

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

AVALIAÇÃO DO ACÚMULO DE BORRACHA POR IMAGENS EM PISTAS DE POUSOS E DECOLAGENS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Gustavo Antonio Sousa Paz e Mota¹; Francisco Heber Lacerda de Oliveira²; Yuri Lenon Barbosa Nogueira¹; Joaquim Bento Cavalcante Neto¹; Creto Augusto Vidal¹

RESUMO

O acúmulo de borracha em pavimentos aeroportuários é um dos fatores responsáveis pela redução do coeficiente de atrito. Esse acúmulo tende a ser mais intenso nas zonas de toque das pistas de pouso e decolagem durante as operações das aeronaves. Dessa forma, essas zonas podem estar em condições mais críticas de deterioração que outras, que são levadas em consideração nas medições de atrito. Essas regiões podem ser identificadas e o emborrachamento mensurado por imagens, de satélite ou capturadas por veículos aéreos, devido ao aspecto visual caracterizado por uma mancha mais escura que o revestimento. Tendo isso em vista, o presente artigo tem por objetivo avaliar a zona de emborrachamento por meio de imagens de uma pista de pouso e decolagem determinando a área de acúmulo de borracha em relação aos valores de coeficiente de atrito *in loco*. Utilizam-se o algoritmo de agrupamento K-médias em imagens coloridas para realizar a segmentação dessas regiões pela tonalidade. Dessa forma, o presente artigo desenvolve uma ferramenta capaz de, baseada nas tonalidades da zona emborrachada na imagem do pavimento, identificar regiões de acúmulo mais crítico que outras. Isso deu-se pela análise do comportamento da tendência de crescimento entre os dados obtidos pelo algoritmo que retorna os dados de emborrachamento e pelos dados de medição de coeficiente atrito no pavimento nas respectivas sub-regiões.

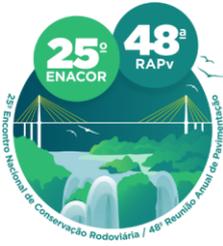
PALAVRAS-CHAVE: Agrupamento; pavimentos; coeficiente de atrito; borracha acumulada; aeroportos.

ABSTRACT

The accumulation of rubber on airport runways is one of the key reasons for the reduction of the coefficient of friction. This accumulation tends to be more pronounced in the runway touchdown zones during aircraft operations. In this way, these areas may be in a more critical condition of deterioration than other areas that are taken into account in measurements of the coefficient of friction. These regions can be identified and the rubberiness measured by satellite images or captured by aerial vehicles, due to the visual appearance characterized by a darker spot than the surface. Having this in perspective, the present paper has the objective of evaluating the rubberizing zone by images of a runway, determining the area of rubber accumulation in comparison to the values of coefficient of friction *in loco*. The K-means clustering algorithm is used on color images to perform the segmentation of these regions by color tonality. Thus, this paper develops a tool capable of, based on the color tones of the rubberized zone in the sidewalk image, identifying regions of more critical accumulation than others. This was done by analyzing the behavior of the trend growth between the data obtained by the algorithm that returns the data of the rubberized zone and the data from the measurement of the coefficient of friction on the runway in the respective subregions.

KEY WORDS: Clustering; pavements; coefficient of friction; rubber accumulation; airports.

^{1, 2 e 3} Universidade Federal do Ceará – UFC, Campus do Pici – CEP 60455706 – Fortaleza - CE, gustavomota953@alu.ufc.br; heber@det.ufc.br; yurilenon@gmail.com; joaquimb@dc.ufc.br; cvidal@lia.ufc.br



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

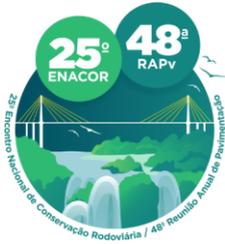
O estado de conservação de uma pista de pouso e decolagem é importante porque a segurança das operações aéreas depende, em grande parte, da qualidade da superfície desses pavimentos. O monitoramento e a manutenção preventiva de maneira regular são necessários para garantir que a superfície esteja em condições adequadas de uso. O coeficiente de atrito é uma das variáveis utilizadas nesse processo; seus valores podem indicar a condição de resistência à derrapagem da pista para as operações e a necessidade ou não de uma intervenção. No Brasil, ANAC (2021) regula os padrões de monitoramento e medição do coeficiente de atrito.

As operações de pousos e decolagens em um pavimento aeroportuário ao longo do tempo podem deteriorar as condições de segurança, observadas pela redução no coeficiente de atrito. O acúmulo de borracha dos pneus das aeronaves nos pavimentos, que ocorre durante essas operações devido à interação pneu-pavimento, provoca a sedimentação desse contaminante no revestimento. Esse é um dos fatores pelo qual o coeficiente de atrito sofre diminuição ao longo do tempo (Chen *et al*, 2008).

O acúmulo de borracha no pavimento pode ser percebido *in loco* pelo aspecto visual da pista. Isso ocorre pela tonalidade dos sedimentos de borracha ocasionarem uma mancha mais escura que o próprio revestimento. Assim, permite-se a detecção viável por meio de imagens. Foi identificada uma correlação entre o acúmulo de borracha e a queda no coeficiente de atrito ao analisar a área de emborrachamento em pistas de pouso e decolagem (PPD) por meio de imagens (Mota *et al*, 2022). Algoritmos de segmentação, que destacam um objeto em uma imagem em relação ao plano de fundo (*background*), permitem esse tipo de aplicação (Aqel e Zaitoun, 2015), o que justifica o presente estudo.

Existem algoritmos de segmentação capazes de destacar objetos e regiões de uma imagem baseada nas cores vermelho-verde-azul (RGB, *red-green-blue*). Dentre eles, estão algoritmos de agrupamento (ou clusterização) que formam subconjuntos de dados baseados nas similaridades entre eles. Em imagens, seriam os *pixels* e as suas similaridades baseadas nas cores apresentadas por eles. O algoritmo de K-médias é um algoritmo capaz de realizar esses agrupamentos indicando a tonalidade média de cada subconjunto (Jalaqam *et al*, 2020). Assim, o presente artigo utiliza o algoritmo de K-médias para realizar agrupamentos dos *pixels* de imagens de uma PPD brasileira executada em concreto asfáltico. Por meio desses agrupamentos, segmentar as imagens em diferentes camadas correspondentes a cada subconjunto formado.

Em Processamento Digital de Imagens (PDI), algoritmos de segmentação são aplicados em imagens com objetivo de detectar e destacar objetos em relação ao *background* que corresponde ao restante da imagem (Aqel e Zaitoun, 2015). Existem diferentes formas de executar segmentação em imagens. Um dos métodos mais utilizados é o de segmentação por limiar (*thresholding*) introduzido por Otsu (1979). Esse método realiza a segmentação na imagem após a transformação em escala de cinza. Dessa forma, todos os *pixels* possuem apenas um valor de intensidade variando de 0 a 255, do preto ao branco, respectivamente. Assim, permite isolar a região de interesse criando um limiar cuja região de interesse possui as intensidades de seus *pixels* acima desse limiar de modo que todos os demais abaixo são desconsiderados.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Algoritmos de segmentação por agrupamento, ou clusterização, são capazes de segmentar imagens coloridas. Através desses algoritmos, imagens aéreas podem ser classificadas de acordo com a presença de edificações, vegetação, entre outros objetos em solo dispensando a necessidade de aplicar transformações para escala de cinza (Jalaqam *et al*, 2020). Portanto, os algoritmos permitem que imagens sejam classificadas de acordo com a tonalidade de suas regiões; imagens em escala de cinza podem perder essa informação e a recuperação pode exigir técnicas tradicionalmente semiautomáticas ou outras mais complexas (Joji *et al*, 2019). Por essas razões, o presente estudo utiliza-se desse algoritmo para classificar imagens de PPD com objetivo de estudar o acúmulo e borracha.

METODOLOGIA DE PESQUISA

As imagens, mesmo coloridas, variam as cores do branco (pintura na pista, por exemplo) ao preto (áreas com picos de acúmulo de borracha). As regiões intermediárias seriam as de acúmulo moderado, possíveis remendos ou tonalidade normal do pavimento. Dessa forma, possibilita uma análise do estado de conservação da pista por sub-regiões baseadas nas concentrações de sedimentos de borracha.

A presente análise se divide em três etapas: (i) coleta de dados, (ii) processamento das imagens e (iii) avaliação dos resultados. A coleta de dados compreende a obtenção das imagens e dos dados de coeficiente de atrito. A etapa de processamento reúne o ajuste das imagens e, então, a aplicação do algoritmo de K-médias, obtendo seus resultados. Por fim, a avaliação dos resultados contém a comparação e estudo de correlação entre os dados do algoritmo com os de atrito.

Os dados de coeficiente de atrito foram cedidos por meio de relatórios de medição para esta pesquisa e compreendem as datas presentes na Tabela 1. Por motivos de segurança, os dias exatos não serão apresentados. Com base nessas datas, foram utilizadas imagens de ambas as cabeceiras da PPD de datas de capturas no mesmo período com diferença de até 20 dias. As imagens foram obtidas por meio de satélite via *Google Earth Pro 7.3.6.9345v* e possuem 1920x1080 *pixels* em escala de cores RGB.

Tabela 1. Períodos analisados (AUTORES, 2023)

Imagem número	Data	Imagem número	Data	Imagem número	Data
0	05/2020	3	04/2021	6	07/2022
1	07/2020	4	07/2021	7	09/2022
2	09/2020	5	10/2021	-	-

As imagens de satélite foram capturadas com auxílio do *software* que automatiza comandos *AutoIt 4.4.6v*. Por meio dele, abre-se a janela do *Google Earth Pro* e posiciona na tela o início da cabeceira alvo de capturas. A partir disso, o algoritmo inicia a sequência idêntica de comandos manuais padronizados para salvar a imagem na tela em disco rígido: efetuar todos os cliques em botões, digitar texto, eventos de *clica-arrasta-e-solta* para deslocar a imagem da pista para a próxima área a salvar uma imagem em disco, dentre outros. As imagens foram então reunidas em mosaicos por meio de um *script* em *Python* automaticamente. A Figura 1 representa uma imagem da cabeceira 01 da PPD.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

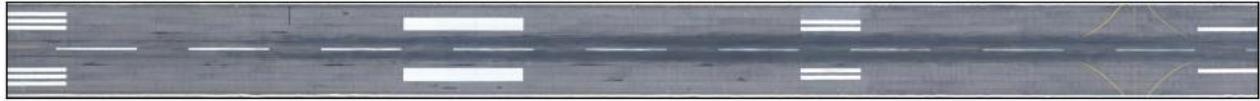


Figura 1: Captura de 10/2021 da cabeceira 01 da PPD de estudo.

As imagens provenientes do *Google Earth Pro* foram disponibilizadas à plataforma por Maxar Technologies. Ambas com *zoom* equivalente a uma altitude relativa ao solo de aproximadamente 100m. Além disso, o *Google Earth Pro* foi configurado de modo que as imagens apresentadas na tela possuíssem melhor contraste entre a zona emborrachada e o revestimento, além de maior riqueza de detalhes. Assim, as configurações padrão foram modificadas: remoção de compactação de cores; filtragem anisotrópica alta e renderização foto realista de atmosfera ativada. Os parâmetros foram selecionados meramente de acordo com o visual a olho nu da imagem na tela antes e após essas configurações.

O algoritmo de K-médias foi configurado a realizar 6 agrupamentos por meio de 10 tentativas. Após a seleção dos pontos, as imagens foram fatiadas em camadas às quais cada uma é segmentada contendo os *pixels* correspondentes de cada agrupamento. Após o fatiamento, cada camada é subdividida em regiões seguindo, aproximadamente, o padrão de regiões da pista onde houve medição de coeficiente de atrito na cabeceira estudada. Por fim, o percentual de área segmentada é mensurado e comparado com os de coeficiente de atrito correspondentes por meio da reta de tendência de ambas as variáveis. O fatiamento é representado na Figura 2. A Figura 3 contém os valores e ilustra as tonalidades dos RGB de cada camada.

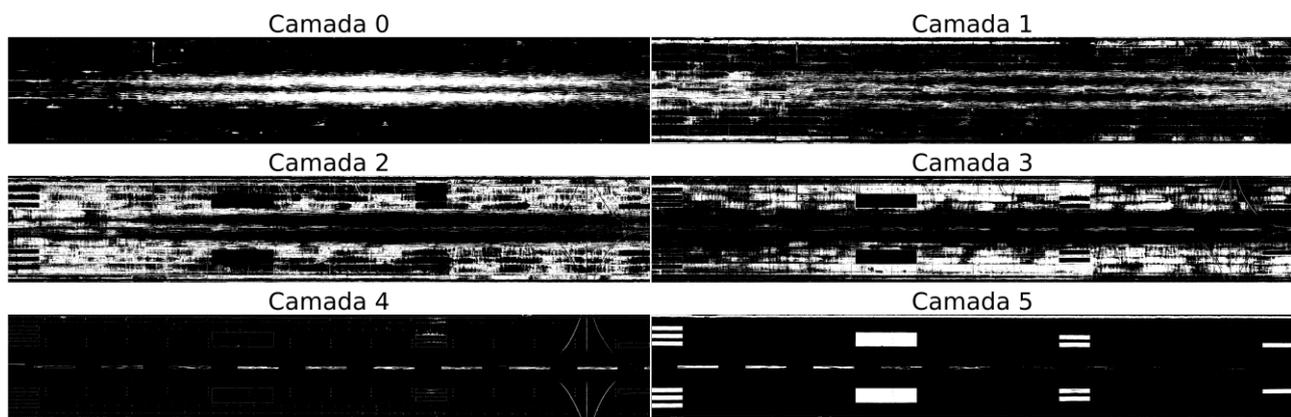
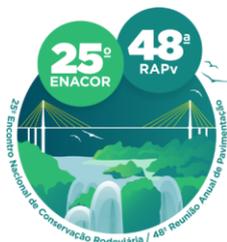


Figura 2: Fatiamento da captura de outubro de 2021 referente à cabeceira 01 da PPD em 6 camadas por tonalidades.

0	[83 92 106]	3	[136 141 150]
1	[108 113 124]	4	[184 187 189]
2	[125 128 139]	5	[246 250 252]

Figura 3: Cores no formato RGB de cada camada detectada pelo algoritmo.

Após o fatiamento, os percentuais de área emborrachada são comparados com os de coeficiente de atrito e é analisado o crescimento entre os períodos para determinar uma estimativa de crescimento percentual do acúmulo de borracha. Apenas as camadas 0 e 1 de cada imagem foram consideradas por notar-se a olho nu que as demais camadas contêm textura de pavimento e pouca informação



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

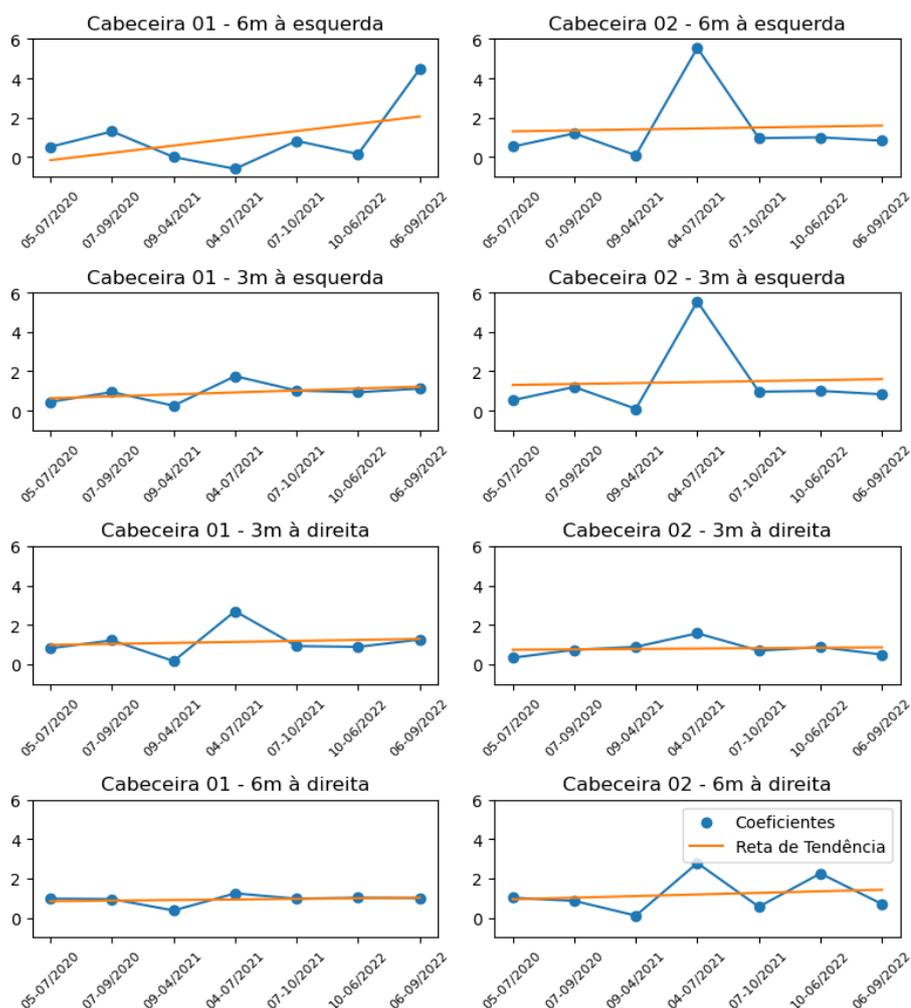


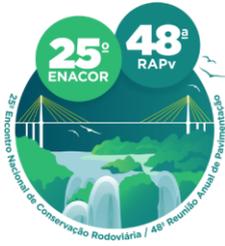
relativa à borracha. Essas fatias foram subdivididas em segmentos equivalentes às áreas 3x100 metros de medição de atrito à 3m e 6m à esquerda e a direita do eixo considerando apenas o primeiro e terceiro terço de pista que correspondem às cabeceiras 01 e 02 cujas regiões contêm as zonas de toque das aeronaves. Os coeficientes de crescimento de um período para o outro e as retas de tendência do período completo foram gerados para os dados correspondentes às camadas 0 e 1, além dos coeficientes de atrito para comparar os respectivos comportamentos. Todos os algoritmos, e *softwares* utilizados, foram implementados em um computador com sistema operacional Windows 10, em linguagem Python 3.5.

RESULTADOS

A Figura 4, 5 e 6 reúnem os dados dos coeficientes e retas de tendência dos dados das camadas 0, 1 e coeficientes de atrito. Nota-se que os dados referentes aos 3m à esquerda e a direita das imagens em ambas as camadas são mais expressivos e congruentes com os de coeficiente de atrito. Por outro lado, os dados apresentados nas figuras 5 e 6 seguem um comportamento proporcional entre si, o que pode indicar que o aspecto visual nas imagens da Camada 1 possui maior correlação em suas características com os valores dos coeficientes de atrito.

Camada 0





19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Figura 4: Coeficientes de crescimento e reta de tendência dos dados de acúmulo de borracha para a Camada 0.

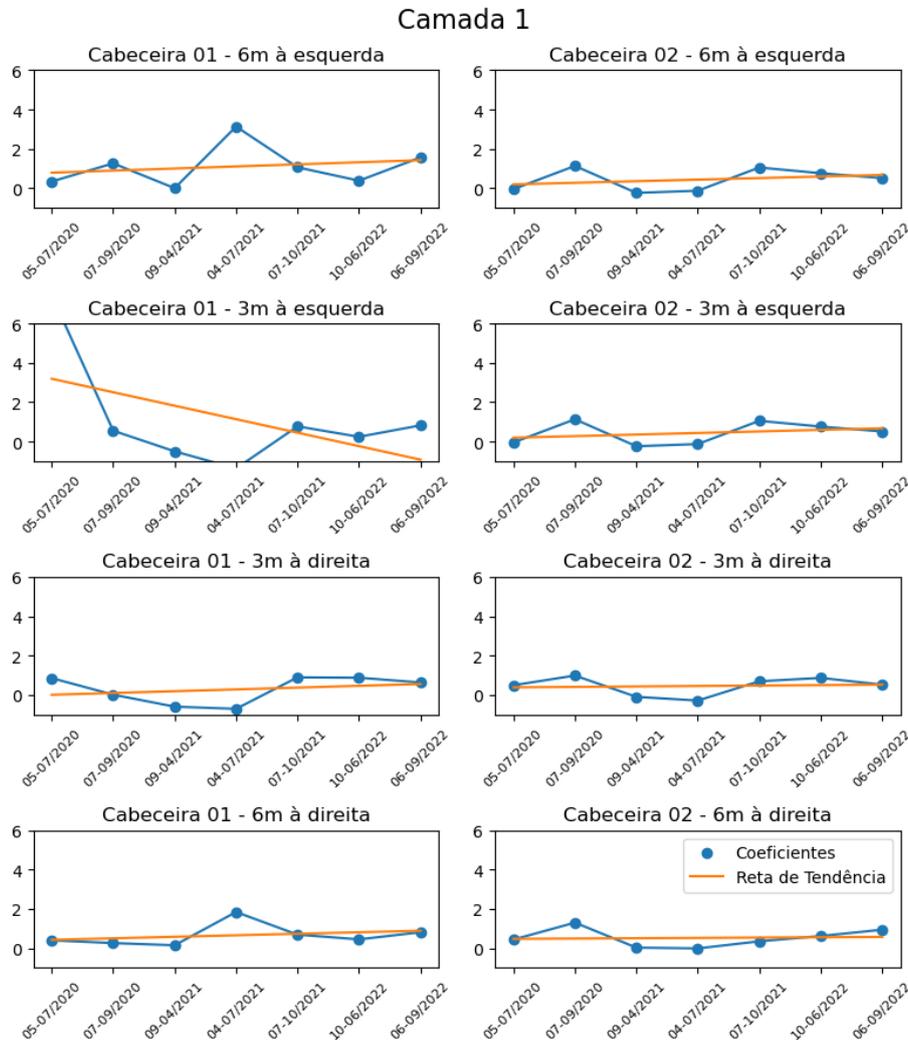
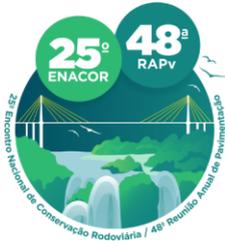


Figura 5: Coeficientes de crescimento e reta de tendência dos dados de acúmulo de borracha para a Camada 1.

O comportamento das tendências das figuras 4, 5 e 6 sugere que a medição de coeficiente de atrito pode estar ocorrendo após a remoção de borracha, indicando que a medição está sempre apontando melhoria do parâmetro. O coeficiente de atrito mantém a tendência geral de melhoria, apesar de que os de acúmulo de borracha também possuem aumento. Dessa forma, os dados apontam que, apesar das remoções de borracha, a PPD pode estar se aproximando do limite de vida útil no qual a remoção de borracha pode não estar mais contribuindo para a melhoria das condições de segurança operacional sob aspecto da resistência à derrapagem.

A Tabela 2 reúne os dados de percentual de crescimento do acúmulo de borracha para a Camada 1 ao longo dos segmentos de 6m e 3m do eixo, lado esquerdo e direito. Esses dados comparam esses dados do início e fim do período de cada região em análise. Os dados para Camada 0 foram tão baixos que se tornaram de pequeno valor e não foram tabelados. Isso sugere que os níveis de acúmulo de borracha em regiões de alta concentração, representados por essa camada, não



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



possuíam variabilidade significativa. Dessa forma, regiões com nível de concentração representada pela Camada 1 foram as de maior variabilidade detectada.

Coeficientes de Atrito

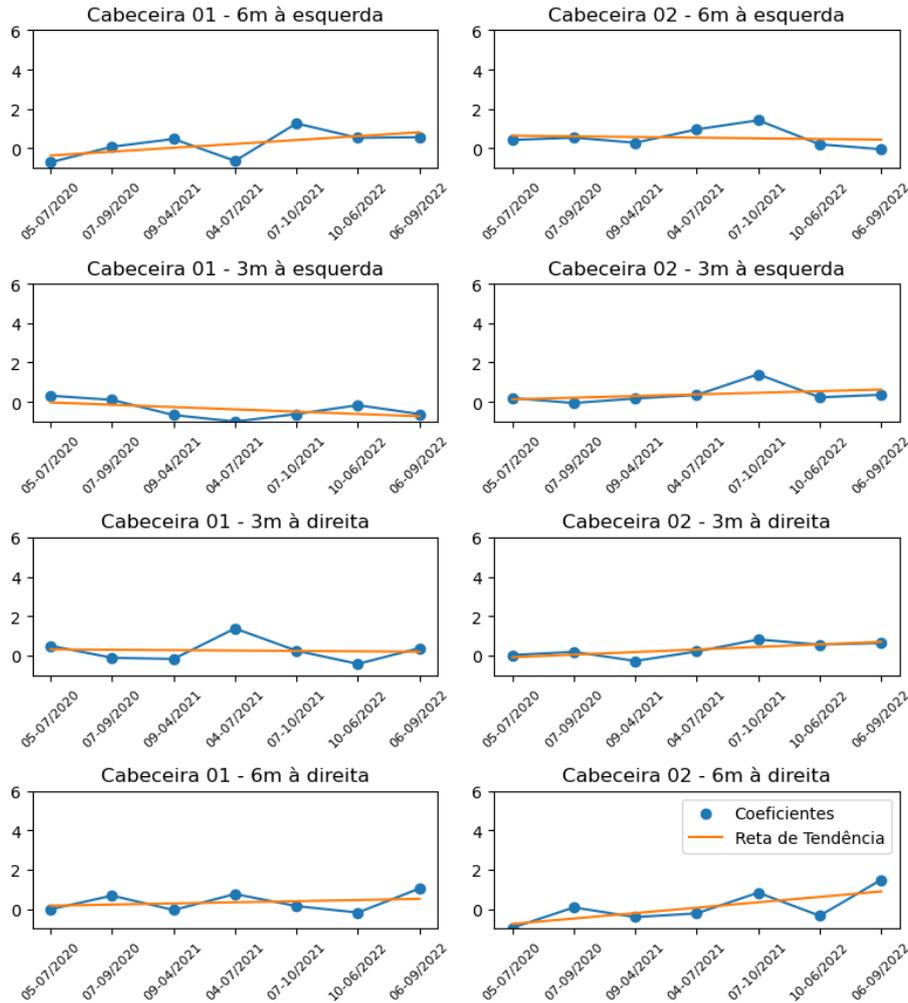
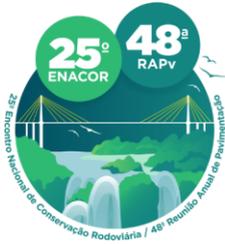


Figura 6: Coeficientes de crescimento e reta de tendência dos dados de coeficiente de atrito.

A Tabela 3 apresenta os dados de variação do coeficiente de atrito. Os dados demonstram que os valores tem se mantido estável devido à baixa variabilidade percentual. No entanto, passou a apresentar quedas de melhorias, embora ainda tenha preservado seus níveis de segurança operacional.

Tabela 2. Percentuais médios do coeficiente de variação do acúmulo de borracha por região da Camada 1 (AUTORES, 2023)

Cabeceira	6m Esquerda	3m Esquerda	3m Direita	6m Direita
01	83%	41%	-0.82%	-0.27%
02	-1%	0%	-0.5%	-1%



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 3. Percentuais médios do coeficiente de variação do coeficiente de atrito por região (AUTORES, 2023)

Cabeceira	6m Esquerda	3m Esquerda	3m Direita	6m Direita
01	0.07%	0.07%	0.03%	0.11%
02	-0.02%	-0.14%	-0.7%	0%

Os dados de emborrachamento estão com tendência de crescimento, apesar de que o algoritmo aponta uma queda entre o emborrachamento inicial e final do período. Além disso, alguns períodos apresentam segmentos com praticamente nenhum emborrachamento nos primeiros 100m de pista. Isso sugere que as zonas de toque das aeronaves podem variar um pouco com relação à distância da cabeceira.

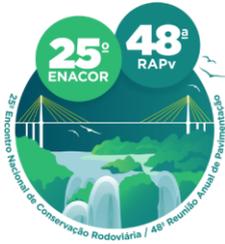
Dessa forma, áreas nos primeiros 100m da cabeceira apresentando baixo emborrachamento com relação a outros períodos levam a indicar, naquela região, uma queda geral no emborrachamento. No entanto, as consistentemente altas taxas de emborrachamento das áreas subsequentes nos trechos analisados levam ao algoritmo detectar uma tendência de aumento. Assim, indicando que apesar dos primeiros segmentos possuírem emborrachamento menor, a tendência para as áreas com atividades segue em aumento gradativamente, congruente com o indicador de que a PPD pode estar se aproximando do limiar do ciclo de vida na qual as remoções podem não contribuir mais com a redução no emborrachamento.

Comparando os dados de coeficiente de atrito com os dados das camadas 0 e 1, observa-se que o percentual de crescimento calculado é baixo. Isso sugere que o atrito não varia significativamente entre seus níveis. Dessa forma, ele se mantém em níveis seguros. Porém, as remoções não estão causando uma alta tendência de melhoria e estão mantendo os níveis dentro dos mesmos padrões entre os períodos.

CONCLUSÕES

Diante da análise dos dados obtidos pelo algoritmo e pelos dados de coeficiente de atrito, verificou-se que o algoritmo contribuiu com o processamento de imagens de uma PPD de modo que tenham correlação entre seu aspecto visual e o coeficiente de atrito. Isso contribui para aplicações em modelos de aprendizagem de máquina avançados que classificam imagens. A análise sugere que o coeficiente de atrito com o passar dos anos dentro o período avaliado possui pouca variação, o que indica que a PPD está mantendo os níveis de segurança para o coeficiente. No entanto, o acúmulo de borracha apresenta variabilidade dentre as regiões das cabeceiras, o que sugere que o ciclo de vida está se aproximando do limite.

O algoritmo demonstra também potencial de estimar o possível aumento ou diminuição médios do emborrachamento em 2 anos, sendo até 1% de queda em regiões onde a remoção é efetiva, e aumento entre 40% e 80% da proporção inicial em regiões mais críticas. Além disso, o algoritmo indica que a região que pode apresentar maior acúmulo de borracha é a região compreendida entre as áreas de 3m à esquerda e à direita do eixo de pista na Cabeceira 01, o que sugere que esta cabeceira pode estar concentrando maior atividades de operações.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



O algoritmo demonstra ainda capacidade de identificar variabilidade de acúmulo de borracha em regiões com os depósitos representados pela Camada 1. Isto é, detritos que podem ter sido depositados a menos tempo que áreas de concentração maior (Camada 0). Assim, demonstra sensibilidade quanto à possível expansão ou recuo da área de acúmulo de borracha para diagnóstico por imagens do estado da pista. Por outro lado, a baixa variabilidade da Camada 0, representante das áreas de mais alta concentração de borracha, contribui para um indicador do nível do ciclo de vida útil do pavimento por considerar que as remoções não estão contribuindo para a remoção completa da borracha de modo pleno.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro concedido para realização desta pesquisa e à Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária da Agência Nacional de Aviação Civil (SIA/ANAC) pela disponibilização dos dados utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Aviação Civil ANAC. RBAC no 153 Emenda 6 Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à emergência. Brasília. 2021.
- Aqel, M. J., Zaitoun, N. M. Survey on Image Segmentation Techniques, *Procedia Computer Science*, Volume 65, 2015, Pages 797-806, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.027>.
- Chen, J.-S., Huang, C.-C., Chen, C.-H., & Su, K.-Y. (2008). Effect of Rubber Deposits on Runway Pavement Friction Characteristics. *Transportation Research Record*, 2068(1), 119–125. <https://doi.org/10.3141/2068-13>
- Jalagam, Mahesh Kumar & Nanda, Rupalin & Rath, Rama & Rao, Gade. (2020). Image Segmentation using K-means Clustering. 10.13140/RG.2.2.31427.84007.
- Joji, Tana & Abraham, Steffin & Venugopal, Rohit & K R, Sidharth. (2019). IJSRSET195901 | Review on Different Methods of Image Colorization. 10.32628/IJSRSET195901.
- Mota, Gustavo & Oliveira, Francisco Heber & Nogueira, Yuri. (2022). Estudo do Processamento Digital de Imagens no Acúmulo de Borracha em Pistas de Pousos e Decolagens. *Reunião Anual de Pavimentação*.
- N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, Jan. 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.