

# Avaliação da drenagem superficial em pista de pouso e decolagem por meio de processamento digital de imagens

*Evaluation of superficial drainage in runway by digital image processing*

Ana Kássia Lopes Gonçalves<sup>1</sup>, Francisco Heber Lacerda de Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, anakassia@det.ufc.br

<sup>2</sup>Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, heber@det.ufc.br

**Recebido:**

22 de dezembro de 2020

**Aceito para publicação:**

23 de março de 2021

**Publicado:**

8 de dezembro de 2021

**Editor de área:**

Kamilla Vasconcelos

**Palavras-chave:**

Escoamento superficial.

Macrot textura.

Aderência.

**Keywords:**

Superficial runoff.

Macrot texture.

Adherence.

**RESUMO**

A aderência pneu-pavimento fator preponderante para minimizar episódios de hidroplanagem. As metodologias convencionais de avaliação de textura demonstram-se ineficientes e pouco confiáveis, em razão da intervenção humana no ensaio. Por outro lado, o desenvolvimento de novas tecnologias proporcionou avaliações mais ágeis por intermédio de técnicas como o processamento digital de imagens (PDI). Nesse sentido, este artigo tem por objetivo analisar do escoamento superficial das águas pluviais com avaliação da textura de revestimentos aeroportuários por meio do processamento digital de imagens. O estudo de campo foi realizado em um aeródromo do estado do Ceará e buscou correlações entre o ensaio de mancha de areia e três metodologias de PDI. Com taxas de sucesso de mais de 70%, segundo a classificação de macrot textura, concluiu-se que o método de contagem de *pixels* mostrou-se eficiente para análise da macrot textura em situações em que há presença de lâmina d'água no revestimento.

**ABSTRACT**

The tirepavement adherence is a major factor to minimize episodes of hydroplaning. Conventional texture assessment methodologies prove to be inefficient and unreliable, due to human intervention in the test. On the other hand, the development of new technologies has provided more agile assessments through techniques such as Digital Image Processing (DIP). In this sense, this paper aims to analyze of the superficial runoff of the rainwater with evaluation of the texture of airport coatings through DIP. The field study was carried out at an aerodromo in the state of Ceará and sought correlations between the Sand Patch Test and the three DIP methodologies presented. With success rates of more than 70% according to the macrot texture classification, it was concluded that the *pixel* counting method proved to be efficient for analyzing the macrot texture in situations where there is a presence of water in the pavement.

DOI:10.14295/transportes.v29i4.2521



## 1. INTRODUÇÃO

A ocorrência mais relatada pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (Santos; Almeida e Peixoto, 2018) para acidentes aeronáuticos ocorridos entre 2008 e 2017 foi a da perda de controle no solo com 24,03% dos acidentes, e uma das causas desse tipo de ocorrência é o acúmulo de água em pista de pouso e decolagem (PPD). Esse acúmulo promove a ocorrência do fenômeno conhecido como hidroplanagem ou aquaplanagem, que é gerada a partir da presença de fluido contaminante (geralmente água, gelo e borracha provenientes dos pneus das aeronaves) que se interpõe entre o pneu e o revestimento, resultando na perda do contato da aeronave com a PPD.

Uma característica necessária para se evitar a hidroplanagem é a textura do revestimento, sendo esta responsável pela aderência pneu-pavimento e pela expulsão das águas pluviais. Uma efetiva interação pneu-pavimento pode ser conseguida por meio de textura e de drenagem adequadas. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2018) regulamenta ensaios para controle dos parâmetros de aderência. Todavia, as restrições nos métodos convencionais fazem com que os resultados não sejam confiáveis. Entre as desvantagens estão o tempo de levantamento *in situ*, o impedimento das operações aéreas, a interrupção da PPD – sobretudo na maioria dos aeroportos brasileiros que dispõem de apenas uma PPD –, operadores treinados e resultados de difícil repetibilidade, que acabam por dificultar a obtenção de resultados mais acurados.

Com o passar dos anos, muitos pesquisadores (Pidewerbesky *et al.*; 2006; Araujo, V. M. C.; I. S, Bessa e V. T. F. Castelo Branco, 2015; Puzzo *et al.*, 2017; Mataei *et al.*, 2018 e Gonçalves, A. K. L. (2020) estudaram deficiências dos métodos tradicionais e avançaram nas técnicas de avaliação por processamento digital de imagens (PDI). Porém, pouco se correlacionam as características de textura à capacidade de escoamento do revestimento, ou seja, técnicas que consideram a avaliação da drenagem. Nesse sentido, demonstra-se a importância do monitoramento das características da textura em situação com presença de lâmina d'água no revestimento para a segurança das PPD. Diante do exposto, o objetivo geral deste artigo é analisar o escoamento superficial das águas pluviais com avaliação da macrotextura de revestimentos distintos em pistas de pouso e decolagem por meio do processamento digital de imagens.

## 2. ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO, HIDROPLANAGEM E PDI

Segundo a ANAC (2018), a aderência de uma PPD é a propriedade física caracterizada pela força de contato entre os pneus da aeronave e a superfície da camada de rolamento que assegura à aeronave resistência à derrapagem e controle direcional. As condições de aderência da PPD são fornecidas, principalmente, pelo coeficiente de atrito e pela textura superficial (microtextura e macrotextura).

A macrotextura é função da granulometria dos agregados utilizados na mistura asfáltica podendo ser classificada como fina ou grosseira. Dentre outros fatores, a macrotextura está diretamente ligada ao fenômeno de aderência existente entre o pneu e o pavimento, sendo associada ao tempo de drenagem desta mesma lâmina d'água (ICAO, 2002). Essa lâmina d'água formada em um revestimento com macrotextura inadequada é capaz de provocar o fenômeno chamado de hidroplanagem que ocorre quando os pneus perdem totalmente o contato com a superfície do pavimento em razão da presença da água que se interpõe entre o pneu e o pavimento (Rodrigues Filho, O. S., 2006).

Alguns revestimentos são capazes de ter um melhor escoamento de fluidos em função de suas características, como o Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF), o Concreto Asfáltico (CA) com *grooving* e a Camada Porosa de Atrito (CPA). O MRAF é aplicado com medida de conservação preventiva ou corretiva, garantindo melhor desempenho funcional do revestimento; o *grooving* é caracterizado por ranhuras feitas em pistas aeroportuárias que evitam o acúmulo de água pluvial e o deslizamento das aeronaves durante o pouso; e a CPA é um revestimento permeável de granulometria aberta que torna a drenagem da água mais eficiente.

Muitos estudos demonstraram a relação entre o contato pneu-pavimento no pavimento molhado e características da textura da superfície do pavimento. Ferreira, P. N. (2002); Rodrigues Filho, O. S. (2006); Aps, M. (2006); Silva, J. P. S. (2008); Rodrigues, A. C. (2013) e Leocádio, A. Da S. e C. A. Frota (2018) utilizaram os ensaios convencionais para evidenciar a importância das

características da textura do pavimento na segurança de aeródromos e de rodovias e para sugerir que a superfície do pavimento seja monitorada continuamente.

Além das técnicas tradicionais, os avanços significativos na tecnologia de *laser* e na área computacional facilitaram a criação de vários sistemas para obter a macrotextura em velocidades de tráfego. Esses novos sistemas desenvolvidos por alguns pesquisadores, como Jayawickrama, P.; R. Prasanna e S. Senadheera. (1996); Walker, R. S. e L. D. Payne. (2003) e Schmiedel, B.; F. Gauterin e H. J. Unrau (2018), utilizam técnicas nas quais um veículo se move em velocidades normais para coletar informações da superfície do pavimento e da drenagem superficial, evitando fechar a pista para avaliação.

Enquanto isso, foram desenvolvidos processos que capturam e analisam imagens para obter informações a partir delas. Na pavimentação, tal procedimento pode ser utilizado para análises sobre textura, defeitos, dentre outros. O processamento de imagens está ligado a esses novos métodos que manipulam imagens, envolvendo diversos processos de tratamento da imagem. O PDI tem por finalidades a manipulação da imagem previamente gerada e a extração de informações a partir desta. Gonzalez e Woods (2010) consideram que os passos fundamentais para o PDI são: aquisição de imagens, processamento de imagens, segmentação, extração de características e reconhecimento de padrões.

Com os avanços da tecnologia e do poder computacional foram inseridos alguns sistemas capazes de medir parâmetros de textura mais rapidamente. Para Gonzalez e Woods (2010), as três modalidades principais utilizadas em PDI para a medição de texturas são: estatística, estrutural e espectral. A transformada de Fourier é um exemplo de abordagem espectral, em que se detecta a periodicidade global em uma imagem, pois as posições desses padrões periódicos são identificadas por meio de picos de alta-energia no espectro. As informações das imagens podem ser extraídas em função das mudanças relativas à intensidade de iluminação entre *pixels* adjacentes em uma imagem. A intensidade de luz de um *pixel* é alta e a do *pixel* ao lado é baixa; essa diferença é um número grande, o que indica alto contraste (quando há objetos diferentes na imagem) e alta frequência (Pidewerbesky *et al.*, 2006).

As técnicas mais modernas de PDI utilizam câmeras ou *scanners* para capturar as imagens e computadores, onde são instalados *software* que realizam o tratamento dos dados em bases estatísticas. A literatura técnica que trata de PDI cresceu e ganhou mais atenção nos últimos anos (Araújo, 2017). Pidewerbesky *et al.* (2006); Araujo, V. M. C.; I. S, Bessa e V. T. F. Castelo Branco (2015); Araújo (2017) e Sousa, E. S. e F. H L. Oliveira (2019) avaliaram a textura superficial dos revestimentos por intermédio do PDI, sejam por suas abordagens de campo ou de laboratório.

Muitos estudos apresentados revelam a aplicabilidade de métodos computadorizados na análise de macrotextura. Porém, a associação do pavimento molhado com a macrotextura é pouco avaliada por tais técnicas, tanto em rodovias quanto em aeroportos. Puzzo *et al.* (2017) e Mataei *et al.* (2018) foram inovadores em investigar o comportamento da textura do revestimento em caso de chuva em revestimentos rodoviários com PDI. Gonçalves, A. K. L. (2020) examinou revestimentos asfálticos em PPD. Esses estudos concluíram que é possível averiguar a capacidade drenante de um revestimento a partir da análise da macrotextura, utilizando PDI.

### 3. MÉTODOS E TÉCNICAS

A pesquisa foi realizada no Aeródromo do Catuleve, situado na cidade de Aquiraz, no estado do Ceará, localizada a 32 km da capital. Esse aeródromo é de natureza privada e possui PPD com

720 m de comprimento, 18 m de largura e designação de cabeceiras 13 e 31. O revestimento da PPD era, inicialmente, de concreto asfáltico, construído no ano de 2010, e, no ano de 2018, passou por reconstrução, sendo recoberta parte da PPD com MRAF em uma extensão de 300 m, a partir da cabeceira 13. As condições de macrotextura e de drenabilidade foram avaliadas em toda a extensão da PPD, em ambos os revestimentos.

O estudo foi dividido em três fases: na primeira, foi realizado o ensaio de mancha de areia (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016); na segunda, procedeu-se à captura das imagens e ao processamento das imagens, a partir da contagem de *pixels*, utilizando os *software* MATLAB (no qual foi desenvolvido um algoritmo) e QGIS 2.18 *with* GRASS, e da aplicação da transformada de Fourier, por meio de código desenvolvido para análise da drenagem; e na terceira, foi executada a análise dos dados obtidos com o PDI e com o ensaio convencional de mancha de areia.

### 3.1. Ensaio convencional

O levantamento realizado em campo para estipular a macrotextura foi o ensaio de mancha de areia (ABNT, 2016), que é utilizado para determinar a média da profundidade da altura da areia que preenche os sulcos da superfície dos revestimentos asfálticos.

Para melhor análise dos dados, optou-se em segmentar a PPD em função de suas cabeceiras e de seu comprimento. Nas cabeceiras, o espaçamento entre os pontos foi de 10 m, em virtude de serem as áreas mais solicitadas da PPD. Desse modo, as cabeceiras 13 e 31 possuem, respectivamente, 10 e 7 pontos. No comprimento, os pontos foram espaçados de acordo com o espaçamento da PPD, ou seja, a cada 20 m. Ao total, foram obtidos dados em 42 pontos na extensão da PPD, em que alguns pontos foram excluídos por se localizarem sobre a sinalização (Figura 1).

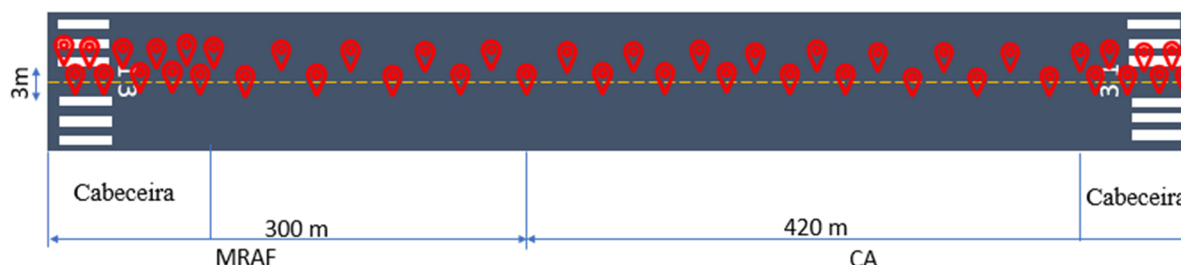


Figura 1. Localização dos pontos analisados

### 3.2. Processamento das imagens

Para a extração de características das imagens, realizou-se levantamento fotográfico com base na técnica de Mataei *et al.* (2018), que consistiu no uso de câmera digital GoPro HERO7 de 12 *megapixels*. Para a captura dos vídeos do escoamento da água, foi necessário saturar o pavimento com 0,5 litros de água colorida e com tinta branca lavável para melhor visualização do escoamento. A câmera foi colocada sempre paralela e a 20 cm do revestimento, garantido, por meio de uma base, capturar 40 s de drenagem. Foram necessários dois operadores para o despejo do líquido, sendo uma das funções do segundo operador segurar a câmera em razão dos ventos presentes na região que impossibilitavam que a câmera se mantivesse parada.

O procedimento foi realizado no período da manhã, entre 7:00 e 11:00 h, para diminuir a interferência dos raios solares nas fotografias. Mesmo que o líquido branco despejado tenha refletido a luz solar, ocasionando brilho em algumas imagens, ele não interferiu nos resultados, pois a parte refletida é considerada *pixels* brancos, componente analisado neste estudo.

Na etapa de processamento das imagens foram verificadas metodologias diferentes, a fim de encontrar uma que melhor analisasse a macrotextura dos revestimentos e, a partir disso, verificar a interferência quanto às condições de drenagem. A primeira delas foi fundamentada em Sousa, E. S. e F. H. L. Oliveira (2019), que utilizaram o *software* MATLAB R2017a para contagem de *pixels* pretos de uma imagem binarizada, a partir da determinação de um limiar de tom de cinza. Ainda com o MATLAB R2017a, foi desenvolvido código com base no algoritmo de Pidwerbesky *et al.* (2006), que utilizou a transformada de Fourier para a verificação de macrotextura em revestimentos asfálticos.

Para extrair as imagens dos vídeos, desenvolveu-se código no MATLAB R2017a capaz de extrair quadros de imagens dos vídeos com o auxílio do *software* FFmpeg 4.2. Com esse código, quadros são retirados a cada 1 s, desde o tempo zero até 40 s de drenagem. Optou-se por cortar as fotos em tamanho de 400 x 400 *pixels* a partir do centro do quadro, para retirar as interferências, como sombras, e facilitar o processamento das imagens. As imagens foram convertidas em formato .TIFF, e o mesmo conjunto de imagem foi utilizado para os três métodos apresentados.

### 3.2.1. Método de contagem de *pixels*

Este método foi utilizado no código desenvolvido no MATLAB R2017a e no QGIS 2.18 *with* GRASS, e tem a função de analisar a drenagem do pavimento a partir da contagem de *pixels* brancos presentes nas fotografias.

No MATLAB R2017a, criou-se uma função para cálculo da área de *pixels*. Inicialmente, a imagem foi lida por meio do comando *imread*. Como as imagens seguem o modelo de cor RGB (*red, green and blue*, ou em português: vermelho, verde e azul), em que cada *pixel* da imagem é representado por três valores inteiros de intensidade de 0 a 255, que correspondem às cores, utilizou-se a função *rgb2gray* para deixá-la no padrão monocromático, ou seja, em tons de cinza, normalizados no padrão de intensidade entre 0 e 1.

Para o processo de segmentação da imagem, utilizou-se a técnica de binarização. Nesse procedimento, estabeleceu-se um limiar (*threshold*) e foram convertidos os *pixels* maiores do que o limiar para 1 e o restante dos *pixels* para 0. Por motivo da complexidade das imagens, a limiarização automática é uma questão problemática. Para a escolha de um limiar automatizado adequado, foi aplicado o método de Otsu, utilizando a função *graythresh* para o *frame* inicial de cada ponto. Após a determinação dos limiares de cada ponto, retirou-se uma média para obter um limiar único para cada revestimento.

Para extrair as características das imagens que foram analisadas, utilizou-se o comando de *sum*. Foi realizada a contagem dos *pixels* brancos que representam, na imagem, a área preenchida por água. Após essa contagem, desenvolveu-se algoritmo que subtraiu a quantidade de *pixels* do primeiro *frame* com o último *frame* e, assim, calculou-se o percentual drenado, que representa a quantidade de água drenada dos sulcos entre os agregados, por meio da porcentagem de *pixels* brancos que diminuiu entre o primeiro *frame* e o último. Esse percentual é, então, comparado com os resultados obtidos com o ensaio tradicional.

No QGIS 2.18 *with* GRASS, optou-se por utilizar as *toolboxes* disponibilizadas para processamento de imagens. Seguindo as fases do PDI pelo método de contagem de *pixels*, a imagem é convertida de RGB – banda vermelha da imagem (R), banda verde da imagem (G) e banda azul da imagem (B) – em imagem monocromática (IM) por meio da Equação 1, utilizando a ferramenta Calculadora Raster. Essa equação é a mesma utilizada no MATLAB R2017a, em seus códigos de conversão para tons de cinza.

$$IM=0,299\times R+0,587\times G+0,114\times B \quad (1)$$

Com a imagem binarizada, calculou-se a média dos níveis de cinza (0-255) de todos os *pixels* abaixo de cada limiar, ou seja, apenas os *pixels* com valores de 1 nas imagens segmentadas, por intermédio da *toolbox* Slicer. O limiar é definido de acordo com os limiares encontrados pelo método de contagem de *pixels*, a fim de obter comparação entre as metodologias. Definido os intervalos do limiar, foi possível contabilizar a quantidade de *pixels* brancos das imagens por meio da ferramenta *Statistics Raster Pixel Count by ClassBreak*.

### 3.2.2. Processamento pelo MATLAB por transformada de Fourier

O processamento utilizando a aplicação da transformada de Fourier ou da *fast Fourier transform* (FFT) teve como base o procedimento de Pidwerbesky *et al.* (2006). O método é fundamentado no conjunto de informações que pode ser medido em uma imagem a partir da luminância de *pixels*, ou seja, quanto maior o contraste entre os *pixels* da imagem, menor o acúmulo de água no revestimento.

Foi desenvolvido um código no MATLAB R2017a para ler as informações contidas nas imagens. Como parte do pré-processamento, as imagens foram lidas por intermédio do comando *imread* e transformadas em monocromáticas pela função *rbg2gray*.

Para a aplicação da FFT, a imagem foi separada em regiões quadradas, denominadas de faixas de frequência, nas quais a FFT é aplicada do centro para fora, formando espécies de anéis na imagem. O código aplica a FFT por meio da função *fft2*, segregando os componentes da frequência. Ao serem somadas as transformadas de cada anel, foi possível produzir os gráficos de distribuição de frequência. A área abaixo do gráfico da distribuição de frequências das imagens foi calculada por meio da função *trapz*, presente no MATLAB R2017a. Essa função realizou integração numérica pelo método trapezoidal que aproxima a integração em um intervalo, dividindo a área em trapézios com áreas mais facilmente computáveis.

Com o cálculo das áreas de cada imagem foi possível fazer a comparação com as respectivas profundidades médias das manchas de areia. Para essa comparação foram correlacionadas as profundidades das manchas de areia com a porcentagem que decaiu de área abaixo do gráfico da distribuição de frequências das imagens. A porcentagem foi calculada a partir da Equação 2.

$$\% \text{ drenada FFT} = \frac{(\text{Área do gráfico de distribuição do Frame 40} \times 100) \div \text{Área do gráfico de distribuição do Frame 01}}{\quad} \quad (2)$$

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Ensaio convencional

O trecho correspondente ao revestimento de MRAF, cujos resultados do ensaio de macrotextura possuem profundidade média de areia (Hm) de 1,02 mm, com desvio padrão de 0,25, é classificado como textura aberta. O segundo trecho inicia-se com revestimento em Concreto Asfáltico (CA) e possui profundidade média de macrotextura de 0,70 mm, com desvio padrão de 0,17, sendo classificado como textura média.

Na Figura 2, é possível visualizar as variações de profundidade de macrot textura em todo o comprimento da PPD. Observa-se que todos os pontos do MRAF se encontram acima do limite mínimo de profundidade de macrot textura exigido pela ANAC (2018) de 0,60 mm. O CA apresenta pontos em que o valor dessa profundidade é abaixo do recomendado. Possivelmente, a macrot textura desse trecho é menor em função da própria característica da mistura ser mais densa e fechada do que o MRAF, além do polimento e do desgaste do revestimento decorrentes aos 8 anos de operação da PPD. Além disso, também é possível notar maiores valores de macrot textura nos pontos finais dos revestimentos (MRAF e CA), em razão da degradação da PPD que possibilita superfície mais aberta e pode ter ocorrido em consequência da baixa frequência de manutenção.

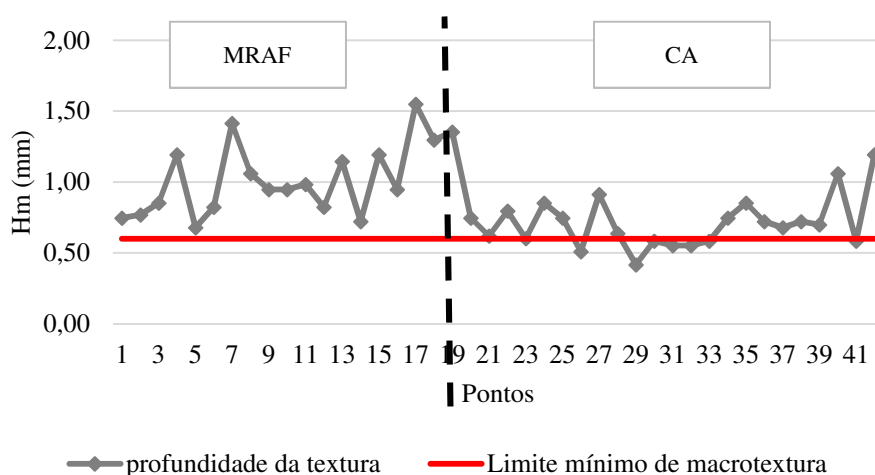


Figura 2. Variação da profundidade da macrot textura

## 4.2. Processamento das imagens

Processaram-se as imagens separadamente para cada revestimento (MRAF e CA) e para cada momento do vídeo a ser analisado. Alguns pontos foram expurgados em virtude da presença da tinta de sinalização na PPD e da qualidade das imagens, o que impossibilitou a análise. Cerca de 8 pontos foram excluídos, em sua maioria no revestimento de CA, por efeito do forte vento no dia do levantamento, mesmo com a presença de operador dedicado a segurar o equipamento.

Iniciou-se com a determinação do limiar ótimo por meio do método de Otsu, que definiu quatro limiares a partir da média do limiar de cada ponto processado. Para evidenciar a segmentação entre os *pixels* brancos e os *pixels* pretos da imagem, obtiveram-se limiares diferentes para as imagens no momento zero (*Frame 01*) e com 40 s (*Frame 40*) do vídeo. Os limiares foram de 0,68 (*Frame 01*) e 0,59 (*Frame 40*) no MRAF e de 0,71 (*Frame 01*) e 0,62 (*Frame 40*) no CA.

### 4.2.1. Método por contagem de *pixels*

O método considera a quantidade de *pixels* brancos que decaem com o escoamento do líquido e foi aplicado no MATLAB e no QGIS. Processou-se inicialmente no MATLAB. Com a determinação da faixa de limiares, processaram-se as imagens para cada limiar com os *frames* correspondentes ao primeiro segundo (*Frame 01*) após a saturação do revestimento e ao tempo de 40 s de escoamento (*Frame 40*).

Iniciou-se o procedimento com o MRAF. Para a análise, instituiu-se o limiar mais próximo coincidente entre os *frames* 01 e 40, sendo este de 0,61. Após o cálculo da quantidade de *pixels* brancos para o limiar de 0,61, determinou-se a porcentagem drenada da água para os *frames* 01 e 40. Para o CA, seguiu-se o mesmo método aplicado ao MRAF. Então, foi determinado um limiar médio para as imagens de CA dos *frames* 01 e 40. O limiar ótimo dos *frames* foi, respectivamente, de 0,72 e 0,62. Calculou-se também a quantidade de *pixels* brancos para o limiar coincidente de 0,65.

O MRAF obteve média de porcentagem drenada de líquido de 59,51%, com desvio padrão de 14,75%. Como esperado, o revestimento de CA teve média de porcentagem drenada de 57,28%, com desvio padrão de 7,92%. A pouca diferença de porcentagem entre os revestimentos pode ter acontecido por motivo da alta variação do CA na sua classificação de macrotextura e, conseqüentemente, na porcentagem drenada. E, assim como no ensaio de mancha de areia, a porcentagem drenada pode ser sensível a uma possível faixa de classificação. Na profundidade média de macrotextura do CA, quando adicionado o desvio padrão de 0,17 mm, sua classificação passa a ser considerada aberta, bem como no MRAF.

Para o MRAF, após o tratamento dos dados, os pontos considerados coerentes foram submetidos a uma nova análise de correlação, sendo observados os resultados com correlação mais adequada entre a profundidade média de macrotextura e a porcentagem drenada de líquido ( $R = 0,72$ ), com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,52 para a equação linear.

O teste estatístico de regressão linear gerou equação explicativa dos modelos linear e polinomial (Equação 3). Para verificação dos dados, substituíram-se, na equação, os valores da porcentagem drenada para previsão da profundidade média de macrotextura no modelo linear. A Tabela 1 demonstra a profundidade média de macrotextura medida em campo e a prevista pelo modelo, bem como sua classificação de acordo com a macrotextura.

$$Hm(\text{modelo}) = 0,0136 \times (\% \text{ drenada}) + 0,237 \quad (3)$$

No CA, com base na profundidade de macrotextura e na porcentagem drenada, verificou-se a correlação entre os métodos ( $R = 0,29$ ). Porém, ao observar fraca correlação, optou-se em realizar teste estatístico de regressão linear para a determinação do  $R^2$ , no qual se obteve  $R^2$  de 0,08 para a equação linear e 0,49 para a equação polinomial, e equação explicativa do modelo, que também mostrou fraca relação entre os dados.

O modelo estatístico não explicou adequadamente o fenômeno para os dados de CA. Então, seguiu-se com a verificação do modelo para entendimento do fenômeno. Os dados de porcentagem drenada foram aplicados na equação explicativa do modelo (Equação 4). Na Tabela 1, estão demonstradas a profundidade de macrotextura medida em campo e suas respectivas classificações.

$$Hm(\text{modelo}) = 0,0051 \times (\% \text{ drenada}) + 0,4383 \quad (4)$$

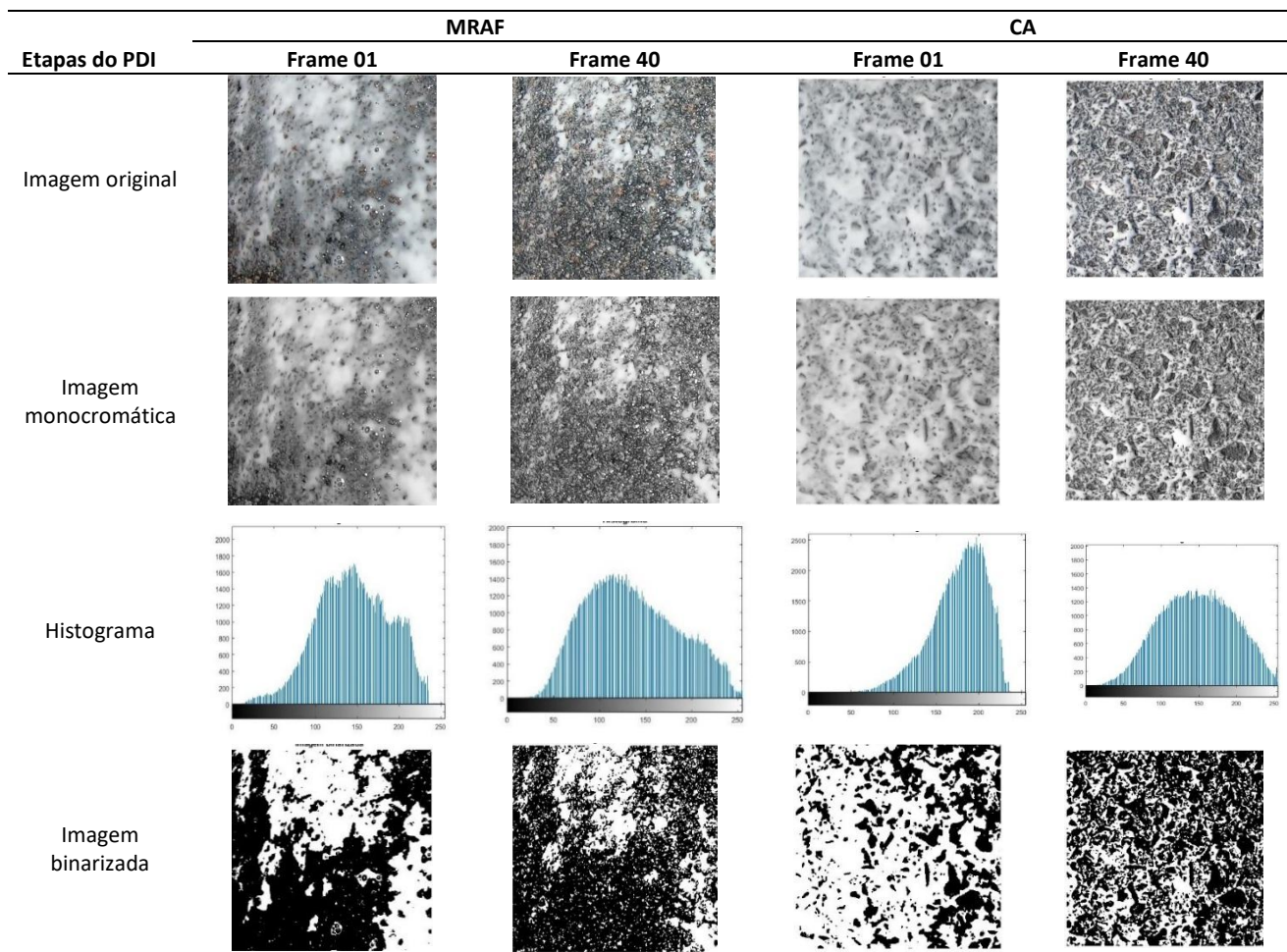
Os pontos em negrito da Tabela 1 indicam que o modelo consegue prever a classificação de macrotextura do revestimento. Assim, a equação do modelo consegue ser aplicada para 77% dos pontos no MRAF e para 76% dos pontos no CA. Todavia, o modelo não consegue ser satisfatório nas macrotexturas abertas, em razão da amplitude do intervalo de profundidade média de areia na sua classificação da macrotextura, mas que beneficiaria a segurança das operações de pouso e decolagem. Além do mais, para a ANAC (2018), há maior importância na classificação da macrotextura em si do que no valor específico, exceto nos casos em que a profundidade média de macrotextura esteja abaixo do valor mínimo.



**Tabela 1 – Classificação de Hm de campo versus modelo**

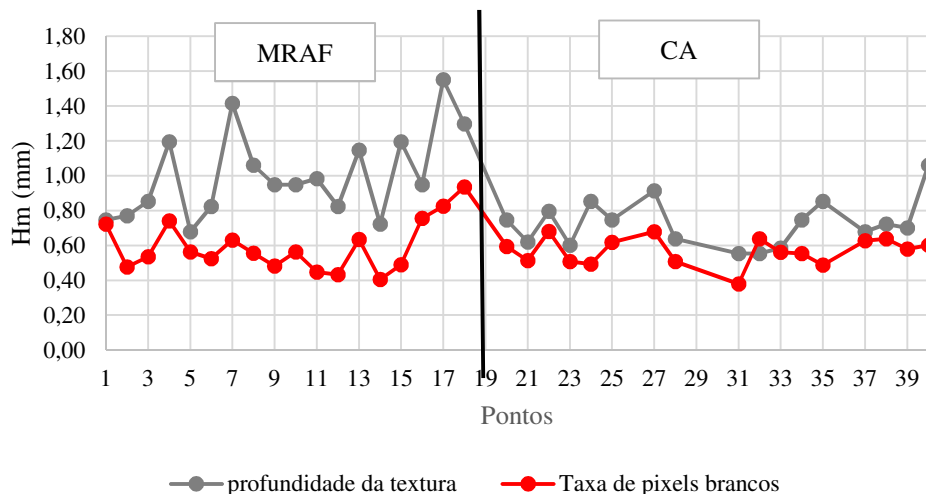
Pontos	MRAF				CA				
	Hm (mm) campo	Classe campo	Hm (mm) modelo	Classe modelo	Pontos	Hm (mm) campo	Classe campo	Hm (mm) modelo	Classe modelo
5	0,68	Média	1,00	Aberta	31	0,55	Média	0,70	Média
14	0,72	Média	0,79	Média	32	0,55	Média	0,63	Média
1	0,77	Média	0,89	Aberta	33	0,58	Média	0,76	Média
2	0,82	Aberta	0,95	Aberta	23	0,60	Média	0,70	Média
6	0,85	Aberta	0,96	Aberta	21	0,62	Média	0,70	Média
12	0,95	Aberta	0,89	Aberta	28	0,64	Média	0,78	Média
3	0,95	Aberta	1,00	Aberta	38	0,68	Média	0,76	Média
9	1,06	Aberta	0,99	Aberta	39	0,70	Média	0,73	Média
10	1,15	Aberta	1,10	Aberta	36	0,72	Média	0,69	Média
16	1,19	Aberta	0,90	Aberta	37	0,72	Média	0,76	Média
11	1,30	Muito aberta	1,51	Muito aberta	20	0,75	Média	0,74	Média
8	1,42	Muito aberta	1,09	Aberta	34	0,75	Média	0,72	Média
13	1,55	Muito aberta	1,36	Muito aberta	22	0,80	Média	0,78	Média
-	-	-	-	-	24	0,85	Aberta	0,69	Média
-	-	-	-	-	35	0,85	Aberta	0,72	Média
-	-	-	-	-	26	0,91	Aberta	0,75	Média
-	-	-	-	-	40	1,06	Aberta	0,74	Média

**Tabela 2 – PDI do ponto 17 (MRAF) e do ponto 34 (CA)**



Em uma análise representativa do PDI dos revestimentos, detalhou-se o processamento das imagens para dois pontos: o ponto 17 (MRAF), e o ponto 34 (CA) (Tabela 2). No MRAF, é possível obter uma pequena lâmina d'água na saturação do revestimento, porém não o cobre por completo. Na imagem obtida logo após a saturação (*Frame 40*), é possível perceber que há pouco acúmulo de água, pois esta continua sendo drenada e decai em 78,73% desde o início. Isso ocorre por motivo da sua macrotextura aberta, o que auxilia em uma drenagem mais rápida. No CA, nota-se a formação da lâmina d'água no revestimento com saturação de pouca visualização dos agregados pertinente à sua macrotextura média que diminui a capacidade drenante do revestimento quando comparada à macrotextura obtida. Conseqüentemente, a quantidade de *pixels* brancos na primeira e na última imagem é maior do que no MRAF. O percentual drenado de água no CA foi de 56,00%.

É possível visualizar, na Figura 3, a tendência de comportamento entre a profundidade média de macrotextura e a taxa de *pixels* brancos que diminuíram com o escoamento do líquido. Essa taxa representa a divisão entre a quantidade de *pixels* brancos do *Frame 40* e do *Frame 01*. Observa-se que as variáveis possuem comportamento semelhante, indicando que, após realizadas melhorias, o modelo poderá ser mais eficiente.



**Figura 3.** Tendência de comportamento entre a profundidade de macrotextura e a taxa de *pixels* brancos

No processamento pelo QGIS 2.18 with GRASS, seguiu-se o mesmo método de contagem de *pixels* no MATLAB R2017a, por meio das toolboxes de PDI disponibilizadas no software.

Seguindo as fases de PDI, no revestimento MRAF, utilizou-se, no cálculo da contagem de *pixels* brancos, o mesmo limiar que o método pelo MATLAB. Sendo assim, o limiar para análise foi de 0,61, porém o QGIS utiliza a faixa de nível de cinza de 0 a 255, fazendo a correspondência do limiar de 155,55 para o QGIS. Outra diferença entre os *softwares* é na contagem de *pixels*; ao contrário do MATLAB, o QGIS conta a quantidade de *pixels* pretos da imagem. Em consequência do tratamento dos dados na contagem de *pixels* pelo MATLAB, excluíram-se alguns pontos que também foram excluídos nesse método. Para fins de comparação entre os métodos, foram calculadas a quantidade de *pixels* brancos em função da subtração de *pixels* restantes na imagem e a porcentagem drenada de líquido.

Assim como no trecho com MRAF, no CA, as etapas de PDI seguiram o método do MATLAB por contagem de *pixels*. Utilizou-se o limiar de 0,65, que, ao ser transformado para a faixa de

intensidade de cinza de 0 a 255, passou a ser de 167,75. Alguns pontos não foram analisados em razão da exclusão destes no método do MATLAB, pois eles apresentaram problemáticas que impossibilitaram o processamento. Seguindo o método de contagem de *pixels*, determinou-se a quantidade *pixels* brancos das imagens a partir da quantidade de *pixels* pretos. Com isso, calculou-se a porcentagem de líquido drenada.

Após o cálculo da porcentagem drenada pelo QGIS, procedeu-se com as análises estatísticas. Com correlação de 0,57 e  $R^2$  de 0,32 para equação linear, a porcentagem drenada do MRAF pelo QGIS apresenta as mesmas características encontradas pelo método do MATLAB por contagem de *pixels*.

No CA, seguindo os cálculos da porcentagem drenada pelo QGIS, procedeu-se com as análises estatísticas. Da mesma maneira que no método por contagem de *pixels* pelo MATLAB, a porcentagem drenada apresentou fraca correlação com a profundidade de macrotextura, com correlação de 0,29 e  $R^2$  de 0,08 para equação linear.

#### 4.2.2. Método por transformada de Fourier

O código desenvolvido no MATLAB para avaliação da drenagem superficial por FFT elaborou um gráfico da soma da distribuição da frequência dos anéis, possibilitando a análise do percentual drenante do revestimento. Assim como nos métodos anteriores, retiraram-se pontos problemáticos, como os fora do desvio padrão da amostra e os que perderam a qualidade da imagem.

Seguiu-se, então, para a verificação da correlação entre a FFT e profundidade de macrotextura. O teste estatístico não apresentou resultados satisfatórios, ocasionando em uma correlação de 0,30 e 0,28, para os revestimentos de MRAF e de CA, respectivamente. O  $R^2$  para o MRAF foi de 0,09 para equação linear e de 0,47 para equação polinomial. Para o CA,  $R^2$  assumiu os valores de 0,08 e 0,32, para as equações linear e polinomial, respectivamente.

**Tabela 3** – Classificação de Hm campo *versus* modelo FFT no MRAF e no CA

MRAF				CA			
Hm (mm)-campo	Classificação-campo	Hm (mm)-modelo	Classificação-modelo	Hm (mm) - campo	Classificação-campo	Hm (mm)-modelo	Classificação-modelo
0,75	Média	0,99	Aberta	0,75	Média	0,70	Média
0,77	Média	1,10	Aberta	0,62	Média	0,71	Média
0,85	Aberta	1,05	Aberta	0,80	Média	0,68	Média
1,19	Aberta	0,97	Aberta	0,60	Média	0,66	Média
0,68	Média	0,82	Aberta	0,85	Aberta	0,70	Média
0,82	Aberta	0,99	Aberta	0,91	Aberta	0,76	Média
1,42	Muito aberta	0,96	Aberta	0,64	Média	0,78	Média
1,06	Aberta	0,86	Aberta	0,55	Média	0,70	Média
0,95	Aberta	0,95	Aberta	0,55	Média	0,67	Média
0,95	Aberta	1,01	Aberta	0,58	Média	0,77	Média
0,98	Aberta	0,97	Aberta	0,75	Média	0,75	Média
0,82	Aberta	0,96	Aberta	0,85	Aberta	0,77	Média
1,15	Aberta	1,02	Aberta	0,68	Média	0,74	Média
0,72	Média	0,99	Aberta	0,72	Média	0,77	Média
1,19	Aberta	1,01	Aberta	0,70	Média	0,71	Média
0,95	Aberta	1,05	Aberta	1,06	Aberta	0,75	Média
1,55	Muito aberta	1,14	Aberta	-	-	-	-

Do mesmo modo que no método pelo MATLAB, calculou-se a profundidade de macrotextura a partir da equação explicativa do modelo para cada revestimento. Na Tabela 3, encontram-se a classificação da macrotextura obtida em campo e a classificação pela equação preditiva.

É possível observar que, mesmo com fraca correlação entre os modelos, a equação consegue prever a classificação em cerca de 64% e 75% dos pontos, de MRAF e de CA, respectivamente.

A diferença na granulometria das misturas asfálticas que compõem os revestimentos pode ter influenciado essa diferença de comportamento do método FFT, em que a classificação da macrotextura do MRAF não atingiu o patamar de 70% como nos outros métodos. Esse fenômeno pode ter acontecido pela maneira como a FFT avalia a macrotextura, por variação da luminância. No MRAF, é perceptível o fato de que a granulometria dos agregados é menor que no CA. Assim, quando o algoritmo processa a imagem, os agregados maiores conseguem ter maior diferença de luminância e maior percepção entre *pixels* brancos e pretos.

### 4.3. Comparativo entre os levantamentos convencionais e o PDI

Ao se comparar os resultados com o método de contagem de *pixels* pelo QGIS, restou comprovado que o método é aplicável para ambos os *softwares*. Para corroborar com a compatibilidade do código criado no MATLAB, procurou-se sistema de algoritmo fechado e de manuseio simplificado que pudesse aplicar o método de contagem de *pixels* por meio de PDI. Nas figuras 4 e 5, encontra-se o percentual drenado para cada ponto calculado pelos dois *softwares*, em que é possível observar a compatibilidade entre os resultados.

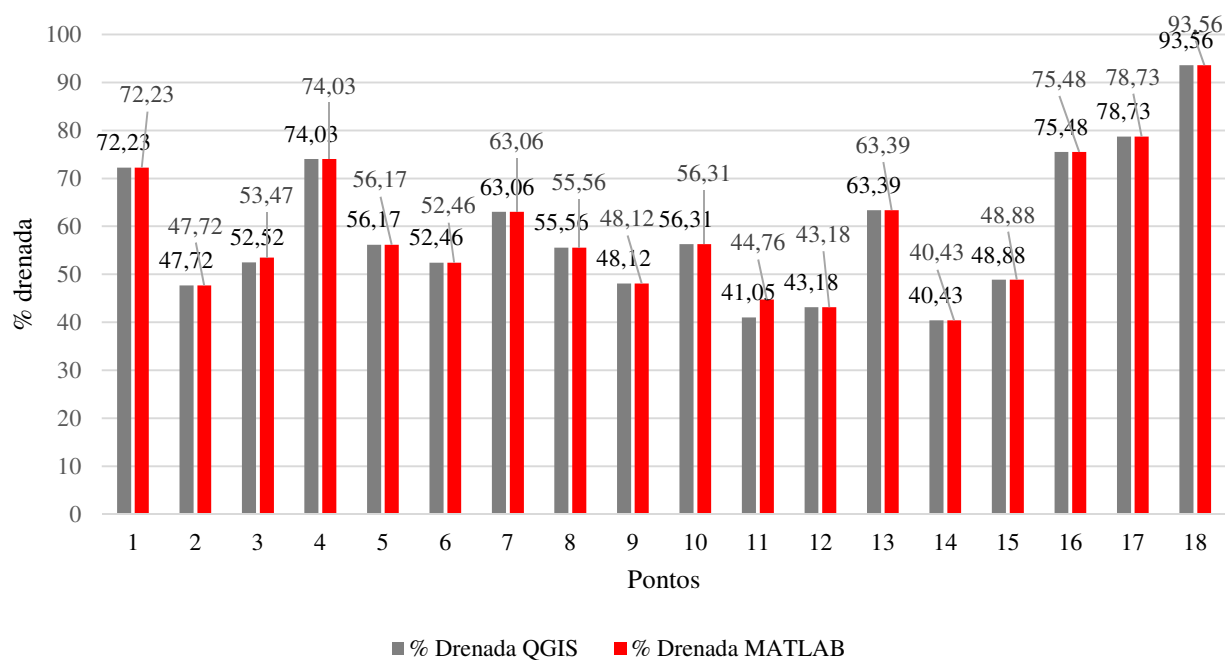


Figura 4. Comparativo % drenada MATLAB versus % drenada QGIS no MRAF

Para comprovar a conformidade entre os procedimentos, calculou-se  $R^2$  entre os métodos para cada revestimento. Validou-se a semelhança entre os procedimentos com  $R^2 = 0,99$  para os dois revestimentos. Ressalta-se que o MATLAB não possui livre acesso e necessita de base de conhecimento em programação de algoritmos, ao contrário do QGIS que se encontra para *download* gratuitamente. Assim, as fortes correlações entre os métodos facilitarão a aplicação do processo de avaliação da macrotextura em revestimentos asfálticos aeroportuários com lâmina d'água por contagem de *pixels*.

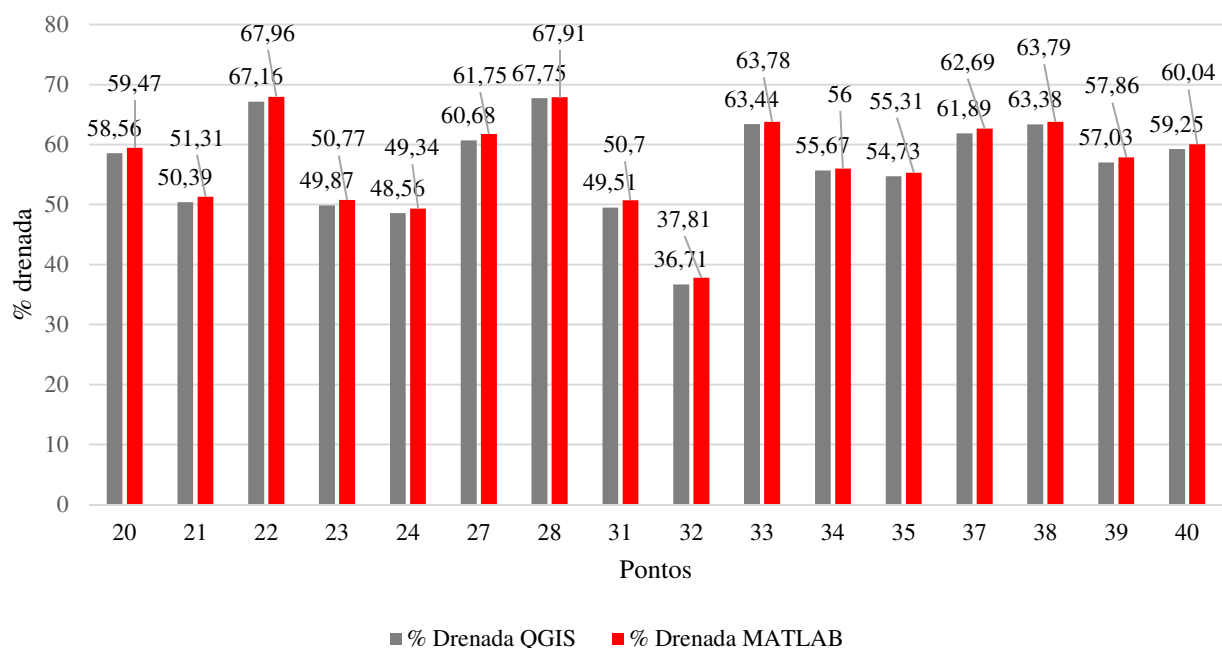


Figura 5. Comparativo % drenada MATLAB versus % drenada QGIS no CA

Os métodos aplicados apresentaram significativo percentual de acerto da classificação da macrotextura em relação aos resultados obtidos em campo. Na primeira abordagem, em que se analisou o agrupamento de dados por tipo de revestimento, o método de contagem de *pixels* pelo MATLAB conseguiu ótimas correlações com o mesmo método aplicado no QGIS. O método FFT mesmo com menor taxa de acerto conseguiu resultados satisfatórios, com percentuais de acerto da classificação de macrotextura em comparação aos resultados obtidos em campo. Os resultados do modelo no MRAF foram de 77% e 64% para os métodos de contagem de *pixels* no MATLAB e FFT, respectivamente. Para o CA, os percentuais de acerto dos métodos foram de 76% e 75% métodos por contagem de *pixels* no MATLAB e FFT, respectivamente.

Diante dos resultados analisados, é possível observar a proximidade entre os valores de percentual drenado dos métodos para os dois pontos representativos analisados. O ponto 17 do MRAF apresentou valor de profundidade média de macrotextura de 1,55 mm. Nos métodos de PDI, a porcentagem drenada ficou entre 71,79% e 78,73%. No ponto 34 do CA, a profundidade média de macrotextura foi de 0,75 mm e suas porcentagens drenadas nos métodos de PDI variaram de 56% a 58,54%. Dessa maneira, pode-se afirmar que o percentual drenado tende a ser condizente com o valor de profundidade de macrotextura obtido pelo ensaio de mancha de areia.

## 5. CONCLUSÃO

A aplicação do PDI como ferramenta para avaliação da PPD do Aeródromo do Catuleve apresentou resultados satisfatórios para a classificação de macrotextura. A análise comparativa entre os resultados do PDI e a classificação de macrotextura mostrou equações que não conseguiram estimar precisamente os valores de macrotextura iguais ao obtido pelo ensaio de mancha de areia. Todavia, quando se trata de classificação, os modelos conseguem estimar sua classificação de profundidade de macrotextura na maioria dos casos.

Foi possível observar adequados percentuais de acerto da classificação da macrotextura por meio do PDI. Na primeira abordagem de análise, com dados agrupados pelo tipo de revestimento, o método desenvolvido no MATLAB R2017a que classificou a macrotextura por contagem de *pixels* brancos se atestou como sendo o mais eficiente. Para o revestimento de MRAF, o modelo obteve a mesma classificação em 77% dos pontos. Por sua vez, para o CA, o percentual de acerto foi de 76% dos pontos.

Para o método mais satisfatório de PDI, ou seja, o de contagem de *pixels*, os resultados de porcentagem drenada foram condizentes com sua classificação de macrotextura. No MRAF de macrotextura aberta, foram encontrados valores maiores de porcentagem drenada (59,51%) em comparação ao CA, com classificação de macrotextura média e com menor valor de porcentagem drenada (57,28%). Conclui-se, então, que o método consegue ser parcialmente condizente com a realidade, pois os resultados convergem ou a diferença entre eles é muito pequena. Entende-se que os métodos podem ser utilizados como alternativa ou complementares ao método convencional da mancha de areia.

A maioria dos métodos que avaliam as características da textura do pavimento baseia-se na situação seca da superfície do pavimento. Este artigo contribui, portanto, para a avaliação da drenagem superficial do pavimento. Desse modo, verifica-se que são satisfatórios os resultados dos métodos de avaliação da macrotextura em condições de saturação do revestimento por meio de PDI, contribuindo, assim, com o desenvolvimento dos procedimentos de avaliação da segurança operacional em PPD. Conclui-se que o método é promissor para a análise da interferência da macrotextura na drenagem superficial de revestimentos asfálticos em MRAF e em CA. Todavia, é necessário aprimorar os modelos em outras PPD que tenham maior quantidade de dados das condições de macrotextura.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) no desenvolvimento deste estudo, por meio da concessão de bolsa de pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- ANAC (2018) *Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Nº 153, de 27 de fevereiro de 2018*. Agência Nacional de Aviação Civil. Secretaria de Aviação Civil. Brasília, DF.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016) NBR 16504 – Misturas asfálticas – *Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria – Método da mancha de areia*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Aps, M. (2006) *Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos*. Tese (Doutorado), Escola Politécnica – USP, São Paulo, SP.
- Araujo, V. M. C.; I. S. Bessa e V. T. F. Castelo Branco (2015) *Measuring skid resistance of hot mix asphalt using the aggregate image measurement system (AIMS)*. Construction and Building Materials, p. 476-481.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.117>
- Araújo, V. M. C. (2017) *Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas em Face a Compactação para uso em Revestimentos Aeroportuários a partir de Processamento Digital de Imagens*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, CE.
- Ferreira, P. N. (2002) *Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Gonçalves, A. K. L. (2020) *Avaliação da drenagem superficial em pista de pouso e decolagem por meio de Processamento Digital de Imagens*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE.
- Gonzalez, R. C. e R. E. Woods (2010) *Processamento de Imagens Digitais*. São Paulo: Edgard Blücher.
- International Civil Aviation Organization. (2002) *Manual de Servicios de Aeropuertos – Parte 2. Estado de la superficie de los pavimentos*. 4. Ed. Organización de Aviación Civil Internacional. Lima, Peru.
- Jayawickrama, P; R. Prasanna e S. Senadheera (1996) *Survey of State Practices to Control Skid Resistance on Hot-Mix Asphalt Concrete Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1536, p. 52-58.  
<https://doi.org/10.3141/1536-08>

- Leocádio, A. Da S. e C. A. Frota (2018) *Evaluation of the Runway at the Eduardo Gomes International Airport in Manaus*. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), v. 5, n. December 2018, p. 9120-9128. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1221964>
- Mataei, B. Nejad; F. M., Mohsen e Z. Hamzeh (2018) *Evaluation of pavement surface drainage using an automated image acquisition and processing system*. Automation in Construction, [s. l.], v. 86, n. November 2016, p. 240-255. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.010>
- Pidwerbesky, B. D. e D. D. Gransberg. (2006) *Road Surface Texture Measurement Using Digital Processing and Information Theory*. Land Transport New Zealand.
- Puzzo, L. A.; G. Loprencipe; Tozzo e A. C. D'andrea (2017) *Three-dimensional survey method of pavement texture using photographic equipment*. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, [s. l.], v. 111, n. January, p. 146-157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.040>
- Rodrigues, A. C. (2013) *Avaliação da Influência da Granulometria na Aderência Pneu-Pavimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Rodrigues Filho, O. S. (2006) *Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários – Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo Congonhas*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – USP, São Paulo, SP.
- Santos, L. C. B.; C. A. Almeida e D. D. M. Peixoto (2018) *Aeródromos - Sumário Estatístico 2008-2017*. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Brasília.
- Schmiedel, B.; F. Gauterin e H. J. Unrau (2018) *Road wetness quantification via tyre spray*. Journal Automobile Engineering. n. May, p. 1-10. DOI: 10.1177/0954407018778972
- Silva, J. P. S. (2008) *Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Sousa, E. S. e F. H. L. Oliveira (2019) *Verificação do parâmetro de Macrot textura de Pavimentos em Serviço por meio de Processamento Digital de Imagens*. Revista Tecnologia Fortaleza, v. 40, n.1, p. 1-17. <https://doi.org/10.5020/23180730.2019.8595>
- Walker, R. S. e L. D. Payne (2003) *Use of selcom laser for pavement texture and skid resistance measurement*. Research Project 1290, Transportation Instrumentation Laboratory, University of Texas, Texas, USA.