

Verificação do parâmetro de macrotextura de pavimentos em serviço por meio da análise digital de imagens

Verification of the parameter of macrotexture of pavements in service by means of the digital analysis of images

Verificación del Parámetro de Macro Textura de Pavimentos en Servicio por medio del Análisis Digital de Imágenes

Vérification du paramètre de macrotexture de pavements en service en utilisant l'analyse numérique d'images

Resumo

A macrotextura é um parâmetro da aderência pneu-pavimento. Apesar de ser uma das características mais importantes na segurança viária, sua avaliação não é comumente realizada no Brasil. Além disso, os procedimentos recomendados para sua mensuração ainda são constituídos por ensaios tradicionais, que envolvem a interrupção de tráfego por longos períodos. Mas o desenvolvimento de tecnologias, associadas aos avanços da computação, geraram técnicas, como o processamento digital de imagens (PDI), que têm mostrado resultados satisfatórios na avaliação da textura de pavimentos. A partir disso, o presente trabalho busca realizar uma análise comparativa entre valores de profundidade média de macrotextura e os resultados obtidos com a aplicação do PDI em imagens de pavimentos. Para tanto, foram escolhidos pontos em pavimentos asfálticos em serviço, localizados no *campus* do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram coletadas imagens com uma câmera digital e processadas com a utilização do *software* Matlab. Posteriormente, foi realizado o ensaio da Mancha de Areia no mesmo local. Com os resultados do PDI e do ensaio foi verificada a existência de correlação entre os dados, tendo como base os valores do coeficiente de determinação (R^2), com o valor máximo obtido de 0,88. Com o desenvolvimento deste trabalho, percebeu-se que o PDI consegue obter resultados satisfatórios na verificação da macrotextura., Porém a análise das imagens para um único limiar não apresentou correlação adequada, com R^2 máximo de 0,13 devido às particularidades de cada imagem, como cor e brilho. De forma geral, verificou-se que é possível desenvolver métodos mais eficientes de avaliação de macrotextura a partir da análise digital de imagens.

Palavras-chave: Pavimento; Macrotextura; Mancha de Areia; Processamento Digital de Imagens.

Abstract

The macrotexture is a parameter of the tire-pavement adhesion. Despite being one of the main characteristics of road safety, its evaluation is not commonly performed in Brazil. In addition, the procedures for their measurement also constituted by umbrellas involve a passage for long periods. But the development of technologies combined with advances in information technology has generated techniques such as digital image processing (PDI), which are satisfactory indicators in the evaluation of pavement texture. So, the present work seeks a comparative analysis between macrotexture mean values and results obtained with a PDI application in pavement images. To do so, places were chosen on asphalt pavements in service, based at the campus of the Federal University of Ceará (UFC), where images were collected with a digital camera and processed using Matlab software. Subsequently, the Sand Stain Test was performed at the same site. The results of the PDI and the test

Elisa da Silva Sousa
([OrCID](#))
elisasousa9404@gmail.com
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Francisco Heber Lacerda de Oliveira
([OrCID](#))
heber@det.ufc.br
Universidade Federal do Ceará (UFC)

showed a correlation between the data verified, based on the coefficient of yield (R^2), with the maximum value received of 0.88. The PDI is an indicator of results of the work, published together with the result, such as color and brightness. In general, the most efficient type of macrotexture evaluation data was verified from the digital image analysis.

Keywords: Pavement; Macrotexture; Sand Stain; Digital Image Processing.

Resumen

La macro textura es un parámetro de adherencia neumático-pavimento. Aunque sea una de las características más importantes en la seguridad vial, su evaluación no es realizada a menudo en Brasil. Además, los procedimientos recomendados o tradicionales, que envuelven la interrupción del tránsito por largos períodos. Pero, el desarrollo de tecnologías, asociadas a los avances de la computación, genera técnicas, como el procesamiento digital de imágenes (PDI), que viene enseñando resultados satisfactorios en la evaluación de la textura de pavimentos. A partir de esto, el presente trabajo busca realizar un análisis comparativo entre valores de profundidad media de macro textura y los resultados obtenidos con la aplicación del PDI en imágenes de pavimentos. Para eso, se escogieron puntos en pavimentos asfálticos en servicio, ubicados en el *campus* del Pici de la Universidad Federal del Ceará (UFC), donde se colectaron imágenes con una cámara digital y procesadas con la utilización del *software* Matlab. Posteriormente, se realizó el ensayo de la Mancha de Arena en el mismo local. Con los resultados del PDI y del ensayo, se verificó la existencia de correlación entre los datos, teniendo como base los valores del coeficiente de determinación (R^2), con el valor máximo encontrado de 0,88. Con el desarrollo de este trabajo, percibimos que el PDI consigue obtener resultados satisfactorios en la verificación de la macro textura. Sin embargo, el análisis de las imágenes para un único límite no presentó correlación adecuada, con R^2 máximo de 0,13 debido a las particularidades de cada imagen, como color y brillo. De forma general, se verificó que es posible desarrollar métodos más eficientes de evaluación de macro textura a partir del análisis digital de imágenes.

Palabras-clave: Pavimento; Macro textura; Mancha de Arena; Procesamiento Digital de Imágenes.

Résumé

La macrotexture est un paramètre de l'adhérence pneu-pavement. Bien qu'il s'agisse d'une des caractéristiques les plus importantes de la sécurité routière, son évaluation n'est pas généralement effectuée au Brésil. En outre, les procédures recommandées pour la mesurer sont encore des tests traditionnels, qui impliquent une interruption du trafic pendant de longues périodes. Pourtant, le développement de technologies, associé aux progrès de l'informatique a généré des techniques, telles que le traitement numérique d'images (TNI). Celui ci a donné des résultats satisfaisants dans l'évaluation de la texture des pavements. À partir de là, le présent travail cherche à réaliser une analyse comparative entre les valeurs de profondeur moyenne de macrotexture et les résultats obtenus avec l'application du TNI dans des images de pavements. Pour le faire, on a choisi des points sur les pavements asphaltés en service, situés au campus de Pici de l'Université Fédérale de l'état du Ceará (UFC), où les images ont été collectées à l'aide d'un appareil photo numérique et traitées à l'aide du logiciel Matlab. En suite, on a réalisé l'essai d'équivalent de sable chez le même endroit. Avec les résultats de TNI et celui de l'essai on a pu vérifier l'existence de corrélation entre les données, en ayant comme base les valeurs du coefficient de détermination (R^2), avec la valeur maxime obtenue de 0.88. Avec le développement de ce travail, il a été observé que le TNI peut obtenir des résultats satisfaisants dans la vérification de la macrotexture. Toutefois l'analyse des images pour un seul seuil n'a pas présenté de corrélation adéquate, c'est-à-dire avec un R^2 maximum de 0,13 en raison des particularités de chaque image, tels que la couleur et la luminosité. D'une façon générale, on a pu constater qu'il est possible de développer des méthodes d'évaluation de macrotexture plus efficaces à partir de l'analyse d'images numériques.

Mots-clés: Pavement; Macrotexture; Équivalent de Sable ; Traitement d'image numérique.

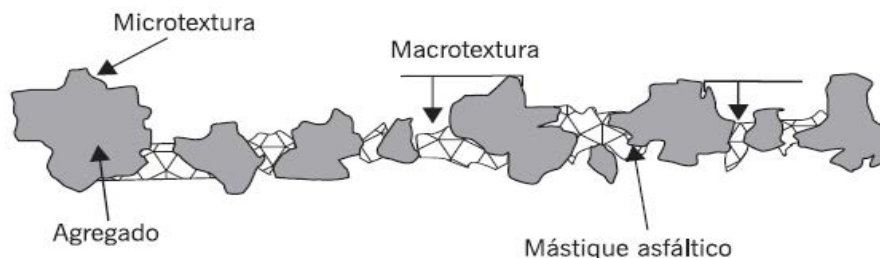
1 Introdução

Como a matriz de transporte brasileira está concentrada no modo rodoviário, é necessária uma maior atenção às rodovias, de modo a conservá-las em condições adequadas, garantindo conforto e segurança aos usuários. Para isso, é preciso que sejam realizadas avaliações periódicas das condições dos pavimentos, a fim de guiar os procedimentos de manutenção necessários.

Em relação à segurança viária, não há um sistema de avaliação indicativo do nível de segurança, uma vez que são diversos os fatores que têm influência na ocorrência de acidentes, tais como: comportamento humano, limite de velocidade, sinalização, geometria da via, textura do revestimento, estado dos pneus dos veículos, entre outros. No entanto, mesmo sem existir a avaliação quantitativa da segurança, sabe-se que uma das características que um pavimento deve ter é a aderência pneu-pavimento, devendo apresentar aderência suficiente principalmente nas zonas de frenagem, nas curvas horizontais e nos casos de pavimento molhado (MATTOS, 2009).

Segundo Bernucci *et al.* (2008), vários são os aspectos que contribuem com a aderência pneu-pavimento, sendo os dois principais a textura superficial da pista e as condições dos pneus. Assim, para a avaliação da pista de rolamento quanto à aderência, consideram-se dois tipos de textura, a microtextura e a macrotextura. A microtextura está relacionada à rugosidade da superfície do agregado, sendo responsável pelo rompimento da película de água à medida que o veículo trafega. Já a macrotextura é caracterizada pela rugosidade formada entre o agregado e o ligante na mistura, sendo responsável pela drenagem superficial da água que cai sobre o revestimento. Mattos (2009), por sua vez, ressalta que a macrotextura não pode possuir valores muito baixos, que prejudiquem a drenagem superficial, nem valores muito altos, que possam causar ruídos excessivos, gerando desconforto ao usuário. A Figura 1 mostra uma representação da macrotextura e da microtextura.

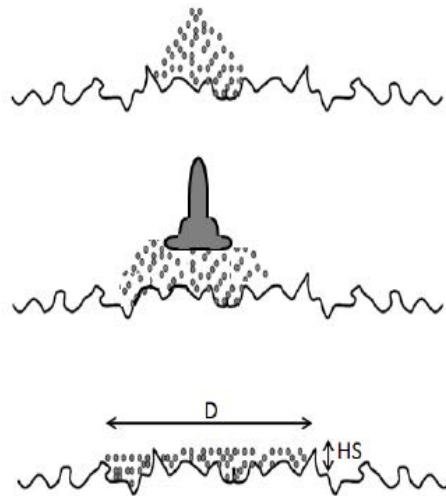
Figura 1 - Macrotextura e microtextura.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Para a avaliação dos parâmetros de aderência, geralmente, para a microtextura, utiliza-se o ensaio do Pêndulo Britânico (ASTM, 1998), enquanto que a macrotextura é medida através do ensaio da mancha de areia (ABNT, 2016). Este último determina a profundidade média da mancha formada pela areia espalhada entre os picos e vales da textura do pavimento, como pode ser visto na Figura 2. Os dois ensaios são realizados em campo, sendo necessária a interrupção do tráfego por longos períodos, o que causa restrição ao fluxo normal dos veículos. Além disso, geralmente, os equipamentos utilizados possuem valores elevados de aquisição e a execução do ensaio demanda mão de obra especializada.

Figura 2 - Detalhe do ensaio de mancha de areia.



Fonte: Mattos (2010)

No Brasil, o monitoramento das condições das rodovias quanto à aderência pneu-pavimento não é comum. A avaliação da macrotextura e da microtextura é realizada quase exclusivamente para o recebimento das obras novas ou restauradas. No entanto, em pavimentos aeroportuários, há uma preocupação maior quanto a essas condições. Nos aeroportos, por exigências de regulamentos nacionais e internacionais, há um sistema de monitoramento constante, de modo a propiciar maior segurança durante pousos e decolagens das aeronaves (MATTOS, 2009).

As atividades de avaliação de pavimentos têm recebido importantes contribuições resultantes do uso de tecnologias nas etapas de coleta e de processamento de dados. O uso de *softwares* conectados a dispositivos a laser e, mais recentemente, aplicativos em *smartphones*, que conseguem coletar e analisar os dados e imagens obtidos, são exemplos de novas tecnologias que auxiliam na etapa de avaliação, tornando a mais rápida, menos onerosa, mais prática e sem maiores interferências humanas nos resultados, sendo estes, portanto, mais acurados (ALMEIDA, 2018).

O desenvolvimento dessas tecnologias deve-se aos avanços e à capacidade da computação, que geraram técnicas, como o processamento digital de imagens (PDI), o qual tem mostrado resultados satisfatórios para a avaliação da textura de pavimentos. Com o uso dessa ferramenta, os métodos de avaliação da aderência pneu-pavimento podem ser facilitados, favorecendo, assim, o aumento da frequência das atividades de avaliação e, conseqüentemente, o nível de segurança das rodovias. Além disso, o PDI, em relação aos ensaios tradicionais, tem a vantagem de promover melhor reprodutibilidade dos resultados e menores riscos à segurança do operador, uma vez que não precisaria ficar exposto ao tráfego de veículos durante muito tempo para a realização dos ensaios (ARAUJO, 2017).

Pidwerbesky *et al.* (2006) e Santos (2008) aplicaram o PDI para avaliação da macrotextura, utilizando imagens obtidas por câmera digital e analisadas por meio do modelo matemático da Transformada Rápida de Fourier (FFT), com o uso do *software* Matlab. Nessas pesquisas, comparou-se o resultado obtido pelo PDI e o valor da macrotextura obtida pelo ensaio de mancha de areia, encontrando uma forte correlação entre os dois e concluindo, assim, que é possível medir a macrotextura através de imagens capturadas por câmeras digitais e posteriormente processadas.

Elunai *et al.* (2010) fizeram uma análise comparativa entre os valores de macrotextura, SMTD (*Sensor Measured Texture Depth*), obtidos por um perfilômetro a laser, e os resultados obtidos por PDI aplicado a imagens capturadas por uma câmera digital. No PDI, foram utilizados três métodos de análise, sendo eles: o método da Transformada Rápida de Fourier, de Autocorrelação e de *Wavelets*. Todos esses métodos resultaram

em uma boa correlação, sendo o método *Wavelets* o que apresentou maior valor de R^2 , igual a 0.866, o que indica a possibilidade de substituição dos ensaios tradicionais por métodos mais práticos utilizando a análise de imagens digitais.

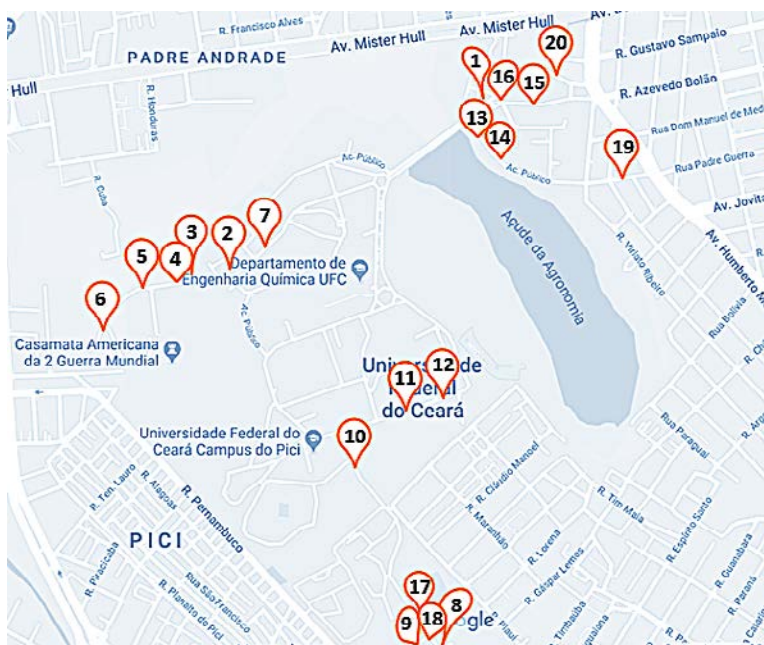
Tendo a vista as vantagens do uso de tecnologias na avaliação das condições dos pavimentos e a aplicabilidade dos avanços da computação, a avaliação da macrotextura a partir da análise digital de imagens mostra-se um caminho para o desenvolvimento de métodos de avaliação mais eficientes. Dessa forma, este trabalho busca realizar uma análise comparativa de mensuração da macrotextura de pavimentos asfálticos por meio do processamento digital de imagens e da profundidade média da mancha de areia.

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo

Os pontos escolhidos para compor a amostra de análise foram áreas quadradas e sem defeitos superficiais, representativas de cada trecho de pavimento asfáltico localizado dentro da Universidade Federal do Ceará (UFC), *campus* do Pici. Optou-se por todos os pontos dentro do *campus* devido à facilidade de acesso e à possibilidade de interromper o tráfego, quando necessário, sem causar grandes transtornos ao fluxo normal, devido ao baixo tráfego de veículos. A partir de uma breve vistoria nos trechos de pavimentação asfáltica, selecionaram-se pontos que, visualmente, mostravam texturas diferentes, totalizando 20 pontos. A Figura 3 apresenta o mapa com a localização dos pontos escolhidos.

Figura 3 - Pontos escolhidos na UFC - *campus* do Pici.



Fonte: Elaborado pela autora.

2.2 Ensaios de Mancha de Areia

Para cada ponto selecionado, realizou-se o ensaio da mancha de areia, o qual é recomendado pelo DNIT (2006) para a mensuração da macrotextura. Esse ensaio tem como objetivo determinar a profundidade de um volume de areia espalhado na superfície do pavimento. Para sua realização, utilizou-se como base a NBR 16504 (ABNT, 2016).

O procedimento consiste em limpar a superfície com uma escova de mão e espalhar 25.000 mm³ de um material com granulometria padronizada, utilizando um disco espalhador revestido de borracha e fazendo movimentos circulares até que não se conseguia espalhar mais material. Além disso, para a realização do ensaio utilizou-se um anteparo quadrado de madeira de 50 cm x 50 cm, mostrado na Figura 4, a fim de evitar interferência do vento durante o ensaio.

Figura 4 - Anteparo de madeira.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após espalhado o material, é medido o diâmetro do círculo em quatro posições igualmente espaçadas. Com a média dos diâmetros e com a relação entre o volume do material e a área do círculo, calcula-se a profundidade média da macrotextura, como é mostrado na Eq. (1). As etapas da realização do ensaio são mostradas na Figura 5.

$$H_s = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (1)$$

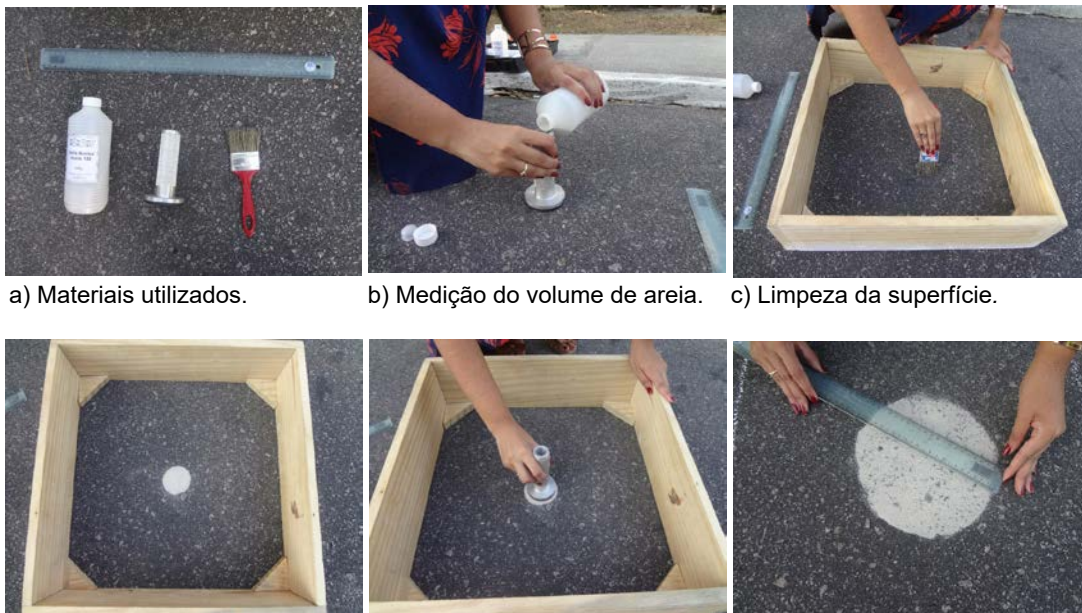
onde

H_s é a profundidade média da macrotextura (mm);

V é o volume do material granular espalhado;

D é o diâmetro médio da mancha de areia (mm).

Figura 5 - Procedimento do ensaio de mancha de areia.



d) Areia despejada em formato de cone. e) Espalhamento do material. f) Medição do diâmetro.

Fonte: Elaborado pela autora.

Com os resultados dos ensaios, foi feita a classificação dos pontos de acordo com as classes de macrot textura apresentadas pelo DNIT (2006), como mostra a Tab. (1).

Tabela 1 - Classes de macrot textura.

Classificação	HS (mm)
Muito Fina ou Muito Fechada	HS < 0,20
Fina ou Fechada	0,20 < HS < 0,40
Média	0,40 < HS < 0,80
Grosseira ou Aberta	0,80 < HS < 1,20
Muito Grosseira ou Muito Aberta	HS > 1,20

Fonte: DNIT (2006).

2.3 Processamento digital de imagens

As etapas que constituem o processamento digital de imagem, adotado nesta pesquisa têm como base a metodologia desenvolvida por Lucas Júnior (2018). Essa metodologia tem como princípio a contagem de *pixels* pretos de uma imagem binarizada a partir da determinação de um limiar de tom de cinza.

2.3.1 Aquisição de imagens

Para a aquisição das imagens digitais, fez-se uso de uma câmera digital de 16.2 *megapixels*. Nos locais de realização dos ensaios, foram capturadas imagens no horário entre 6 horas e 8 horas, a três diferentes alturas (a 60 cm, a 40 cm e a 20 cm), garantidas através de medições com uso de uma trena. Escolheu-se esse horário a fim de padronizar as imagens em relação à iluminação natural.

2.3.2 Pré-processamento

Utilizando o *software* Matlab R2017a, utilizou-se o comando *imread* para que a imagem em análise fosse lida. Como as imagens têm padrão RGB (*Red Green Blue*), utilizou-se o comando *rgb2gray* para transformar as cores da imagem em escala de cinza.

2.3.3 Segmentação

Nesta etapa, a imagem foi segmenta por limiarização, transformando-se em uma imagem binarizada. Utilizando o comando *im2bw*, testou-se vários limiares de tons de cinza a fim de visualizar o que melhor representava cada imagem. Esses limiares significam, aqui, um ponto na escala de tom de cinza a partir do qual se dividem os pixels brancos dos pretos na imagem binarizada. Assim, aos pixels com tom de cinza abaixo do limiar estabelecido, foi atribuído valor 0, indicando a cor preta, e aos pixels com tom de cinza acima do limiar, foi atribuído valor 1, indicando a cor branca.

2.3.4 Representação e descrição

Após binarizar as imagem, cada uma foi invertida, a fim de representar o pixels brancos pela cor preta e os pretos pela cor branca. Fez-se isso para que fosse possível a contagem dos pixels pretos, já que o Matlab consegue obter a soma de pixels brancos, ao invés dos pretos, que são os de interesse para essa análise.

2.3.5 Reconhecimento

Na etapa de reconhecimento, através do comando *bwarea* do Matlab, foi determinada a quantidade de pixels pretos, os quais indicam a profundidade da imagem. A partir disso, o resultado obtido foi comparado com os valores de macrot textura, a fim de verificar a existência de uma correlação entre o número de *pixels* pretos dados pelo PDI e a profundidade média da macrot textura obtida no ensaio da mancha de areia.

2.4 Análise e comparação dos resultados

A partir dos resultados de macrotextura obtidos pelo ensaio de mancha de areia e dos resultados obtidos pelo processamento digital de imagens, analisou-se a correlação dos dados, a partir da comparação dos resultados com uso de gráficos no *software* Excel. Utilizou-se a ferramenta da linha de tendência e o coeficiente de determinação (R^2). Além disso, realizou-se a comparação para cada classe de macrotextura determinada pelo DNIT (2006). Sendo assim, desenvolveram-se correlações individuais para os grupos de pontos com macrotextura média, aberta e muito aberta, a fim de verificar quais os melhores resultados obtidos. Para as classes de macrotextura muito fechada e fechada, não foram feitas comparações devido à ausência de pontos com essa classificação.

3 Resultados e discussões

3.1 Análise das imagens

Como já descrito anteriormente, as imagens foram capturadas em uma mesma faixa de horário. Esse critério tem importância na aquisição de imagens com características semelhantes de brilho e tom de cor, e sem as sombras dos agregados. Com base nisso, teve-se o cuidado de capturar imagens nas mesmas condições, a fim de poder reduzir diferenças entre as imagens e, assim, obter resultados satisfatórios.

Em relação à altura, analisando-se as imagens obtidas, verificou-se que é possível ter uma adequada visualização dos agregados e do ligante, e, com isso, inferir a diferença entre uma macrotextura aberta e uma fechada, por exemplo, mesmo a uma altura de 60 cm. A Fig. 6 (a) apresenta uma imagem de macrotextura fechada, enquanto que a Fig. 6 (b) apresenta uma imagem de macrotextura muito aberta, ambas obtidas a 60 cm de altura.

Figura 6 - Diferentes misturas e inferências de diferentes texturas.

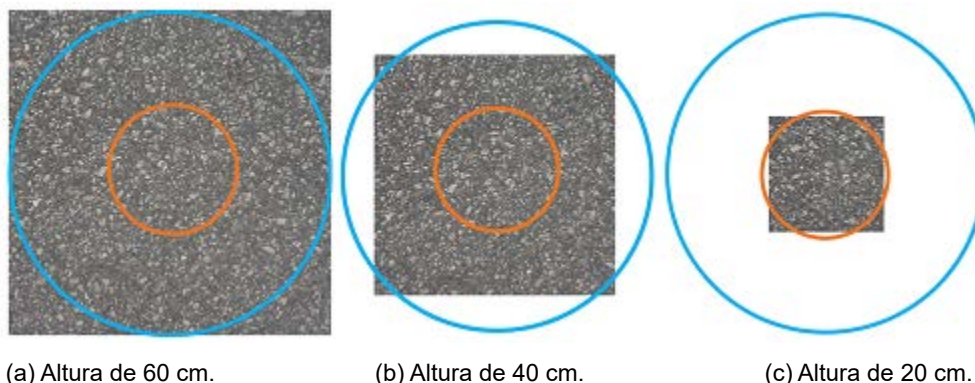


Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se, durante o processamento, que as imagens possuem maior nitidez no centro, enquanto que as bordas apresentam-se um pouco distorcidas e escuras. Com base nisso, optou-se por recortar as imagens de forma a retirar as bordas, deixando a área mais nítida e de um tamanho adequado que representasse a textura do pavimento no ponto analisado, o que resultou em imagens de 2505 x 2505 *pixels*. Preceder desse modo também colaborou no processamento das imagens, uma vez que uma imagem com menos *pixels* tem o tempo de processamento reduzido.

Analisou-se também a representatividade das áreas englobadas após o recorte das imagens. Para isso, foram desenhadas duas projeções da mancha de areia, sendo a de maior diâmetro de 35,7 cm, e a de menor diâmetro de 14,2 cm. A Figura 7 mostra essas projeções nas imagens coletadas nas três diferentes alturas, em que o círculo azul representa a maior mancha de areia encontrada e o círculo laranja, a menor.

Figura 7 - Projeção da mancha de areia nas imagens com alturas diferentes, recortadas com 2505 x 2505 pixels.



(a) Altura de 60 cm.

(b) Altura de 40 cm.

(c) Altura de 20 cm.

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nessas imagens, nota-se que, a à distância de 60 cm de altura, a área recortada consegue englobar todos os tamanhos das manchas de areia, indicando uma adequada representatividade para todos os pontos de análise deste trabalho. Já as áreas recortadas das imagens à distância de 40 cm de altura não conseguem abranger a maior mancha de areia completamente, porém, ainda assim representa uma parte considerável dela. Na imagem capturada à distância de 20 cm, a área recortada só consegue englobar de forma adequada a menor mancha de areia. Por outro lado, se a área do ponto escolhido tem textura homogênea, qualquer área, mesmo que pequena, deve representar o ponto. Sendo assim, espera-se que as três diferentes imagens consigam representar a macrotextura analisada.

Com as imagens recortadas, aplicou-se o PDI utilizando o Matlab como ferramenta de análise. As imagens foram analisadas individualmente, a fim de encontrar o limiar que melhor se adequasse, ou seja, o limiar que melhor representasse a profundidade da imagem, considerando-se que as áreas com concentração de pixels pretos significavam regiões mais profundas. Nessa busca por limiares que conseguissem mostrar a partes mais profundas da imagem, alguns agregados não eram bem representados, devido ao fato de possuírem a coloração mais escura ou por possuir ligante na superfície. Sendo assim, foram escolhidos limiares que conseguissem representar os dois aspectos.

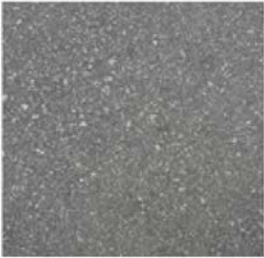
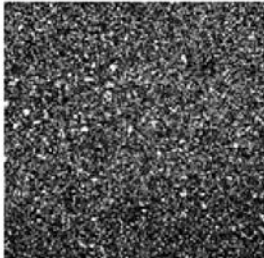

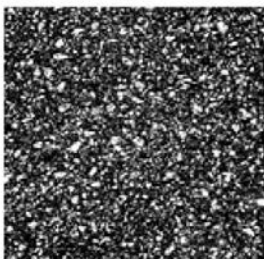

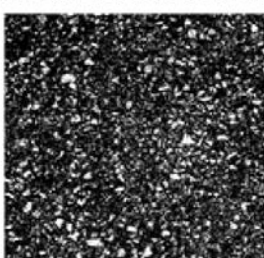

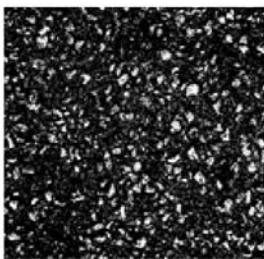
3.2 Análise comparativa dos dados de Mancha de Areia e PDI

Após a análise individual das imagens, determinou-se o limiar para cada uma delas, considerando-se as alturas de 20 cm, 40 cm e 60 cm. Nos subitens a seguir, serão apresentados os comparativos do resultado do PDI com os valores de profundidade de mancha de areia.

3.2.1 Determinação de limiares adequados a cada imagem

Na Tabela 2 é apresentado um ponto representativo para cada classe de macrotextura obtida, com suas respectivas imagens digitais, original e binarizada, para a altura de 60 cm, como forma de ilustrar o resultado do processamento.

Tabela 2 - Resultados para os pontos 14, 9, 3 e 15.

Ponto	HS (mm)	Classificação	Imagem original	Imagem binarizada
14	0.25	Fechada		
9	0.55	Média		
3	1.11	Aberta		
15	1.45	Muito aberta		

Fonte: Elaborado pela autora.

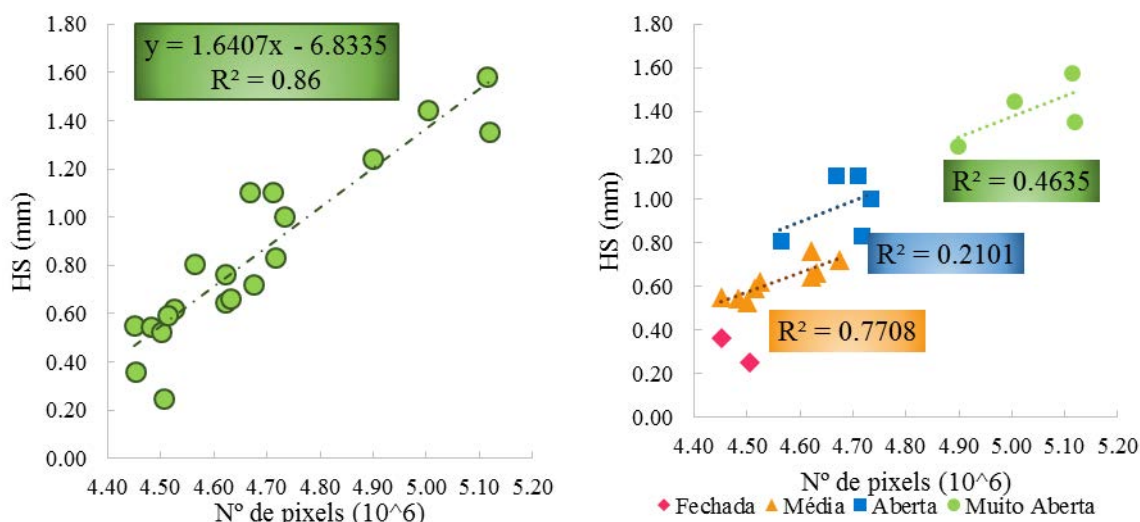
É apresentado na Tab. (3) o resultado do PDI de todos os pontos. Em seguida, nas Fig. 8 (a), 9 (a) 10 (a) são apresentados os gráficos de correlação entre os valores de profundidade média da macrotextura e o número de *pixels* obtidos por meio da análise digital para as três diferentes alturas. Além disso, na Fig. 8 (b), 9 (b) e 10 (b) são apresentados gráficos com a correlação para cada faixa de macrotextura.

Tabela 3 – Resultados das imagens de tamanho de 2505 x 2505 pixels.

ALTURAS			H = 20 cm		H = 40 cm		H = 60 cm	
Ponto	HS (mm)	Classe	Limiar	Nº de pixels (10 ⁶)	Limiar	Nº de pixels (10 ⁶)	Limiar	Nº de pixels (10 ⁶)
1	0.59	Média	0.560	4.51	0.570	4.56	0.530	4.57
2	0.65	Média	0.540	4.62	0.540	4.67	0.540	4.77
3	1.11	Aberta	0.560	4.71	0.560	4.87	0.550	4.89
4	1.11	Aberta	0.570	4.67	0.570	4.73	0.555	4.77
5	0.66	Média	0.550	4.63	0.550	4.69	0.550	4.73
6	1.24	Muito Aberta	0.570	4.90	0.560	4.85	0.560	4.80
7	0.55	Média	0.540	4.45	0.560	4.49	0.550	4.60
8	0.83	Aberta	0.570	4.72	0.520	4.69	0.520	4.75
9	0.55	Média	0.500	4.48	0.500	4.45	0.510	4.61
10	0.81	Aberta	0.550	4.56	0.520	4.67	0.520	4.68
11	0.53	Média	0.590	4.36	0.490	4.59	0.520	4.54
12	0.62	Média	0.560	4.52	0.570	4.51	0.540	4.63
13	0.76	Média	0.550	4.62	0.510	4.68	0.510	4.71
14	0.25	Fechada	0.510	4.50	0.510	4.47	0.510	4.59
15	1.45	Muito Aberta	0.590	5.00	0.560	5.20	0.560	5.09
16	0.36	Fechada	0.560	4.45	0.500	4.51	0.500	4.54
17	1.58	Muito Aberta	0.580	5.20	0.570	5.26	0.570	5.30
18	1.00	Aberta	0.580	4.73	0.560	4.88	0.540	4.83
19	0.72	Média	0.540	4.68	0.530	4.84	0.530	4.69
20	1.36	Muito Aberta	0.550	5.12	0.550	5.21	0.560	5.25

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 – Correlação entre número de pixels e HS para imagens a 20 cm de altura e tamanho de 2505 x 2505 pixels.

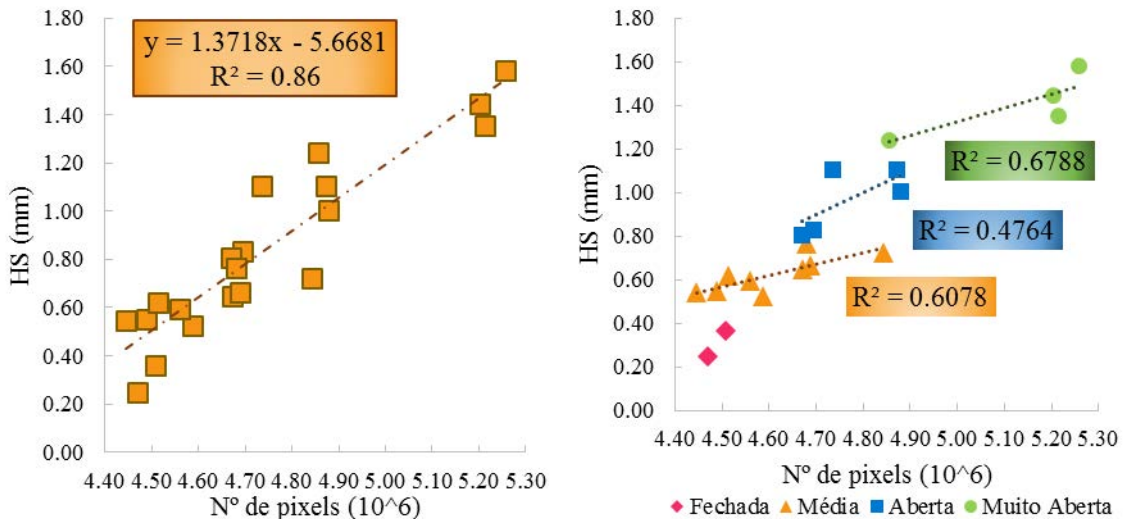


(a) Correlação para todos os pontos.

(b) Correlação para cada faixa de macrotextura.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 – Correlação entre número de *pixels* e HS para imagens a 40 cm de altura e tamanho de 2505 x 2505 *pixels*.

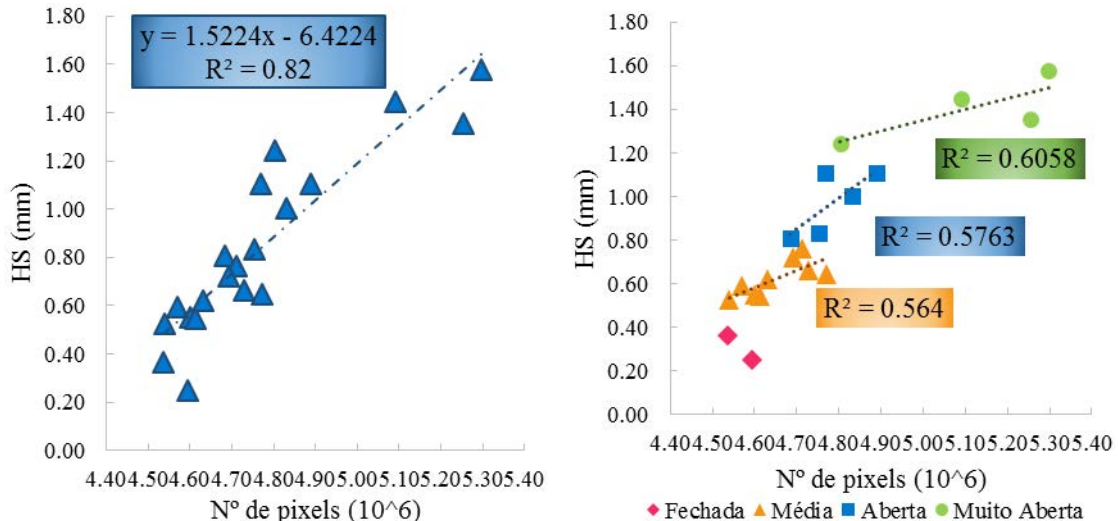


(a) Correlação para todos os pontos.

(b) Correlação para cada faixa de macrotextura.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 10 – Correlação entre número de *pixels* e HS para imagens a 60 cm de altura e tamanho de 2505 x 2505 *pixels*.



(a) Correlação para todos os pontos.

(b) Correlação para cada faixa de macrotextura.

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando-se os resultados mostrados nos gráficos das Fig. 8 (a), 9 (a) e 10 (a), verifica-se a existência de correlação considerável entre os valores de profundidade média de macrotextura e a quantidade de *pixels* pretos dado pelo PDI. O valor do coeficiente de determinação (R^2) igual a 0.86, na Fig. 8 (a), indica que o PDI consegue explicar a macrotextura em 86 % dos dados, o que é um valor satisfatório, estando próximo de 100%. Isto significa que o modelo de análise, que tem como base a contagem de *pixels* escuros, se adéqua aos dados de macrotextura, sendo a análise feita a partir da adaptação manual de um limiar para cada imagem.

Além disso, o valor de R^2 igual a 82%, na Fig. 10 (a), apesar de menor, também é suficiente para representar adequadamente os valores de profundidade média de macrotextura.

Observando-se a correlação separadamente, para cada classe de macrotextura, percebe-se uma grande redução no valor de R^2 , chegando a 21%. Dessa forma, pode-se entender que a análise da profundidade média de macrotextura obtém melhores resultados para o conjunto completo de pontos, enquanto que, analisando por classes, a correlação é quase inexistente. Deve-se observar, porém, que a quantidade de pontos para cada classe pode não ter sido suficiente para apresentar uma correlação satisfatória.

Analisando a influência da altura de captura das imagens, percebe-se que os resultados de R^2 divergem pouco. Verifica-se, porém, que foi possível obter correlações melhores para imagens capturadas mais próximas ao revestimento analisado. Isto já era esperado, tendo em vista que imagens mais aproximadas permitem distinguir melhor os agregados do ligante e, com isso, facilitam a identificação da textura.

Um aspecto que se buscou verificar foi o tamanho da imagem a ser processada, a fim de observar a qualidade dos resultados para arquivos de imagem menores que o escolhido como principal. Dessa forma, aplicou-se o PDI para as mesmas imagens, capturadas a 20 cm, a 40 cm e a 60 cm de altura, porém recortadas em tamanho quadrado de 1400 x 1400 *pixels*. A Tabela 4 apresenta os resultados de R^2 obtidos até aqui.

Tabela 4 – Resumo dos resultados de R^2 obtidos.

ALTURAS	20 cm	40 cm	60 cm
2505 x 2505 <i>pixels</i>	0.86	0.86	0.82
1400 x 1400 <i>pixels</i>	0.88	0.86	0.85

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados apresentados pela Tab. (4) evidenciam que o modelo de PDI aplicado também consegue explicar bem os valores de profundidade média de macrotextura, apesar da análise ser realizada em uma superfície menor. Os valores de R^2 iguais a 0.88, 0.85 e 0.84 mostram-se próximos aos valores de R^2 para imagens de 2505 x 2505 *pixels*, descritos anteriormente, indicando que a análise das imagens de uma superfície menor de 1400 x 1400 *pixels* consegue obter resultados satisfatórios, assim como em uma superfície maior, de 2505 x 2505 *pixels*, a partir da adequação dos limiares a cada imagem.

Os valores de R^2 para as faixas de macrotextura, assim como para as imagens de 2505 x 2505 *pixels*, reduziram consideravelmente, principalmente para a faixa de macrotextura aberta. Além disso, para os pontos de macrotextura média, que estão inclusos na faixa de maior quantidade de pontos, obteve-se bons resultados de correlação, variando de 70% a 80%. Isto pode ser um indicativo de que, quanto maior a quantidade de pontos, melhor é a representação de um modelo, gerando, assim, um valor de R^2 maior.

A utilização dessa metodologia de escolha manual de limiares foi necessária devido às particularidades de cada imagem. Dentre essas particularidades, têm-se o brilho devido à iluminação natural, apesar de todas as imagens terem sido capturadas em um mesmo horário do dia, a Fig. 11 mostra essa diferença de brilho. Além disso, o tom de cor dos agregados tem grande influência, bem como agregados com superfície recoberta por ligante, uma vez que, quando são mais escuros, são confundidos com o ligante e, por isso, a representação a partir da escolha de um limiar é prejudicada. Essa situação é mostrada na Fig. 12.

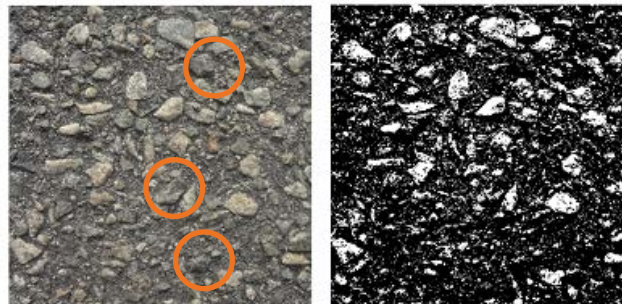
Figura 11 – Diferença de brilho nas imagens.



(a) Maior intensidade de brilho. (b) Menor intensidade de brilho.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – Influência da cor dos agregados no PDI.



a) Imagem original. b) Agregados mais escuros mal representados na imagem binarizada.
Fonte: Elaborado pela autora.

Outro fator notório na análise digital das imagens é a cor do ligante na mistura asfáltica. Isto se deve aos diferentes tipos de revestimentos, sendo alguns com maior quantidade de agregado mais fino, o que faz a cor do ligante ser menos aparente do que em uma mistura em que há predominância de agregados graúdos, ou até mesmo devido a um revestimento ser mais novo que outro. Com o envelhecimento do revestimento, o ligante geralmente muda a cor, devido à oxidação. Além disso, ocorre o desgaste do agregado devido ao tráfego de veículos. Tais mudanças resultam em imagens com aspectos diferentes. Esse fato pode ser visualizado nas imagens da Fig. 13.

Figura 13 – Misturas asfálticas distintas, com diferentes idades e cores de ligante.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.2 Análise de imagens para um único limiar

A ideia de se utilizar a análise digital de imagens para a verificação da macrotextura de pavimentos asfálticos deve-se à necessidade de métodos mais práticos, rápidos, econômicos e acurados para a avaliação das condições de segurança de pavimentos. Assim, seria ideal que houvesse um único limiar que conseguisse se adequar a todas as imagens, facilitando o processamento digital. Com base nisso, buscou-se, através de vários testes, um limiar que se adequasse a todas as imagens, garantindo uma correlação satisfatória entre o modelo utilizado de análise digital de imagens e os valores de profundidade média de macrotextura obtidos. A Tabela 5 apresenta os maiores coeficientes de determinação (R^2) encontrados para imagens capturadas nas três alturas estudadas neste trabalho (20 cm, 40 cm, e 60 cm) e seus respectivos limiares.

Tabela 5 – Limiares para cada grupo de imagens.

	2505 x 2505 pixels			1400 x 1400 pixels		
	H = 20 cm	H = 40 cm	H = 60 cm	H = 20 cm	H = 40 cm	H = 60 cm
Limiar	0.490	0.60	0.49	0.49	0.60	0.49
R^2	0.08	0.07	0.04	0.05	0.13	0.06

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados da Tab. (5), verifica-se que a correlação é muito baixa entre os resultados do PDI para um único limiar e os valores de profundidade média de macrotextura, uma vez que os valores de R^2 apresentaram-se muito pequenos. Isto se deve às características particulares de cada imagem e do próprio revestimento, como o tom de cor do agregado e do ligante e o brilho da imagem, descritos anteriormente. Sendo assim, a fim de poder aplicar o PDI utilizando um único limiar, seria necessário que as imagens tivessem o mesmo padrão de cores, ou seja, imagens em que as cores do ligante e dos agregados não se diferenciassem.

4 Conclusão

A aplicação de tecnologias e ferramentas computacionais nos procedimentos de avaliação de pavimentos tem mostrado resultados satisfatórios em relação à rapidez e praticidade na coleta de dados, à racionalização da mão de obra e à redução de custos. O PDI, um procedimento computacional, foi aplicado neste trabalho a fim de analisar imagens e extrair informações que se relacionassem com os valores de profundidade média de macrotextura, podendo ser um caminho para o desenvolvimento de métodos mais eficientes de avaliação da macrotextura.

Com base na visualização das imagens, verificou-se que, apesar de capturadas em um mesmo horário, elas apresentaram diferenças no tom de cor e no brilho, as quais interferiram significativamente nos resultados do processamento digital. Além disso, aspectos como a cor dos agregados, a idade do ligante e o tipo de mistura asfáltica também tiveram bastante interferência nas análises realizadas. Tais interferências podem ter ocorrido devido à análise de uma característica de três dimensões (3D), que é a textura, ter sido analisada como duas dimensões (2D), tendo como parâmetro os tons de cor das imagens.

A análise comparativa entre os resultados do PDI e os valores de profundidade média de macrotextura mostrou que há correlação entre os dois resultados. Os valores dos coeficientes de determinação, variando de 82% a 88%, indicam que os resultados obtidos pelo ensaio da mancha de areia são bem representados pelo modelo de análise digital de imagens adotado. Além disso, percebeu-se que os maiores valores de R^2 foram obtidos pelas imagens de 1400 x 1400 pixels, podendo concluir que a análise de imagens com menor porção da superfície do pavimento conduz a melhores resultados, porém seria necessária uma análise mais aprofundada, com mais dados, para verificar adequadamente esse aspecto.

A tentativa de definir um único limiar que pudesse representar todas as imagens não obteve sucesso, uma vez que a maior correlação obtida gerou um R^2 igual a 13%. As possíveis causas desse resultado são

as particularidades de cada imagem, como: a cor dos agregados; a presença de agregados recobertos por ligante; a cor do ligante, que é modificada devido ao envelhecimento; o tipo de mistura e o brilho da imagem.

De forma geral, verificou-se que existe uma correlação entre os resultados da análise digital de imagens e os valores de profundidade média de macrotextura. Essa correlação mostrou-se satisfatória quando são definidos limiares específicos para cada imagem, tendo em vista que elas apresentam características particulares que interferem de forma significativa no resultado do processamento digital. Conclui-se, assim, que é possível desenvolver métodos mais eficientes de avaliação de macrotextura, a partir da análise digital de imagens, contribuindo, dessa forma, para o desenvolvimento da avaliação das condições de segurança em pavimentos rodoviários, urbanos e aeroportuários.

Com relação às limitações e dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho, têm-se os diferentes aspectos de cada tipo de revestimento, como estado de oxidação, a coloração dos agregados, a iluminação, que depende da hora do dia em que são capturadas as imagens, e a presença de objetos que podem gerar sombra sobre o ponto de análise. Além disso, uma das dificuldades envolvidas foi a necessidade de isolamento de um trecho do pavimento para que fosse possível realizar o ensaio e obter as imagens. Apesar de o *campus* ser um local onde o fluxo de veículos não se mostra intenso, foi preciso ter o cuidado de escolher pontos em que se pudesse fazer o isolamento e houvesse um risco menor na coleta dos dados.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16504** – Misturas asfálticas – Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria – Método da mancha de areia. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E303-98** - Standard test method for measuring surface frictional properties using the british pendulum tester. West Conshohocken: ASTM International, 1998.

ALMEIDA, L. C. **Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias**. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

ARAUJO, V. M. C. **Avaliação da textura de misturas asfálticas para uso em revestimentos aeroportuários a partir do uso do processamento digital de imagens**. 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras/Abeda, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

ELUNAI, R. et al. Digital image processing techniques for pavement macro-texture analysis. *In: Australian Road Research Board Conference: Building on 50 years of road transport research*, 24., 2010, Melbourne. **Proceedings** [...]. Melbourne: ARRB Group, 2010. p. 1-5

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. **Influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS**. 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PIDWERBESKY, B. et al. **Road surface texture measurement using digital image processing and information theory**. Wellington: Land Transport New Zealand Research Report, 2006.

SANTOS, R. T. dos. **Análise da macrotextura de pavimentos através de processamento de imagens usando transformada de Fourier**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008.

Sobre os autores

Elisa da Silva Sousa

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Foi bolsista de Iniciação Científica na área de Engenharia Estrutural (2015-2016) e de Gerência de Pavimentos (2017-2018).

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Doutor em Engenharia de Transportes pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. Professor adjunto do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. *Affiliate Member in the American Society of Civil Engineers – ASCE*. Tem experiência em Planejamento do transporte aéreo, operação, manutenção e reabilitação de infraestruturas aeroportuárias, especialmente em pavimentos de pátios e de pistas de pouso e decolagem.

Recebido: 08/11/2018

Avaliação: 01/02/2019

Aceito: 04/02/2019