CARACTERIZAÇÃO DO ACÚMULO DE BORRACHA POR MEIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E POR ANÁLISE DAS OPERAÇÕES DE POUSOS E DECOLAGENS

Tiago Silveira de Andrade Aquino, Francisco Heber Lacerda de Oliveira, Gustavo Mota
Universidade Federal do Ceará,

*** Corresponding author e-mail address**: tiago.silveira@det.ufc.br, heber@det.ufc.br, gustavomota953@alu.ufc.br

PAPER ID: SIT158

ABSTRACT

O acúmulo de borracha causado por pneus de aeronaves nas pistas de aeródromos, sobretudo durante as operações de pouso e decolagens, representa um risco à segurança por favorecer a ocorrência de acidentes. Entre as causas está o comprometimento do escoamento de água na pista, pela obstrução da textura superficial do revestimento, prejudicando o seu coeficiente de atrito. A condição é mitigada pela remoção periódica da borracha da pista, cujo acúmulo está relacionado ao volume de operações e fatores condicionantes, como umidade ambiental e temperatura da pista. O presente artigo tem como objetivo relacionar o acúmulo de borracha de um aeródromo com o volume de operações de pousos e decolagens. A caracterização da área de acúmulo de borracha ocorreu por meio de processamento de imagens, obtidas por veículo aéreo não tripulado. O estudo considerou o volume de operações de aeronaves com propulsão de motor a reação, como a condição crítica de operação. Identificando a ocorrência de um serviço de remoção de borracha e comparando diversas condições de processamento foi possível identificar graficamente que a variação do percentual de área emborrachada era compatível com o volume de operações de pouso.

Keywords: segurança operacional, pavimento, aeroporto, processamento de imagens, atrito.

1. INTRODUÇÃO

As pistas de pousos e decolagens (PPD) são pavimentos que exigem cuidadosa manutenção e monitoramento para manter a segurança das operações. Dentre as ocorrências que deterioram a segurança das PPD em aeródromos está o acúmulo de borracha.

O monitoramento do acúmulo de borracha é realizado por meio da medição do coeficiente de atrito do pavimento, cujas normas de controle, equipamentos utilizados e frequência de monitoramento estão especificados em ANAC (2020, 2021).

A instrução normativa nacional é baseada em normativas internacionais (FAA, 1997; ICAO, 2002) e descreve os mesmos critérios de monitoramento, avaliação e intervenções.

Uma forma de parametrizar o acúmulo, percebido também a olho nu, caracterizado por uma mancha mais escura que a do pavimento da PPD, é por meio de imagens aéreas. A partir dessas imagens, é possível aplicar algoritmos de processamento de imagens (PDI) para estimar a quantidade do acúmulo pela área da zona emborrachada, baseada nas tonalidades das manchas.

O acúmulo de borracha origina-se do processo de polimerização dos pneus das aeronaves, provocado pelo calor gerado no atrito entre a superfície da pista e os pneus das aeronaves (COTTER; SMITH, 2006). Essa película de resíduo emborrachado, com características similares ao de uma lâmina de vidro sobre a textura do pavimento na PPD, reduz o coeficiente de atrito da pista e contribui para o risco de acidentes em condições de pista molhada (MCKEEN; LENKE, 1984).

Diferentes fatores podem contribuir para uma maior soltura de borracha e, consequentemente, acúmulo na PPD. Dentre eles, pode-se listar questões meteorológicas, como a temperatura, e características das aeronaves como o peso.

A execução do serviço de remoção de borracha requer fechamento temporário de pista, uso de equipamentos e materiais onerosos (YOUNG; WELLS, 2014), e que inclusive podem remover material do revestimento e danificar a rugosidade do pavimento (WATERS, 2005)e perda de material. Preocupações com gerenciamento de riscos e recursos motivaram Abduljabbar *et al.* (2020) a desenvolverem um sistema para tomada de decisão de método de remoção de borracha baseado nestes critérios. Entende-se então que um monitoramento mais preciso das condições de pista permitiria um melhor gerenciamento dos recursos e programação da realização das operações de remoção de acordo com as operações de pouso e decolagem.

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) e suas imagens vem sendo utilizados em pesquisas e procedimentos de apoio à estruturas aeroportuárias (AKBAR *et al.*, 2019; GRADOLEWSKI *et al.*, 2021; PARKER *et al.*, 2022).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é determinar uma taxa de acúmulo de borracha na pista por meio de correlações entre a variação da mancha do emborrachamento, obtidas por PDI, e as operações de pouso e decolagem na PPD estudada. Além disso, identificar propriedades nas imagens que contribuem para uma melhor caracterização do emborrachamento da pista em análise.

2. METODOLOGIA

As imagens foram coletadas a partir de voo de VANT conduzido por um operador de aeródromo em três meses distintos. As datas exatas das coletas são de 17/10/2021, 04/12/2021 e 26/02/2022 respectivamente. O aeródromo escolhido está situado na Região Sul do Brasil.

Para proporcionar imagens de alta resolução e maior riqueza de detalhes, o VANT sobrevoou a uma altitude mais baixa, contudo, que não permite a captura da pista inteira. Porém, um conjunto de imagens foi criado para cada mês, e a partir disso foi gerado um mosaico que representa a pista inteira como a criação de um panorama. Por esse motivo, o voo do VANT ocorreu ao longo de três viagens de uma cabeceira a outra para aumentar o número de imagens e as sobreposições entre elas. Contribuindo dessa forma para a geração do mosaico daquela coleta e em uma alta resolução e com o mínimo de artefatos ou defeitos.

Foi utilizado o modelo de VANT DJI Mavic Air 2, conduzido pelo operador ao longo do eixo da pista de uma cabeceira à outra. A altura média foi de 70 metros em outubro e 30 metros nos dois meses restantes e as capturas possem resolução geral de 4000x3000 *pixels*. O presente trabalho agrupou as imagens, de cada mês de coleta, dentre as que compreendem a primeira e a segunda cabeceira da pista, denominadas aqui de cabeceira 11 e 29, respectivamente. Assim, para cada coleta, foram gerados dois mosaicos. O *software* utilizado foi o Bentley Contextcapture v19.1. Devido às diferenças quanto ao volume de imagens de cada conjunto, de cada cabeceira, apesar de que as capturas individuais tenham uma alta resolução comum, os mosaicos podem se diferenciar na quantidade de *pixels*. A Figura 1 apresenta os mosaicos por cabeceira em cada mês e a resolução em *pixels*.

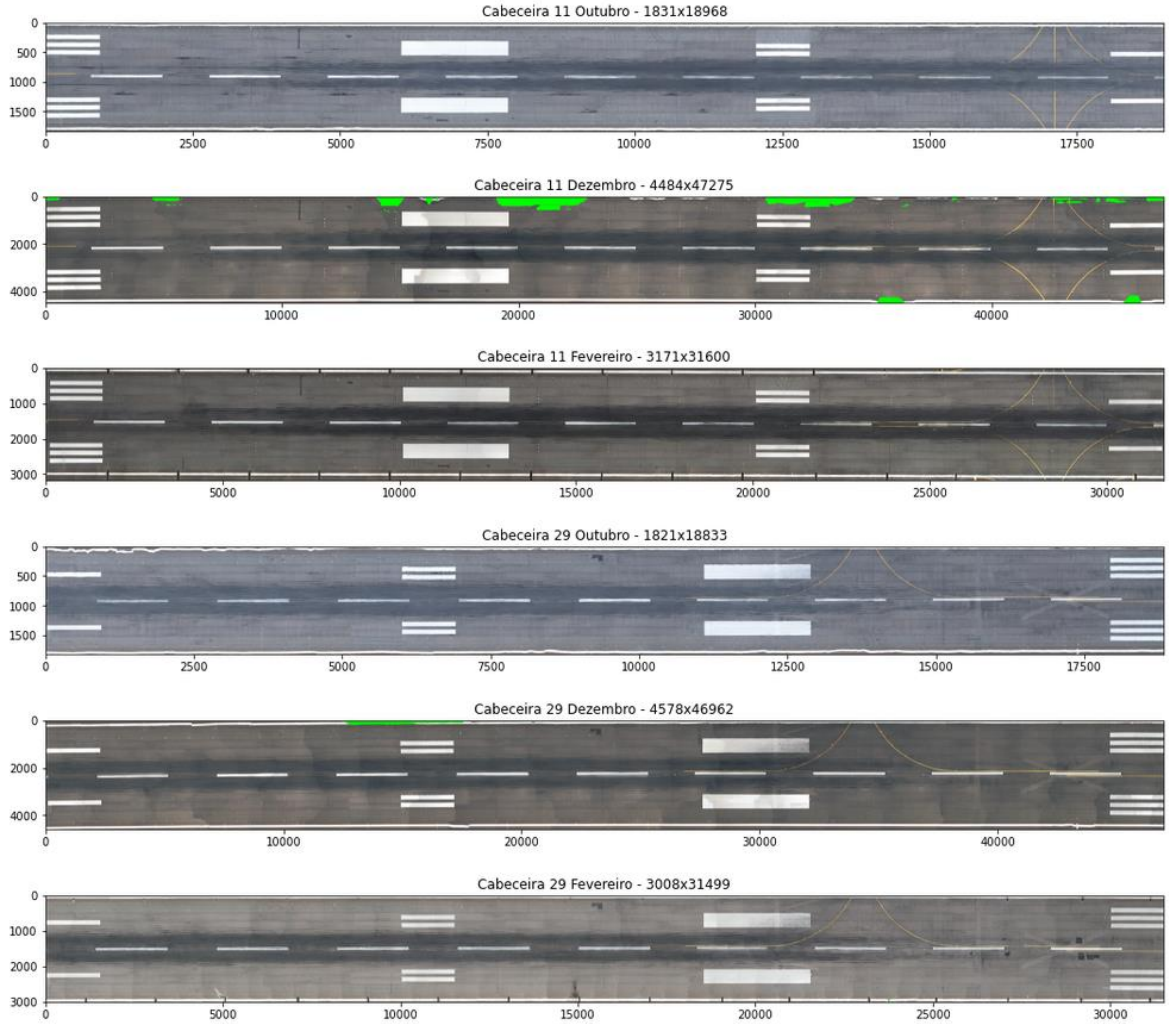


Figura 1: Mosaicos gerados, por período, cabeceira, e com a respectiva resolução

A aplicação de PDI se dividiu em três etapas: (i) cálculo de segmentação para mensurar o acúmulo de borracha no pavimento; (ii) reaplicação da técnica após realizar a calibragem das imagens por meio do método elaborado; e (iii) análise dos resultados com comparativo com os demais dados de operações de pousos e decolagens, entre outros. Os mosaicos foram ainda cortados de modo a representar, proporcionalmente, cerca de 19 m aproximados de largura total de pista centralizado no eixo.

O cálculo de segmentação ocorreu pela aplicação de um método de extração da área emborrachada na pista. Na imagem, são identificados os *pixels*, baseados em suas tonalidades, que correspondem à região de interesse (*region of interest*, ROI) que no caso é a área emborrachada.

O método escolhido é o método de Yen (YEN *et al.*, 1995). Após extrair a área emborrachada, a estimativa se dá pelo cálculo do percentual dessa área com relação à pista toda com base na quantidade de *pixels*. Esse

percentual é proporcional ao da área emborrachada real no pavimento.

A realização da calibragem nas imagens ocorreu pela escolha de uma imagem chamada neste trabalho de *calibrante*. Uma imagem *calibrante* é aquela imagem que terá suas características usadas como parâmetro para que as imagens que serão calibradas incorporem suas características de tonalidade. Neste caso, as tonalidades gerais do espectro de cores RGB. O objetivo é, por meio da imagem exemplar, calibrar as demais para que suas características fiquem mais homogêneas e, por consequência, sejam melhoradas. Além disso, o ganho é de que os parâmetros para aplicação da segmentação podem tornar-se mais similares devido a semelhança final entre as imagens após a calibragem. Assim, não havendo esforços para encontrar parâmetros completamente diferentes para as imagens tão diferenciadas.

A partir da seleção da imagem exemplar, seleciona-se um pixel branco e se obtém as suas intensidades. A partir disso, escolhe-se outros pixels brancos, um para cada imagem a ser calibrada. As diferenças entre as intensidades serão utilizadas para criar uma variável a ser utilizada em uma função que visa minimizar essa diferença. Foi desenvolvido um algoritmo capaz de exibir na tela a imagem *calibrante* a fim de se selecionar um pixel de uma região pré-definida da pista, por meio de um clique de mouse, e na sequência o mesmo procedimento na mesma região da pista para as demais imagens a serem calibradas. Assim, automatizando a execução e tornando seu uso mais intuitivo.

O método de calibragem foi desenvolvido baseado em Thanh *et al.* (2020). O método originalmente considera o mapeamento de pixels correspondentes entre duas capturas, originárias de duas câmeras distintas. A partir do mapeamento, identifica-se um parâmetro que representa a transformação de cores que ocorreu de um para o outro, dado que são do mesmo objeto para realizar a estabilização de uma das imagens. O presente estudo considerou o mesmo princípio, mas considerando os mosaicos da pista que estão em comum para cada época. A pesquisa, no entanto, considerou apenas a transformação de cores ignorando a variação gama, nesta fase.

Os indicadores que determinam a qualidade das calibragens é o aspecto visual analógico, no qual as imagens devem se apresentar semelhantes. Além disso, a segmentação é também um fator importante, pois utiliza parâmetros muito próximos. O indicativo da qualidade da segmentação é o aspecto visual subjetivo e os indicadores dos dados de saída, que devem estar alinhados com parâmetros utilizados na área para caracterizar o emborrachamento.

Os dados de operações de pousos e decolagens do aeroporto estudado foram obtidos por meio do programa de Dados Abertos da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2019).

Apenas o número total de operações de pouso por cabeceira em cada período foi considerado, tendo em vista que comparada a operação de decolagem é no pouso que ocorre o maior desgaste dos pneumáticos da aeronave e consequentemente um índice de contaminação do pavimento demasiadamente superior. Os dados utilizados no estudo são apresentados na Tabela 1, que reúne a quantidade de operações de pouso no aeroporto de análise nos períodos trabalhados.

Tabela 1: Operações de pousos por cabeceiras entre os meses de captura (out/21 e fev/22).

Cabeceiras	Out/21 - Dez/21	Dez/21 - Fev/22
Cabeceira 11	5.871	3.565
Cabeceira 29	1.291	1.288

3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os resultados da aplicação do algoritmo de segmentação juntamente das estimativas da área emborrachada (dano) determinada em cada imagem. Os eixos X e Y representam respectivamente o comprimento e a altura em *pixels* de cada imagem. Observa-se, portanto, as diferenças de resolução entre as imagens, mas que foram uniformizadas para este processo.

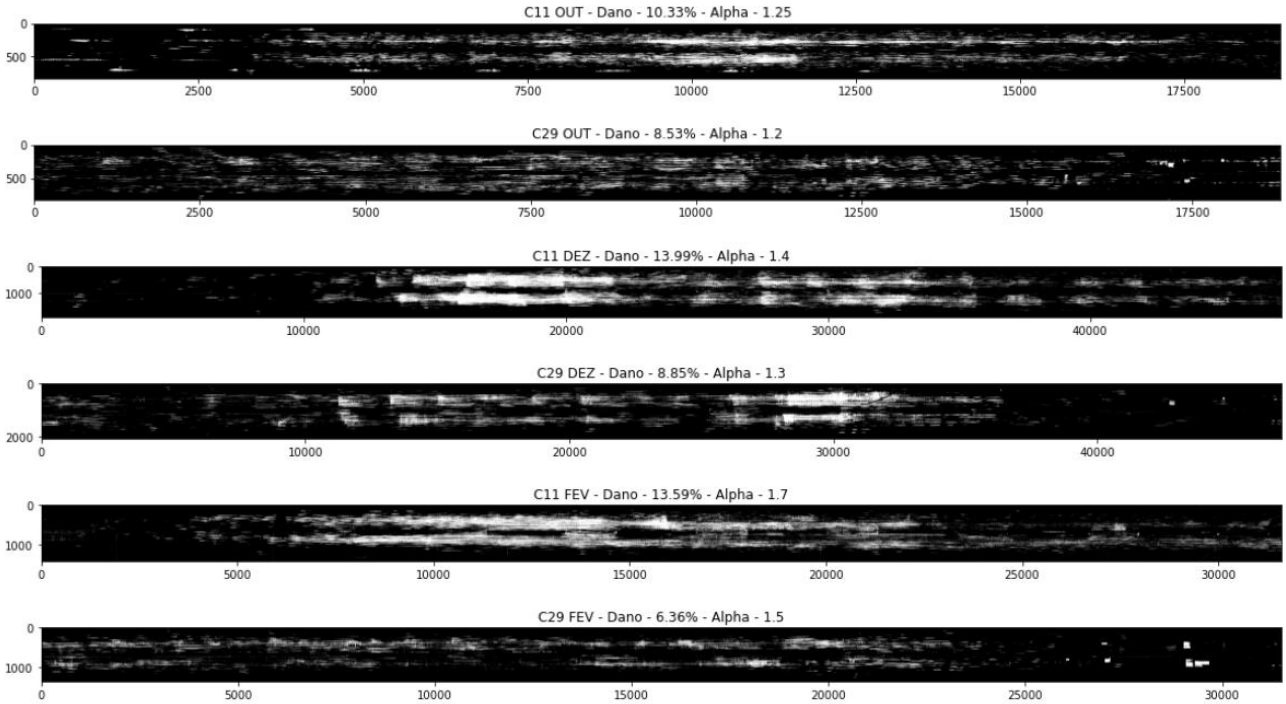


Figura 2: Resultados da aplicação da segmentação nos mosaicos originais e a estimativa de área emborrachada (dano).

Observa-se na Figura 2 que, por meio da aplicação do algoritmo de segmentação, houve maior acúmulo na cabeceira 11 da pista do que na cabeceira 29, indicando maior frequência de operações de pousos nesta cabeceira. Infere-se ainda que houve um incremento no emborrachamento de outubro para dezembro, mas um decréscimo de dezembro para fevereiro. Este último fato é explicado pela ocorrência de manutenção em período entre as datas de obtenção destas duas capturas. Outra observação é de que os parâmetros *alpha* não são uniformes (aproximadamente iguais) entre campanhas de capturas. É inclusive, impreciso apontar um padrão claro capaz de indicar qual o alpha adequado para a imagem seguinte com base no encontrado para a anterior.

O algoritmo de calibragem foi executado sobre as imagens. A imagem *calibrante* foi escolhida por sendo a da cabeceira 11 da captura de outubro. Dado que a imagem da cabeceira 29 de outubro possui aspectos similares, foi descartada da calibragem. Ambas as imagens de outubro foram descartadas para o novo cálculo de segmentação. As imagens passaram a assumir aspectos de tonalidade de cores observados na imagem *calibrante*, mas com intensidades indo de acordo com o brilho e o contraste geral originais de cada imagem calibrada. A Figura 3 apresenta os mosaicos calibrados das capturas dos meses de dezembro/21 e fevereiro/22.

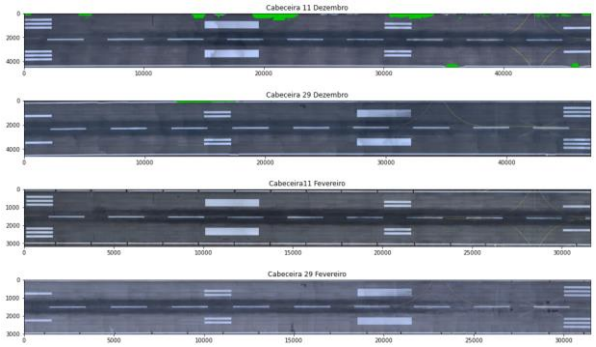


Figura 3: Imagens das cabeceiras 11 e 29 dos meses de dezembro/21 e fevereiro/22 após calibragem

A partir das quatro imagens da Figura 3, aplicou-se a segmentação, obtendo então os resultados apresentados na Figura 4. Os parâmetros alpha mais adequados foram os mesmos aplicados nas imagens originais e as estimativas obtidas também foram preservadas. Além disso, a região segmentada permaneceu inalterada em ambas as aplicações.

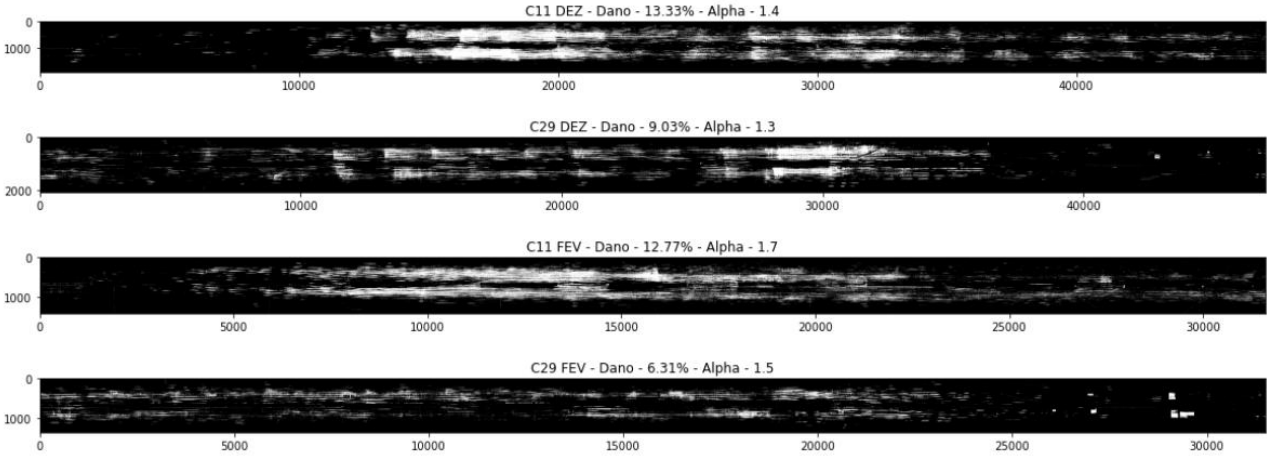


Figura 4: Resultados da segmentação nas imagens após calibragem e a estimativa de área emborrachada (Dano).

Para verificar se a restrição do processamento das imagens à faixa central da pista (área do pavimento diretamente afetada pelo emborrachamento) impacta a qualidade da segmentação, aplicou-se o filtro nas imagens cortadas e nas imagens calibradas. A Figura 5 apresenta os mosaicos sem calibração e sem os cortes e a Figura 6 apresenta os mosaicos com a calibração, porém sem os cortes.

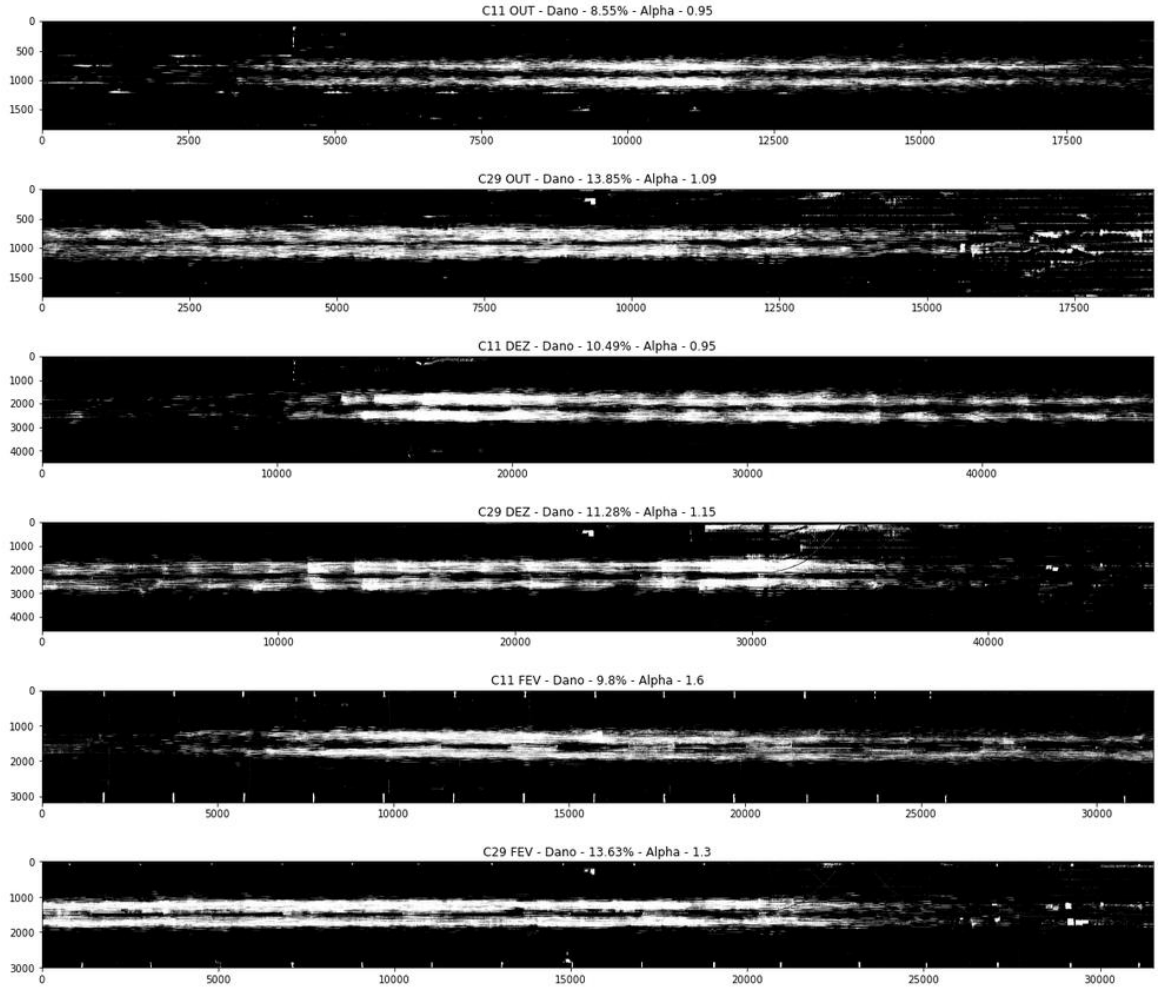


Figura 5: Resultados da aplicação da segmentação nas imagens originais sem calibragem.

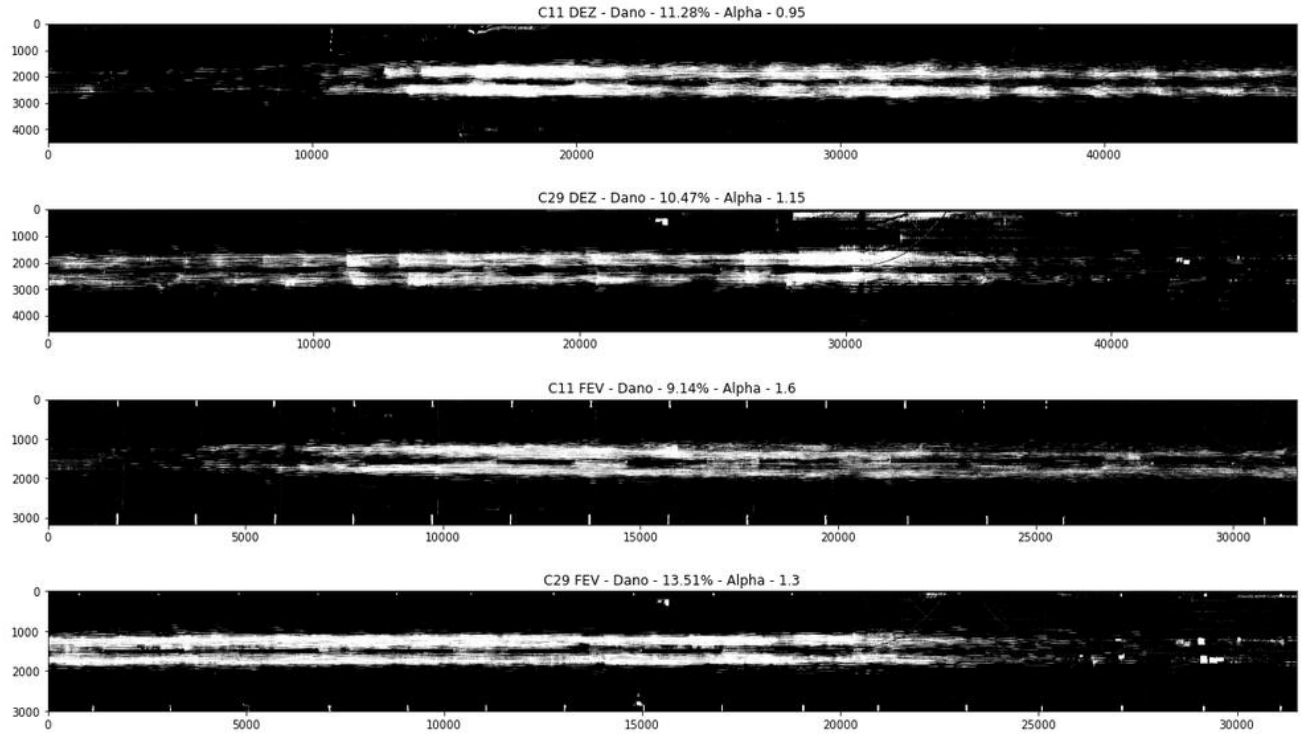


Figura 6: Resultados da aplicação da segmentação nas imagens calibradas sem os cortes

Sem os cortes, os resultados não seguem o mesmo padrão anterior e não possuem comportamento condizente com os da Tabela 1. Desta maneira os dados erroneamente sugerem que a cabeceira 29 possuiu maior acúmulo com relação à 11, consequentemente maior frequência de operações. Além disso, indicam que para a cabeceira 11 houve um aumento gradual, ao passo que para a 29 houve um decaimento em dezembro/21, com relação a outubro/21. Com relação a fevereiro/22, haveria um aumento comparado com dezembro/21. Esses resultados das imagens não cortadas e sem calibragem não são corroboram com os dados de volume de operações, demonstrando que a restrição do estudo à porção central da pista impacta na consistência final dos dados. A operação de corte do mosaico ainda elimina regiões das laterais que contam com pinturas da pista e artefatos, como observado nos mosaicos de dezembro/21, que interferem na segmentação.

A Tabela 2 sintetiza os resultados agregando os dados de estimativas por cabeceira, mês de captura e pela realização de corte e calibração.

Tabela 2: Tabela comparativa dos resultados de percentual de área emborrachada por tipo de processamento.

Data	Percentual de área emborrachada (dano)							
	Cabeceira 11				Cabeceira 29			
	S/Corte S/Calibr.	S/Corte C/Calibr.	C/Corte S/Calibr.	C/Corte C/Calibr.	S/Corte S/Calibr.	S/Corte C/Calibr.	C/Corte S/Calibr.	C/Corte C/Calibr.
Out/21	8,55	10,33	10,33	10,33	13,85	8,53	8,53	8,53
Dez/21	10,49	12,28	13,99	13,33	11,28	10,47	8,85	9,03
Fev/22	9,8	9,14	13,59	12,77	13,63	13,51	6,36	6,31

Definindo como Período 01 o ocorrido entre Out/21 e Dez/21 e Período 02 o ocorrido entre Dez/21 e Fev/22. A Tabela 3 apresenta a variação entre os percentuais das áreas emborrachadas, nos dois períodos, em diferentes critérios de processamento da imagem (corte e calibração).

Tabela 3: Variação percentual da área emborrachada entre as datas de levantamento

	Processamento da imagem	Variação % emborrachado	
		Período 1 (Out/21-Dez/21)	Período 2 (Dez/21-Fev/22)
Cabeceira 11	S/Corte S/Calibr.	1,94	-0,69
	S/Corte C/Calibr.	1,95	-3,14
	C/Corte S/Calibr.	3,66	-0,40
	C/Corte C/Calibr.	3,00	-0,56
Cabeceira 29	S/Corte S/Calibr.	-2,57	2,35
	S/Corte C/Calibr.	1,94	3,04
	C/Corte S/Calibr.	0,32	-2,49
	C/Corte C/Calibr.	0,50	-2,72

Observa-se uma variação percentual negativa no Período 2 em quase todos os modos de processamento da imagem. Tal resultado pode ser explicado devido à um serviço de remoção de borracha que ocorreu logo após a data de aquisição do segundo grupo de imagens (Jan/21). Mesmo com a realização do serviço, o percentual de emborrachamento no período 2 obteve uma menor redução na cabeceira 29, exatamente a cabeceira que apresenta menos operações de pouso e consequentemente a cabeceira que teve o serviço de remoção de borracha mais preservado no Período 2 (menor contaminação).

Foi comparada então a evolução do percentual de área emborrachada com o volume de operações de pouso ocorrido nestes mesmos períodos. A Figura 3 apresenta a representação gráfica destas variações na cabeceira 11 (a) e na cabeceira 29 (b). Observa-se que as opções de análise das imagens utilizando a restrição de área avaliada (corte) tendem a seguir a mesma variação de operações de pouso naquela cabeceira, um possível indicativo de correlação. A inclinação menos acentuada da variação de emborrachamento observado na figura 3(b) pode ter sido causada por uma menor eficiência na remoção de borracha desta cabeceira, ou uma combinação de maior emborrachamento causado pela influência de uma maior temperatura ambiente que ocorre neste período do ano na região.

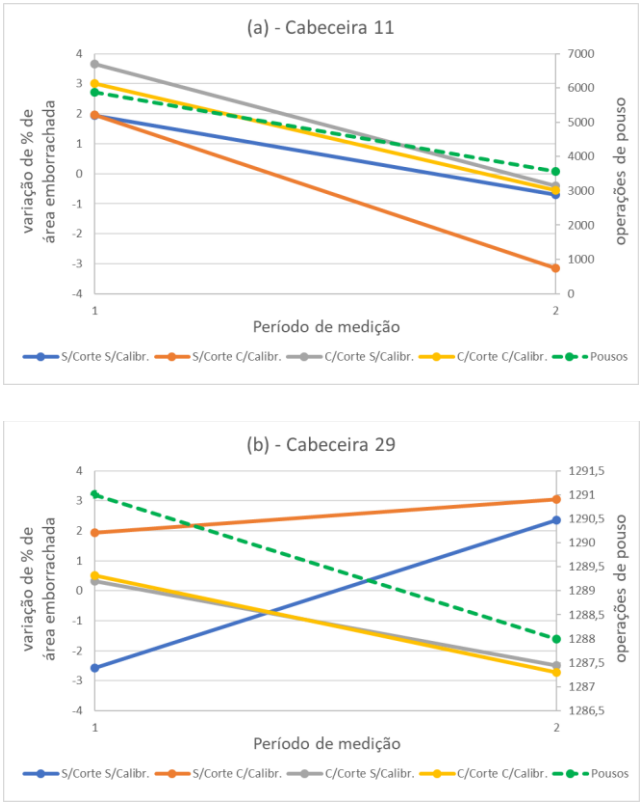


Figura 3: Variação percentual da área emborrachada entre as datas de levantamento na cabeceira 11 (a) e na cabeceira 29 (b)

O maior volume observado na frequência de operações de pouso sugeria que a cabeceira 11 deveria possuir maior percentual de depósito de borracha que a cabeceira 29. Além disso, os valores sugeriam ainda que o depósito deveria ter sido maior entre outubro/21 e dezembro/21 do que entre dezembro/21 e fevereiro/22 em ambas as cabeceiras.

As imagens demonstram, contudo, uma redução da área emborrachada entre dezembro/21 e fevereiro/22, justificado possivelmente pela ocorrência de remoção de borracha após a data de captura de dezembro/21. Isso sugere ainda que, mesmo após essa remoção, o acúmulo de borracha tenha sido menor no segundo período em decorrência de um menor volume de tráfego.

4. CONCLUSÕES

A partir deste trabalho é possível identificar que para os dados estudados não houve indicativos de que as diferenças de tonalidades entre diferentes imagens prejudicassem a aplicação de segmentação no processamento digital. Por outro lado, foi observado que cortes nas imagens, o brilho e o

contraste geral são fatores de maior relevância e podem influenciar diretamente os resultados obtidos.

É possível afirmar que a implementação do uso de imagens e aplicação de PDI para inferir o emborrachamento do pavimento e realizar comparações entre as imagens de diferentes épocas auxilia o processo de tomada de decisão para realização de serviços de remoção de borracha, pois, proporciona uma análise que caracteriza a evolução do emborrachamento de pista. Entretanto, diferenças nas imagens, que podem ser causadas por fatores climáticos no momento da captura devem ser levadas em consideração no momento do processamento.

Constata-se, ainda, que é possível determinar o acúmulo de borracha pelo seu aspecto visual de forma automatizada e passível de validação com parâmetros volumétricos de operações de pouso e decolagens. Contudo, é importante atentar-se aos cortes nas imagens para a exclusão de elementos da pista que interfiram nos resultados (artefatos, remendos e pinturas) e à determinação dos parâmetros ideais para aplicação de algoritmos de processamento automatizado.

Uma coleta de dados de mais períodos, incluindo dados mais detalhados das operações de pouso (temperatura, peso da aeronave, condição de umidade da pista) promoveriam a elaboração de um modelo matemático de previsibilidade de indicativo de remoção de borracha da pista de pouso e decolagem.

Espera-se que o trabalho, por meio dos parâmetros estudados, possa auxiliar operadores de aeródromos em tomadas de decisão de processos de manutenção de pistas de pouso e decolagem, e, com isso, incrementar a segurança das operações em aeroportos brasileiros.

BIBLIOGRAFIA

ABDULJABBAR, A. S.; SALMAN, N. D.; JALEEL, Z. T. Design of an Expert System for Airport Rubber Removal. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 737, n. 1, 2020. Disponível em: Acesso em: 30 ago. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **IS Nº 153.205-001 - Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista pouso e decolagem**. Brasil: 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **RBAC nº 153 Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à emergência**. Brasil: 2021.

AKBAR, J.; SHAHZAD, M.; MALIK, M. I.; UL-HASAN, A.; SHAFAIT, F. Runway Detection and Localization in Aerial Images using Deep Learning. **2019 Digital Image Computing: Techniques and Applications, DICTA 2019**, [*s. l.*], 2019. Disponível em: Acesso em: 23 ago. 2022.

ANAC. **Dados abertos — Agência Nacional de Aviação Civil ANAC**. [*S. l.: s. n.*], 2019. Disponível em: https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos. Acesso em: 14 maio 2022.

COTTER, B.; SMITH, S. **Expeditionary rubber removal capability**. [*S. l.: s. n.*], 2006. Disponível em: http://www.dtic.mil. .

FAA. **AC 150/5320-12C - MEASUREMENT, CONSTRUCTION, AND MAINTENANCE OF SKID-RESISTANT AIRPORT PAVEMENT SURFACES**. 18 mar. 1997. Disponível em: Acesso em: 30 ago. 2022.

GRADOLEWSKI, D.; DZIAK, D.; KANIECKI, D.; JAWORSKI, A.; SKAKUJ, M.; KULESZA, W. J. A Runway Safety System Based on Vertically Oriented Stereovision. **Sensors 2021, Vol. 21, Page 1464**, [*s. l.*], v. 21, n. 4, p. 1464, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1464/htm. Acesso em: 23 ago. 2022.

ICAO. Airport Services Manual: Part 2, Airport Surface Conditions. **Doc 9137**, [*s. l.*], 2002.

MCKEEN, R. G.; LENKE, L. R. **Alternatives for runway rubber removal from**

porous friction surfaces. Albuquerque: [*s. n.*], 1984.

PARKER, A.; GONZALEZ, F.; TROTTER, P. Live Detection of Foreign Object Debris on Runways Detection using Drones and AI. **2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)**, [*s. l.*], p. 1–13, 2022. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9843697/. Acesso em: 23 ago. 2022.

THANH, O. V.; CANHAM, T.; VAZQUEZ-CORRAL, J.; RODRIGUEZ, R. G.; BERTALMIO, M. Color Stabilization for Multi-Camera Light-Field Imaging. **ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings**, [*s. l.*], v. 2020-May, p. 2148–2152, 2020. Disponível em: Acesso em: 24 ago. 2022.

WATERS, J. C. Ultra high pressure Watercutting-Rejuvenating the microtexture of polished surfacings. **Transit New Zealand International Conference on Surface Friction for Roads and Runways**, [*s. l.*], 2005. Disponível em: Acesso em: 23 ago. 2022.

YEN, J. C.; CHANG, F. J.; CHANG, S. A New Criterion for Automatic Multilevel Thresholding. **IEEE Transactions on Image Processing**, [*s. l.*], v. 4, n. 3, p. 370–378, 1995. Disponível em: Acesso em: 24 ago. 2022.

YOUNG, S. B.; WELLS, A. T. **Aeroportos - Planejamento e Gestão**. 6. ed. [*S. l.: s. n.*], 2014. 2014. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Aeroportos_6_ed.html?hl=pt-BR&id=JmDiAwAAQBAJ. Acesso em: 23 ago. 2022.

.