



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ELISA DA SILVA SOUSA

**VERIFICAÇÃO DO PARÂMETRO DE MACROTEXTURA DE PAVIMENTOS EM
SERVIÇO POR MEIO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

FORTALEZA

2018

ELISA DA SILVA SOUSA

VERIFICAÇÃO DO PARÂMETRO DE MACROTEXTURA DE PAVIMENTOS EM
SERVIÇO POR MEIO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheira
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda
de Oliveira.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S696v Sousa, Elisa da Silva.
Verificação do parâmetro de macrotextura de pavimentos em serviço por meio do processamento digital de imagens / Elisa da Silva Sousa. – 2018.
66 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.
1. Pavimento. 2. Macrotextura. 3. Mancha de Areia. 4. Processamento Digital de Imagens. I. Título.
CDD 620
-

ELISA DA SILVA SOUSA

VERIFICAÇÃO DO PARÂMETRO DE MACROTEXTURA DE PAVIMENTOS EM
SERVIÇO POR MEIO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheira
Civil.

Aprovado em: 21/11/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M. Eng. Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Osmarina e Elias.

Ao meu tio e padrinho, Pe. José Filho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por Sua infinita bondade, por ter me permitido realizar esse sonho, pela proteção em todas as situações e por me colocar ao lado de pessoas tão especiais.

Agradeço aos meus pais, Osmarina e Elias, por todo amor e ensinamentos que me deram, por sempre estarem ao meu lado, confiando em mim e buscando sempre o melhor para mim. Parte desta conquista é deles. À minha irmã, Mariana, por me ensinar a ser mais paciente e por sempre torcer por mim.

À toda a minha família (meus avós Lourdes e José Luis, meus tios Daniel, Ozanira e Pe. José Filho, meus primos e demais familiares) pelo apoio e por ser fonte de alegria na vida. Agradeço à minha tia, Ozanira, por ser como uma mãe para mim, sempre preocupando-se comigo. Sou grata também à minha prima, Fernanda, que é como uma irmã para mim, com quem convivo diariamente e posso sempre contar nas mais diversas situações.

Em especial ao meu tio e padrinho, Pe. José Filho, uma das pessoas que mais contribuiu para que eu ingressasse na universidade e que não mede esforços em ajudar nossa família. Agradeço também pelo lar que me deu durante quase cinco anos, onde nós pudemos conviver mais próximos, e ao lado de outras pessoas especiais da Casa Paroquial.

Ao meu namorado, Paulo Mateus, pelo amor, pelo companheirismo e pelo incentivo nos meus momentos mais tristes. Agradeço pela segunda família que me deu, formada por pessoas muito boas que me tiram tantas risadas quando nos reunimos.

Ao professor Heber, por ser um orientador tão atencioso e dedicado e por fazer todas as correções necessárias aos trabalhos. Agradeço também pelos cafés em sua sala e pelas conversas que transmitem confiança.

Aos amigos e funcionários da Paróquia Nossa Senhora dos Prazeres, pelo convívio diário, pela amizade e pelo acolhimento na Casa Paroquial. Agradeço por serem sempre tão gentis e prestativos, e pelas boas risadas após as refeições. Essas pessoas foram essenciais para tornar os meus dias mais felizes ao longo desses anos.

Aos meus amigos da UFC, Lídia, Zaqueu, Luis Marcelo, Ammanda, Tardiele, Tiago, e aos demais colegas, pelos bons momentos vividos que fizeram esses anos serem mais prazerosos. Ao Lennon e à Cecília por terem sido pacientes e terem dividido comigo os momentos cansativos de realização dos ensaios e obtenção das imagens necessários a este trabalho.

Ao Jorge Lucas e ao Pedro Henrique, do Petran, que se dispuseram a colaborar com o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao Jorge Lucas por ter aceitado fazer parte da banca examinadora.

À professora Suelly por também ter aceitado fazer parte da banca examinadora deste trabalho.

À professora Verônica por ter levado às aulas de PG (Projeto de Graduação) informações essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e reflexões sobre valores e assuntos tão importantes para o desenvolvimento humano dos alunos, mas que muitas vezes passam despercebidos durante a formação acadêmica.

A todos os professores da UFC que contribuíram para a minha formação.

Ao Moacyr, Prefeito do *Campus* do Pici da UFC, e funcionários da UFC - Infra que não mediram esforços para conseguir informações importantes para este trabalho.

“Portanto, quem ouve estas minhas palavras e as pratica é como um homem prudente que construiu a sua casa sobre a rocha. Caiu a chuva, transbordaram os rios, sopraram os ventos e deram contra aquela casa, e ela não caiu, porque tinha seus alicerces na rocha.”

(Evangelho de Mateus, 7: 24 e 25)

RESUMO

A macrotextura é um parâmetro da aderência pneu-pavimento, que, apesar de ser uma das características mais importantes na segurança viária, sua avaliação não é comumente realizada nas rodovias públicas brasileiras. Além disso, os procedimentos de mensuração da macrotextura recomendados para as rodovias ainda são constituídos por ensaios tradicionais que envolvem a interrupção de tráfego por longos períodos. Por outro lado, o desenvolvimento de tecnologias associadas aos avanços e à capacidade da computação geraram técnicas, como o Processamento Digital de Imagens (PDI), as quais têm mostrado resultados satisfatórios na avaliação da textura de pavimentos. O presente trabalho buscou realizar uma análise comparativa entre valores de profundidade média de macrotextura e os resultados obtidos com a aplicação do PDI em pavimentos em serviço. Para tanto, foram escolhidos pontos em pavimentos asfálticos localizados no *Campus* do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram coletadas imagens com a utilização de uma câmera de digital e processadas com a utilização do *software* Matlab. Posteriormente, foi realizado o ensaio de Mancha de Areia nos mesmos pontos. Com os resultados do PDI e do ensaio, foram gerados gráficos a fim de verificar a existência de correlação entre os dados, tendo como base os valores do coeficiente de determinação (R^2). Além disso, foram estimados valores de profundidade média de macrotextura a partir de equações geradas pelos gráficos de correlação, a fim de verificar a classificação dos dados a partir das classes definidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Trânsito (DNIT). Com o desenvolvimento deste trabalho, percebeu-se que o PDI consegue obter resultados satisfatórios na verificação da macrotextura, a partir da determinação de limiares específicos para cada imagem. Porém, a análise das imagens para um único limiar não apresentou correlação adequada, devido às particularidades de cada imagem, como cor e brilho. Ademais, a classificação dos valores estimados mostrou-se próxima a classificação obtida com os valores do ensaio. De forma geral, verifica-se que é possível desenvolver métodos mais eficientes de avaliação de macrotextura, a partir do processamento digital de imagens, contribuindo, desse modo, com o desenvolvimento dos procedimentos de avaliação da segurança viária.

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

ABSTRACT

Macrottexture is a parameter of tire-road friction, which, despite being one of the most important characteristics in road safety, its evaluation is not commonly performed on Brazilian public highways. In addition, the recommended macrottexture measurement procedures for highways are still traditional tests involving long-term traffic disruption. On the other hand, the development of technologies associated to the advances and the capacity of the computation have generated techniques, such as Digital Image Processing, which have shown satisfactory results in the evaluation of pavement texture. The present work seeks to perform a comparative analysis between values of average depth of macrottexture and the results obtained with the application of Digital Image Processing in pavements in service. In order to do so, points were chosen on asphalt pavements located in the Pici Campus of the Federal University of Ceará (UFC), where images were collected using a digital camera and processed using Matlab software. Subsequently, the Sand Patch test was performed at the same points. With the results of the PDI and the test, graphs were generated in order to verify the existence of correlation between the data, based on the values of the coefficient of determination (R^2). In addition, values of averaged depth of macrottexture were estimated from equations generated by correlation graphs, in order to verify the classification of the data from the classes defined by the National Department of Traffic Infrastructure (DNIT). With the development of this work, it was observed that the Digital Image Processing can obtain satisfactory results in the verification of the macrottexture, from the determination of specific thresholds for each image. However, the analysis of the images for a single threshold did not present adequate correlation, due to the particularities of each image, such as color and brightness. In addition, the classification of the estimated values was close to the classification obtained with the values of the test. In general, it is possible to develop more efficient methods of macrottexture evaluation, based on the digital image processing, thus contributing to the development of road safety assessment procedures.

Keywords: Pavement. Macrottexture. Sand Patch. Digital Image Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismos de atrito durante o tráfego.	18
Figura 2 – Fenômeno da hidroplanagem.	18
Figura 3 – Superfície dos agregados.	21
Figura 4 – Pêndulo Britânico.	23
Figura 5 – Detalhe da mancha de areia.	25
Figura 6 – Etapas do PDI.	26
Figura 7 – Processamento Digital de Imagens.	28
Figura 8 – Fluxograma das etapas do trabalho.	29
Figura 9 – Pontos escolhidos na UFC - Campus do Pici.	31
Figura 10 – Anteparo de madeira.	32
Figura 11 – Procedimentos do ensaio de Mancha de Areia.	33
Figura 12 – Padrões de imagens.	34
Figura 13 – Imagem binarizada.	35
Figura 14 – Imagem invertida.	35
Figura 15 – Imagens obtidas em diferentes condições.	39
Figura 16 – Diferentes classes de textura.	39
Figura 17 – Projeção da mancha de areia nas três imagens.	40
Figura 18 – Verificação de limiares distintos.	41
Figura 19 – Correlação entre número de <i>pixels</i> e HS para imagens a 20 cm de altura e tamanho de 2.505 x 2.505 <i>pixels</i>	44
Figura 20 – Correlação entre número de <i>pixels</i> e HS para imagens a 40 cm de altura e tamanho de 2.505 x 2.505 <i>pixels</i>	44
Figura 21 – Correlação entre número de <i>pixels</i> e HS para imagens a 60 cm de altura e tamanho de 2.505 x 2.505 <i>pixels</i>	44
Figura 22 – Correlação entre número de <i>pixels</i> e HS para imagens a 20 cm de altura e tamanho de 1.400 x 1.400 <i>pixels</i>	47
Figura 23 – Correlação entre número de <i>pixels</i> e HS para imagens a 40 cm de altura e tamanho de 1.400 x 1.400 <i>pixels</i>	47
Figura 24 – Correlação entre número de <i>pixels</i> e HS para imagens a 60 cm de altura e tamanho de 1.400 x 1.400 <i>pixels</i>	47
Figura 25 – Diferença de brilho nas imagens.	49
Figura 26 – Influência da cor dos agregados.	49

Figura 27 – Diferentes misturas asfálticas.....	50
Figura 28 – Correlação de HS x HS' para imagens de 2.505 x 2.505 <i>pixels</i>	52
Figura 29 – Correlação de HS x HS' para imagens de 1.400 x 1.400 <i>pixels</i>	53
Figura 30 – Código implementado	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de Textura.....	20
Tabela 2 – Classes de resistência à derrapagem/Pêndulo Britânico.	24
Tabela 3 – Classes de macrotextura.....	25
Tabela 4 – Distribuição dos pontos nos trechos de pavimento asfáltico do <i>Campus</i> do Pici...30	
Tabela 5 – Profundidade média de macrotextura (HS).....	37
Tabela 6 – Resumo dos resultados da macrotextura.....	38
Tabela 7 – Imagens binarizadas obtidas no processamento digital de imagens para alguns pontos selecionados.....	42
Tabela 8 – Resultados do PDI para imagens de tamanho de 2.505 x 2.505 <i>pixels</i>	43
Tabela 9 – Resultados do PDI para imagens de tamanho de 1.400 x 1.400 <i>pixels</i>	46
Tabela 10 – Resumo das correlações (Hs vs PDI).....	48
Tabela 11 – Limiares único para cada grupo de imagens.....	50
Tabela 12 – Classificação dos valores de profundidade média de macrotextura estimados para 2.505 x 2.505 <i>pixels</i>	51
Tabela 13 – Classificação dos valores de profundidade média de macrotextura estimados para 1.400 x 1.400 <i>pixels</i>	53
Tabela 14 – Imagens recortadas em 2.505 x 2.505 <i>pixels</i>	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Problema da Pesquisa	15
1.2 Objetivo Geral e Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Aderência pneu-pavimento	17
2.2 Textura superficial do pavimento.....	20
2.2.1 <i>Microtextura</i>	20
2.2.2 <i>Macrotextura</i>	21
2.3 Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento	22
2.4 Aplicação do Processamento Digital de Imagens para análise de textura.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Determinação da área de estudo	29
3.2 Ensaios de Mancha de Areia.....	31
3.3 Processamento digital de imagens.....	33
3.3.1 <i>Aquisição de imagens</i>	33
3.3.2 <i>Pré-processamento</i>	34
3.3.3 <i>Segmentação</i>	34
3.3.4 <i>Representação e descrição</i>	35
3.3.5 <i>Reconhecimento</i>	35
3.4 Análise e comparação dos resultados.....	36
4 ANÁLISES E DISCUSSÕES	37
4.1 Dados de profundidade média de macrotextura.....	37
4.2 Análise das imagens	38
4.3 Análise comparativa dos dados de Mancha de Areia e PDI	41
4.3.1 <i>Determinação de limiares adequados a cada imagem</i>	42
4.3.2 <i>PDI para um único limiar</i>	50
4.4 Classificação da macrotextura com base nos resultados do PDI	51
4.5 Limitações da análise.....	54
5 CONCLUSÃO	56
5.1 Conclusões	56
5.1.1 <i>Principais conclusões</i>	56
5.1.2 <i>Principais limitações</i>	57

5.2 Sugestões para trabalhos futuros	58
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE A – IMAGENS UTILIZADAS NO PROCESSAMENTO	62
ANEXO I – CÓDIGO IMPLEMENTADO.....	65

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica de uma sociedade, formada pelas atividades humanas, industriais e comerciais, é proporcionada pelos sistemas de transportes, os quais contribuem de forma significativa para o desenvolvimento de uma nação. Sendo assim, o adequado desempenho das infraestruturas de transporte tem papel fundamental para a realização efetiva de tais atividades.

No Brasil, como a matriz de transporte 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 as atividades dos sistemas de gerência de pavimentos, que tem como um dos objetivos oferecer um transporte rodoviário econômico, compatível e seguro (DNIT, 2011).

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 garantir 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, sendo eles a microtextura e a macrotextura. A microtextura está relacionada à rugosidade da superfície do agregado, responsável pelo rompimento da película de água à medida que o veículo trafega. Já a macrotextura, que é o foco deste trabalho, é caracterizada pela rugosidade formada entre o agregado e o ligante na mistura, 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.

Para a avaliação dos parâmetros de aderência, geralmente, para a microtextura utiliza-se o ensaio do Pêndulo Britânico, enquanto que a macrotextura é medida através do ensaio de Mancha de Areia. Ambos os ensaios são realizados em campo, sendo necessária a

interrupção do tráfego para pavimentos em serviço por longos períodos, o que causa restrição ao fluxo normal dos veículos. Além disso, esses ensaios envolvem grande parcela de interferência humana durante a execução.

No Brasil, o monitoramento das condições das rodovias quanto à aderência pneu-pavimento não é comum, sobretudo em infraestruturas de gestão pública. A avaliação da macrotextura 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, devido às exigências de regulamentos nacionais e internacionais, por meio de um sistema de monitoramento constante, de modo a propiciar maior segurança das operações de pousos e decolagens (MATTOS, 2009).

Por outro lado, 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 dessas novas tecnologias. Essas auxiliam na etapa de avaliação, tornando-a mais rápida, menos onerosa, mais prática e sem maiores interferências humanas nos resultados, sendo esses, portanto, mais acurados.

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 desta 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 esse não necessita ficar exposto ao tráfego de veículos durante muito tempo para a realização dos ensaios (ARAUJO, 2017).

1.1 Problema da Pesquisa

É comprovado que a aderência pneu-pavimento é um fator que está relacionado diretamente à segurança viária, uma vez que a textura adequada do revestimento faz com que haja atrito, e portanto, aderência suficiente, de forma a evitar derrapagens e acidentes. Nesse sentido, o monitoramento das características do pavimento faz-se necessário para manter os parâmetros adequados para a garantia da segurança e do conforto ao rolamento, sendo isso feito a partir de avaliações funcionais e estruturais.

No entanto, a mensuração dos parâmetros da aderência pneu-pavimento no Brasil é pouco realizada em rodovias públicas, o que resulta em pavimentos com revestimentos inadequados ao rolamento, conduzindo, assim, a maiores riscos de acidentes. Nessas avaliações, o parâmetro de macrotextura é verificado a partir de processos que envolvem a utilização de ensaios tradicionais e a interrupção de tráfego por longos períodos.

1.2 Objetivo Geral e Específicos

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa de mensuração da macrotextura de pavimentos asfálticos por meio da profundidade média da mancha de areia e do Processamento Digital de Imagens.

Como objetivos específicos, têm-se:

- a) caracterizar a macrotextura de revestimentos asfálticos de pavimentos em serviço por meio do ensaio tradicional de Mancha de Areia;
- b) analisar a macrotextura de revestimentos asfálticos de pavimentos em serviço por meio do processamento digital de imagens;
- c) verificar a existência de correlação entre os resultados de macrotextura obtidos em campo e os resultados do PDI.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho aqui apresentado está dividido em cinco capítulos, estruturados da forma apresentada a seguir:

- a) O capítulo 2 expõe conceitos importantes para o entendimento deste trabalho e uma revisão de obras relacionados ao tema;
- b) O capítulo 3 aborda a metodologia adotada para a coleta dos dados de profundidade média de macrotextura obtidos pelo método da Mancha de Areia, o método usado no PDI, e a análise dos dados obtidos;
- c) No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios de Mancha de Areia e do PDI. É feita a análise desses resultados, a partir de uma comparação entre os valores obtidos pelos dois métodos;
- d) Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas ao final da realização da pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados conceitos e pesquisas relacionados à avaliação da aderência pneu-pavimento e do parâmetro de macrotextura, em pavimentos rodoviários. Apresentam-se o conceito de aderência pneu-pavimento, a influência das classes de textura na aderência, o método de avaliação dos parâmetros utilizando os ensaios tradicionais e a definição e a utilização do PDI para a avaliação do parâmetro de macrotextura.

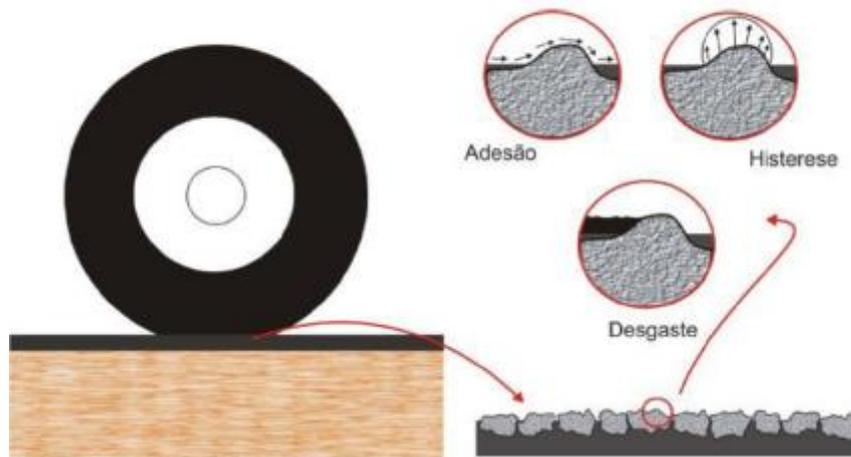
2.1 Aderência pneu-pavimento

A aderência pneu-pavimento é uma propriedade dos revestimentos diretamente ligada à segurança viária. A textura superficial dos revestimentos e as características dos pneus (tipo, dimensões, ranhuras, e pressão de inflação) são os dois fatores que mais contribuem para a existência dessa aderência, sendo assim, uma composição resultante da textura e outra formada por uma parcela devido ao atrito, na interação pneu-pavimento. (FERREIRA, 2002, 2008, e BERNUCCI *et al.*).

A força de atrito é definida como uma força de contato entre a superfície de dois corpos que resiste ao movimento devido à aplicação de uma força externa, e considera-se que é formada por três mecanismos, mostrados na Figura 1, sendo eles, conforme Andresen e Wambold (1999) e Silva (2008):

- a) Adesão: força proporcional à área de contato entre as asperezas do pneu e a superfície do pavimento, gerada pela interação entre as moléculas dos dois materiais, estando relacionada à microtextura;
- b) Histerese: parcela do atrito resultante da deformação da borracha do pneu, devido à macrotextura do pavimento. Essa parcela é diretamente proporcional à velocidade do veículo;
- c) Desgaste: conhecido como emborrachamento da pista, é resultado do arrancamento de partículas do pneu que passam a preencher a rugosidade formada pelos agregados.

Figura 1 – Mecanismos de atrito durante o tráfego.

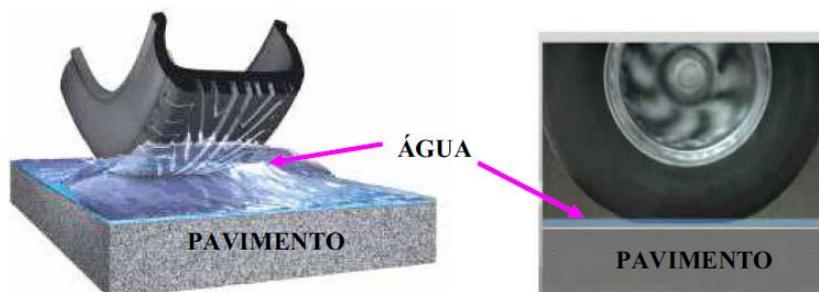


Fonte: Silva (2008).

Segundo Silva (2008), em pavimentos aeroportuários, há uma preocupação maior com a medição do valor do atrito para as atividades de manutenção, uma vez que as aeronaves ficaram maiores, exigindo uma maior aderência pneu-pavimento para a garantia da segurança nos procedimentos de pouso e de decolagem. De acordo com Bernucci *et al.* (2008), é importante a avaliação do atrito entre o pneu e o pavimento, principalmente em pistas molhadas, estando esse fator relacionado à resistência à derrapagem, a qual é função da aderência pneu-pavimento.

Na falta da aderência, há a diminuição do contato pneu-pavimento, que dificulta a realização de manobras pelo motorista e aumenta os riscos de acidentes. Isso ocorre principalmente em dias chuvosos, quando se forma uma lâmina d'água sobre o revestimento, que diminui o contato entre o pneu e o pavimento, contribuindo, assim, para o fenômeno da hidroplanagem, que está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Fenômeno da hidroplanagem.



Fonte: Silva (2008).

A hidroplanagem ocorre quando há a perda total do contato pneu-pavimento devido a existência de uma lâmina de água que não foi rompida pelos pneus e pela textura superficial da pista. Com isso, o motorista perde o controle do veículo, já que as rodas apenas deslizam sobre o fluido (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Mounce e Bartoskewitz (1993), existem quatro fatores principais para a ocorrência da hidroplanagem, sendo eles:

- a) habilidade e velocidade do motorista;
- b) pressão de insuflação e área de contato dos pneus;
- c) textura e geometria do pavimento;
- d) intensidade da chuva e caminhos disponíveis para drenagem.

A velocidade do veículo é um fator muito relevante para a hidroplanagem, sendo proporcional à área de contato pneu-pavimento. Quando a velocidade aumenta, o tempo de expulsão da água é reduzido, fazendo com que esse contato seja menor e a parcela de atrito devido a adesão seja reduzida (BERNUCCI *et al.*, 2008; LUGÃO, 2008).

Ferreira (2002) ressalta que mesmo sem atingir a velocidade de hidroplanagem, valor a partir do qual ocorre esse fenômeno, a presença de água no pavimento é suficiente para o condutor perder o controle do veículo em rodovias. Tal fenômeno é um dos principais fatores que contribui para a ocorrência de acidentes com aeronaves (SILVA, 2008).

Outro aspecto que influencia na qualidade da aderência pneu-pavimento é o tipo de revestimento, já que uma camada mais porosa com agregados mais ásperos, por exemplo, possui uma textura que garante melhor drenagem da água superficial e maior coeficiente de atrito na interação pneu-pavimento, garantindo assim adequadas condições de aderência. Aps (2006) em sua pesquisa mostra que revestimentos de SMA (*Stone Matrix Asphalt* ou Matriz Pétreo Asfáltica), que possui elevada quantidade de agregados graúdos, promove maior aderência em relação aos revestimentos de concreto asfáltico modificado por borracha, que possui agregados menores e textura mais lisa.

Ainda sobre a qualidade da aderência pneu-pavimento, a exposição ao tráfego é um fator que afeta negativamente. Do *et al.* (2009) mostraram que o tráfego de veículos remove a película de ligante sobre os agregados, desprotegendo-os. Com isso, o material passa a sofrer o processo de polimento, diminuindo assim o atrito superficial e prejudicando a aderência pneu-pavimento.

2.2 Textura superficial do pavimento

A PIARC (*The World Road Association*) divide a textura de pavimentos em quatro classes, mostradas na Tabela 1, de acordo com o intervalo de comprimento de onda, que indica a distância entre dois picos ou depressões na superfície do pavimento. Para a avaliação da aderência pneu-pavimento, são utilizados dois parâmetros de textura, a macrotextura e a microtextura (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Tabela 1 – Classes de Textura.

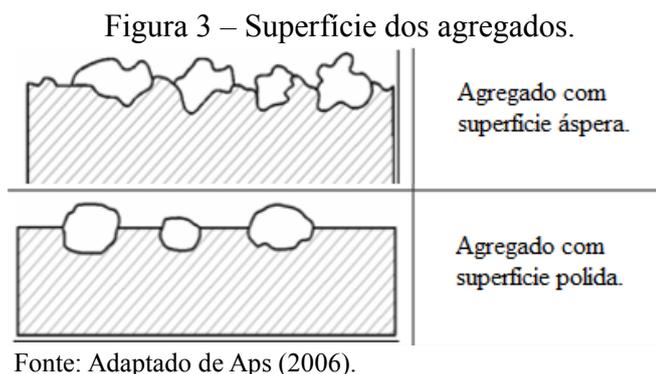
Classificação da Textura	Faixa de Comprimento de Onda
Microtextura	$\lambda < 0,5 \text{ mm}$
Macrotextura	$0,5 \text{ mm} \leq \lambda < 50 \text{ mm}$
Megatextura	$50 \text{ mm} \leq \lambda < 500 \text{ mm}$
Irregularidade	$0,5 \text{ m} \leq \lambda < 50 \text{ m}$

Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

A megatextura possui comprimento de onda da ordem das dimensões dos sulcos dos pneus, sendo percebida pelo condutor do veículo através de solavancos. A irregularidade é caracterizada por comprimentos de onda maiores que a megatextura, causando maiores desconfortos aos usuários. Esses dois tipos de texturas, ao contrário da microtextura e da macrotextura, dificultam o contato pneu-pavimento e a dinâmica veicular (FERREIRA, 2016 e BERNUNCCI *et al.*, 2008). Serão detalhados na sequência os principais aspectos relativos à microtextura e à macrotextura.

2.2.1 Microtextura

A microtextura do revestimento é caracterizada pela aspereza da superfície do agregado, que pode ser áspera ou polida, como ilustra a Figura 3. Tal propriedade está relacionada à origem mineralógica do agregado mineral e tem grande importância no rompimento da película de água durante o tráfego do veículo em pistas molhadas (SPECHT *et al.*, 2007). Sendo assim, agregados mais angulares e com superfícies mais ásperas garantem mais facilidade nesse rompimento.



Considera-se que, para velocidades abaixo de 50 km/h, a microtextura é o principal fator responsável pela resistência a derrapagem, uma vez que possibilita o fácil rompimento da película de água em pavimentos molhados. Porém, para maiores valores de velocidade, torna-se mais difícil esse rompimento devido ao menor tempo de contato pneu-pavimento (MATTOS, 2009).

2.2.2 Macrotextura

A macrotextura é caracterizada pela irregularidade formada entre o agregado e o ligante na mistura asfáltica, criando pequenos canais que permitem o escoamento da água. Essa classe de textura está relacionada ao atrito entre pneu-pavimento para médias e altas velocidades e à capacidade do pavimento de drenar a água superficial que cai sobre o revestimento, evitando a hidroplanagem (SPECHT *et al.*, 2007). Uma das preocupações relacionadas a macrotextura ressaltada por Oliveira (2009) é a impregnação de borracha de pneu no pavimento, uma vez que tal material contaminante preenche a rugosidade que constitui a macrotextura, dificultando o escoamento da água superficial, sendo esse escoamento necessário para a garantia da aderência.

Ainda de acordo com Specht *et al.* (2007), fatores como distribuição granulométrica, características dos agregados (forma, tamanho, etc), a dosagem da mistura e o processo construtivo têm grande influência na macrotextura de pavimentos. Para Oliveira (2009), uma macrotextura, que proporcione uma adequada drenagem, depende do tamanho e da granulometria dos agregados predominantemente de microtextura áspera. Aps (2006) e Bernuncci *et al.* (2008) afirmam que a granulometria da mistura é uma das características que mais influencia a macrotextura. Assim, misturas asfálticas com granulometria e dosagem que permitam a formação de pequenos canais de drenagem, sobretudo misturas abertas e descontínuas, proporcionam revestimentos com macrotextura adequada para a segurança ao

rolamento.

Pereira (2010) analisou a textura superficial de algumas rodovias em pontos de maiores ocorrências de incidentes e de acidentes e constatou que 78% deles apresentavam profundidade média de macrotextura abaixo do limite aceitável, conforme as regulamentações disponíveis. Bucharles (2014) em sua pesquisa verificou que uma qualidade adequada de macrotextura reduz a energia envolvida em um acidente, sendo capaz de diminuir os danos no veículo e as lesões nas vítimas. Isso evidencia a importância de se manter o pavimento com textura adequada ao tráfego, a fim de proporcionar segurança aos usuários.

Segundo Mattos (2009), pode-se citar três métodos mais tradicionais para medição da macrotextura: Mancha de Areia, Perfilômetros e Drenabilidade. Porém, têm-se estudado um método alternativo de medição de macrotextura, a partir de análises digitais de imagens, usando modelos matemáticos, como mostram Santos (2008), Pidwerbesky *et al.* (2006) e Elunai *et al.* (2010) em suas pesquisas.

2.3 Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento

A avaliação das características de um pavimento seja ele rodoviário ou aeroportuário é uma das etapas de um sistema de gerenciamento, tendo grande importância para determinação das suas condições e das medidas a serem tomadas para um possível melhoramento. Na avaliação da aderência pneu-pavimento, utilizam-se os parâmetros relacionados à textura e ao coeficiente de atrito na interação pneu-pavimento.

No Brasil, DNIT (2006) indica dois métodos para a avaliação das condições da aderência pneu-pavimento, sendo eles o Método do Pêndulo Britânico, para medidas de resistência à derrapagem e o Método da Mancha de Areia, para medidas de macrotextura. Os ensaios devem ser realizados na trilha de roda externa em trechos de 20 km, sendo 5 pontos para medidas de resistência à derrapagem e 4 pontos para medidas de macrotextura.

Para pavimentos aeroportuários, ANAC (2018) especifica, para a medição do coeficiente de atrito, um dos seguintes equipamentos: *Mu-meter*, *Skidometer*, *Surface Friction Tester Vehicle*, *Runway Friction Tester Vehicle*, *Trata ou Grip Tester*. Nesse regulamento, para cada equipamento, é disposto ainda as condições de realização do ensaio, como pressão do pneu, velocidade do ensaio e profundidade da lâmina d'água, e o valor do coeficiente de atrito.

A aferição da macrotextura em aeródromos, de acordo com ANAC (2018), deve ser feita a partir do ensaio de Mancha de Areia. Além disso, esse regulamento determina a frequência de medição do coeficiente de atrito e da macrotextura, em função da média de pousos

diários no último ano na cabeceira predominantemente usada. Tais especificações deixam evidentes a maior atenção que é dada à avaliação das condições de aderência em pavimentos aeroportuários.

2.3.1 Determinação da microtextura

Dentre os principais equipamentos para medição de microtextura, o Pêndulo Britânico, representado na Figura 4, é o mais utilizado. Esse ensaio ainda não possui normatização brasileira, mas o DNIT (2006) recomenda a utilização da norma ASTM (1998).

Figura 4 – Pêndulo Britânico.



Fonte: Araujo (2017).

Para a realização do ensaio, o equipamento é nivelado na superfície e o pavimento é molhado. O pêndulo, que é composto por uma sapata de borracha na extremidade, é liberado. A partir disso, a perda de energia é quantificada e serve como medida de atrito. O valor obtido é expresso em BPN (*British Number Pendulum*), SRT (*Skid Resistent Test*) ou VRD (Valor de Resistência à Derrapagem). A Tabela 2 apresenta a classificação da superfície do pavimento de acordo com o resultado obtido no ensaio. Além disso, DNIT (2006) recomendou um VRD ≥ 55 , correspondendo a uma superfície rugosa a muito rugosa.

Tabela 2 – Classes de resistência à derrapagem/Pêndulo Britânico.

<i>Classificação</i>	<i>VRD – Valor de Resistência à derrapagem</i>
Perigosa	< 25
Muito Lisa	25 – 31
Lisa	32 – 39
Insuficientemente rugosa	40 – 46
Medianamente Rugosa	47 – 54
Rugosa	55 – 75
Muito Rugosa	> 75

Fonte: DNIT (2006).

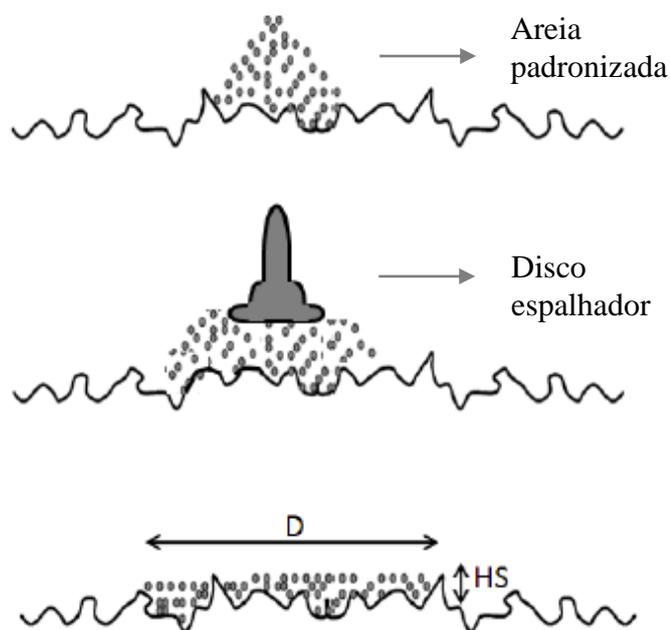
2.3.2 Determinação da macrotextura

Para a medição da macrotextura, como já mencionado anteriormente, o DNIT recomenda o Método da Mancha de Areia apresentado por uma norma francesa. Porém, já se tem uma norma brasileira, a ABNT (2016), que estabelece o procedimento para determinação da profundidade média da macrotextura.

O método da Mancha de Areia é um ensaio volumétrico que utiliza um volume conhecido de uma areia padronizada. Para a realização do ensaio, a superfície é limpa com uma escova de mão e, então, a areia é espalhada a partir de movimentos circulares com auxílio de um disco espalhador. Após isso, é feita a medição, em quatro posições diferentes, separadas por 45°. Com o volume do material espalhado conhecido e com a média dos diâmetros, é calculada a profundidade média da macrotextura (HS).

O ensaio de Mancha de Areia determina a profundidade média da mancha formada pela areia espalhada entre os picos e vales da textura do pavimento, como pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 – Detalhe da mancha de areia.



Fonte: Mattos (2010)

A macrotextura é classificada de acordo com as faixas de valores da profundidade média da macrotextura mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Classes de macrotextura.

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).

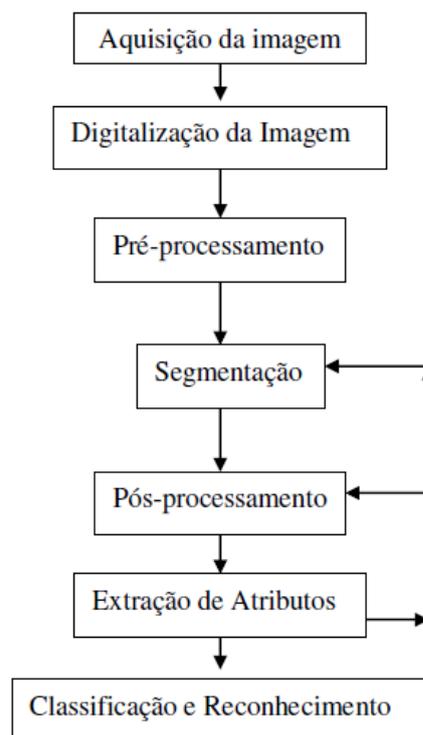
O DNIT sugere $0,60 \text{ mm} < HS < 1,20 \text{ mm}$ como os limites de macrotextura, correspondendo a uma textura superficial média a grosseira. Valores de mancha de areia abaixo de $0,60 \text{ mm}$ aumentam o risco de derrapagem, devido a superfície do pavimento ser considerada muito lisa. Para valores maiores do que $1,20 \text{ mm}$, a macrotextura pode causar ruídos excessivos, maior desgaste dos pneus e maior consumo de combustível (BERNUCCI *et al.*, 2008). Para pavimentos aeroportuários, a ANAC recomenda que a profundidade média da macrotextura não seja menor do que $0,60 \text{ mm}$.

2.4 Aplicação do Processamento Digital de Imagens para análise de textura

O Processamento Digital de Imagens (PDI) é uma técnica relacionada à análise e ao tratamento de imagens digitais prontas. Tal técnica tem por objetivo manipular e extrair informações de uma imagem previamente gerada (SANTOS, 2008). De acordo com Gonzalez e Woods (2000), o PDI se divide em: aquisição, pré-processamento, segmentação, representação e descrição, e por último, reconhecimento e interpretação.

Para a aquisição da imagem, é necessário um sensor de imageamento com capacidade de digitalizar o sinal gerado pelo sensor, como uma câmera digital. No pré-processamento, é feito o melhoramento da imagem digital, a partir da aplicação de métodos e/ou algoritmos para realce das características importantes na análise. Após isso, é feita a segmentação, a etapa mais difícil, que divide a imagem em pequenos objetos significativos, representados por *pixels*. Na representação e descrição, os dados são transformados em uma forma adequada à continuação do processo e são extraídas informações básicas para a diferenciação das classes dos objetos. Por fim, com base nessa última etapa, cada objeto recebe sua informação, como um rótulo. Seguindo para a etapa de interpretação, essa dá um significado para um conjunto de objetos reconhecidos (GONZALEZ e WOODS, 2000; PADILHA, 2007). Na Figura 6, são apresentadas as etapas do PDI.

Figura 6 – Etapas do PDI.



Fonte: Santos (2008).

O uso do PDI tem crescido vigorosamente em diversas áreas do conhecimento, melhorando a informação visual das imagens para interpretação humana. Como exemplo de aplicações dessa técnica têm-se: o melhoramento da intensidade de contraste de cores para a interpretação de imagens biomédicas, na medicina; o estudo do padrão de poluição de imagens aéreas ou de satélites, realizado por geógrafos; o realce de imagens de experimentos em áreas como microscopia eletrônica, em Física; entre outras aplicações (GONZALEZ e WOODS, 2000).

A textura de uma superfície, segundo Santos (2008), é uma característica que pode ser analisada por meio do processamento de imagens para definição de regiões com mesmas características, podendo então serem classificadas em superfícies lisas, rugosas ou grossas. Com isso, o parâmetro de textura pode ser usado como um descritor regional, contribuindo para os processos de reconhecimento, descrição e classificação de imagens.

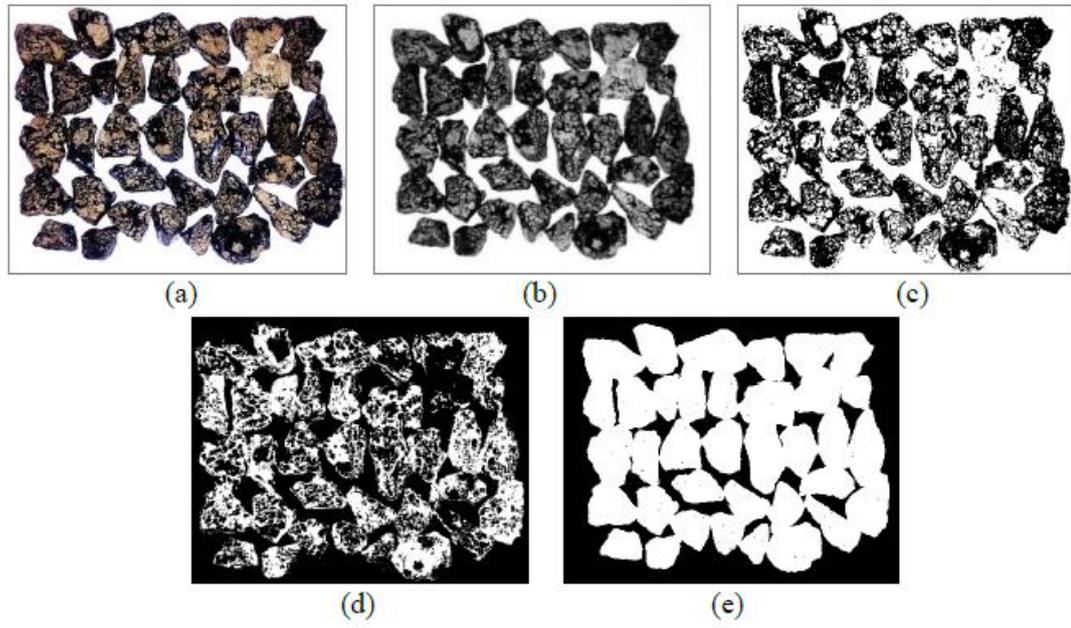
Pidwerbesky *et al.* (2006) e Santos (2008) aplicaram o PDI para avaliação da macrotextura, utilizando imagens obtidas por câmera digital e analisadas por meio do modelo matemático da Transformada Rápida de Fourier (FFT), com o uso do *software* Matlab. Nessas pesquisas, comparou-se o resultado obtido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

Elunai *et al.* (2010) fez 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 às imagens capturadas por uma câmera digital. No PDI, foram utilizados três métodos de análise, sendo eles: o Método da Transformada Rápida de Fourier, da Auto correlação, e *Wavelets*. Todos esses métodos resultaram em uma boa correlação, sendo o Método *Wavelets* o que apresentou maior valor de coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,87, indicando assim, a possibilidade de substituição dos ensaios tradicionais por métodos mais práticos, utilizando a análise de imagens digitais.

Lucas Júnior (2018) aplicou o PDI para determinação da porcentagem da área de agregados recoberta por ligante asfáltico após a realização do ensaio de adesividade. As imagens foram capturadas por uma câmera de *smartphone* e processadas utilizando um código desenvolvido no *software* Matlab, tendo como princípio a contagem de pixels que representavam o ligante em uma imagem binarizada. Como resultado, os percentuais de área recoberta obtidas pelo PDI e os percentuais teóricos mostram-se muito próximos, indicando a eficiência da aplicação do PDI na análise de misturas asfálticas. A Figura 7 mostra as etapas do

PDI para determinação da área recoberta dos agregados.

Figura 7 – Processamento Digital de Imagens.



Fonte: Lucas Júnior (2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as etapas desenvolvidas para a coleta e a análise dos dados na realização deste trabalho. Será apresentada a área de estudo escolhida para compor a amostra de dados, o procedimento de ensaio de Mancha de Areia, o Processamento Digital de Imagens (PDI) aplicado e o método de análise adotado. A Figura 8 apresenta a sequência das etapas que serão descritas nos itens e subitens a seguir.

Figura 8 – Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Determinação da área de estudo

Os pontos escolhidos para compor a amostra de análise foram áreas quadradas de 0,25 m² e sem graves defeitos superficiais tais como trincas, panelas ou ondulações,

considerando essas áreas representativas de cada trecho de pavimento asfáltico localizado no *Campus* do Pici, da Universidade Federal do Ceará. De acordo com informações da Coordenadoria de Projetos e Obras da UFC, em torno de 7.000 veículos trafegam no *campus* diariamente, segundo um levantamento realizado em 2016. Além disso, a maioria dos trechos é composta por vias simples com duas faixas de tráfego, revestimento asfáltico executado sobre paralelepípedos e idade de 5 anos, sendo apenas um trecho com idade superior a 15 anos. A Tabela 4 apresenta os trechos de pavimento asfáltico utilizados nesta pesquisa, com seus respectivos pontos analisados e a idade aproximada dos revestimentos.

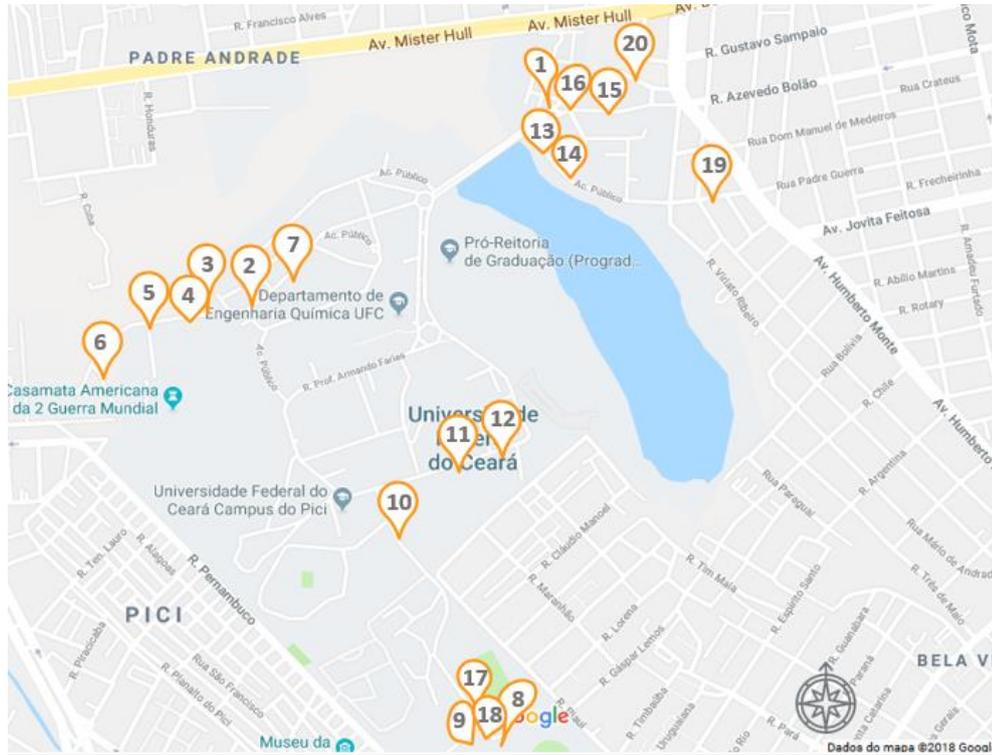
Tabela 4 – Distribuição dos pontos nos trechos de pavimento asfáltico do *Campus* do Pici.

Descrição do trecho	Pontos	Idade do revestimento
Entrada pela Av. Humberto Monte até as proximidades do Açude da Agronomia.	1, 15, 16 e 20	> 15 anos
Entrada pela Rua Pe. Guerra até as proximidades do Açude da Agronomia.	13, 14 e 19	5 anos
Entrada pela Rua Pernambuco até as proximidades da Embrapa.	8, 9, 10, 17 e 18	5 anos
Centro de Ciências, próximo ao PADETEC (Parque de Desenvolvimento Tecnológico).	11 e 12	5 anos
Centro de Ciências Agrárias (CCA).	2, 3, 4, 5, 6 e 7	5 anos

Fonte: Elaborado pela autora.

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 maiores transtornos ao fluxo dos veículos. A partir de uma vistoria prévia, caminhando sobre os trechos de pavimentação asfáltica, foram selecionados pontos que, visualmente, mostravam texturas superficiais diferentes, totalizando, assim, 20 pontos. A Figura 9 apresenta o mapa com a localização dos pontos escolhidos.

Figura 9 – Pontos escolhidos na UFC - *Campus do Pici*.



Fonte: Elaborado pela autora.

Vale ressaltar que alguns dos pontos estudados para a realização do ensaio não estão localizados exatamente na trilha de roda externa, onde deveria ser feito para uma adequada avaliação da aderência pneu-pavimento. Escolheu-se os pontos dessa forma devido ao foco do trabalho ser a análise da textura por meio de imagens digitais, e por isso, foi dada preferência aos locais com diferentes texturas, independentes de pertencerem ou não a trilha de roda da via.

3.2 Ensaio de Mancha de Areia

Para cada ponto selecionado, foi realizado o ensaio de Mancha de Areia. Esse ensaio tem como objetivo determinar a profundidade de um volume de areia espalhado na superfície do revestimento a ser analisado. Para a realização do ensaio, 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 mm^3 de um material com granulometria padronizada, utilizando um disco espalhador revestido de borracha e fazendo movimentos circulares até que a área da mancha pare de aumentar. Além disso, para a realização do ensaio utilizou-se um anteparo quadrado de madeira

de 55 cm x 55 cm x 15 cm, mostrado na Figura 10, a fim de evitar interferência do vento durante o ensaio.

Figura 10 – Anteparo de madeira.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após espalhar o material, é medido o diâmetro do círculo em quatro posições, espaçadas de 45° para obtenção de um diâmetro médio. Com esse diâmetro e com a relação entre o volume do material e a área do círculo, calcula-se a profundidade média da macrotextura, como mostrado na Equação 1. As etapas de realização do ensaio são mostradas na Figura 11, as quais levaram em torno de 10 minutos para serem realizadas, considerando o tempo de isolamento do local.

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

onde:

H_s é a profundidade média da macrotextura (mm);

V é o volume do material granular espalhado (mm³);

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

Após realização dos ensaios, cada ponto foi classificado em relação à profundidade média da macrotextura (H_s), de acordo com a classificação apresentada pelo DNIT (2006).

Figura 11 – Procedimentos do ensaio de Mancha de Areia.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3 Processamento digital de imagens

As etapas que constituem o PDI adotadas 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. A realização das etapas do processamento no *software* Matlab, apresentadas a seguir, levou em torno de 3 segundos. No Anexo I, é apresentado o código utilizado.

3.3.1 Aquisição de imagens

Para a aquisição das imagens digitais, fez-se uso de uma câmera digital *Sony Cyber-shot* de 16.2 *megapixels*. Nos locais de realização dos ensaios, foram capturadas imagens nos horários entre 06h e 08h, em três diferentes alturas, 60 cm, 40 cm e 20 cm. Escolheu-se esse horário a fim de tentar padronizar as imagens e evitar a formação de sombra nos agregados. Além disso, optou-se por imagens em diferentes alturas a fim de verificar qual delas conduzem a resultados melhores.

3.3.2 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. A Figura 12 (a) apresenta um exemplo de imagens com padrão RGB, enquanto que a Figura 12 (b) apresenta o padrão monocromático.

Figura 12 – Padrões de imagens.



a) Padrão RGB

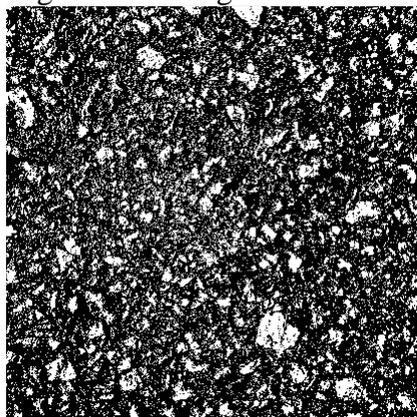
b) Padrão monocromático

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.3 Segmentação

Nesta etapa, a imagem foi segmentada 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 um ponto na escala de tom de cinza a partir do qual se divide 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. A Figura 13 apresenta um exemplo de imagem binarizada.

Figura 13 – Imagem binarizada.

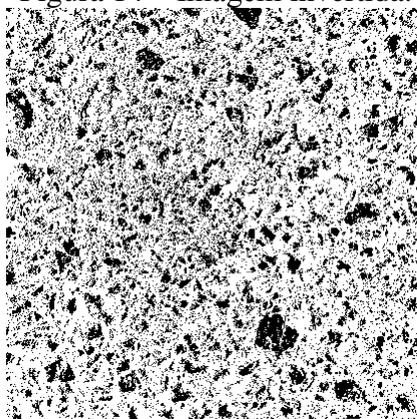


Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.4 Representação e descrição

Após binarizar a imagem, esta foi invertida, como mostra a Figura 14, 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 da textura.

Figura 14 – Imagem invertida.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.5 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 macrotextura, a fim de verificar a existência de uma correlação entre a quantidade de *pixels* pretos dada pela análise da imagem e a profundidade média da macrotextura obtida no ensaio de Mancha de Areia.

3.4 Análise e comparação dos resultados

A partir dos resultados de macrotextura obtidos pelo ensaio de Mancha de Areia e os resultados obtidos pelo PDI, foi analisada a correlação dos dados, a partir da comparação dos resultados com uso de gráficos no *software* Microsoft Excel. Utilizou-se a ferramenta da linha de tendência e o coeficiente de determinação (R^2). Em relação às alturas de obtenção das imagens, verificou-se a influência nos resultados das correlações.

4 ANÁLISES E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados das análises de imagens digitais, a fim de verificar a macrotextura dos pavimentos asfálticos em serviço localizados no *Campus* do Pici da UFC. É feita uma breve discussão sobre as condições de macrotextura dos pavimentos do *Campus*, a partir da sua classificação considerando as classes apresentadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Apresentam-se, como parte principal deste trabalho, uma análise comparativa entre os resultados do PDI e os valores de profundidade média de macrotextura (HS), incluindo uma discussão sobre os aspectos das imagens que interferem nos resultados.

4.1 Dados de profundidade média de macrotextura

Para a determinação da profundidade média de macrotextura, utilizando o ensaio de Mancha de Areia, seguiu-se o procedimento normatizado mostrado no capítulo anterior. Os resultados dos ensaios, incluindo a classificação de cada ponto, de acordo com as classes apresentadas pelo DNIT (2006), são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Profundidade média de macrotextura (HS).

Ponto	HS (mm)	Classificação DNIT (2006)
1	0,59	Média
2	0,65	Média
3	1,11	Aberta
4	1,11	Aberta
5	0,66	Média
6	1,24	Muito Aberta
7	0,55	Média
8	0,83	Aberta
9	0,55	Média
10	0,81	Aberta
11	0,53	Média
12	0,62	Média
13	0,76	Média
14	0,25	Fechada
15	1,45	Muito Aberta
16	0,36	Fechada
17	1,58	Muito Aberta
18	1,00	Aberta
19	0,72	Média
20	1,36	Muito Aberta

Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que a classe de macrotextura predominante é a média ($0.40 \text{ mm} < HS < 0.80 \text{ mm}$), representando 45% dos pontos ensaiados. A macrotextura aberta é apresentada em 25% dos pontos, já os pontos de macrotextura fechada representam 10%, e muito aberta representam 20%. Além disso, constatou-se que metade dos pontos analisados estão dentro dos limites sugeridos pelo DNIT (2006), $0,60 \text{ mm} < HS < 1,20 \text{ mm}$, ou seja de média a aberta. Isso indica que em torno da metade dos pavimentos asfálticos localizados no *Campus* do Pici da UFC apresentam condições de macrotextura que não atendem às especificações do DNIT, o que colabora para uma aderência pneu-pavimento pouco eficiente e, portanto, condições de segurança prejudicadas. A Tabela 6 apresenta um resumo dos resultados da macrotextura.

Tabela 6 – Resumo dos resultados da macrotextura.

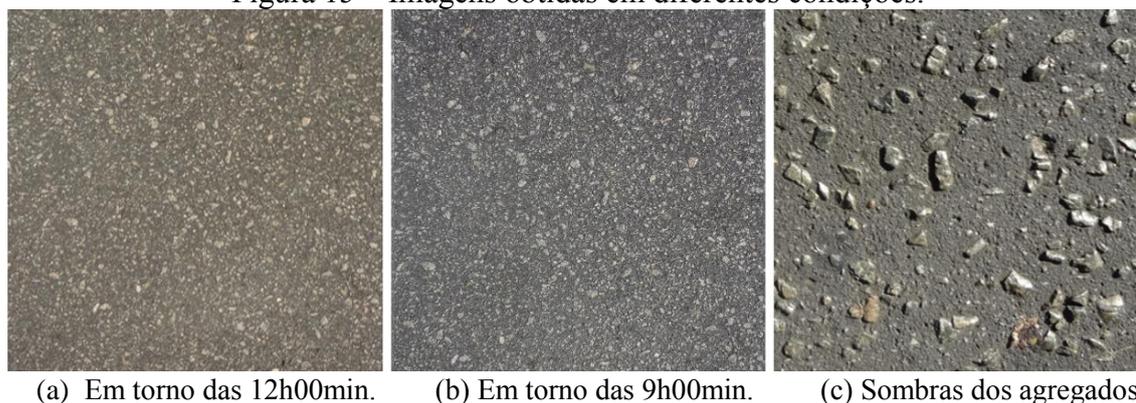
Classificação	Quantidade	Percentual
Muito Fechada	0	0%
Fechada	2	10%
Média	9	45%
Aberta	5	25%
Muito aberta	4	20%
$0,60 \text{ mm} < HS < 1,20 \text{ mm}$	10	50%

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Análise das imagens

Como já descrito no capítulo anterior, as imagens foram capturadas em uma mesma faixa de horário (entre 6h e 8h). 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 elas e, assim, obter resultados satisfatórios. Nas Figuras 15 (a) e 15 (b), são mostradas imagens do Ponto 11 em momentos diferentes, e na Figura 15 (c) é mostrada uma imagem do Ponto 20 onde são vistas as sombras dos agregados, a fim de ilustrar os resultados de imagens capturadas em diferentes condições.

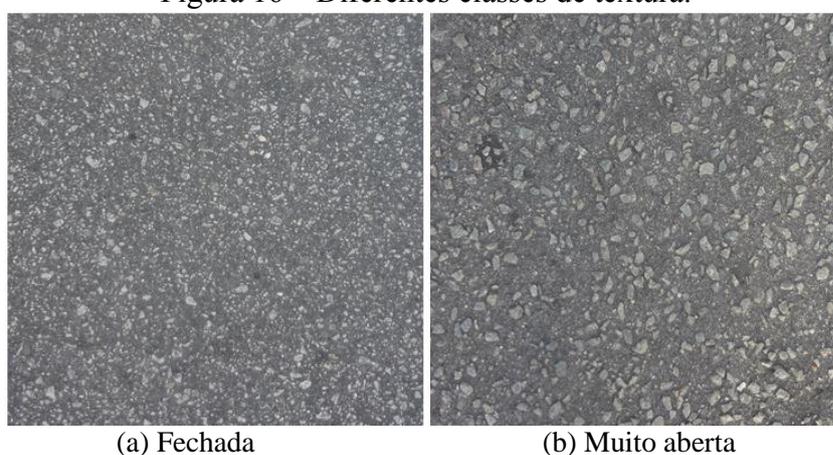
Figura 15 – Imagens obtidas em diferentes condições.



Fonte: Elaborado pela autora.

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, diferenciar uma macrotextura aberta de uma fechada, mesmo a uma altura de 60 cm. A Figura 16 (a) apresenta uma imagem de macrotextura fechada ($H_s = 0,25$ mm) enquanto que na Figura 16 (b) vê-se uma imagem de macrotextura muito aberta ($H_s = 1,45$ mm), ambas capturadas a 60 cm de altura.

Figura 16 – Diferentes classes de textura.

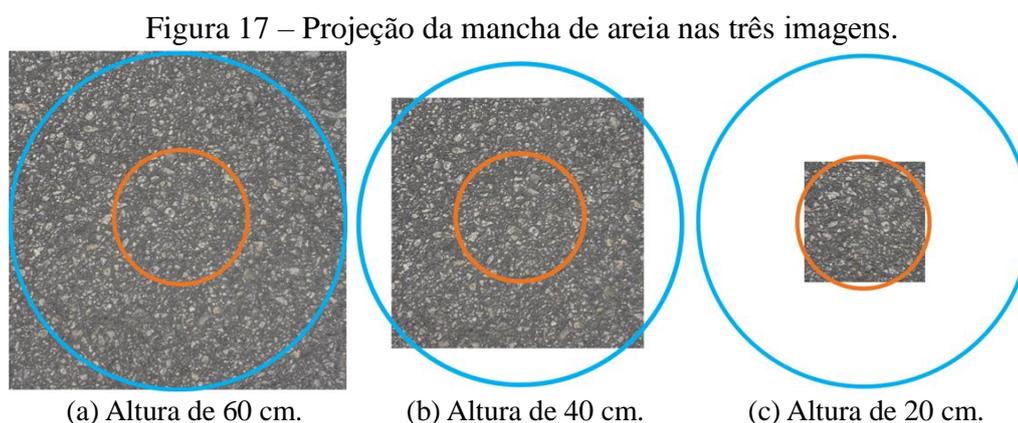


Fonte: Elaborado pela autora.

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 parte das 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 2.505×2.505 pixels. Proceder desse modo, também colaborou no processamento das imagens, uma vez que uma imagem com menos pixels tem o tempo de

processamento reduzido.

Foi analisada 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, 35,7 cm, e a de menor diâmetro, 14,2 cm. A Figura 17 mostra essas projeções nas imagens coletadas nas três diferentes alturas, onde o círculo azul representa a maior mancha de areia encontrada e o círculo laranja representa a menor.



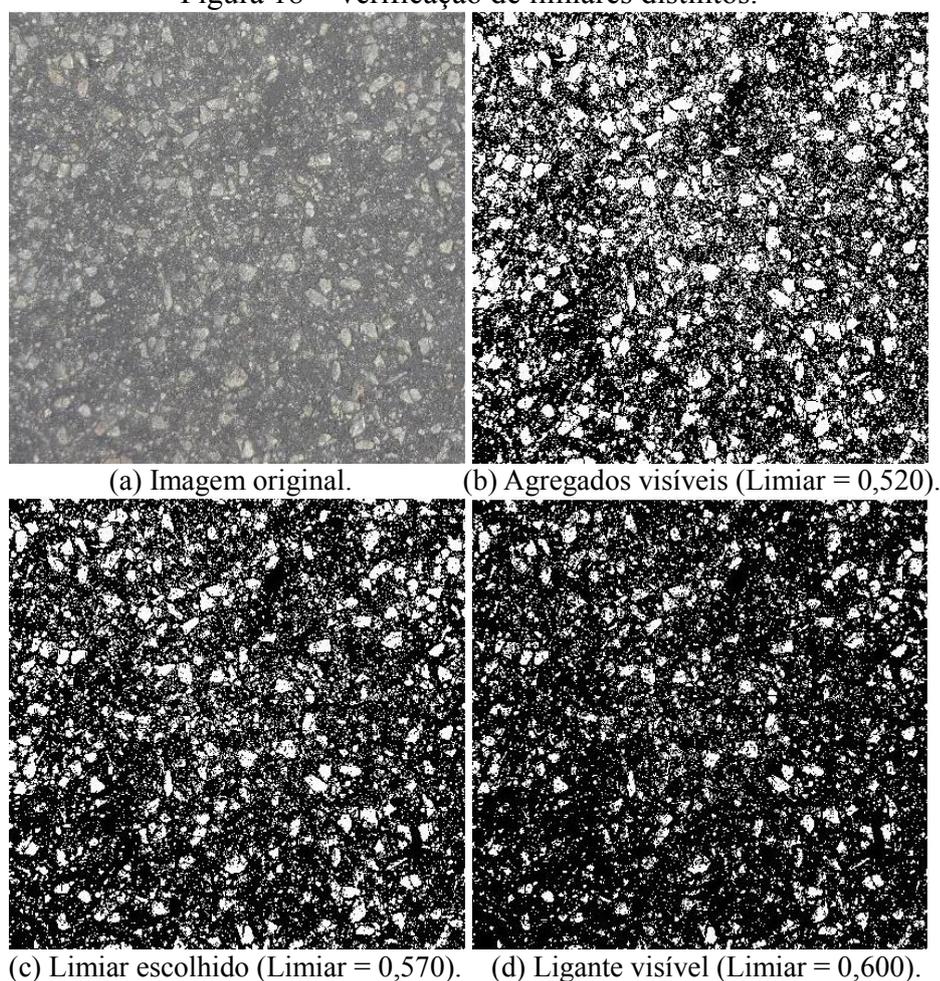
Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nessas imagens, nota-se que, a 60 cm de altura, a área recortada consegue englobar todos os tamanhos das manchas de areia dos pontos ensaiados, indicando uma adequada representatividade para todos os pontos de análise deste trabalho. Já as áreas recortadas das imagens a 40 cm de altura não conseguem abranger a maior mancha de areia completamente, porém, ainda assim representa uma parte considerável dela. Na imagem capturada a 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 *software* 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 que as áreas com concentração de *pixels* pretos significavam regiões mais profundas. Nessa busca por limiares que conseguissem mostrar as partes mais profundas da imagem, alguns agregados não eram bem representados devido possuir a coloração mais escura ou por possuir ligante na superfície. Sendo assim, foram escolhidos limiares que conseguissem representar os dois aspectos.

Na Figura 18, são apresentados exemplos de imagens de um mesmo ponto com três limiares diferentes. Na Figura 18 (b) a imagem com limiar menor consegue representar bem os agregados, porém a visualização da profundidade não se mostra adequada. Na Figura 18 (c) o limiar aplicado foi considerado o melhor para análise, representando os dois aspectos, enquanto que na Figura 18 (d) foi aplicado um limiar maior que consegue representar bem a profundidade, porém prejudica a visualização dos agregados. Apesar de visualmente muito semelhantes, essas imagens apresentam diferentes quantidades de *pixels* pretos que interferem significativamente nos resultados.

Figura 18 – Verificação de limiares distintos.



Fonte: Elaborado pela autora.

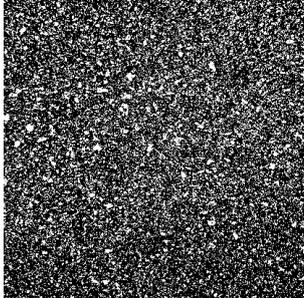
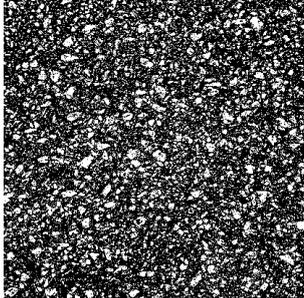
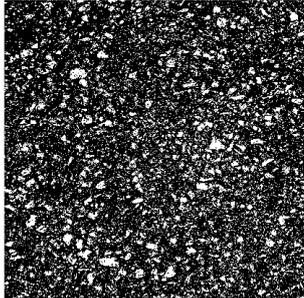
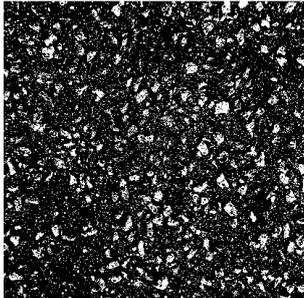
4.3 Análise comparativa dos dados de Mancha de Areia e PDI

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

4.3.1 Determinação de limiares adequados a cada imagem

Na Tabela 7 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. Todos os pontos ensaiados são apresentados no Apêndice A.

Tabela 7 – Imagens binarizadas obtidas no processamento digital de imagens para alguns pontos selecionados.

Ponto	Hs (mm)	Classificação da macrotextura	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.

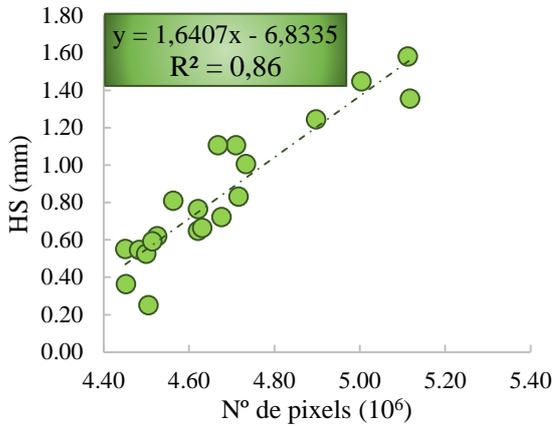
É apresentado na Tabela 8, o resultado do PDI de todos os pontos. Em seguida, nas Figuras 19 (a), 20 (a) e 21 (a) são apresentados os gráficos de correlação entre os valores de profundidade média da macrotextura e o número de *pixels* obtidos por meio da análise digital, para as três diferentes alturas. Além disso, na Figuras 19 (b), 20 (b) e 21 (b) são apresentados gráficos com a correlação para cada classe de macrotextura.

Tabela 8 – Resultados do PDI para imagens de tamanho de 2.505 x 2.505 *pixels*.

ALTURAS		H = 20 cm		H = 40 cm		H = 60 cm	
Ponto	HS (mm)	Limiar	Nº de <i>pixels</i> (10 ⁶)	Limiar	Nº de <i>pixels</i> (10 ⁶)	Limiar	Nº de <i>pixels</i> (10 ⁶)
1	0,59	0,560	4,51	0,570	4,56	0,530	4,57
2	0,65	0,540	4,62	0,540	4,67	0,540	4,77
3	1,11	0,560	4,71	0,560	4,87	0,550	4,89
4	1,11	0,570	4,67	0,570	4,73	0,555	4,77
5	0,66	0,550	4,63	0,550	4,69	0,550	4,73
6	1,24	0,570	4,90	0,560	4,85	0,560	4,80
7	0,55	0,540	4,45	0,560	4,49	0,550	4,60
8	0,83	0,570	4,72	0,520	4,69	0,520	4,75
9	0,55	0,500	4,48	0,500	4,45	0,510	4,61
10	0,81	0,550	4,56	0,520	4,67	0,520	4,68
11	0,53	0,590	4,36	0,490	4,59	0,520	4,54
12	0,62	0,560	4,52	0,570	4,51	0,540	4,63
13	0,76	0,550	4,62	0,510	4,68	0,510	4,71
14	0,25	0,510	4,50	0,510	4,47	0,510	4,59
15	1,45	0,590	5,00	0,560	5,20	0,560	5,09
16	0,36	0,560	4,45	0,500	4,51	0,500	4,54
17	1,58	0,580	5,20	0,570	5,26	0,570	5,30
18	1,00	0,580	4,73	0,560	4,88	0,540	4,83
19	0,72	0,540	4,68	0,530	4,84	0,530	4,69
20	1,36	0,550	5,12	0,550	5,21	0,560	5,25

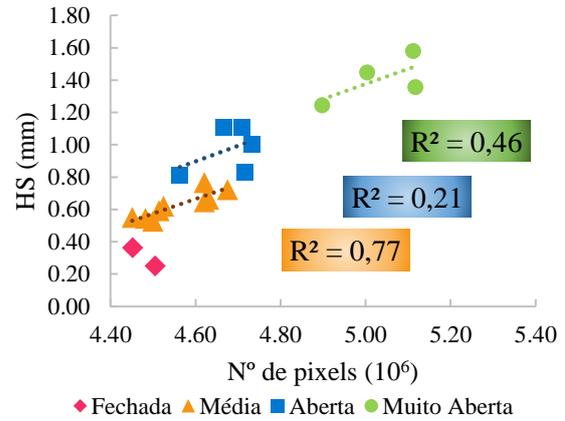
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Correlação entre número de *pixels* e HS para imagens a 20 cm de altura e tamanho de 2.505 x 2.505 *pixels*.



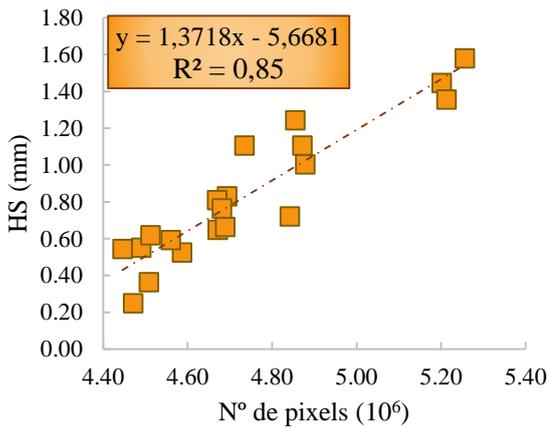
(a) Correlação para todos os pontos.

Fonte: Elaborado pela autora.



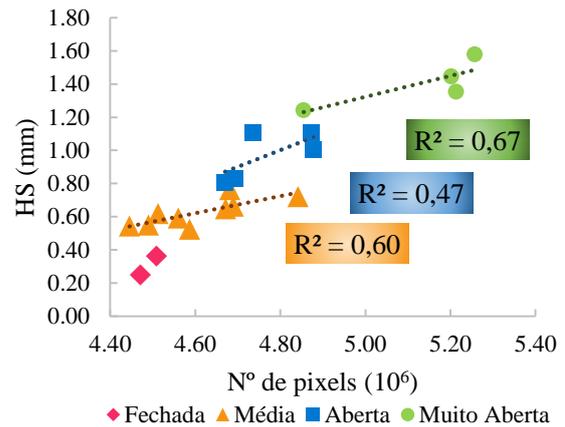
(b) Correlação para cada faixa de macrotextura.

Figura 20 – Correlação entre número de *pixels* e HS para imagens a 40 cm de altura e tamanho de 2.505 x 2.505 *pixels*.



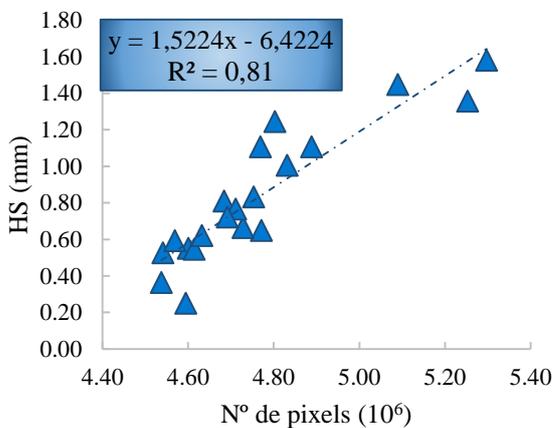
(a) Correlação para todos os pontos.

Fonte: Elaborado pela autora.



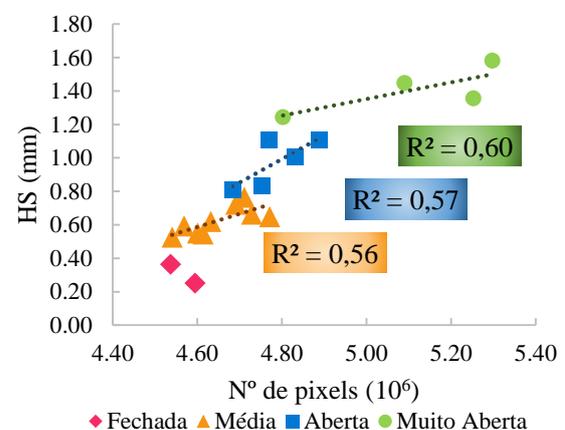
(b) Correlação para cada faixa de macrotextura.

Figura 21 – Correlação entre número de *pixels* e HS para imagens a 60 cm de altura e tamanho de 2.505 x 2.505 *pixels*.



(a) Correlação para todos os pontos.

Fonte: Elaborado pela autora.



(b) Correlação para cada faixa de macrotextura.

Analisando os resultados mostrados nas Figuras 19(a), 20(a) e 22(a), verifica-se a existência de alta correlação entre os valores de HS e os resultados do PDI. O valor do coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,86, na Figura 19(a), indica que o PDI consegue explicar cerca de 86% dos resultados do ensaio, o que é um valor satisfatório, ou seja 86% de uma variável explica a outra. Isso significa que o modelo de análise, que tem como base a contagem de *pixels* escuros, se adequa aos dados de macrotextura, sendo essa análise feita a partir de uma adaptação manual de um limiar a cada imagem. Além disso, o valor de R^2 igual a 0,81, na Figura 21(a), apesar de menor, também é suficiente para representar adequadamente os valores de profundidade média de macrotextura.

Observando a correlação separadamente para cada classe de macrotextura, com base nas Figuras 19(b), 20(b), e 21(b), percebe-se uma redução no valor de R^2 , chegando a 0,21. 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 muito baixa. Porém, deve-se observar que a quantidade de pontos para cada classe provavelmente não foi suficiente para representar o comportamento dos dados.

Analisando a influência da altura de captura das imagens, percebe-se que os resultados de R^2 divergem pouco, com maior diferença de 0,04. Porém, verifica-se que foi possível obter correlações melhores para imagens capturadas mais próximas ao revestimento analisado. Isso já era esperado, tendo em vista que imagens mais aproximadas permitem distinguir melhor os agregados do ligante na mistura, e com isso, facilitar a identificação da textura.

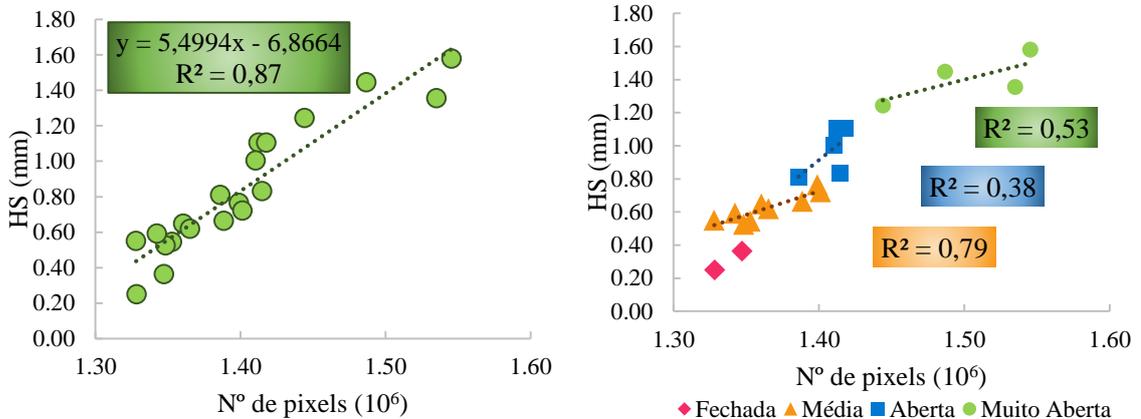
Um aspecto que se buscou verificar foi o tamanho da imagem a ser processada, a fim de observar a qualidade dos resultados para arquivos de imagem menores que o escolhido como principal. Dessa forma, foi aplicado o PDI para as mesmas imagens capturadas a 20 cm, a 40 cm e a 60 cm de altura, porém recortadas em tamanho quadrado de 1.400 x 1.400 *pixels*. Foi determinado esse tamanho pela facilidade de recorte considerando o número de pixels, utilizando o *software* Paint. A Tabela 9 e as Figuras 25, 26 e 27 mostram os resultados obtidos.

Tabela 9 – Resultados do PDI para imagens de tamanho de 1.400 x 1.400 *pixels*.

ALTURAS		H = 20 cm		H = 40 cm		H = 60 cm	
Ponto	HS (mm)	Limiar	Nº de <i>pixels</i> (10 ⁶)	Limiar	Nº de <i>pixels</i> (10 ⁶)	Limiar	Nº de <i>pixels</i> (10 ⁶)
1	0,59	0,540	1,34	0,590	1,45	0,550	1,48
2	0,65	0,530	1,36	0,550	1,48	0,550	1,52
3	1,11	0,560	1,41	0,550	1,51	0,560	1,52
4	1,11	0,550	1,42	0,580	1,51	0,580	1,50
5	0,66	0,550	1,39	0,570	1,48	0,570	1,52
6	1,24	0,580	1,44	0,570	1,54	0,570	1,59
7	0,55	0,550	1,33	0,580	1,43	0,560	1,46
8	0,83	0,570	1,41	0,530	1,50	0,530	1,52
9	0,55	0,500	1,35	0,530	1,48	0,530	1,46
10	0,81	0,560	1,39	0,540	1,48	0,540	1,51
11	0,53	0,600	1,35	0,500	1,44	0,540	1,47
12	0,62	0,560	1,37	0,590	1,47	0,560	1,50
13	0,76	0,540	1,40	0,520	1,50	0,510	1,52
14	0,25	0,500	1,33	0,520	1,40	0,530	1,43
15	1,45	0,570	1,49	0,550	1,60	0,560	1,61
16	0,36	0,550	1,35	0,510	1,43	0,520	1,47
17	1,58	0,570	1,55	0,580	1,64	0,590	1,68
18	1,00	0,560	1,41	0,570	1,53	0,540	1,52
19	0,72	0,530	1,40	0,540	1,50	0,540	1,50
20	1,36	0,560	1,54	0,570	1,66	0,560	1,61

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 – Correlação entre número de *pixels* e HS para imagens a 20 cm de altura e tamanho de 1.400 x 1.400 *pixels*.

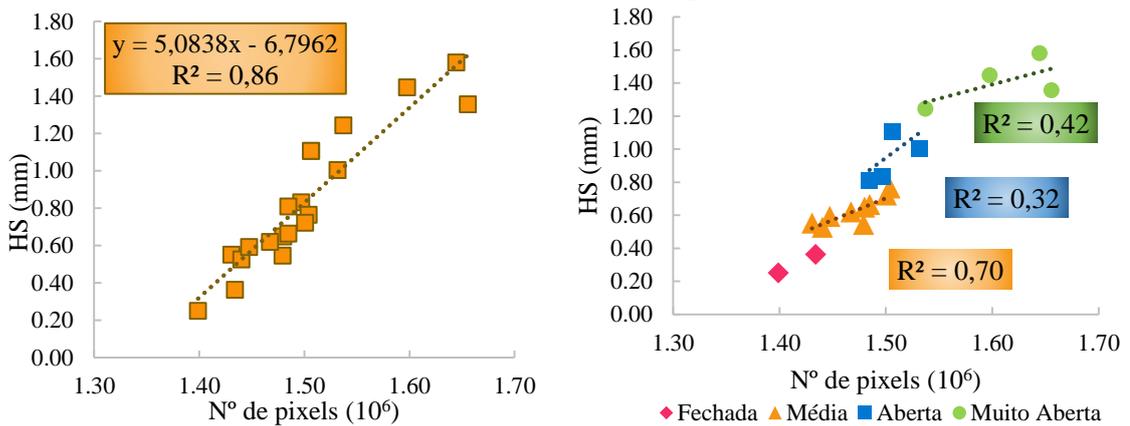


(a) Correlação para todos os pontos.

(b) Correlação para cada classe de macrotextura.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23 – Correlação entre número de *pixels* e HS para imagens a 40 cm de altura e tamanho de 1.400 x 1.400 *pixels*.

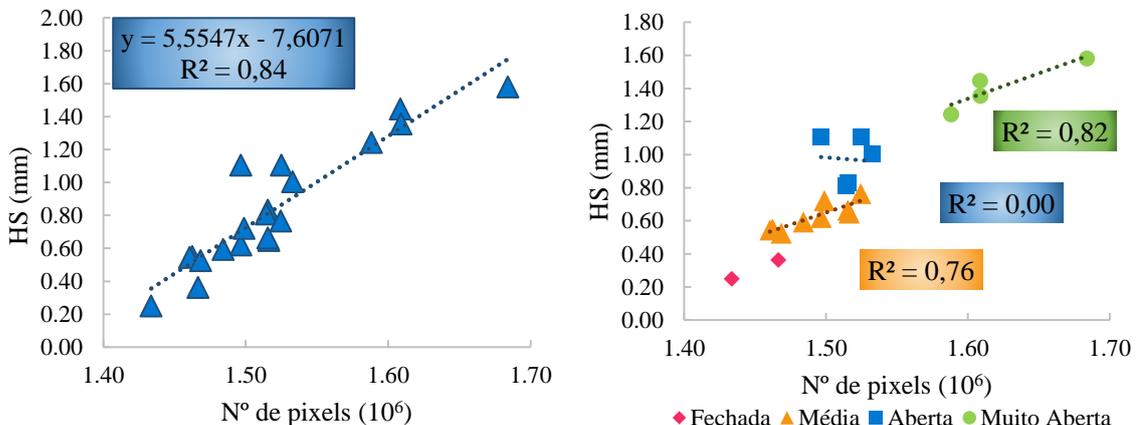


(a) Correlação para todos os pontos.

(b) Correlação para cada classe de macrotextura.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 – Correlação entre número de *pixels* e HS para imagens a 60 cm de altura e tamanho de 1.400 x 1.400 *pixels*.



(a) Correlação para todos os pontos.

(b) Correlação para cada faixa de macrotextura.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados apresentados pela Tabela 9 e pelos gráficos das Figura 22(a), 23(a) e 24(a) 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 0,87, 0,86 e 0,84 mostram-se próximos aos valores de R^2 obtidos para imagens de 2.505 x 2.505 *pixels*, descritos anteriormente. Esses resultados indicam que a análise de imagens de uma superfície menor, como 1.400 x 1.400 *pixels*, consegue obter resultados satisfatórios, assim como em uma superfície maior de 2.505 x 2.505 *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 2.505 x 2.505 *pixels*, reduziram consideravelmente, principalmente para a faixa de macrotextura aberta. Além disso, os pontos de macrotextura média, que estão inclusos na faixa de maior quantidade de pontos, obteve bons resultados de correlação, variando de 0,70 a 0,79. Isso 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 Tabela 10 apresenta o resumo dos resultados dos coeficientes de determinação obtidos até aqui em relação à altura e aos tamanhos das imagens.

Tabela 10 – Resumo das correlações (HS vs PDI).

ALTURAS	20 cm	40 cm	60 cm
2.505 x 2.505 <i>pixels</i>	0,86	0,85	0,81
1.400 x 1.400 <i>pixels</i>	0,87	0,86	0,84

Fonte: Elaborado pela autora.

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 a iluminação natural, apesar de todas as imagens terem sido capturadas em um mesmo horário do dia. Na Figura 25 é possível notar essa diferença de brilho. Além disso, o tom de cor dos agregados tem grande influência, 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 Figura 26.

Figura 25 – Diferença de brilho nas imagens.

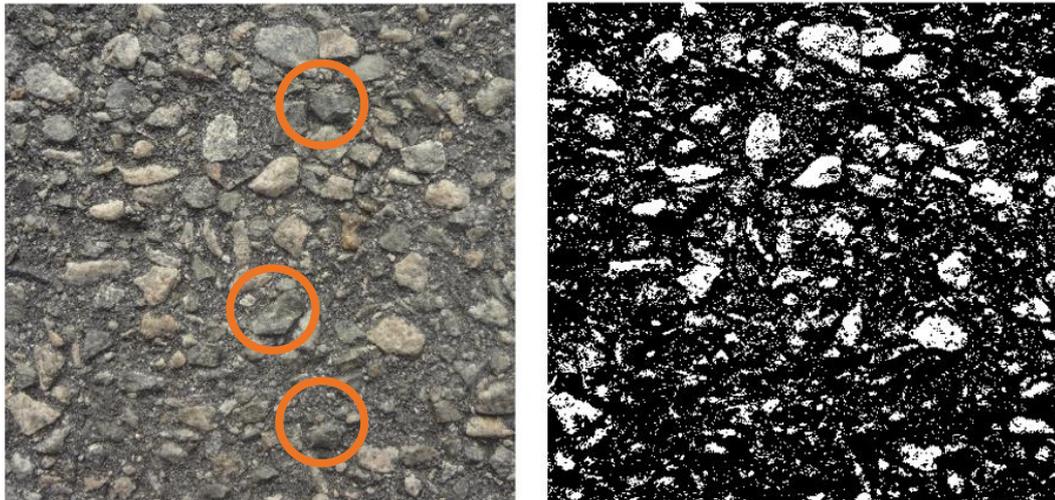


(a) Maior intensidade de brilho.

(b) Menor intensidade de brilho.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 – Influência da cor dos agregados.



a) Imagem original.

b) Agregados mais escuros mal representados na imagem binarizada.

Fonte: Elaborado pela autora.

Um outro fator notório no processamento digital das imagens é a cor do ligante na mistura asfáltica. Isso se deve aos diferentes tipos de revestimentos, sendo alguns com maior quantidade de agregados miúdos a médios, o que faz com que a cor do ligante seja menos aparente do que em uma mistura onde há predominância de agregados graúdos. Além disso, a cor da mistura também está relacionada a sua idade, ao desgaste dado pelo tráfego e pelos condicionantes ambientais (sol, chuva e temperatura), uma vez que, com o envelhecimento do revestimento, o ligante geralmente mudar de cor devido à oxidação. Além disso, com o tempo, há 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 Figura 27.

Figura 27 – Diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.2 PDI para um único limiar

A ideia de se utilizar o PDI 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 aderência pneu-pavimento. Assim, seria importante que houvesse um único limiar que conseguisse se adequar a todas as imagens, facilitando, assim, 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 PDI e os valores de profundidade média de macrotextura obtidos. Dessa forma, foram gerados vários gráficos de correlação para limiares de 0,49 a 0,60, variando de 0,01. Foi determinada essa faixa de limiares com base na visualização das imagens binarizadas, já que, para limiares fora dessa faixa, tais imagens não representavam muito bem as imagens originais.

Dentre os gráficos de correlação gerados pelos limiares da faixa considerada, foi observado qual apresentava maior correlação. A Tabela 11 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 11 – Limiares único para cada grupo de imagens.

Alturas	2.505 x 2.505 pixels			1.400 x 1.400 pixels		
	H = 20 cm	H = 40 cm	H = 60 cm	H = 20 cm	H = 40 cm	H = 60 cm
Limiar	0,49	0,60	0,49	0,49	0,60	0,49
R²	0,08	0,07	0,04	0,05	0,13	0,06

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados da Tabela 11, 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. Isso 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 características, ou seja, imagens onde as cores do ligante e dos agregados não se diferenciasssem.

4.4 Classificação da macrotextura com base nos resultados do PDI

A fim de verificar os resultados gerados por meio do PDI, foi estimado o valor da profundidade média de macrotextura, a partir das equações lineares geradas para os gráficos das Figuras 19, 20, 21, 25, 26 e 27, utilizando o *software* Excel. Os valores encontrados foram classificados de acordo com as classes Fechada, Média, Aberta e Muito Aberta, e dentro dos limites de macrotextura sugeridos pelo DNIT ($0,60 \text{ mm} < \text{HS} < 1,20 \text{ mm}$). As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados para imagens de $2.505 \times 2.505 \text{ pixels}$ e de $1.400 \times 1.400 \text{ pixels}$, onde HS' indica a profundidade média de macrotextura estimada. Além disso, as Figuras 28 e 29 mostram os gráficos dos valores de HS vs HS'.

Tabela 12 – Classificação dos valores de profundidade média de macrotextura estimados para $2.505 \times 2.505 \text{ pixels}$. (Continua)

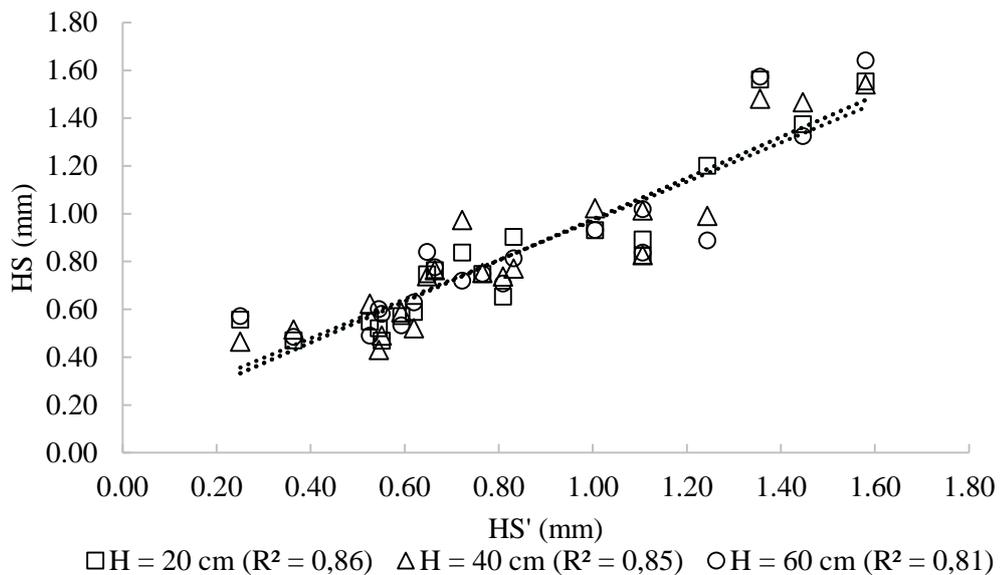
ALTURA		H = 20 cm		H = 40 cm		H = 60 cm	
PONTO	HS (mm)	Nº de pixels (10^6)	HS' (mm)	Nº de pixels (10^6)	HS' (mm)	Nº de pixels (10^6)	HS' (mm)
14	0,25	4,50	0,56	4,47	0,46	4,59	0,57
16	0,36	4,45	0,47	4,51	0,52	4,54	0,48
11	0,53	4,50	0,55	4,59	0,62	4,54	0,49
9	0,55	4,48	0,52	4,45	0,43	4,61	0,60
7	0,55	4,45	0,47	4,49	0,49	4,60	0,58
1	0,59	4,51	0,57	4,56	0,59	4,57	0,53
12	0,62	4,52	0,59	4,51	0,52	4,63	0,63
2	0,65	4,62	0,75	4,67	0,74	4,77	0,84
5	0,66	4,63	0,76	4,69	0,76	4,73	0,78
19	0,72	4,68	0,84	4,84	0,97	4,69	0,72
13	0,76	4,62	0,75	4,68	0,50	4,71	0,75
10	0,81	4,56	0,65	4,67	0,74	4,68	0,71
8	0,83	4,72	0,90	4,69	0,77	4,75	0,81
18	1,00	4,73	0,93	4,88	1,02	4,83	0,93

Tabela 12 – Classificação dos valores de profundidade média de macrotextura estimados para 2.505 x 2.505 pixels. (Conclusão)

ALTURA		H = 20 cm		H = 40 cm		H = 60 cm	
PONTO	HS (mm)	Nº de pixels (10 ⁶)	HS' (mm)	Nº de pixels (10 ⁶)	HS' (mm)	Nº de pixels (10 ⁶)	HS' (mm)
3	1,11	4,71	0,89	4,87	1,01	4,89	1,02
4	1,11	4,67	0,83	4,73	0,83	4,77	0,84
6	1,24	4,90	1,20	4,85	0,99	4,80	0,89
20	1,36	5,12	1,56	5,21	1,48	5,25	1,57
15	1,45	5,00	1,38	5,20	1,47	5,09	1,33
17	1,58	5,11	1,55	5,26	1,54	5,30	1,64
		Faixa do DNIT	Média			Aberta	
			Fechada			Muito Aberta	

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 28 – Correlação de HS x HS' para imagens de 2.505 x 2.505 pixels.



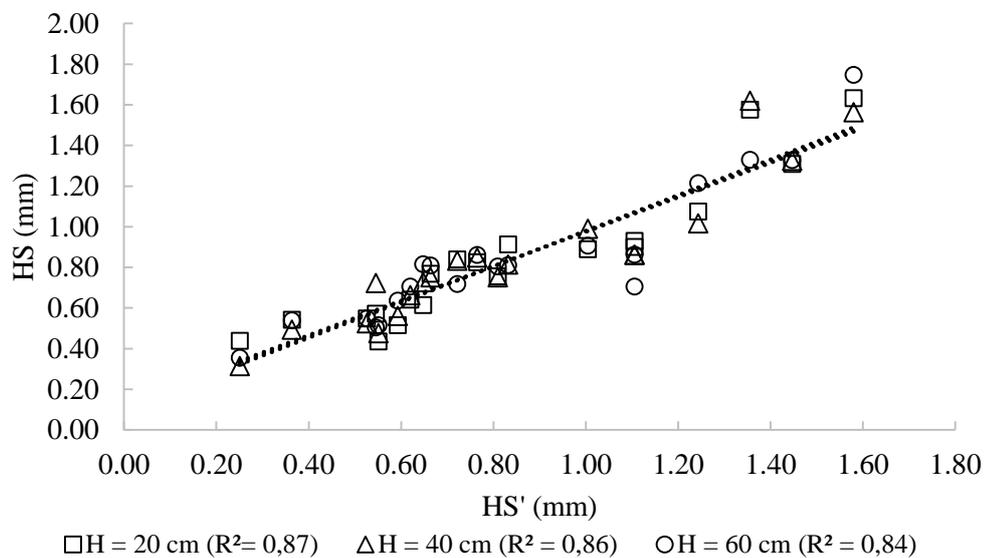
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 13 – Classificação dos valores de profundidade média de macrotextura estimados para 1.400 x 1.400 pixels.

ALTURA		H = 20 cm		H = 40 cm		H = 60 cm	
PONTO	HS (mm)	Nº de pixels (10 ⁶)	HS' (mm)	Nº de pixels (10 ⁶)	HS' (mm)	Nº de pixels (10 ⁶)	HS' (mm)
14	0,25	1,33	0,44	1,40	0,32	1,43	0,36
16	0,36	1,35	0,54	1,43	0,49	1,47	0,54
11	0,53	1,35	0,55	1,44	0,53	1,47	0,55
9	0,55	1,35	0,57	1,48	0,72	1,46	0,51
7	0,55	1,33	0,44	1,43	0,48	1,46	0,52
1	0,59	1,34	0,52	1,45	0,56	1,48	0,64
12	0,62	1,37	0,64	1,47	0,66	1,50	0,71
2	0,65	1,36	0,61	1,48	0,73	1,52	0,82
5	0,66	1,39	0,77	1,48	0,75	1,52	0,81
19	0,72	1,40	0,84	1,50	0,83	1,50	0,72
13	0,76	1,40	0,83	1,50	0,85	1,52	0,86
10	0,81	1,39	0,76	1,48	0,75	1,51	0,80
8	0,83	1,41	0,91	1,50	0,81	1,52	0,81
18	1,00	1,41	0,89	1,53	0,99	1,53	0,91
3	1,11	1,41	0,90	1,51	0,86	1,52	0,86
4	1,11	1,42	0,93	1,51	0,86	1,50	0,71
6	1,24	1,44	1,07	1,54	1,02	1,59	1,22
20	1,36	1,54	1,58	1,66	1,62	1,61	1,33
15	1,45	1,49	1,31	1,60	1,33	1,61	1,33
17	1,58	1,55	1,63	1,64	1,56	1,68	1,75
		Faixa do DNIT		Média		Aberta	
				Fechada		Muito Aberta	

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 29 – Correlação de HS x HS' para imagens de 1.400 x 1.400 pixels.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base na análise das tabelas apresentadas, percebe-se que na maioria dos pontos o valor de profundidade média de macrotextura estimado pelas equações é maior que o valor real, fazendo com que os alguns pontos classificados em uma classe passem a ser classificados em outra. Além disso, nota-se que as principais variações ocorrem para os pontos de macrotextura fechada, chegando a uma divergência de 129%, no Ponto 14, para uma imagem capturada a 60 cm e de tamanho 2.505 x 2.505 *pixels*. Pode-se entender, com isso, que análise abordada neste trabalho não conseguiu interpretar adequadamente as imagens de macrotextura fechada. Por outro lado, analisando as demais classes (Média, Aberta e Muito aberta), verifica-se que há uma divergência menor entre os valores reais e os estimados, sendo a variação de 0% a 39%, considerando o conjunto total de resultados das duas tabelas em análise.

Ao se verificar os pontos que são classificados dentro dos limites de macrotextura recomendados pelo DNIT (2006), nota-se que grande parte dos pontos continuam dentro dessa faixa, ao serem obtidos pelo PDI. A classificação que mais difere da realidade é a resultante das imagens capturadas a 40 cm, não conseguindo incluir todos os pontos e acrescentando outros com macrotextura fora dos limites. Já as classificações que mais se aproximaram da realidade foram obtidas pelas imagens de 2505 x 2505 *pixels* capturadas a 60 cm de altura, e pelas imagens menores (1.400 x 1.400 *pixels*) capturadas a 20 cm de altura, conseguindo incluir 100% dos pontos e mais 1 ponto com macrotextura maior que o limite de 1,20 mm.

Essas observações ressaltam que imagens capturadas mais próximas ao pavimento, ou seja, a uma altura menor, e de tamanho menor, permitem obter melhores resultados com o PDI. Além disso, a classificação dos valores estimados com base nos limites de macrotextura mostrou-se muito próxima a classificação obtida com os valores reais dos ensaios. Com isso, vê-se que a aplicação do PDI para a classificação da macrotextura e, assim, sua avaliação, de acordo com as recomendações do DNIT apresenta resultados satisfatórios.

4.5 Limitações da análise

Considera-se que os resultados obtidos por meio da aplicação do PDI mostraram-se satisfatórios, ao conseguir uma correlação alta entre a quantidade de *pixels* pretos e a profundidade média da macrotextura. Apesar disso, há algumas limitações nesta pesquisa que são importantes de serem discutidas.

Uma dessas limitações é o tipo de revestimento, uma vez que este pode ser novo e possuir ligante com cor mais intensa, o que colabora na identificação do ligante. Por outro lado, em revestimentos novos é possível que grande parte dos agregados esteja recoberta pelo ligante,

dificultando a análise das imagens.

Outra limitação é a necessidade de iluminação para a aquisição das imagens. É provável que as imagens não fiquem muito adequadas à análise quando capturadas em horários com pouca iluminação. Uma dificuldade encontrada na obtenção das imagens foi a formação de sombras de objetos próximos ao pavimento, como árvores e postes. Assim, é necessário que se tenha o cuidado de obter imagens em horários que não exista esse problema, ou em pontos distantes desses objetos.

Um último aspecto tido como limitação é a necessidade de adquirir imagens nas mesmas condições horárias, a fim de manter um padrão de cor e brilho. Apesar das imagens deste trabalho terem sido obtidas em uma mesma faixa de horário, percebeu-se que persistiram diferenças que impediram a utilização de um único limiar para na análise. Dessa forma, verifica-se que é preciso uma metodologia melhor que consiga padronizar essas imagens, a fim de tornar o PDI mais prático, mais razoável e acurado, sobretudo para pavimentos em serviço.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho, o qual teve como proposta fazer uma análise comparativa entre os resultados do ensaio de Mancha de Areia e os resultados da aplicação do Processamento Digital de Imagens (PDI). Serão feitos comentários relativos ao modelo de PDI adotado, aos aspectos das imagens que comprometem a análise, às correlações encontradas e ao resultado da classificação a partir de valores estimados pela análise. Além disso, serão comentadas informações relevantes encontradas no transcorrer da pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

5.1.1 Principais conclusões

A aplicação e desenvolvimento de novas tecnologias para avaliação de pavimentos e o incremento de ferramentas computacionais, têm mostrado resultados satisfatórios em relação à rapidez e praticidade na coleta de dados, à racionalização da mão-de-obra e redução de custos. O PDI 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 início 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 de imagens. 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 profundidade da 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 (R^2) variando de 0,81 a 0,87 indicam que os resultados obtidos pelo ensaio de 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 menores conduz a melhores resultados. Porém, seria necessária uma análise mais aprofundada, com maior

quantidade de dados e diferentes tipos de revestimento, para verificar mais 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 0,13. As possíveis causas desse resultado são as particularidades de cada imagem, como a cor dos agregados e ligante, as quais são modificadas devido ao envelhecimento, o tipo de mistura e o brilho da imagem.

A classificação dos valores de macrotextura, estimados através das equações geradas pelos gráficos de correlação, mostrou que há diferença significativa em relação à classificação com os valores obtidos por meio do ensaio de Mancha de Areia. Por outro lado, ao classificar os valores nos limites de macrotextura recomendada pelo DNIT, notou-se que foi possível obter uma classificação muito próxima em relação a classificação com os resultados do ensaio.

De forma geral, verificou-se que existe uma correlação entre os resultados do PDI 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 do PDI, contribuindo, dessa forma, com o desenvolvimento da avaliação das condições de segurança em pavimentos asfálticos urbanos, rodoviários e aeroportuários.

5.1.2 Principais limitações

Com relação às limitações e dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho, tem-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; a presença de objetos que podem gerar sombra sobre o ponto de análise; e a resolução da câmera digital utilizada, que tem influência na obtenção de imagens de melhor qualidade. Além disso, uma das dificuldades envolvidas foi a necessidade de isolamento de um trecho da via, para que fosse possível realizar o ensaio e obter as imagens com segurança para os pesquisadores envolvidos, o que levou a um prolongado intervalo de tempo, em relação ao risco existente.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Serão listadas, a seguir, algumas sugestões para o desenvolvimento de futuras pesquisas que poderão dar continuidade a este trabalho:

- a) a utilização de uma câmera fotográfica ou *smartphone* com melhor resolução, a fim de melhorar a identificação das características de cada tipo de revestimento;
- b) a realização de uma análise de imagens capturadas em diferentes horários do dia, de modo a verificar a influência da iluminação;
- c) a padronização dos aspectos das imagens, por meio da edição de imagens, alterando cor, brilho ou contraste, de forma que se possa utilizar um único limiar que se adeque a todas as imagens e assim possa facilitar a análise digital;
- d) a utilização de uma metodologia de análise da macrotextura em três dimensões (3D);
- e) a análise da macrotextura para diferentes revestimentos, a fim de verificar a aplicabilidade do método.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. **Aeródromos – operação, manutenção e resposta à emergência - RBAC 153**. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. Ministério da Defesa. Brasília, DF, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E303-98 - Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**, 1998.
- ANDRESEN, A. WAMBOLD, J.C. **Friction Fundamentals, Concepts and Methodology**. Transportation Development Centre, Canadá, n. TP 13837E, 1999.
- APS, Márcia. **Classificação da Aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – international friction index para revestimentos asfálticos**. 2006. 208p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- 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 de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- 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, RJ, Brasil, 2016.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras/Abeda, 2008.
- BUCHARLES, L. G. E. **Critérios para avaliação pericial da macro e microtextura de pavimento asfáltico em local de acidente de trânsito**. 2014. 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- DO, M. T.; KANE, M.; TANG, Z.; LARRARD, F. **Physical Model for the Prediction of Pavement Polishing**. 17th International Conference on Wear of Materials, Las Vegas, USA, v. 267, p. 81-85, 2009.
- ELUNAI, R.; CHANDRAN, V.; MABUKWA, P. **Digital Image processing techniques for pavement macro-texture analysis**. Proceeding of the 24th ARRB Conference: Building on 50 years of road transport research, ARRB Group Ltd, Sebel Hotel, Melbourne, Vic, p. 1 -5, 2010.
- FERREIRA, P. N. **Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias**

estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis. 2002.161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FERREIRA, J. C. **Estudo e Avaliação da Influência da Macrotextura e Microtextura na Aderência Pneu-Pavimento.** 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais.** São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

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.

LUGÃO, W. G. **Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG.** 2008. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2008.

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.

MOUNCE, J. M., BARTOSKEWITZ, R. T. **Hidroplaning and Roadway Tort Liability.** Transportation Research Record, USA, n. 1401, p. 117-124. 1993.

OLIVEIRA, F. H. L. **Proposição de estratégias de manutenção de pavimentos aeroportuários baseadas na macrotextura e no atrito: Estudo de caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza.** 2009. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PADILHA, F. R. R. **Reconhecimento de variedades de soja através do Processamento e Imagens Digitais usando redes neurais artificiais.** 2007. 94 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí 2007.

PEREIRA, C. A. **Análise da aderência pneu-pavimento em rodovias do Estado de Pernambuco e da Paraíba com elevado índice de acidentes.** 2010. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

PIDWERBESKY, B.; WATERS, J.; GRANSBERG, D.; STEMPROK, R. **Road surface texture measurement using digital image processing and information theory.** Land Transport New Zealand Research Report 290, 65 pp, 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) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2008.

SILVA, J. P. S. **Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários.**

2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SPECHT, L. P.; ROZEK, T.; HIRSCH, F.; SANTOS, R. T. **Avaliação da macrotextura de pavimentos através do ensaio de mancha de areia.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande, RS, n. 10, p. 30–38, 2007.

APÊNDICE A – IMAGENS UTILIZADAS NO PROCESSAMENTO

Tabela 14 – Imagens recortadas em 2.505 x 2.505 *pixels*. (Continua)

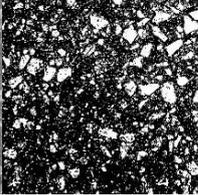
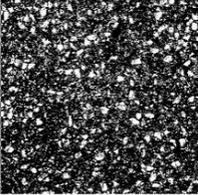
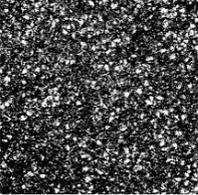
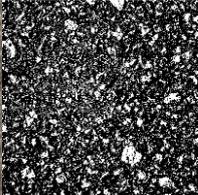
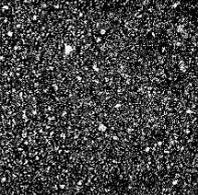
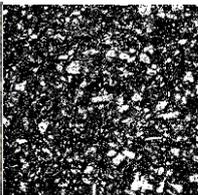
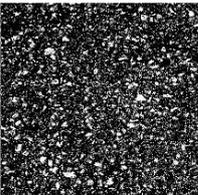
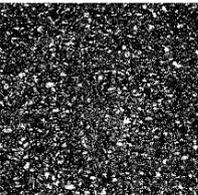
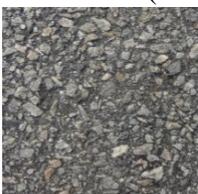
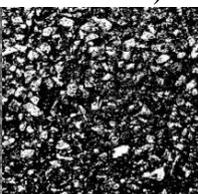
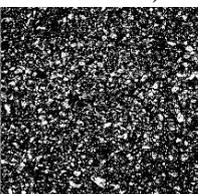
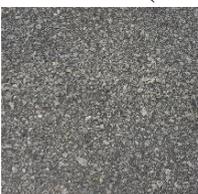
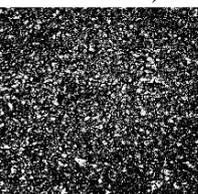
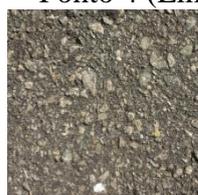
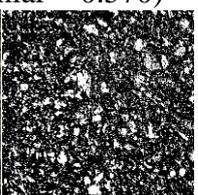
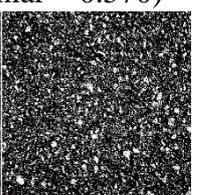
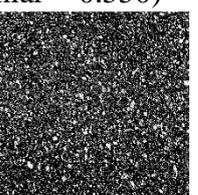
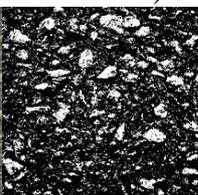
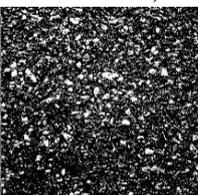
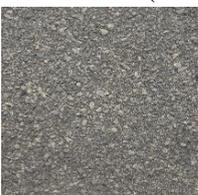
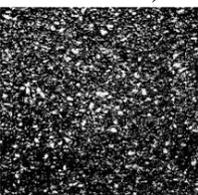
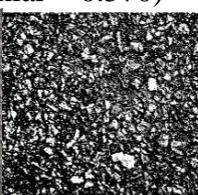
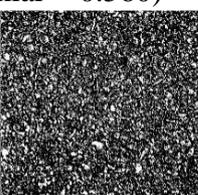
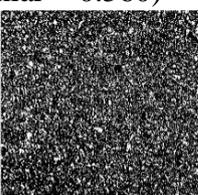
H = 20 cm		H = 40 cm		H = 60 cm	
					
Ponto 1 (Limiar = 0.560)		Ponto 1 (Limiar = 0.570)		Ponto 1 (Limiar = 0.530)	
					
Ponto 2 (Limiar = 0.540)		Ponto 2 (Limiar = 0.540)		Ponto 2 (Limiar = 0.540)	
					
Ponto 3 (Limiar = 0.560)		Ponto 3 (Limiar = 0.560)		Ponto 3 (Limiar = 0.550)	
					
Ponto 4 (Limiar = 0.570)		Ponto 4 (Limiar = 0.570)		Ponto 4 (Limiar = 0.550)	
					
Ponto 5 (Limiar = 0.550)		Ponto 5 (Limiar = 0.550)		Ponto 5 (Limiar = 0.550)	
					
Ponto 6 (Limiar = 0.570)		Ponto 6 (Limiar = 0.560)		Ponto 6 (Limiar = 0.560)	
					
Ponto 7 (Limiar = 0.540)		Ponto 7 (Limiar = 0.560)		Ponto 7 (Limiar = 0.550)	

Tabela 14 – Imagens recortadas em 2.505 x 2.505 *pixels* (Continuação)

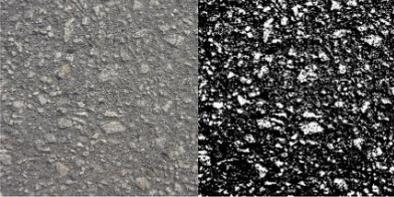
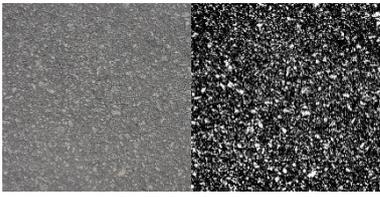
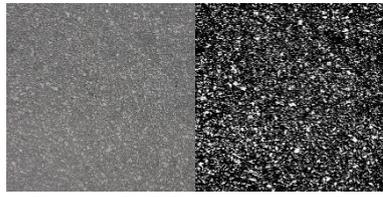
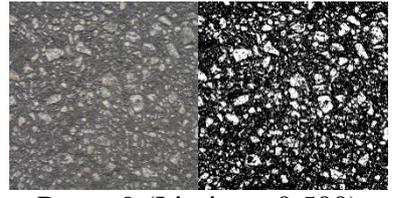
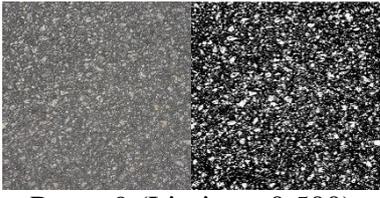
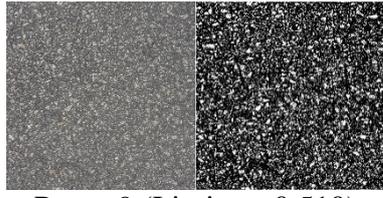
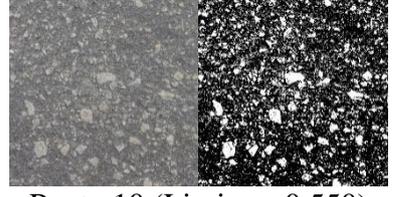
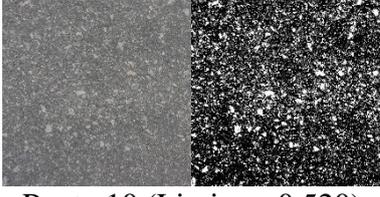
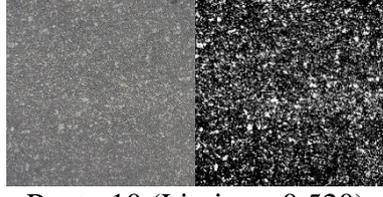
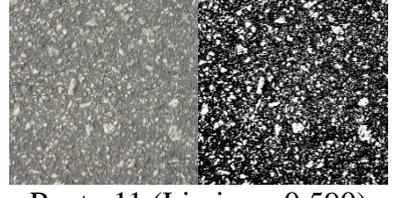
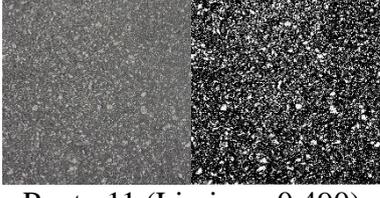
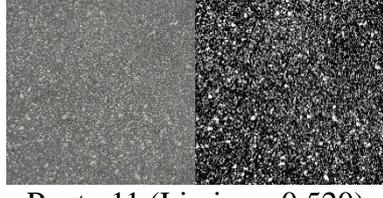
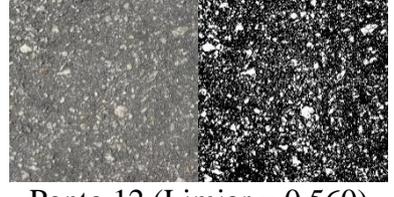
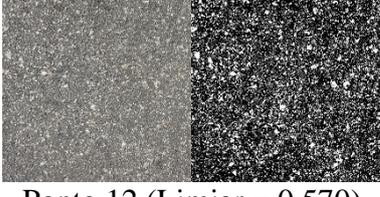
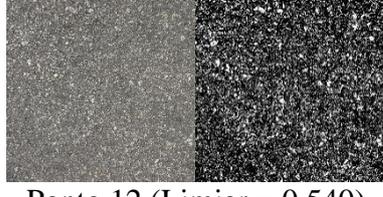
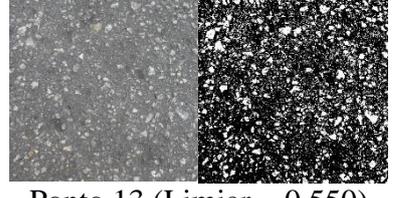
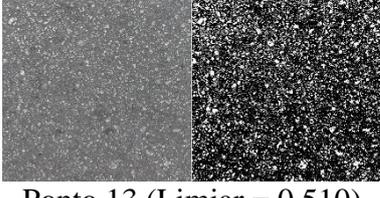
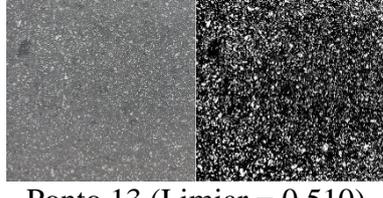
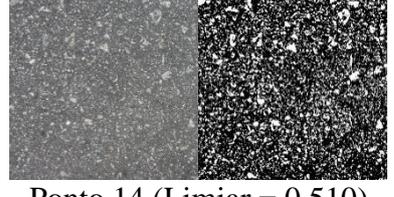
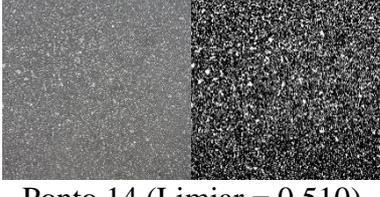
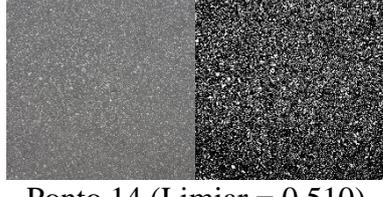
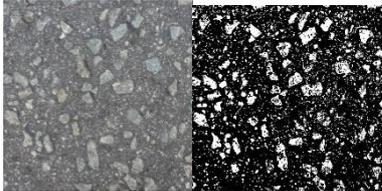
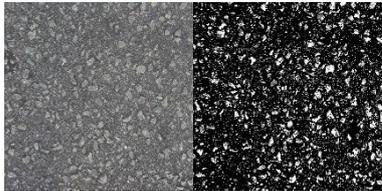
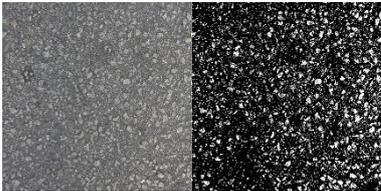
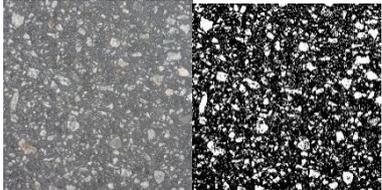
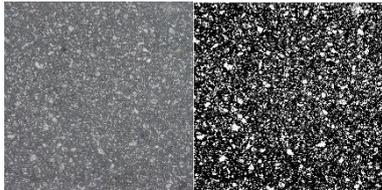
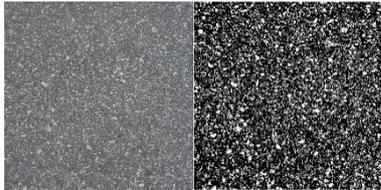
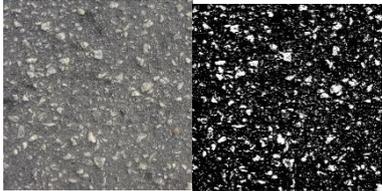
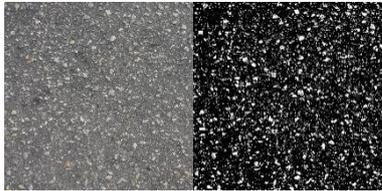
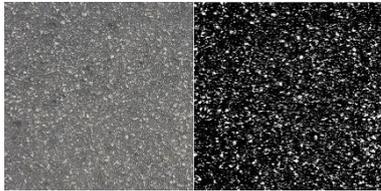
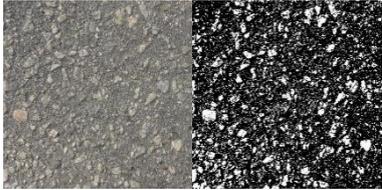
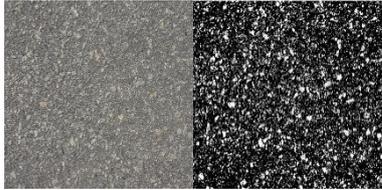
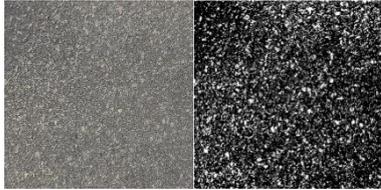
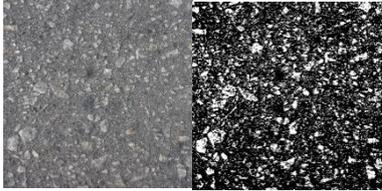
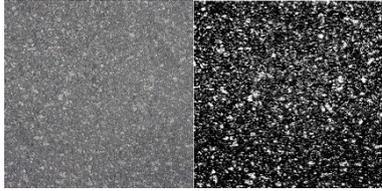
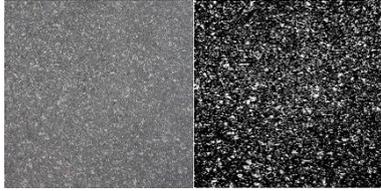
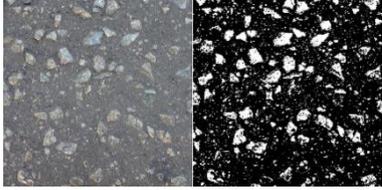
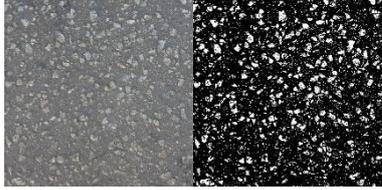
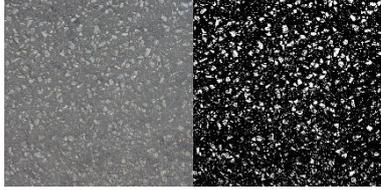
H = 20 cm	H = 40 cm	H = 60 cm
 Ponto 8 (Limiar = 0.570)	 Ponto 8 (Limiar = 0.520)	 Ponto 8 (Limiar = 0.520)
 Ponto 9 (Limiar = 0.500)	 Ponto 9 (Limiar = 0.500)	 Ponto 9 (Limiar = 0.510)
 Ponto 10 (Limiar = 0.550)	 Ponto 10 (Limiar = 0.520)	 Ponto 10 (Limiar = 0.520)
 Ponto 11 (Limiar = 0.590)	 Ponto 11 (Limiar = 0.490)	 Ponto 11 (Limiar = 0.520)
 Ponto 12 (Limiar = 0.560)	 Ponto 12 (Limiar = 0.570)	 Ponto 12 (Limiar = 0.540)
 Ponto 13 (Limiar = 0.550)	 Ponto 13 (Limiar = 0.510)	 Ponto 13 (Limiar = 0.510)
 Ponto 14 (Limiar = 0.510)	 Ponto 14 (Limiar = 0.510)	 Ponto 14 (Limiar = 0.510)

Tabela 14 – Imagens recortadas em 2.505 x 2.505 *pixels*. (Conclusão)

H = 20 cm	H = 40 cm	H = 60 cm
 Ponto 15 (Limiar = 0.590)	 Ponto 15 (Limiar = 0.560)	 Ponto 15 (Limiar = 0.560)
 Ponto 16 (Limiar = 0.560)	 Ponto 16 (Limiar = 0.500)	 Ponto 16 (Limiar = 0.500)
 Ponto 17 (Limiar = 0.580)	 Ponto 17 (Limiar = 0.570)	 Ponto 17 (Limiar = 0.570)
 Ponto 18 (Limiar = 0.580)	 Ponto 18 (Limiar = 0.560)	 Ponto 18 (Limiar = 0.540)
 Ponto 19 (Limiar = 0.540)	 Ponto 19 (Limiar = 0.530)	 Ponto 19 (Limiar = 0.530)
 Ponto 20 (Limiar = 0.550)	 Ponto 20 (Limiar = 0.550)	 Ponto 20 (Limiar = 0.560)

Fonte: Elaborado pela autora.

ANEXO I – CÓDIGO IMPLEMENTADO

Figura 30 – Código implementado
do PDI.

```
I=imread('P1.jpg');  
figure(1); imshow(I);  
  
EC=rgb2gray(I);  
figure(2);imshow(EC);  
level=0.570;  
  
A=im2bw(EC,level);  
figure(3);imshow(A);  
  
B=~A;  
figure(4);imshow(B);  
bwarea(B)
```

Fonte: Adaptado de Lucas Júnior (2018).