



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

GUSTAVO ANTONIO SOUSA PAZ E MOTA

**ESTUDO DO USO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS NA
DETERMINAÇÃO DO ACÚMULO DE BORRACHA EM PISTAS DE POUSOS E
DECOLAGENS**

FORTALEZA

2021

GUSTAVO ANTONIO SOUSA PAZ E MOTA

ESTUDO DO USO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS NA DETERMINAÇÃO
DO ACÚMULO DE BORRACHA EM PISTAS DE POUSOS E DECOLAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Ciência da Computação
do Centro de Ciências da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber
Lacerda de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Yuri Lenon Bar-
bosa Nogueira

FORTALEZA

2021

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)

- M871e Mota, Gustavo Antonio Sousa Paz e.
Estudo do uso de processamento digital de imagens na determinação do acúmulo de borracha em pistas de pousos e decolagens / Gustavo Antonio Sousa Paz e Mota. – 2021.
45 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Computação, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.
Coorientação: Prof. Dr. Yuri Lenon Barbosa Nogueira.
1. Ciência da computação. 2. Processamento de imagens. 3. Engenharia de transportes. 4. Transporte aéreo. 5. Acúmulo de borracha. I. Título.

CDD 005

GUSTAVO ANTONIO SOUSA PAZ E MOTA

ESTUDO DO USO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS NA DETERMINAÇÃO
DO ACÚMULO DE BORRACHA EM PISTAS DE POUSOS E DECOLAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Ciência da Computação
do Centro de Ciências da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Ciência da Computação.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Yuri Lenon Barbosa
Nogueira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.e Bruno Cavalcante Mota
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

À todos que estiveram e agora possuem um lugar especial nessa caminhada junto a mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira por me orientar em minhas pesquisas ao longo da graduação e meu trabalho de conclusão de curso.

Ao Prof. Dr. Yuri Lenon Barbosa Nogueira por todo seu apoio que foi decisivo.

Ao grupo Petran por proporcionar experiências maravilhosas e pelas pessoas incríveis que conheci.

A Universidade Federal do Ceará por tudo que me proporcionou para meu melhor aprendizado possível.

A todo o corpo docente do Departamento de Computação que esteve à frente de cada sala por onde passei e foram os pilares de minha formação.

A minha família: Gabriela de Sousa por ter paciência e acreditar em todo meu esforço; Denise Paz por estar sempre aqui; Evandro Paz pelas lições.

A cada pessoa que conheci nesses anos e que podem não estar diretamente ligadas à minha graduação, mas por fazer parte de minha vida e de minha caminhada, eu dedico o reconhecimento do meu trabalho a vocês também. Para que o fruto de um artista seja uma verdadeira arte, primeiro o artista deve estar pronto para poder proporcionar tal realização. Para um preparo desses, cada vivência é necessária, e todos os que fazem parte delas, também são responsáveis pela obra final.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

RESUMO

Tendo em vista o crescimento do volume de tráfego aéreo e juntamente uma necessidade cada vez maior de realização de manutenções em pistas de pousos e decolagens em aeroportos (PPD), pesquisa-se técnicas de avaliação das PPDs para melhoria das tomadas de decisão em relação à manutenção e exame da qualidade da pista. Para tanto, é necessária uma alternativa rápida e eficaz capaz de avaliar a pista como um todo e que possa retornar um parâmetro confiável. Um mecanismo possível é examinar a PPD por imagens e realizar processamentos sobre elas que retornem os dados necessários. Este trabalho desenvolve um estudo sobre o uso de processamento digital de imagens (PDI) de satélite da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins de Fortaleza aplicada às áreas de acúmulo de borracha. O estudo foi feito com imagens capturadas via Google Earth e utilizou dados de macrotextura e de coeficiente de atrito da PPD do aeroporto. Diante disso, verifica-se que o uso de PDI possui potencial significativo para estabelecer uma métrica de avaliação da superfícies de PPDs e métodos de captura e processamento podem ser melhor desenvolvidos para ampliar o seu potencial nas tomadas de decisão.

Palavras-chave: PPD. Processamento de Imagens. Macrotextura. Coeficiente de Atrito.

ABSTRACT

In view of the growing volume of air traffic and together with an increasing need to perform maintenance on airport runways (PPDs), PPD evaluation techniques are being researched to improve decision-making regarding maintenance and examination of runway quality. This requires a fast and effective alternative that can assess the runway as a whole and return a reliable parameter. One possible mechanism is to examine the PPD by images and perform processing on them that returns the necessary data. This paper develops a study on the use of satellite digital image processing (DIP) of the PPD of the Pinto Martins International Airport in Fortaleza applied to the areas of rubber accumulation. The study was done with images captured via Google Earth and used macrotexure and friction coefficient data from the airport PPD. In light of this, it can be seen that the use of PDI has significant potential to establish a metric for evaluating the surfaces of PPDs and methods of capture and processing can be better developed to expand its potential in decision making.

Keywords: PPD. Image Processing. Macrotexure. Coefficient of Friction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eixos de projeção de imagens	20
Figura 2 – Etapas do presente trabalho.	22
Figura 3 – Imagem de satélite de 01/11/2016 da Pista de pousos e decolagens (PPD) do Aeroporto Internacional Pinto Martins via <i>Google Earth Pro</i>	24
Figura 4 – Imagem de satélite de 01/11/2016 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins via <i>Google Earth Pro</i>	25
Figura 5 – Resultados iniciais das estimativas de área de acúmulo de borracha na PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins	29
Figura 6 – Imagem de 14/01/2018 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins	30
Figura 7 – Imagem de 14/01/2018 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins com máscara	30
Figura 8 – Imagem de 02/06/2017 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins	30
Figura 9 – Imagem de 02/06/2017 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins com máscara	31
Figura 10 – PPD do Aeroporto de Miami de data 23/01/2016	31
Figura 11 – Rotulação das pistas selecionadas da PPD do Aeroporto de Miami da Figura 11	32
Figura 12 – Pista selecionada 1 da PPD do Aeroporto de Miami - processada	32
Figura 13 – Pista selecionada 2 da PPD do Aeroporto de Miami - processada	32
Figura 14 – Resultados com Equalização por Histograma do Aeroporto Internacional Pinto Martins	33
Figura 15 – Imagem de data 10/09/2013 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins	34
Figura 16 – Gráfico das médias de coeficientes de atrito calculadas por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - faixa de 3 metros	36
Figura 17 – Gráfico das médias de coeficientes de atrito calculadas por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - faixa de 6 metros	37
Figura 18 – Gráfico das médias de coeficientes de atrito calculadas por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins de ambas as faixas	38
Figura 19 – Retas de tendência - coeficientes de atrito por terços de ambas as faixas da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins antes de julho de 2016	38

Figura 20 – Retas de tendência - coeficientes de atrito por terços de ambas as faixas da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins após julho de 2016	39
Figura 21 – Retas de tendência - macrotextura por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins antes de junho de 2016	39
Figura 22 – Retas de tendência - macrotextura por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins após junho de 2016	40
Figura 23 – Estimativa de área de acúmulo de borracha por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins sem equalização por histograma	40
Figura 24 – Estimativa de área de acúmulo de borracha por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins com equalização por histograma	41
Figura 25 – Reta de tendência - resultados de PDI até Junho por terços sem equalização por histograma	41
Figura 26 – Reta de tendência - resultados de PDI de Junho e após por terços sem equalização por histograma	42
Figura 27 – Reta de tendência - resultados de PDI até junho de 2016 por terços com equalização	42
Figura 28 – Reta de tendência - resultados de PDI de junho de 2016 e após por terços com equalização	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de imagens de satélite obtidas por meio do <i>Google Earth</i> da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins e suas datas informadas pela ferramenta	24
Tabela 2 – Limiares obtidos com o método de Yen	25
Tabela 3 – Datas de remoção de acúmulo de borracha na PPD do Aeroporto Pinto Martins	29
Tabela 4 – Desvio padrão por média dos coeficientes de atrito por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - Faixa de 3 metros	35
Tabela 5 – Desvio padrão por média dos coeficientes de atrito por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - faixa de 6 metros	36
Tabela 6 – Desvio padrão dos coeficientes de atrito por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - Ambas as faixas	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
PDI	Processamento digital de imagens
PPD	Pista de pousos e decolagens
ROI	<i>Region of Interest</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Estrutura do trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Aderência	17
2.2	Coeficiente de Atrito	17
2.3	Macrotextura	18
2.4	Procedimento de Remoção de Borracha Acumulada	18
2.5	Imagens Digitais	19
2.6	Processamento Digital de Imagens	20
2.7	Etapas do Processamento de Imagens	21
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	23
3.1	Aquisição de imagens	23
3.2	Realce	23
3.3	Segmentação	25
3.4	Cálculo e análise	26
3.5	Metodologia para experimentos e análise	26
4	RESULTADOS	28
4.1	Resultados do Experimento A	28
4.2	Resultados do Experimento B	29
4.3	Resultados do Experimento C	33
4.4	Análise dos Resultados com dados de coeficientes de atrito e de macrotextura	34
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	43
5.1	Principal contribuição	43
5.2	Principais constatações	43
5.3	Principais limitações	44
5.4	Sugestões para trabalhos futuros	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Em 2020 nos meses que antecederam a declaração oficial da pandemia de COVID-19 pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2020), foram estimados, no mundo todo, cerca de 40 milhões de voos (STATISTA, 2021), o que demonstra o grande volume de tráfego aéreo e, conseqüentemente, a grande movimentação nos aeroportos. Seu volume se justifica pela notável necessidade de locomoção aérea, como também pelos impactos econômicos positivos que o transporte aéreo proporciona.

O transporte aéreo proporciona também maior produtividade geral da economia local e estabelece uma relação entre o custo de investimento e o impacto positivo no produto interno bruto por meio de diversos outros fatores (SMITH; PEARCE, 2007). Esse retorno pode ser ainda maior com a redução dos custos mantendo ou elevando a qualidade dos recursos investidos ou até elevando sua qualidade.

A importância de observar o volume de tráfego aéreo e a relação dos investimentos para com a economia local ocorre pela observação de que quanto maior o fluxo aéreo em um aeroporto, maiores os custos e a frequência de manutenção para preservar e garantir a segurança das operações de pousos e decolagens. Entre as ocorrências que proporcionam a necessidade de uma manutenção está a de acúmulo de borracha que precariza a aderência entre a pista e os pneus das aeronaves. Essa aderência é fundamental para proporcionar uma frenagem adequada e se for comprometida, os riscos de acidentes são elevados. Dessa forma, é de suma importância a remoção de borracha acumulada e o seu monitoramento ao longo do tempo.

Uma das maneiras de identificar esse acúmulo é pelo aspecto visual, a olho nu, da pista, que apresenta uma região mais escura sobre o revestimento ao longo do eixo. A frequência de monitoramento é pré-determinada pela regulação vigente (Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)), mas podem ser modificadas a depender de determinadas variáveis que sinalizam um acúmulo mais elevado ou fora do normal. Essas variáveis podem ser a quantidade de pousos e decolagens, o tipo de revestimento, a idade do revestimento, e o próprio aspecto visual do revestimento. Porém, diferentes condições durante as operações de pouso e decolagem proporcionam acúmulos diferenciados, e o aspecto visual torna-se um indicador na condição prática e imediata. Uma estratégia de medição rápida se faz necessária para a tomada de decisões em relação a uma remoção de borracha acumulada. Um mecanismo computacional que determine uma aproximação da porcentagem de borracha acumulada por meio de imagens vem a ser mais racional, menos suscetível a erros e imprecisões da análise humana, e com potencial de capturar

mais detalhes.

Diante do exposto, a proposta deste trabalho é contribuir para o uso de imagens de satélite aplicado à análise das áreas de acúmulo de borracha em pista de pouso e decolagem PPD. O aeroporto escolhido é o Aeroporto Internacional Pinto Martins, em Fortaleza, Ceará, Brasil; pela acessibilidade dos dados de aderência, além da disponibilidade das imagens. Além disso, em Processamento digital de imagens (PDI), sabe-se que imagens com propriedades diferentes, como elementos característicos em que a imagem captura, como o comprimento e desenho da PPD, condições de brilho e contraste, provocam variações nas técnicas executadas para um mesmo fim. Assim, escolhe-se o aeroporto mencionado em um primeiro momento pela uniformidade das imagens em relação às características citadas e outras como tonalidade original do revestimento, condições de claridade pelo clima da cidade em que está localizado, entre outros.

Os algoritmos e técnicas de Visão Computacional aplicados neste trabalho foram avaliados, também, por meio de comparações com dados originários de medições realizadas na PPD. Os dados de remoções de acúmulo de borracha e os resultados obtidos foram avaliados tal como as performances desses algoritmos e técnicas, ao longo do processamento das imagens em relação ao resultado visual alcançado. Dessa forma, a elaboração deste trabalho enseja as seguintes contribuições: (i) Um estudo do uso de imagens de satélite para analisar a PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins; (ii) Avaliação de técnicas de Visão Computacional para extração de regiões de interesse (*Region of Interest (ROI)*) para esta aplicação; (iii) Análise da relação dessas técnicas que proporcionam uma estimativa para o acúmulo com os dados de manutenção da pista de pousos e decolagens.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar imagens de satélite da pista de pousos e decolagens do Aeroporto Internacional Pinto Martins aplicado às áreas de acúmulo de borracha. Por meio de análise usando algoritmos e técnicas de Visão Computacional que ajude de forma eficiente e de baixo custo no monitoramento da segurança das operações. Como objetivos específicos podem ser mencionados:

- a Realizar uma pesquisa bibliográfica dos principais conceitos usados;

- b Desenvolver um estudo de análise de imagens de satélite, que captura toda a extensão da pista do aeroporto, com mínima angulação, que destaca a ROI e calcula uma estimativa em porcentagem do acúmulo de borracha;
- c Examinar o desempenho nos resultados dos algoritmos e técnicas de Processamento de Imagens para o destaque da ROI e cálculo da estimativa;
- d Comparar as estimativas obtidas em cada imagem com dados de remoções realizadas na mesma época de cada uma delas trazendo uma avaliação da relevância e qualidade do estudo.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. Além deste capítulo introdutório, o Capítulo 2 traz os fundamentos teóricos necessários para alicerçar o trabalho proposto; o Capítulo 3 mostra os procedimentos metodológicos necessários para este trabalho; o Capítulo 4 expõe os resultados e as análises realizadas a partir dos experimentos realizados bem como as características técnicas de cada um deles; por fim, o Capítulo 5 resume os resultados e sugere trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção apresenta toda uma base de conhecimentos teóricos e técnicos para a compreensão deste trabalho. As seções iniciais apresentam conceitos de engenharia quanto ao atrito, acúmulo de borracha e brevemente sobre manutenção para remoção de borracha acumulada. Em seguida, sobre processamento de imagens, técnicas e algoritmos citando suas propriedades, as motivações para explorar seu uso e em como nos leva à finalidade da ferramenta.

2.1 Aderência

Para as operações de pousos e decolagens acontecerem é necessário, entre outros fatores, uma eficiente aderência entre a PPD e o pneu da aeronave. Essa aderência é o limite do atrito entre o pneu e a PPD assegurando então a mobilidade das aeronaves, entre outras propriedades (APS, 2006). Essa aderência vem da combinação dentre a textura e o atrito pneu-pavimento da PPD.

2.2 Coeficiente de Atrito

Atrito é a força tangencial resistente que opera na interface entre dois corpos, resultante da força externa de um corpo que se "movimenta ou tende a se movimentar sobre outro corpo (APS, 2006).

O coeficiente de atrito é uma variável definida pela como sendo a média aritmética dos valores obtidos a partir das medições desse coeficiente a cada 100 metros do mesmo lado e distância possuindo o exido da PPD como referência (ANAC, 2019). Os equipamentos de medição para obtenção desses valores estão especificados (ANAC, 2019) incluindo valores mínimos para este coeficiente, cabendo ações previstas pela legislação para normalizar esse dado sob responsabilidade do operador de aeródromo. Além disso, se estabelece também que a necessidade de medição do coeficiente de atrito cabe também ao operador de aeródromo após execução de obra ou serviço, por exemplo.

Existe um indicativo de que a presença de borracha na PPD influencia o coeficiente de atrito (SALES, 2019). Por meio de um estudo (CHEN JIAN-SHIUH; CHEN, 2013), concluiu-se que o coeficiente de atrito da PPD é influenciada pelo região em que a medição ocorre e que as zonas de toque são as que apresentam valores abaixo dos recomendados.

2.3 Macrotextura

A textura de um pavimento se divide em microtextura e macrotextura (SALES, 2019). A microtextura é dada pelo grau de rugosidade ou aspereza individual da superfície de partículas do agregado que compõem a mistura asfáltica ou de concreto de cimento Portland da camada de revestimento (FILHO, 2006). Já a macrotextura está ligada à granulometria dos agregados utilizados no revestimento. Uma PPD com macrotextura mais elevada possui, em sua mistura, agregado graúdo e anguloso, gerando grande volume de vazios, propiciando o acúmulo de borracha provinda dos pneus das aeronaves.

A superfície resultante de um pavimento depende de características tanto de microtextura quanto de macrotextura (APS, 2006). As diferentes combinações proporcionadas pela variedade de características proporciona a textura da PPDs.

Os pavimentos novos com macrotexutra mais aberta e uma microtextura mais rugosa e áspera oferecem melhores condições de atrito na presença de uma lâmina de água (SALES, 2019). As PPDs mais desgastadas possuem capacidade proporcionam frenagens menos eficientes. Em PPDs mais desgastadas, pode ocorrer o acúmulo de contaminantes como borracha (FAA, 1997) na macrotextura ocasionando seu fechamento. Em uma ocorrência como essa, é exigida maior distância passível à frenagem devido ao favorecimento da ocorrência de acidentes (LEOCÁDIO, 2014).

Um pouso libera, em média, 700g de borracha sobre a superfície de uma PPD (SALES, 2019). Além dessa liberação de borracha, o calor gerado provoca a chamada polimerização, que torna os depósitos de borracha materiais duros e lisos. Esse acúmulo de borracha preenche a microtextura e a macrotextura do pavimento, ocasionando uma grave perda de resistência à derrapagem quando a PPD está molhada (GRANSBERG, 2008).

Também é estabelecido que cabe ao operador de aeródromo monitoramento da macrotextura (ANAC, 2019). A norma (ABNT, 2016) estabelece o regimento para a realização da medição que ocorre em um trecho da PPD que pode não necessariamente ser o local de maior passagem de aeronaves em toda a PPD.

2.4 Procedimento de Remoção de Borracha Acumulada

A remoção de borracha de um pavimento é uma atividade essencial que visa manter áreas de pouso e decolagem seguras. São exigidos que padrões rígidos de resistência à

derrapagem sejam atingidos e mantidos em aeródromos (FAA, 1997).

A ANAC (2019) determina que a borracha deve ser removida de um revestimento quando notar-se que as condições de aderência estão sendo afetadas pelo acúmulo do contaminante. Além disso, a remoção de borracha deve ser realizada quando o coeficiente de atrito for menor que o valor mínimo estabelecido para nível de manutenção ou quando a profundidade de macrotextura for menor que o nível mínimo, na frequência mínima estabelecida pela Tabela 6.

Existem diversas formas de realizar a remoção dos depósitos de borracha. Depois dos contaminantes serem removidos da pista, é recomendado que o operador aeroportuário deve realizar medições de atrito para assegurar que os valores foram restaurados para os níveis aceitáveis (FAA, 1997). Os métodos podem fazer uso de jatos de alta pressão, impacto de partículas abrasivas em altas velocidades, produtos químicos e remoções mecânicas (FAA, 1997).

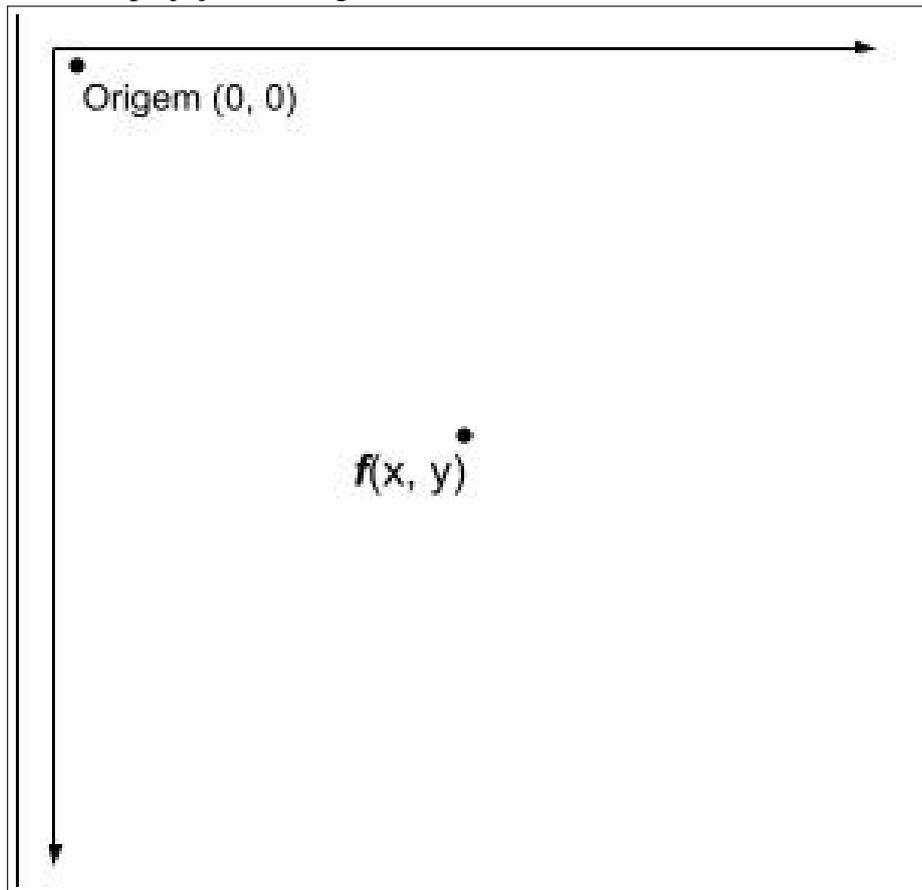
2.5 Imagens Digitais

Imagens digitais podem ser definidas como funções de duas variáveis $F(x, y)$ em que x e y são as coordenadas espaciais de um determinado ponto, referentes ao plano de duas dimensões, e que retorna a intensidade da imagem nessa coordenada, sendo que todos esses valores são discretos e finitos (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Para projetar uma imagem, é necessário mapear para cada pixel da tela uma intensidade. Cada pixel corresponde a um ponto na tela que pode-se atribuir uma tonalidade de cor. A função $F(x, y)$ faz esse mapeamento ao longo dos eixos X e Y da tela. A convenção adotada é com o ponto de origem posicionando-se no canto superior esquerdo, e de modo que o eixo x mantenha seu sentido, mas o eixo y fique invertido em relação ao plano cartesiano. A Figura 1 ilustra essa orientação.

Todas as intensidades são armazenadas na imagem no formato 8 bits variando em 256 intensidades que vão de 0, preto, a 255, mais intenso. As imagens são matrizes com esses valores e as coordenadas correspondem aos da projeção na tela para com os pixels. Em imagens coloridas, cada posição da matriz armazena uma tripla contendo uma intensidade para vermelho, uma para verde e uma para azul, comumente referenciado pela sigla RGB, do inglês *red*, *green* e *blue*. Dessa forma, as respectivas intensidades em cada pixel são atribuídas formando uma tonalidade de cor. Em imagens em escala de cinza, o mesmo acontece, exceto que cada posição da matriz possui apenas um valor de intensidade, em vez de três, e correspondem às tonalidades

Figura 1 – Eixos de projeção de imagens



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

de cinza variando de preto, valor zero, ao branco, valor 255.

Por fins de simplificação, neste trabalho cada coordenada na matriz de intensidades correspondente a cada imagem será referenciado como pixel.

2.6 Processamento Digital de Imagens

O processamento digital de imagens pode ser definido como a aplicação de técnicas e algoritmos que modificam essa função quanto às intensidades para um determinado fim através de um computador digital.

Esse campo de estudo começa a ter história nos anos 1920, quando a técnica de Pulse Code Modulation - PCM foi usada para codificar imagens que foram levadas de imagens analógicas para a forma digital para transmitir entre continentes por cabos submarinos no atlântico (GARTNER GLOSSARY, 2021). A técnica anterior durava semanas e passou a durar algumas horas. As imagens foram utilizadas para publicações em jornais da época, e eram decodificadas de volta ao meio analógico ao chegar no destinatário. Dessa maneira, essa transformação na

função pela codificação digital e decodificação equivale ao processamento digital de imagens, embora a falta de um computador digital, concebido remontando os anos 1950 e 1960, venha a não considerar ainda um processamento propriamente dito como definido.

O processamento digital veio a ser estabelecido e definido a partir dos anos de 1960 na área médica para avaliação de imagens usadas em avaliação de sintomas e tratamentos, observação remota da Terra e na astronomia (MUKUL SAJJAN SINGH, 2013). Neste trabalho, por fins de simplificação, o termo será citado apenas por processamento de imagens.

2.7 Etapas do Processamento de Imagens

A presente seção apresenta as etapas do processamento de imagens presentes neste trabalho bem como os processamentos realizados em cada uma. A Figura 2 representa esses passos.

1. Primeiramente, é necessária a aquisição das imagens através de algum meio de captura, podendo ser o acesso a uma imagem já existente no formato digital.
2. O realce pode ser entendido como sendo a manipulação delas de modo que estejam de acordo com a aplicação final servindo mais aos propósitos do que as imagens em seu estado original durante a aquisição.
 - o Entre as operações, estão a de corte para ajustar a imagem aproveitando apenas a partição necessária; rotação, em que neste trabalho tem por fim para ajustar a imagem de acordo com os eixos; transformação da imagem colorida em escala de cinza, alterando suas intensidades RGB para um único valor e equalização por histograma.
 - o Um histograma de uma imagem é a interpretação gráfica dos valores das intensidades de cada pixel na imagem. Ele apresenta a frequência de cada intensidade em um gráfico. A equalização do histograma ajusta o contraste de uma imagem usando seu histograma. Para isso, ela distribui os valores de intensidade de pixels mais frequentes ou amplia o intervalo de intensidades da imagem. Assim, regiões da imagem com menor contraste ganham maior contraste.
3. A etapa de segmentação é a extração dos componentes de uma imagem que passam a ser encarados como seus atributos, tais como determinados objetos que caracterizam a imagem, por exemplo, a extração da área de acúmulo de borracha.

4. A representação e descrição vem como passo subsequente da segmentação. Neste passo, tem-se dados primários como fronteiras de pixels ou áreas na imagem que determinado elemento ocupa. Dessa maneira, constitui-se este passo como a decisão e implementação da representação desses dados primários e sua descrição (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Figura 2 – Etapas do presente trabalho.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre processamento de imagens e sobre trabalhos relacionados ao problema de acúmulo de borracha. Na sequência, os procedimentos usados neste trabalho foram: coleta de imagens, pré-processamento, processamento para realizar o cálculo, cálculo e análise dos resultados com base nas datas e em remoções ocorridas, repetição dos passos anteriores com ajustes necessários em casos de dados incongruentes.

3.1 Aquisição de imagens

As imagens foram obtidas por meio da ferramenta Google Earth Pro versão 7.3.4.8248, gratuita para *download* e para uso. Com essa ferramenta, realizou-se a utilização do recurso para acessar imagens de satélite de datas mais antigas e, em seguida, a de salvar a imagem da tela. As propriedades de tamanho, inclinação e posicionamento das imagens na tela são as mesmas; elas variam apenas em relação às datas. As imagens possuem resolução inicial de 3840x2160 *pixels*. A Tabela 1 apresenta a relação de imagens e suas respectivas datas.

As datas informadas no *Google Street View* e *Google Earth* correspondem às datas de capturas. A Google não revela o dia e a hora exatas, mas o mês corresponde (GOOGLE, 2020). Dessa forma, assume-se que as imagens podem possuir menos de 30 dias de margem de erro.

3.2 Realce

Para realizar a estimativa de acúmulo de borracha, é necessário aplicar filtros na imagem da pista em si para destacar a região de acúmulo e estimar sua porcentagem. Para tanto, obtém-se a imagem da pista propriamente dita para comparar o tamanho da região de borracha com a da pista em toda a sua extensão, equivalente à imagem realçada, e em escala de cinza para poder utilizar as técnicas de segmentação.

As imagens originais estão com o mesmo aspecto geral da imagem da Figura 3: coloridas, com a pista inclinada e todo o aeroporto e arredores contidos na captura. O primeiro processamento aplicado foi o de escala de cinza e aplicação de filtro com *threshold* padrão de 200. Em seguida, o corte e rotação para apenas a pista restar na imagem e precisamente na horizontal, assumindo resolução de 3659x80 *pixels*. Apesar da resolução inicialmente alta, a área dentro da imagem que corresponde à PPD é reduzida. Assim, a altura da imagem cai para

Tabela 1 – Relação de imagens de satélite obtidas por meio do *Google Earth* da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins e suas datas informadas pela ferramenta

Índice	Arquivo	Data
00	Im_10_09_2013.jpg	2013-09-10
01	Im_10_01_2014.jpg	2014-01-10
02	Im_09_06_2014.jpg	2014-06-09
03	Im_10_06_2014.jpg	2014-06-10
04	Im_06_08_2014.jpg	2014-08-06
05	Im_29_11_2014.jpg	2014-11-29
06	Im_31_07_2015.jpg	2015-07-31
07	Im_18_06_2016.jpg	2016-06-18
08	Im_04_07_2016.jpg	2016-07-04
09	Im_23_07_2016.jpg	2016-07-23
10	Im_15_10_2016.jpg	2016-10-15
11	Im_29_10_2016.jpg	2016-10-29
12	Im_01_11_2016.jpg	2016-11-01
13	Im_19_12_2016.jpg	2016-12-19
14	Im_02_06_2017.jpg	2017-06-02
15	Im_31_10_2017.jpg	2017-10-31
16	Im_25_11_2017.jpg	2017-11-25
17	Im_14_01_2018.jpg	2018-01-14
18	Im_08_07_2018.jpg	2018-07-08

Fonte: Google Earth 2021.

80 *pixels*. É necessária uma resolução ainda maior, e/ou uma altura de captura no céu menor, para obter uma imagem capturando toda a pista e com riqueza de detalhes da PPD. A imagem final apresenta-se como na Figura 4:

Figura 3 – Imagem de satélite de 01/11/2016 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins via *Google Earth Pro*.



Fonte: Google Earth Pro (2016).

Figura 4 – Imagem de satélite de 01/11/2016 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins via *Google Earth Pro*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.3 Segmentação

Uma operação ainda necessária é a de limiarização. A imagem é filtrada de modo que todas as intensidades acima de um limiar são mantidas e todos os outros abaixo são consideradas plano de fundo e podem ser eliminadas, de modo que apenas as intensidades desejadas são mantidas. É necessário, ainda, encontrar o limiar de interesse que possibilite a filtragem que corresponda à região alvo; isto é, encontrar o limiar que filtre a região de acúmulo de borracha na imagem.

Para encontrar esse limiar, foi utilizado o Método de Yen (J.C.; S., 1995). Os valores obtidos por imagens estão na Tabela 2. Após a obtenção desse limiar, as intensidades são reajustadas e uma nova escala utiliza-se em toda a imagem após esse ajuste variando de 0 a 1.

Tabela 2 – Limiares obtidos com o método de Yen

Índice	Imagem	Limiar
00	Im_10_09_2013.jpg	129
01	Im_10_01_2014.jpg	149
02	Im_09_06_2014.jpg	143
03	Im_10_06_2014.jpg	127
04	Im_06_08_2014.jpg	136
05	Im_29_11_2014.jpg	136
06	Im_31_07_2015.jpg	135
07	Im_18_06_2016.jpg	131
08	Im_04_07_2016.jpg	182
09	Im_23_07_2016.jpg	164
10	Im_15_10_2016.jpg	116
11	Im_29_10_2016.jpg	114
12	Im_01_11_2016.jpg	107
13	Im_19_12_2016.jpg	169
14	Im_02_06_2017.jpg	177
15	Im_31_10_2017.jpg	125
16	Im_25_11_2017.jpg	137
17	Im_14_01_2018.jpg	157
18	Im_08_07_2018.jpg	187

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por meio de uma imagem contendo esses valores, torna-se viável computar o percentual de área de acúmulo de borracha em relação a toda pista. Por meio dos dados de resolução de

imagem, pode-se obter uma representação da área total; dos *pixels* iguais ao valor de 1, a área de acúmulo de borracha. Assim, o percentual representa a área real capturada na imagem.

3.4 Cálculo e análise

Para a etapa de representação, calcula-se a porcentagem da área de acúmulo de borracha na imagem e projeta-se a imagem para uma visualização. Para isso é necessário usar uma escala de 0 a 255. Dado que a imagem após o passo de segmentação está em escala de 0 a 1, uma nova conversão é realizada para a devida projeção. Isso justifica-se porque os valores 0 e 1 representam valores de preto tão próximos um do outro na escala padrão de 0 a 255 que, para o olho humano, a diferença seria indetectável e a imagem toda pareceria totalmente preta. Portanto, utiliza-se do produto entre cada valor de intensidade por 255 para criar um arquivo de imagem de melhor visualização. Desse modo, as intensidades iguais a zero permanecem iguais a zero, mas as iguais ao valor de 1 passam a valer 255. Dessa forma, obtém-se as imagens com fundo preto correspondendo a toda a região detectada como fundo e em branco a região de acúmulo.

3.5 Metodologia para experimentos e análise

Foram desenvolvidos três experimentos. O primeiro experimento foi executado com objetivo de analisar os resultados obtidos com as primeiras configurações do processamento. O segundo foi realizado com interesse em avaliar o desempenho do processamento em filtrar a mancha de borracha na pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Miami; assim, identificando o quão preciso o algoritmo é para extrair a área de borracha. Isso se deu pelo fato de que a pista do Aeroporto Internacional Pinto Martins é escura pelo material do revestimento (concreto asfáltico). Todo o processamento foi desenhado para que fosse sensível à característica dos *pixels* relativos à pista e à mancha serem de intensidades tão próximas. Logo, uma dedução clara é a de que em uma pista de cimento, por ser de tom mais claro, a diferença entre as respectivas intensidades nesse cenário é bem maior. Assim, o contraste é tamanho que a própria mancha do acúmulo de borracha será destacada pela fácil separação dos dois. Tendo isso em vista, esse experimento foi feito com objetivo de avaliar o resultado e identificar possíveis problemas.

O terceiro experimento foi executado adicionando o processamento de equalização de histograma nas imagens para assim avaliar seu uso para aperfeiçoar os resultados nos dados

originali, obter e analisar os resultados com base em terços de pista.

Por fim, é feita uma análise dos valores obtidos com PDI para com os de coeficiente de atrito e de macrotextura (SALES, 2019) para avaliar uma correlação e eficácia. Desse modo, obtém-se uma possível validação dos dados de PDI por meio de seu comportamento.

Todos os experimentos descritos foram executados usando as seguintes configurações de máquina: em um ambiente Conda versão 4.9.1, usando python versão 3.9.5, sistema operacional Windows 10, memória RAM de 16 GB, processador Intel Core i5 de 9º geração.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e também discutidos os resultados obtidos com as estimativas calculadas e seus ajustes. Inicialmente, são descritos e analisados os três experimentos realizados. Todos possuem como base o interesse em analisar a qualidade do processamento em filtrar a mancha de borracha tomando como parâmetro as estimativas geradas cruzando com dados de manutenção e o aspecto visual entre a imagem original e a mancha destacada.

4.1 Resultados do Experimento A

Neste experimento, foi realizada a aquisição das imagens via *Google Earth*. Todas elas foram submetidas à etapa de realce com os seguintes processamentos: corte, rotação e aplicação de filtro de escala de cinza.

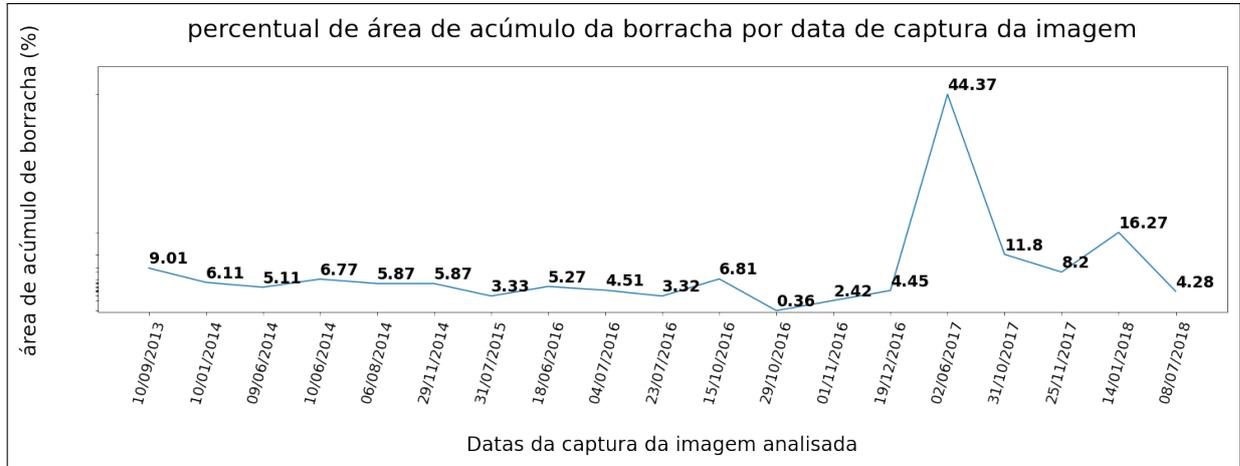
A etapa de segmentação foi realizada aplicando a limiarização obtendo um limiar por meio do método de Yen. Após essa etapa, é calculada a área de acúmulo e a imagem é recuperada destacando a ROI.

A Figura 5 apresenta as áreas estimadas em porcentagem em relação à pista, e a Tabela 3 apresenta as datas de manutenção da PPD quando ocorreram remoções de acúmulo de borracha da pista (SALES, 2019). Os primeiros resultados sugerem uma coerência com as datas de remoção de acúmulo de borracha. Há quedas nas estimativas após períodos de remoção comparando-os com períodos anteriores, apesar de alguns deles pontualmente apresentarem altas. Isso sugere possíveis aumentos no fluxo de operações de pousos e decolagens na PPD durante as altas. Por outro lado, há valores muito elevados de forma desbalanceada para com as outras estimativas. No presente trabalho, esses valores consideram-se *outliers*.

As imagens responsáveis pelo surgimento dos *outliers* foram identificadas como aquelas com presença de nuvens como na Figura 6 ou de suas sombras sobre a pista como na Figura 8. Uma nuvem gera regiões brancas que se traduzem como regiões mais claras em toda a imagem, levando a uma perda de características. As sombras das nuvens geram sub-regiões mais escuras confundindo os filtros, uma vez que regiões dentro e fora das sombreadas podem ter intensidades bem semelhantes, não possibilitando uma adequada filtragem. As Figuras 7 e 9 correspondem às imagens com filtro de máscara aplicada a partir das imagens das Figuras 6 e 8, respectivamente.

Para fins do presente trabalho, as estimativas obtidas a partir dessas imagens (14/01/2018

Figura 5 – Resultados iniciais das estimativas de área de acúmulo de borracha na PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Tabela 3 – Datas de remoção de acúmulo de borracha na PPD do Aeroporto Pinto Martins

Índice	Data de Remoção
1	02/12/2013
2	10/05/2014
4	20/11/2014
5	04/04/2015
6	10/06/2015
7	10/11/2015
8	30/06/2016
9	23/10/2016
10	21/03/2017
11	08/11/2017
12	13/05/2018

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

e 02/06/2017) foram completamente ignoradas. Contudo, serão mantidas dentro do conjunto de imagens apenas para fins de análise dos filtros aplicados e do processamento como um todo; isso pois a forma como os filtros lidam com as imagens que possuem disformidade nas características pode dizer muito sobre sua eficiência no objetivo principal.

4.2 Resultados do Experimento B

Para avaliar a qualidade do processamento em destacar a região dominada por borracha, foi utilizada uma imagem da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Miami, sendo o arquivo 23012016_.jpg da Figura 10. A escolha ocorreu pela tonalidade da pista e da mancha serem bem diferentes no espectro de cores. Isso significa que os valores em *pixels* estão bem afastados. Escolheu-se uma imagem apenas dado que é suficiente para o objetivo

Figura 6 – Imagem de 14/01/2018 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins



Fonte: Google Earth Pro (2018).

Figura 7 – Imagem de 14/01/2018 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins com máscara



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 8 – Imagem de 02/06/2017 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins



Fonte: Google Earth Pro (2017).

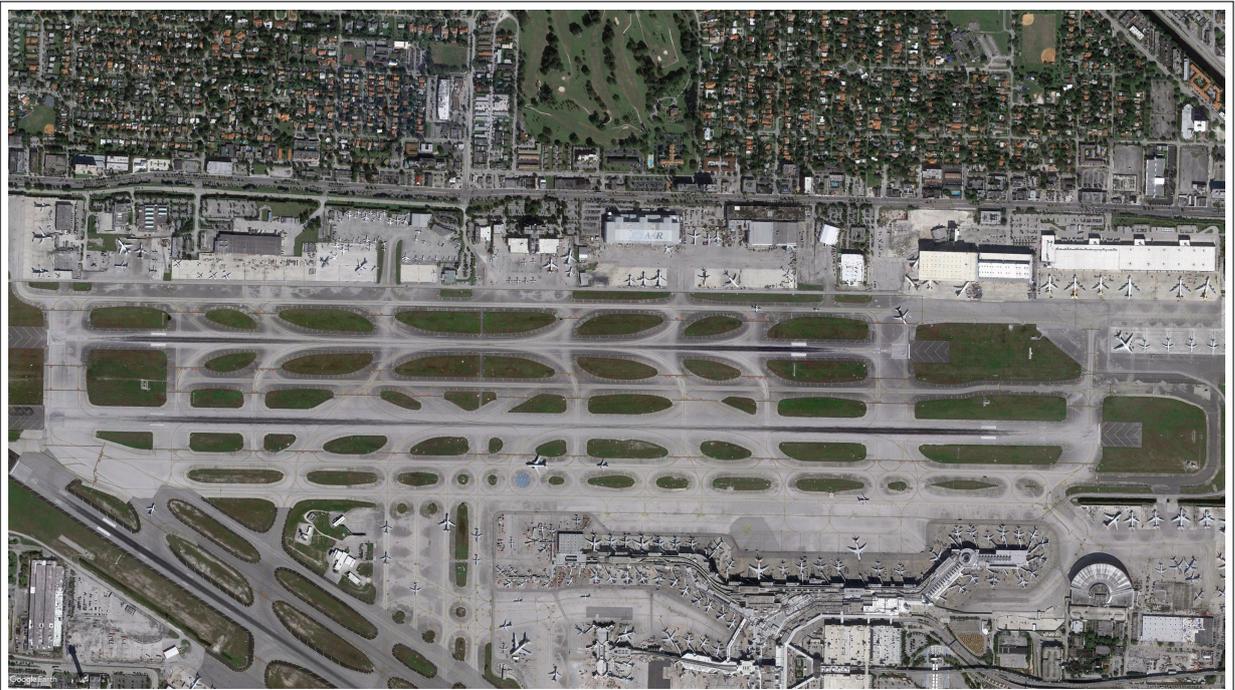
Figura 9 – Imagem de 02/06/2017 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins com máscara



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

deste experimento. A razão para isso é a de que não é de interesse obter a estimativa do acúmulo na pista deste aeroporto de Miami, mas de que necessita-se apenas mensurar uma performance, a de filtragem do objeto mancha, a olho nu, que é o recurso disponível e essa prática é recorrente em aplicações do gênero. Para tanto, uma imagem veio a ser suficiente para a conclusão obtida inclusive considerando que uma mesma imagem proporcionou duas pistas diferentes para esta análise.

Figura 10 – PPD do Aeroporto de Miami de data 23/01/2016



Fonte: Google Earth Pro (2016).

Foram identificadas duas pistas na imagem para o propósito deste experimento (Figura 11). A pista 1 é a pista superior e a pista 2 a inferior. A etapa de realce usou apenas os parâmetros de corte diferenciados em relação às imagens anteriormente trabalhadas até então para cortar e rotacionar, minimamente, as pistas extraídas. Isso ocorreu pelo alinhamento das pistas em relação ao eixo X da imagem e mínima inclinação. Ao todo, duas pistas foram extraídas.

O processamento de segmentação aplicado foi o mesmo. A razão é de, como até então cada variável desta etapa estava configurada para uma pista escura em que os tons

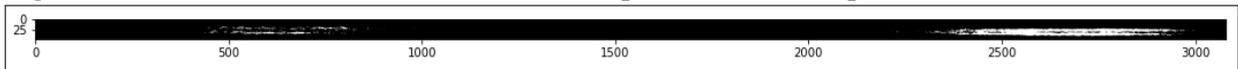
Figura 11 – Rotulação das pistas selecionadas da PPD do Aeroporto de Miami da Figura 11



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

estivessem próximos, no valor de seus *pixels*, aos da mancha, espera-se não só um destaque nítido como também de todo o corpo da mancha. Ou seja, o resultado esperado era de que a segmentação extraísse uma área maior de borracha. Porém, as Figuras 12 e 13 demonstram que isso não aconteceu.

Figura 12 – Pista selecionada 1 da PPD do Aeroporto de Miami - processada



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 13 – Pista selecionada 2 da PPD do Aeroporto de Miami - processada



Fonte: elaborado pelo autor.

As manchas não foram totalmente destacadas. Além disso, parte delas, ou a mancha como um todo, perdeu-se no resultado. Isso sugere que apesar do contraste da pista e das manchas, os tons misturam-se devido ao brilho/contraste da imagem, dado que os filtros sugerem que a imagem escura proporciona esse fenômeno, a partir de que em ambos os casos (Aeroporto Internacional Pinto Martins e Aeroporto de Miami) essa característica repete-se. Além de tudo, o cálculo estimou uma proporção bem menor de área dominada pela borracha. Ressalta-se, por fim,

que o filtro pouco percebe determinadas regiões, como a região esquerda das pistas de ambas as Figuras 12 e 13. A abordagem mais direta para esse resultado é o uso de equalização de histograma para equilibrar as intensidades em níveis mais balanceados de brilho/contraste.

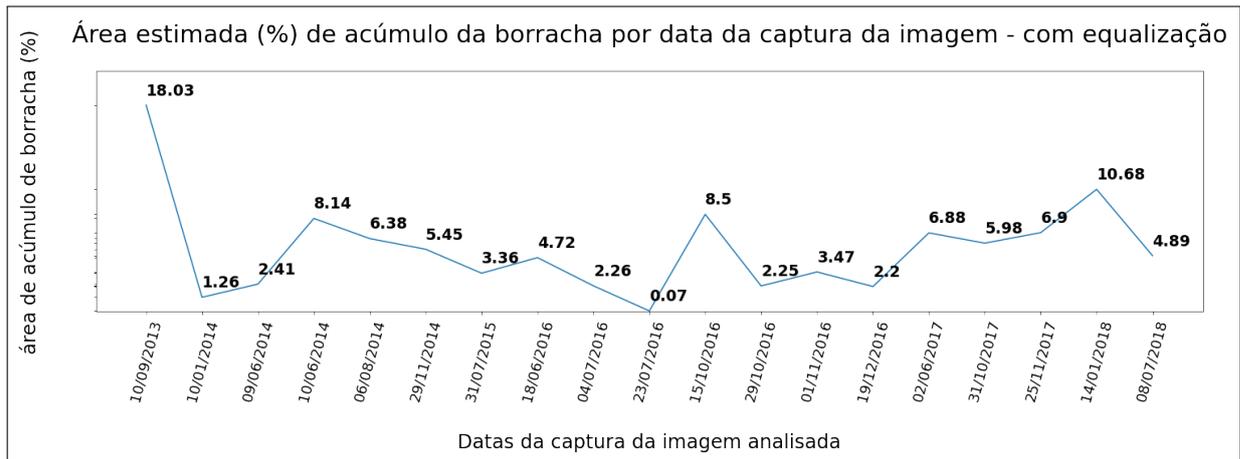
4.3 Resultados do Experimento C

No presente experimento, adicionou-se à etapa de realce a equalização por histograma no processamento das imagens da pista do Aeroporto Internacional Pinto Martins. Após identificar que o processamento até então pode estar falho no aspecto de diferenciar as tonalidades devido aos níveis de brilho e contraste, é necessária uma equalização desses níveis.

Não há método convencional para quantificar o nível de brilho ou contraste de uma imagem de forma tão padronizada como a medição de temperatura. O que existe é uma diversidade de métodos que modificam a imagem afetando essas propriedades. Dentre elas, uma bem conhecida é a equalização por histograma aqui proposta (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Os resultados obtidos estão projetados na Figura 14. Traz-se ainda dados identificados como outliers anteriormente para fins de identificar o comportamento sob o processamento; assim, analisa-se a eventual possibilidade de identificação de um processamento que trate esses dados como alternativa às suas exclusões.

Figura 14 – Resultados com Equalização por Histograma do Aeroporto Internacional Pinto Martins



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com este experimento, os resultados assemelham-se aos anteriormente citados para com o experimento A por meio de imagens sem a equalização durante a análise com as datas de remoções. Observa-se que alguns *outliers* como as imagens da datas 02/06/2017 e 14/01/2018

ficaram balanceados em relação às outras imagens quanto à estimativa. Por outro lado, a imagem da data 10/09/2013 passou a ficar com sua estimativa com valor disparado (Figura 15).

Figura 15 – Imagem de data 10/09/2013 da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins



Fonte: Google Earth (2013).

Observa-se que há uma diferença de brilho e contraste na própria imagem original por uma clara linha divisória horizontal. Essa diferença não é de se supor que seja de causa natural, o que indica que a própria ferramenta pode aplicar um pré-processamento em algumas das imagens retornadas de maneira que cause esse efeito. Essa diferença clara de brilho e contraste sugere que dentro da imagem possam existir outros tão contrastados como esse em evidência, exceto que indetectável ao olho humano. Porém, computacionalmente, o algoritmo é sensível por trabalhar diretamente com as intensidades, e mesmo valores pequenos causam grandes diferenças como visto até então neste trabalho. Portanto, isso é considerado como hipótese para esse fenômeno nos resultados por parte dessa imagem.

4.4 Análise dos Resultados com dados de coeficientes de atrito e de macrotextura

Nesta seção serão analisados dados de coeficiente de atrito e de macrotextura (SALLES, 2019) ao longo dos anos de 2013 a 2018. Por meio desses dados, obtém-se informações que podem revelar sobre os efeitos de manutenções na PPD para com esses parâmetros e as suas eficiências, além de entender como as imagens e seus resultados melhor contribuem para a

tomada de decisões por parte de operações de manutenção.

Inicialmente, analisa-se nesta seção os dados de coeficientes de atrito. Os dados são medidos por faixas e, no presente trabalho, divididos também por terços da PPD. Primeiramente, os dados relativos à faixa de 3 metros do lado direito e faixa de 3 metros do esquerdo da PPD no primeiro, segundo e terceiro terço. A Figura 16 reúne esses dados pelas médias de cada um dos coeficientes calculados no lado direito e esquerdo correspondentes. A Tabela 4 representa os valores referentes aos desvios padrão.

Tabela 4 – Desvio padrão por média dos coeficientes de atrito por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - Faixa de 3 metros

Data de medição	Desvio padrão
25/08/2013	0.0225
23/02/2014	0.0166
18/05/2014	0.0213
12/08/2014	0.0943
24/11/2014	0.0164
13/08/2015	0.0347
1/07/2016	0.0507
4/10/2016	0.0370
1/11/2016	0.0430
2/01/2017	0.0421
22/06/2017	0.0445
9/10/2017	0.0353
20/02/2018	0.0169
15/08/201	0.0262

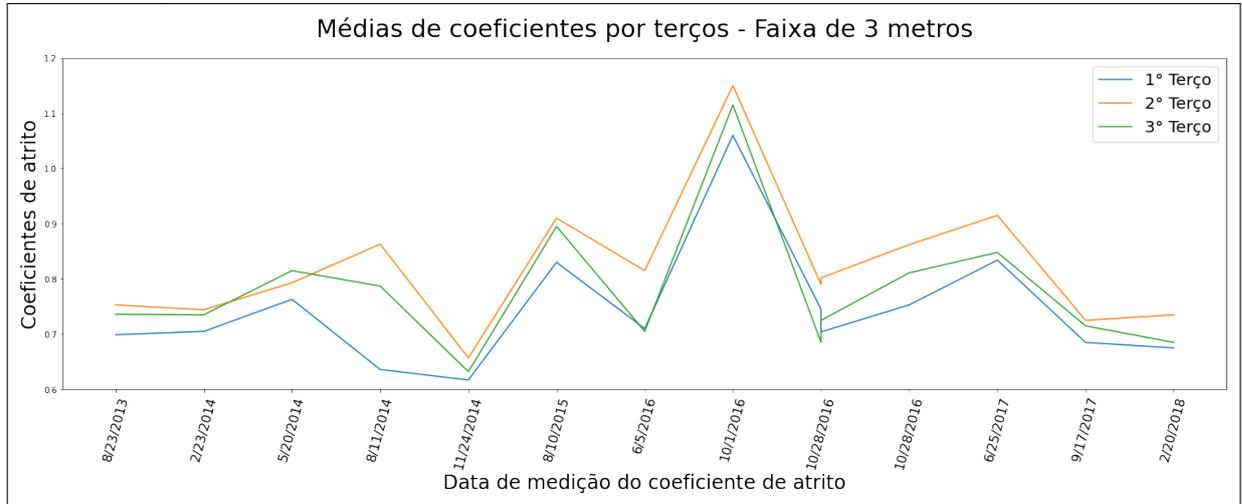
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Observa-se que esses coeficientes são mais distintos entre si. O coeficiente do primeiro terço, por serem menores, indicam um possível maior acúmulo pela diminuição no atrito. Isso pode ser ainda mais sustentado pelo fato de que o primeiro terço costuma ser a primeira região de toque das rodas de aeronaves durante um pouso.

A Figura 17 reúne os mesmos dados para a medida de faixa equivalente a 6 metros. Os dados são mais uniformes e mantém a tendência geral de acúmulo por terços. A Tabela 5 reúne os dados dos respectivos desvios padrão.

Os dados dos coeficientes de atritos foram reunidos em uma só métrica de média entre os valores supracitados das faixas de 3 e 6 metros para futura comparação com dados de PDI. Os dados não foram comparados separadamente como anteriormente apresentados pois os dados referentes às imagens correspondem à pista toda. Para uma comparação mais próxima

Figura 16 – Gráfico das médias de coeficientes de atrito calculadas por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - faixa de 3 metros



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

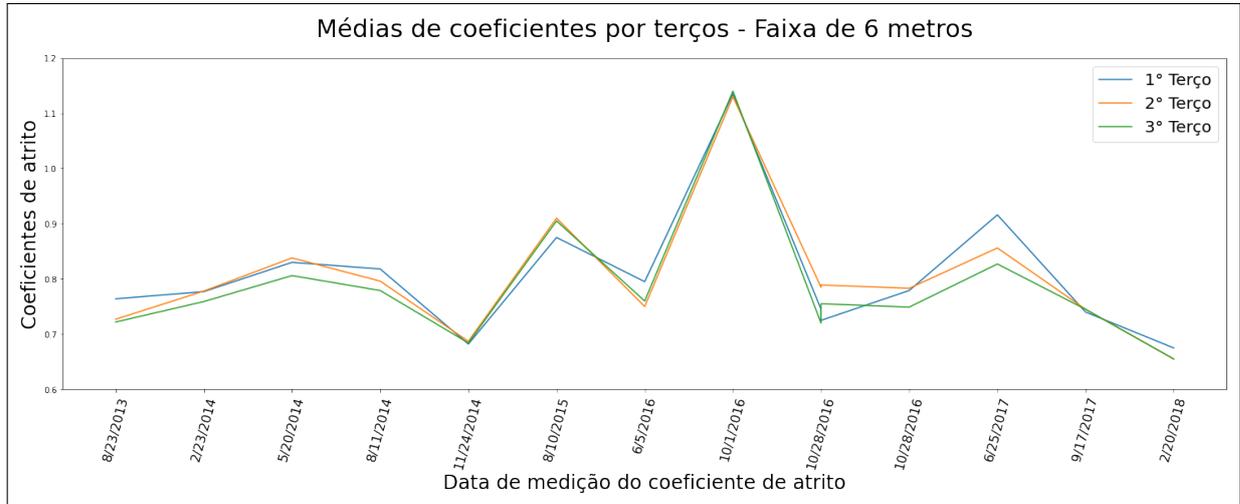
Tabela 5 – Desvio padrão por média dos coeficientes de atrito por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - faixa de 6 metros

Data de medição	Desvio padrão
25/08/2013	0.0187
23/02/2014	0.0087
18/05/2014	0.0135
12/08/2014	0.0159
24/11/2014	0.0020
13/08/2015	0.0154
1/07/2016	0.0192
4/10/2016	0.0040
1/11/2016	0.0267
2/01/2017	0.0261
22/06/2017	0.0151
9/10/2017	0.0370
20/02/2018	0.0023
15/08/201	0.0094

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

com dados por faixas de 3 e 6 metros seria adequado um corte adicional na imagem da PPD em, respectivamente, 3 e 6 metros correspondentes na imagem. Contudo, a resolução já cai bastante após o corte inicial. Cortes adicionais nas presentes imagens sob essas condições podem diminuir as quantidades de *pixels*, levando à perda de informação o suficiente para prejudicar o PDI, uma diminuição potencialmente suficiente para tirar da imagem detalhes necessários para boas medições. Portanto, a imagem sem cortes por faixas de largura de 3 e 6 metros são mantidas e os dados de coeficiente de atrito são combinados em uma só variável. A Figura 18 apresenta

Figura 17 – Gráfico das médias de coeficientes de atrito calculadas por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - faixa de 6 metros



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

esses dados e esses serão utilizados na análise para com os resultados obtidos com PDI.

Tabela 6 – Desvio padrão dos coeficientes de atrito por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins - Ambas as faixas

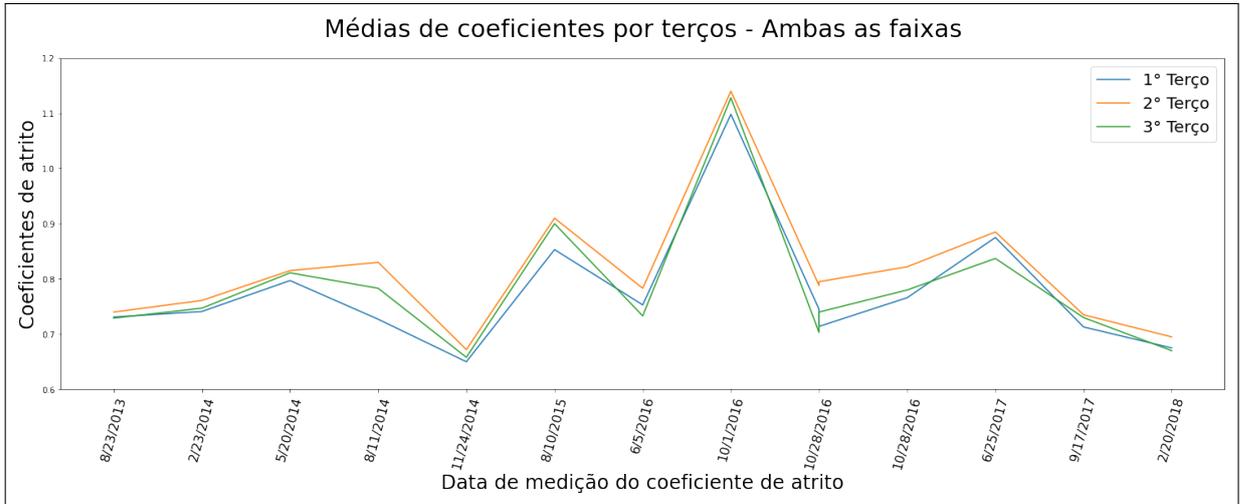
Data de medição	Desvio padrão
25/08/2013	0.0047
23/02/2014	0.0083
18/05/2014	0.0077
12/08/2014	0.0421
24/11/2014	0.0090
13/08/2015	0.0248
1/07/2016	0.0205
4/10/2016	0.0176
1/11/2016	0.0347
2/01/2017	0.0337
22/06/2017	0.0237
9/10/2017	0.0206
20/02/2018	0.0094
15/08/201	0.0108

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Esses resultados indicam que o procedimento de remoção do acúmulo de borracha na PPD após determinado ano (2016) pode não ser tão eficiente. Para que haja perda de eficiência e o coeficiente de atrito decaia, o acúmulo de borracha pode ser um fator.

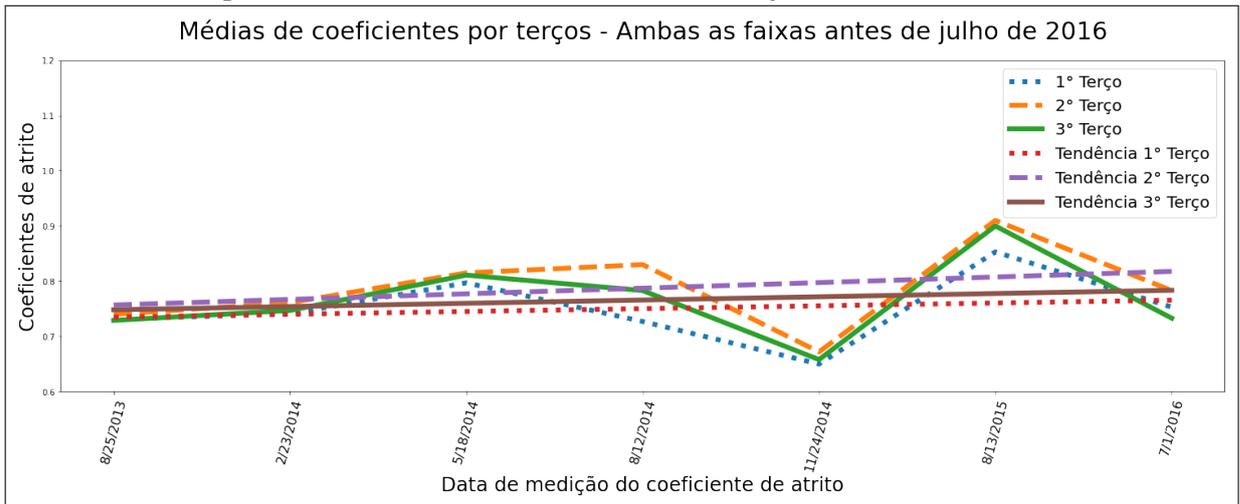
As Figuras 21 e 22 apresentam os dados de macrotextura (SALES, 2019), aos quais as medições já o são realizadas por terços segundo regulamentação ((ANAC, 2019)), e as retas de tendência para esses valores. As retas de tendência indicam todas uma tendência de crescimento

Figura 18 – Gráfico das médias de coeficientes de atrito calculadas por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins de ambas as faixas



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 19 – Retas de tendência - coeficientes de atrito por terços de ambas as faixas da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins antes de julho de 2016



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

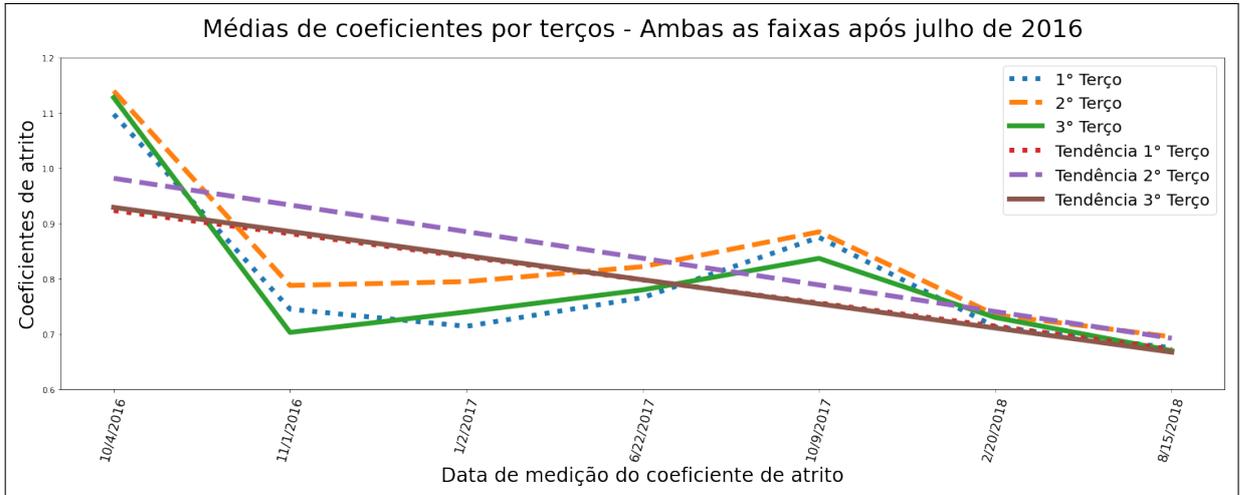
da macrotextura. O que sugere que ao longo dos anos a tendência é de aumento pelo desgaste da pista, apesar das manutenções.

A Figura 23 reúne os resultados de PDI por terços sem equalização por histograma e a Figura 24 os resultados com equalização.

A Figura 25 apresenta a reta de tendência de crescimento para os dados dos resultados de PDI sem equalização por histograma até a data de junho. Observa-se nos dados que a tendência de crescimento se mantém de forma uniforme exceto por uma queda principalmente na tendência para o segundo terço.

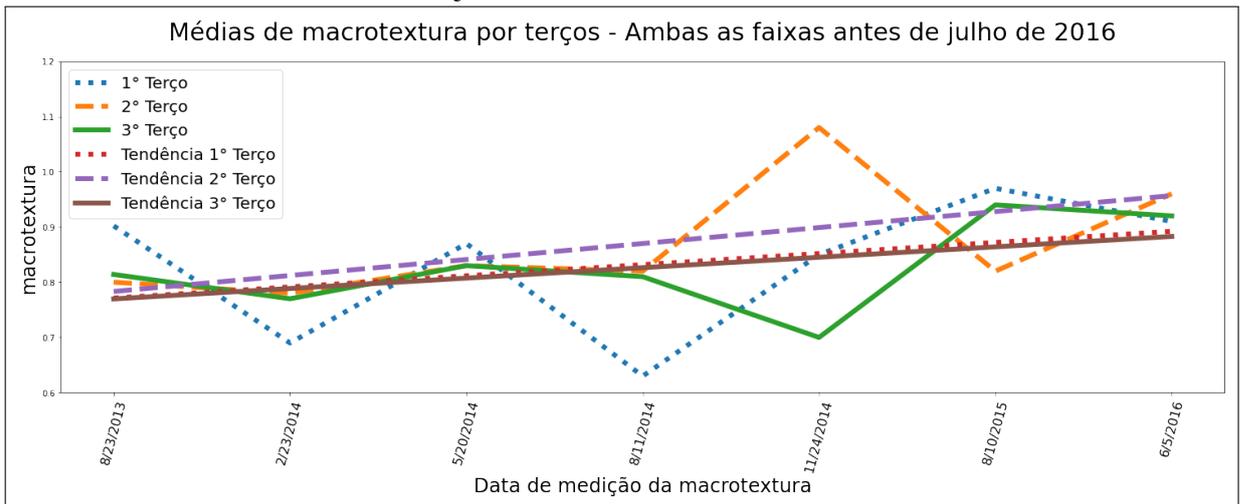
Na Figura 26 estão representados as retas de tendência para os mesmos terços de pista, mas a partir de junho de 2016 e sem equalização por histograma. Observa-se um claro

Figura 20 – Retas de tendência - coeficientes de atrito por terços de ambas as faixas da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins após julho de 2016



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 21 – Retas de tendência - macrotextura por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins antes de junho de 2016



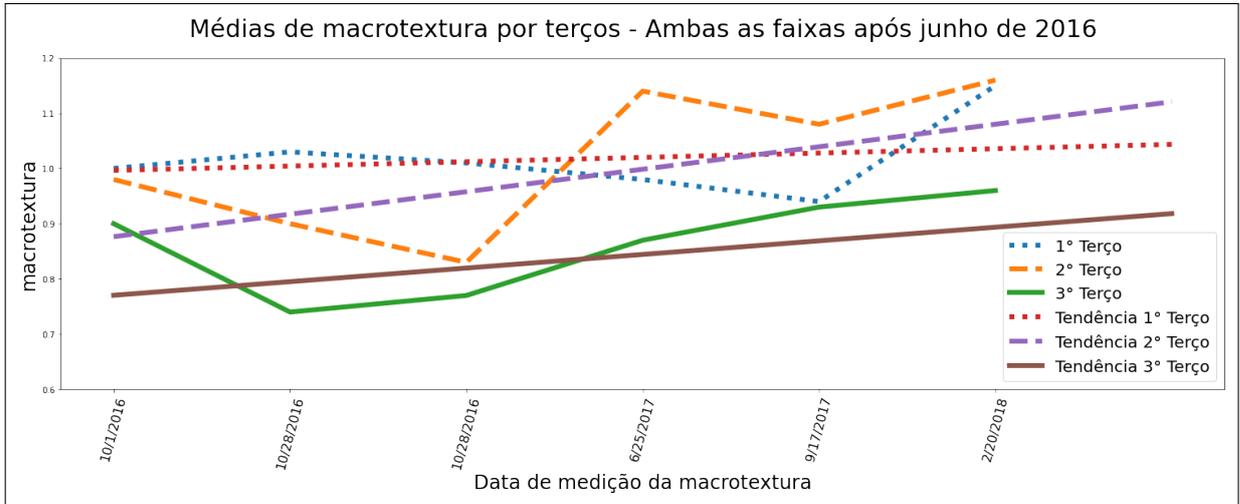
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

aumento, o que indica que o acúmulo tende a aumentar a partir de determinada época (2016) pelo desgaste na PPD.

Comparando com os dados de coeficientes de atrito do mesmo período na Figura 20, observa-se que o coeficiente tem uma tendência de queda. Isso indica que as manutenções na PPD pareceram não contribuir para a melhoria do coeficiente de atrito, de modo que a borracha se mantém acumulada e essa variável indica um potencial de risco à segurança de pousos e decolagens.

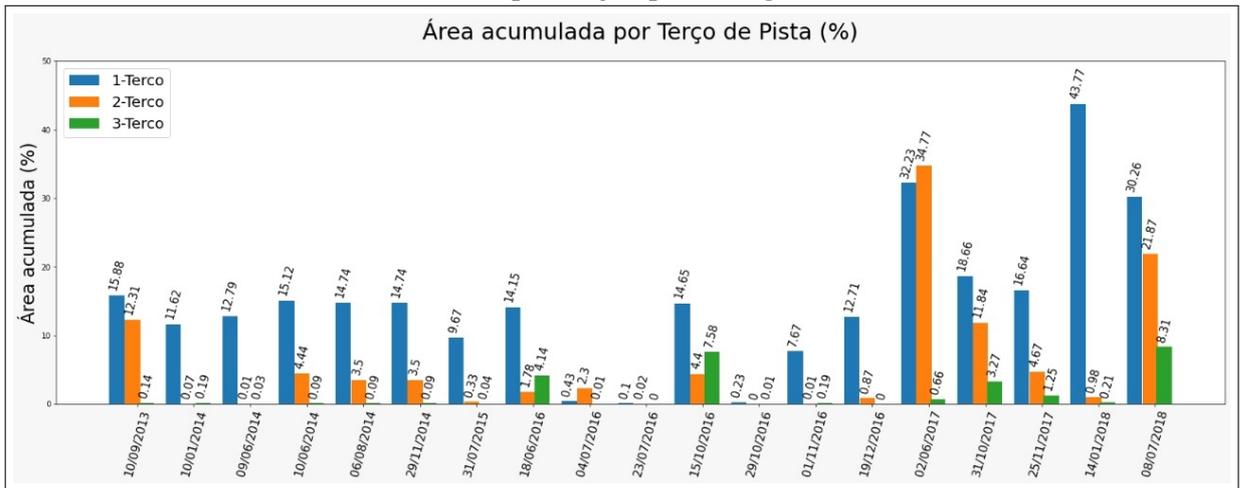
As Figuras 27 e 28 apresentam os mesmos dados previamente apresentados com equalização por histograma, respectivamente. Por meio desses dados, observam-se tendências de queda na Figura 27. Já na Figura 28, a tendência se altera significativamente para a reta

Figura 22 – Retas de tendência - macrotextura por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins após junho de 2016



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 23 – Estimativa de área de acúmulo de borracha por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins sem equalização por histograma

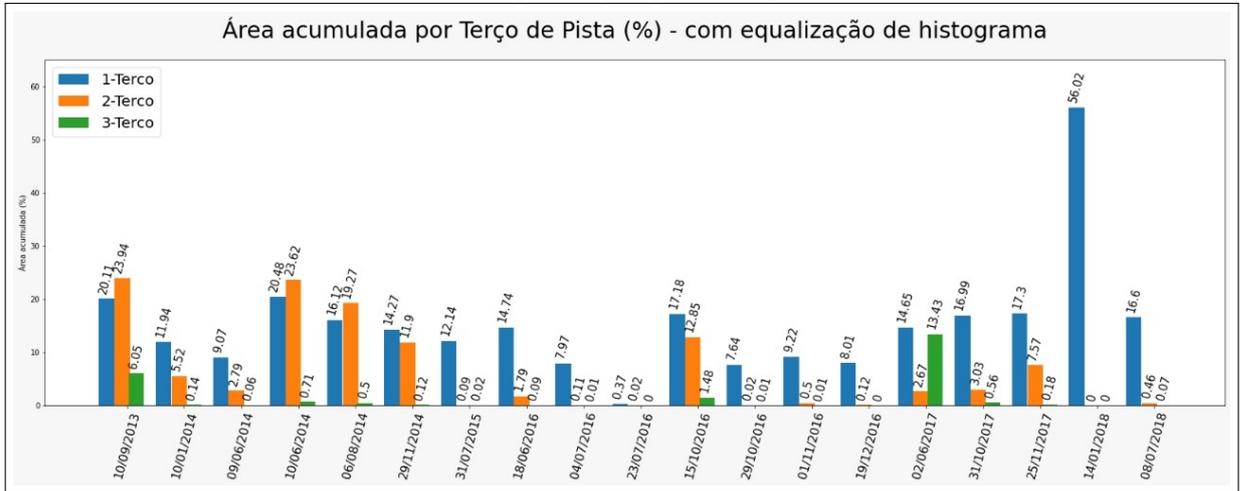


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

do primeiro terço. As retas do segundo e terceiro terço sofrem uma alteração na tendência de crescimento. Uma alteração também em relação à tendência vista anteriormente.

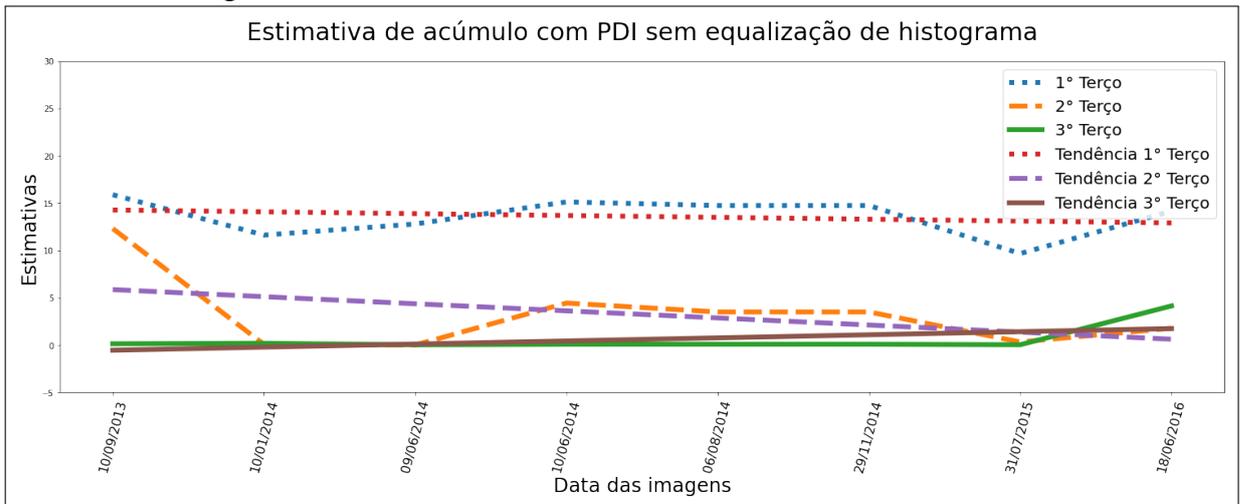
Isso significa que a equalização por histograma pode estar contribuindo para uma perda de informação que pode ser necessária para melhor diagnosticar o estado do acúmulo de borracha na PPD. Isto é, determinados processamentos que contribuem para uma análise podem levar a uma perda de informação relevante em uma outra análise. O que indica que para a tomada de decisões de manutenção na PPD, é necessária avaliar o melhor processamento para a coleta de informação nas imagens a depender de qual o parâmetro está sendo analisado.

Figura 24 – Estimativa de área de acúmulo de borracha por terços da PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins com equalização por histograma



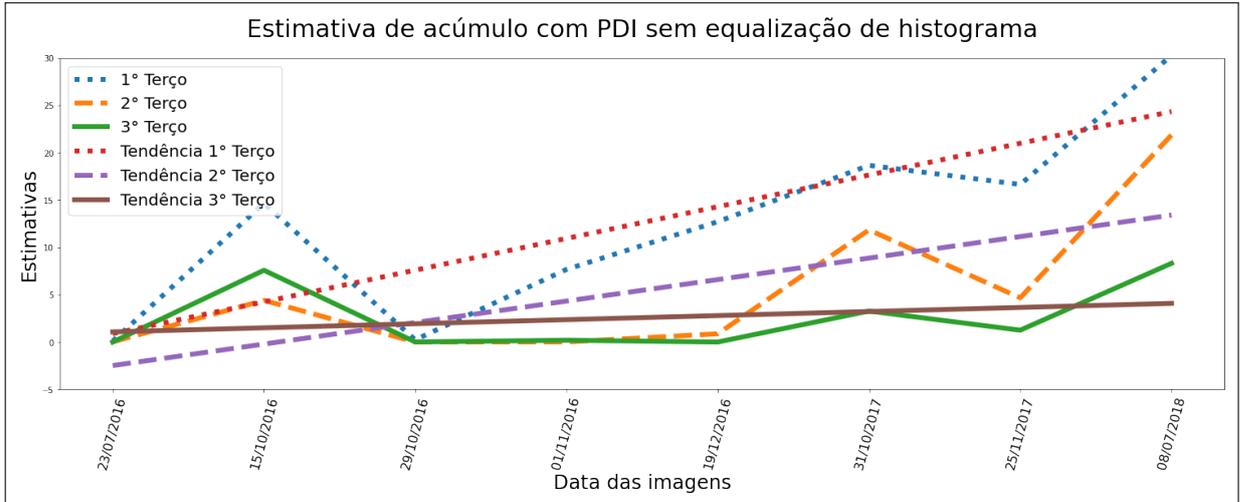
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 25 – Retas de tendência - resultados de PDI até Junho por terços sem equalização por histograma



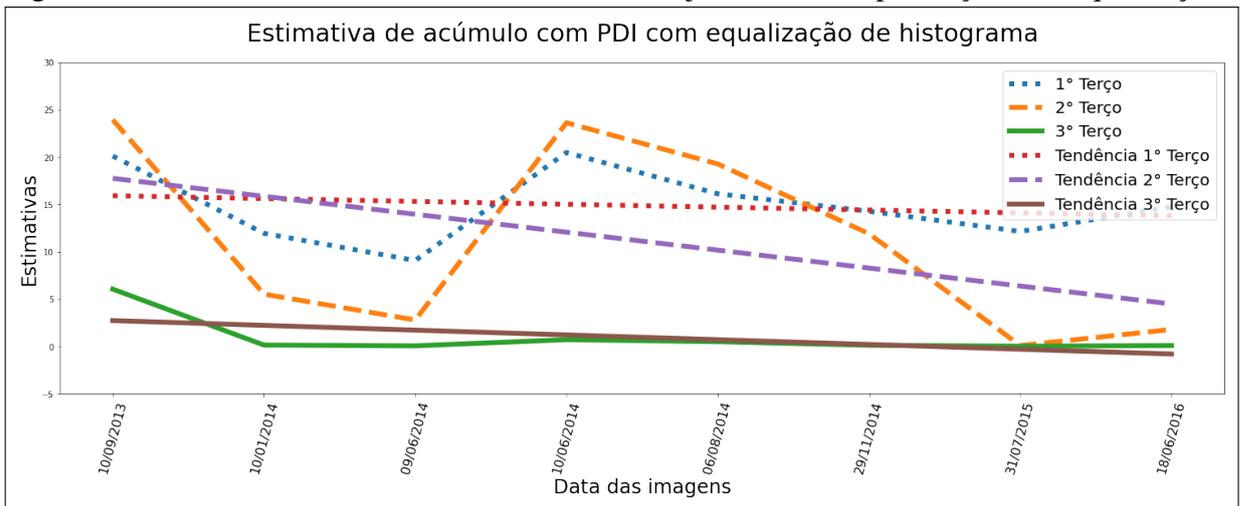
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 26 – Reta de tendência - resultados de PDI de Junho e após por terços sem equalização por histograma



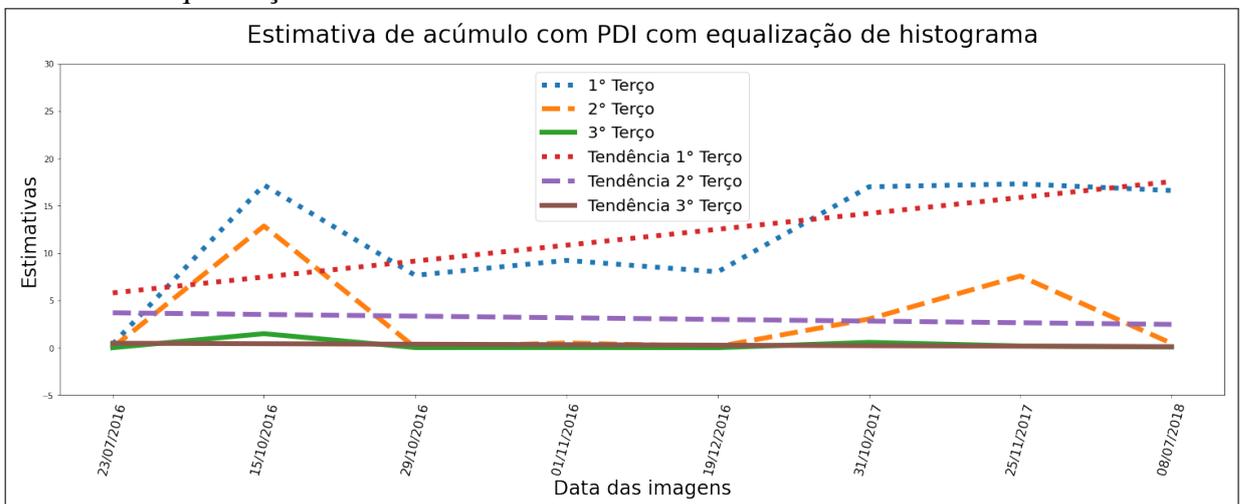
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 27 – Reta de tendência - resultados de PDI até junho de 2016 por terços com equalização



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 28 – Reta de tendência - resultados de PDI de junho de 2016 e após por terços com equalização



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho. Aqui serão feitos comentários sobre o uso de imagens de satélite para analisar PPD do Aeroporto Internacional Pinto Martins por meio de PDI e sobre a análise dos parâmetros de coeficiente de atrito, macrotextura e das estimativas obtidas com o PDI aplicado neste trabalho.

5.1 Principal contribuição

Por meio deste trabalho, pode-se concluir que pelo desgaste em uma PPD ao longo dos anos, a borracha tende a acumular-se apesar das remoções, uma vez que as retas de tendência do coeficiente de atrito possuíam mesmo comportamento para com a de resultados do PDI. Além disso, pode-se perceber que o uso da estimativa obtida pelas imagens pode ser trabalhada como parâmetro em análises de PPDs e possui potencial significativo para auxiliar na tomada de decisões por parte de um operador de aeródromo. Por fim, pode-se perceber que há necessidade de maiores estudos para aumentar a precisão de resultados e adequar melhor os métodos de para uma análise de revestimento por meio de imagens.

5.2 Principais constatações

Por meio deste trabalho, é possível concluir que há um potencial significativo do uso de imagens por meio de PDI para auxiliar nas tomadas de decisões. Apresentou-se de maneira eficiente a análise dos dados obtidos pelas imagens por separação em terços de comprimento de pista. É necessária a utilização de imagens de elevada resolução para eventuais análises que eventualmente utilizem objetivamente a separação da pista por comprimento de largura da PPD. Assim, evitando uma possível perda de informação e de detalhes pela diminuição dos *pixels* presente nas imagens.

Não foi encontrada uma tendência de crescimento ou decaimento para a macrotextura de maneira similar ao do coeficiente de atrito. Contudo, analisar a tendência de crescimento ou decaimento do coeficiente de atrito por terços foi significativo para analisar melhor o comportamento das retas referentes aos dados obtidos com PDI.

É necessário o estudo de técnicas para ajuste dos níveis de brilho e contraste para balancear e corrigir imperfeições que possam levar o conjunto de imagens a resultados incongruentes; isto é, imagens escuras e outras mais claras, neste tipo de aplicação, devem ser processadas

de modo que suas intensidades encontrem uma homogeneidade quanta a essas características em relação a umas às outras.

As capturas por satélite do *Google Earth* são acessíveis e disponíveis, mas são limitadas quanto às datas de captura e, pela altitude, ocasionam a aparição de objetos que as tornam *outliers*. Por outro lado, as capturas em altitude elevada proporciona um amplo alcance de toda a extensão de uma PPD.

5.3 Principais limitações

As imagens de satélite podem proporcionar objetos como nuvens ou sombras de nuvens sobre uma PPD pela altitude. Assim, satélites de monitoramento podem vir a estar limitados a datas muito restritas devido a condições climáticas, por exemplo. Essa limitação pode-se contornar com capturas alternativas às de satélites como as por drones, mas com estudo de uma altura ideal para uma ampla captura rica em detalhes, mas abaixo de um possível limiar que evite nuvens baixas, pássaros ou outros objetos que ocasionem *outliers*. Por fim, determinadas resoluções podem-se demonstrar insuficiente para análises que requeiram a separação da imagem da pista em terços por largura, por exemplo. Portanto, é necessário

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

- a Uso de drones para a captura e análise de imagens em altas resoluções de PPD e a partir de grandes alturas;
- b Estudo de técnicas de processamento que equilibrem melhor um conjunto determinado de imagens quanto aos níveis de brilho e contraste para melhor uniformidade e extração de informação na análise de PPDs por imagens;
- c Estudo de outros parâmetros relativos aos procedimentos de remoção de acúmulo de borracha e outros relacionados aos de manutenção em PPD para comparar e estabelecer analisar novos métodos e parâmetros de análise do revestimento por meio de imagens.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **RBAC N°153 EMENDA N°04 AERÓDROMOS - OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E RESPOSTA À EMERGÊNCIA**. Brasília, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 2016.
- APS, M. **Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos**. 2017. 164 f. Tese (Tese de Doutorado) — Escola Politécnica, Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- CHEN JIAN-SHIUH; CHEN, S.-F. L. M.-C. Macroscopic and microscopic evaluation of surface friction airport pavements. **Chinese Society of Pavement Engineering**, International Journal of Pavement Research and Technology, v. 7, n. 5, p. 588–594, 2013.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **AC 150/5320-12C - Measurement, Construction, and Maintenance of Skid Resistant Airport Pavement Surfaces**. United States, 1997.
- FILHO, O. S. R. **Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários – Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo Congonhas**. 2006. 290 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola Politécnica, Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- GARTNER GLOSSARY. **PCM (Pulse Code Modulation)**. 2021. Glossário de Tecnologia da Informação do Gartner. Disponível em: <<https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/pcm-pulse-code-modulation>>. Acesso em: 16 nov. 2021.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. [S. l.]: Pearson, 2008.
- GOOGLE. **Data de Captura das Imagens**. 2020. Fórum do Google: Imagens digitais do Google Maps - Data de captura e de publicação, as mesmas? Disponível em: <<https://support.google.com/maps/thread/58907256/data-de-captura-das-imagens?hl=pt-BR>>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- J.C., C. F. Y.; S., C. A new criterion for automatic multilevel thresholding. **IEE Transactions on Image Processing**, IEEE Signal Processing Society, v. 4, n. 3, p. 370–378, 1995.
- LEOCÁDIO, A. S. **Avaliação da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Manaus**. 2014. 114 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Manaus, Manaus, 2014.
- MUKUL SAJJAN SINGH, N. The origins of digital image processing application areas in digital image processing medical images. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH TECHNOLOGY (IJERT) NCEAM**, v. 1, n. 2, 2013.

SALES, S. R. **Análise do processo de remoção de borracha em revestimentos aeroportuários: influência na aderência pneu-pavimento.** 2019. 103 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Centro de Tecnologia, Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SMITH, M.; PEARCE, B. Aviation Economic Benefits **Measuring the Economic rate of return on investment in the aviation industry:** report. Canadá, 2007. 38 p. (IATA Economics Briefings N°8).

STATISTA . **Number of flights performed by the global airline industry from 2004 to 2022 (in millions).** 2021. Dados estatísticos do volume de voos mundiais de 2004 a 2021. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/564769/airline-industry-number-of-flights/>>. Acesso em: 07 nov. 2021.

WHO. **WHO Director-General’s opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020 (Ng).** 2020. Declaração da OMS em 11 mar. 2020 declarando pandemia de Covid-19. Disponível em: <<https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>>. Acesso em: 07 nov. 2021.