (0,60 mm - média), a seleção de agregados minerais cuja textura superficial (parâmetro AIMS) da matriz pétreo seja de aproximadamente 540, logo, de baixa rugosidade. Logicamente, as exigências quanto à textura superficial da matriz pétreo serão tanto menores quanto maior for a macrotextura das misturas em campo.

A Tabela 5 pode ser uma ferramenta de auxílio na fase de projeto de misturas asfálticas ainda na fase laboratorial, uma vez que a microtextura da mistura em campo, quando avaliada com o uso do AIMS pode ser bem representada pela textura superficial da matriz pétreo. Além disso, os CPs produzidos em laboratório podem apresentar macrotextura semelhante à de campo, a saber que CPs compactados pelo Compactador Superpave e pelo Compactador Marshall (com GC próximo a 97%) podem apresentar macrotextura semelhante à de misturas finalizadas em campo com o rolo tandem, enquanto as misturas compactadas com o Compactador Marshall em menor GC (94%) apresentam macrotextura da magnitude de misturas nas quais não ocorre finalização por rolo tandem. Essa previsão pode ainda ser auxiliada pela análise de macrotextura do AIMS, cujos resultados apresentam elevada correlação com o ensaio de MA (Araujo *et al.*, 2019). Dessa forma, a associação de dados de textura (macro e micro) obtidos em laboratório, com corpos de prova, com o uso do AIMS podem apresentar um valor preditivo quanto ao cumprimento de requisitos de textura e atrito em campo.

A partir do gráfico exposto na Figura 2, observam-se 3 parâmetros: (i) a média da microtextura obtida para a mistura asfáltica executada em cada um dos 8 trechos experimentais, (ii) a média de GN previsto a partir da técnica de modelagem tridimensional para cada um dos trechos e (iii) o GN obtido a partir de regressão linear com o uso das variáveis altura de MA e da microtextura da mistura asfáltica proposta neste trabalho. Observou-se que a compatibilização das duas formas de previsão de GN foi mais precisa para os trechos nos quais o GC (%) da mistura foi maior, sendo apenas nos trechos 6, 7 e 8, cujos GC foram menores em comparação com os trechos 1 a 5, onde se observou uma pequena variação entre o GN previsto pelo modelo de aplicação dos parâmetros tridimensionais e o GN ajustado a partir da ponderação entre macro e microtextura.

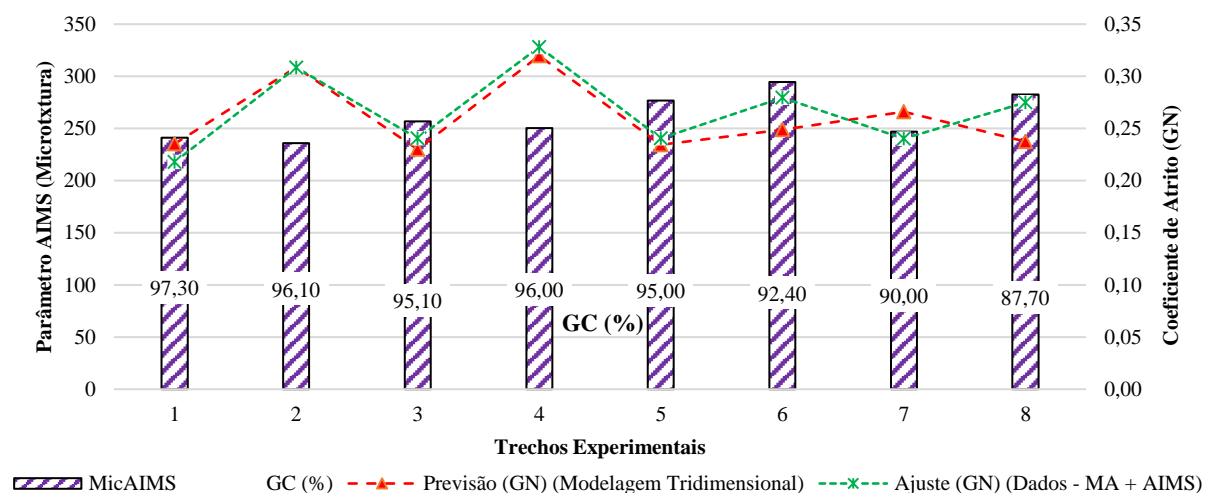


Figura 2: Paralelo entre valores de microtextura (AIMS) e de GN a partir de diferentes modelos de previsão e em pistas com diferentes GC

Ainda assim, a análise da propriedade de textura superficial de agregados não pode ser considerada trivial, dado que, utilizando-se o AIMS, conforme mostrado na Figura 1, tem-se nela a propriedade cuja variação em torno de um valor médio é mais expressiva. Sugere-se, assim, que a escolha de agregados, especificamente na questão da textura superficial, seja sempre acompanhada de testes de hipóteses que corroborem que o agregado em questão apresenta uma textura superficial média estatisticamente superior à sugerida, de forma a não comprometer o desempenho de segurança quanto a resistência à derrapagem em campo. Cabe mencionar que a mineralogia do agregado pode contribuir para essa análise, uma vez que uma menor quantidade de biotita e uma maior quantidade de quartzo podem originar partículas menos rugosas. Ao mesmo tempo, a depender da origem mineralógica e de outros fatores, dentre os quais está o próprio volume de tráfego, o agregado pode apresentar uma maior suscetibilidade à perda de textura (polimento) (Diógenes, 2018).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho buscou, por meio de procedimentos simples, adereçar a uma das principais questões no que concerne à utilização da função de análise de textura superficial de agregados minerais e microtextura de misturas asfálticas do *Aggregate Image Measurement System* (AIMS): a falta de uma correspondência intuitiva entre o parâmetro de textura superficial/microtextura e a resposta física dessas propriedades em campo por meio do atrito superficial. Estudos relativos ao uso do AIMS no contexto nacional já alertam para o fato de

que os sistemas de classificação de propriedades de agregados, em geral, se baseiam no tratamento estatístico de bancos de dados, indicando que essas classificações podem fornecer um bom ferramental comparativo entre diferentes agregados, mas nem sempre representam o mesmo para a previsão de desempenho em campo.

Para relacionar o parâmetro de microtextura para misturas asfálticas fornecido com o uso do AIMS e o atrito superficial em campo a fim de contribuir para uma maior racionalização da escolha de agregados, partiu-se da premissa de que o parâmetro AIMS de microtextura das misturas asfálticas é bem representado pela textura superficial da matriz pétreas de agregados minerais utilizados na produção das mesmas. Assim, foram estudados 8 trechos experimentais de uma mistura asfáltica aeroportuária de graduação densa, compactados segundo diferentes combinações de utilização de rolos. Desses trechos, foram obtidos parâmetros de microtextura a partir do uso do AIMS e de macrotextura a partir da realização em campo de ensaios de MA, sendo tais resultados utilizados em um modelo de regressão linear para a previsão de um valor de GN obtido a partir da aplicação de modelos de relação de parâmetros tridimensionais ao atrito superficial.

Estatisticamente, o modelo de regressão proposto para o GN, combinando macro e microtextura, apresentou significância aceitável (R^2 elevado, significância na análise ANOVA e no valor p dos coeficientes inferior a 0,05). Já quando as variáveis foram comparadas com o GN isoladamente, obtiveram-se correlações pouco relevantes, especialmente o parâmetro de microtextura, sugerindo que a análise proposta pelo AIMS não apresenta diretamente um significado físico de atrito, porém é relevante quando analisada em conjunto com o parâmetro de macrotextura. Dessa forma, foram sugeridos limites mínimos de textura superficial da matriz pétreas para diferentes níveis de macrotextura. Em geral, para a obtenção de superfícies rugosas, é necessária uma matriz pétreas classificada como de baixa rugosidade, no mínimo, sendo possível a utilização de agregados macios desde que exista uma macrotextura mais elevada (grossa ou muito grossa).

No caso de misturas asfálticas especificadas para uso em pavimentos aeroportuárias cuja macrotextura se encontra no limite mínimo do ensaio de MA (0,60 mm), sugere-se uma matriz pétreas que apresente um requisito mínimo de textura superficial classificada como de baixa rugosidade (evitando-se agregados classificados como polidos e macios). Essa informação é de extrema relevância para o meio técnico, uma vez que, principalmente, para fins de composição em pavimentos aeroportuários, necessita-se da construção de trechos experimentais, que demandam considerável investimento, para a verificação das propriedades das misturas asfálticas, incluindo textura e atrito. Dessa forma, a matriz exposta na Tabela 5 surge como uma ferramenta importante para uma seleção mais racional de agregados minerais.

Dentre outras análises, destacam-se: (i) a necessidade de matrizes pétreas, no mínimo, de alta rugosidade, para compensar o efeito negativo de macrotexturas fina/muito fina; (ii) a disponibilidade de uma maior gama de agregados propícios para uso em revestimentos com necessidade de melhor desempenho quanto à resistência à derrapagem quando macrotexturas mais elevadas são alcançadas (pode-se obter uma superfície medianamente rugosa com agregados classificados como polidos, classe de menor magnitude de textura) e (iii) a relevância em se buscar avançar para uma análise que considere também as propriedades de resistência ao polimento dos agregados, de forma que se garanta que a propriedade de textura superficial cumpre requisitos desejados não apenas no início da via útil, mas também ao longo da operação

em campo (equipamentos como o Micro-Deval, específicos para a avaliação do polimento, podem ser ferramentas pertinentes para tanto). Contribui-se, assim, para uma escolha mais racional de agregados, oferecendo-se uma ferramenta simplificada para avaliação da viabilidade dos mesmos para construção de revestimentos asfálticos com foco na segurança viária.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento à pesquisa CAPES e CNPq, bem como à empresa Insttale Engenharia Ltda, por toda a infraestrutura disponibilizada para a construção e a avaliação das pistas experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (2012) *Resolução N° 236 (Requisitos de Aderência para Pistas de Pouso e Decolagem)*, Diário Oficial da União N° 111, 11/06/2012, S.1, P. 6-8.
- Al Rousan, T. M. (2004) *Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System*. Tese de Doutorado, Texas A&M University, College Station-TX, EUA.
- Amarante Júnior, F. D.; Souza, F. S. V.; Sant'Anna, F. M. G.; Oliveira, P. C. A. (2005) Fresagem Fina como Medida de Melhoramento da Segurança da Rodovia Presidente Dutra no Trecho da Serra das Araras. In: Anais da 36ª Reunião Anual de Pavimentação (36ª RAPV), Curitiba-PR, Brasil.
- Aps, M. (2006) *Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.
- Araujo, V.M.; Bessa, I.S.; Castelo Branco, V.T.F. (2015) Measuring skid resistance of hot mix asphalt using the aggregate image measurement system (AIMS). *Construction and Building Materials*, n.98, p.476–481. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.117.
- Araujo, V. M. C. (2017) *Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas em face à Compactação para uso em Revestimentos Aeroportuários a partir do uso do Processamento Digital de Imagens*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil.
- Araujo, V.M.C; Maia, R.S.; Castelo Branco, V.T.F; Maia, A.O.; Rodrigues, C.B. (2019) 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). *Revista Transportes*. Aceito para publicação em março de 2019.
- Bessa, I. S., Castelo Branco, V. T. F., Soares, J. B. (2011) Avaliação do Processo de Produção de Agregados por Meio da Utilização Processamento Digital de Imagens. In: Anais do XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Belo Horizonte-MG, Brasil.
- Bessa, I. S. (2012) *Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. 2ª Ed., Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- 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 de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil.
- Hall, J. W.; Smith, K. L.; Titus-Glover, L.; Wambold, J. C.; Tager, T.J.; Rado, Z. (2009) *Guide for Pavement Friction*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington-DC, EUA.
- Hartley, R. I.; Sturm, P. (1997) Triangulation. *Computer Vision and Image Understanding*, v.68, n.2, p.146–157. DOI: 10.1006/cviu.1997.0547.
- 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 de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil.
- Kogbara, R. B.; Masad, E. A.; Woodward D.; Millar, P. (2018) Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements. *Construction and Building Materials*, v.166, p.227-240. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.102.
- Kogbara, R. B.; Masad, E. A.; Kassem, E.; Scarpas, A.; Anupam, K. (2016) A State-of-the-Art Review of Parameters Influencing Measurement and Modeling of Skid Resistance of Asphalt Pavements. *Construction and Building Materials*, v.114, p.602-617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.

- Maia, A. O.; Maia, R. S.; Castelo Branco, V. T. F. (2018) Avaliação da Macrot textura de Pavimentos Asfálticos com a Utilização da Visão Computacional 3D. Encontro de Iniciação Científica - XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, Gramado-RS, Brasil.
- Masad, E. A. (2005) *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS): Basics and Applications*. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. Project Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Report nº FHWA/TX-05/5-1707-01-1. College Station-TX, EUA.
- Mcquaid, G.; Millar, P.; Woodward, D. (2014) A Comparison of Techniques to Determine Surface Texture Data. In: Civil Engineering Research in Ireland Conference. Belfast, Irlanda.
- Rezaei, A., Hoyt, D., Martin, A. E. (2011) Simple Laboratory Method for Measuring Pavement Macrot texture. *Transportation Research Record*, v.2227, p.146-152. DOI: 10.3141/2227-16.
- Tiggs, B.; Mclauchlan, P.; Hartley R.; Fitzgibbon, A. (2000) Bundle Adjustment - A Modern Synthesis. In: International Workshop on Vision Algorithms, Corfu, Grécia. Springer-Verlag.
- Wambold, J. C.; Antle, C. E.; Henry, J. J.; Rado, Z. (1995) *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*. Paris, França.
- Witczak, M. W.; Kaloush, K.; Pellinen, T.; El-Basyouny, M.; Von Quintus, H. (2002) *NCHRP – Report 465: Simple performance test for Superpave Mix Design*. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington-DC, EUA.

Renan Santos Maia (renanmaia@det.ufc.br)

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)

Departamento de Engenharia de Transportes (DET)

Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici, s/n – Bloco

703 – CEP: 60440-554 – Fortaleza, Ceará, Brasil.