
A INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO NA SEGURANÇA OPERACIONAL AEROPORTUÁRIA

Aldaianny de Oliveira Maia, Renata de Souza Sales, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

* Corresponding author e-mail address: aldaiannymaia@det.ufc.br

PAPER ID: SIT209

RESUMO

A ocorrência de acidentes durante as operações aéreas é um evento raro, principalmente pelo desenvolvimento do transporte aéreo, que tornou esse meio mais seguro com o passar dos anos. Diante disso, garantir a segurança operacional é importante, sobretudo nas etapas de pouso e decolagem, por meio de um adequado monitoramento das condições de aderência dos pavimentos aeroportuários. Assim, este estudo avalia a segurança operacional por meio da condição de aderência pneu-pavimento de uma pista de pouso e decolagem brasileira, com revestimento em Concreto Asfáltico. Para tanto, foram analisados os valores de macrotextura, de coeficiente de atrito e de ocorrências de remoção do acúmulo de borracha no período de 2015 a 2019. Os valores das medições desses parâmetros foram comparados com aqueles que são regulamentados no Brasil pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Os resultados indicam valores muito próximos aos mínimos recomendados para o coeficiente de atrito e a macrotextura, o que pode afetar a segurança operacional. Constatou-se que a análise por terço de pista permite um melhor detalhamento para o estudo, e que o primeiro terço no qual ocorrem as operações é o que apresenta as piores condições de aderência. Além disso, percebe-se que a remoção do acúmulo de borracha ocorreu com frequência inferior à recomendada em alguns períodos, o que pode ter influenciado o comportamento da aderência. Dessa forma, pode-se concluir que a aderência pneu-pavimento é um fator importante para a segurança das operações de pouso e decolagem. Ademais, o adequado monitoramento desse parâmetro pode permitir uma modelagem mais apropriada acerca do desempenho dos pavimentos de pistas de pouso e decolagem.

Keywords: Aeroporto, Segurança, Aderência, Macrotextura, Coeficiente de atrito.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) com os recursos financeiros para o desenvolvimento desta pesquisa.

1. INTRODUÇÃO

O nível de segurança das atividades aéreas cresceu desde o início de suas operações na década de 1920. No entanto, o número de acidentes ainda é uma preocupação da indústria da aviação civil em todo o mundo. Nesse sentido, as fases de pouso e decolagem são as mais críticas de um voo. De acordo com CENIPA (2021), em torno de 52% dos acidentes e 61% dos incidentes graves identificados nos aeródromos brasileiros entre 2010 e 2019 ocorreram durante essas fases. Segundo Liou et al. (2008), o favorecimento de condições aceitáveis de segurança para as operações de pouso e decolagem é importante para o êxito do transporte aéreo.

A aderência entre o pneu e a superfície do pavimento é essencial para operações seguras de pouso e decolagem. Esse parâmetro é composto pelo atrito entre o pneu e o pavimento e pela macrotextura da superfície da pista. O atrito sofre influência de vários fatores, entre eles clima e a ineficácia das ações de manutenção do pavimento (ICAO, 2004, Rodrigues Filho, 2006, e Mota et al., 2016). Além disso, o acúmulo de contaminantes nas pistas de pouso e decolagem contribui para a redução do coeficiente de atrito.

Nesse âmbito, o processo de remoção do acúmulo de borracha na pista é uma atividade importante para a manutenção das pistas de pouso e decolagem, uma vez que consiste em preservar ou restaurar as condições de aderência pneu-pavimento. O hidrojateamento de água a alta pressão é o método comumente utilizado na realização desse processo no Brasil.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da aderência pneu-pavimento na segurança operacional de uma pista de pouso e decolagem brasileira, com revestimento em Concreto Asfáltico. Para tanto, foram analisados os valores de macrotextura, coeficiente de atrito e ocorrências de remoção de borracha no período de 2015 a 2019.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a aplicação de uma metodologia multicritérios Cunha et al. (2021) monitoraram

a manutenção de pistas de pouso e decolagem por meio da percepção de risco em aeroportos. O estudo identificou que sete parâmetros concentravam 80% do risco percebido pelos profissionais consultados. Entre os fatores destacados estavam o coeficiente de atrito e a profundidade de macrotextura. Além disso, o coeficiente de atrito estava entre os três fatores com maior peso na análise, que somaram 52% da percepção dos entrevistados. Diante disso, os autores concluíram que os recursos destinados à manutenção devem ser mais bem distribuídos de maneira que seja destinada maior atenção aos fatores mais relevantes.

A segurança de pavimento está relacionada tanto com o atrito superficial quanto com a textura do pavimento. Um pavimento deve proporcionar atrito adequado, além de capacidade de drenagem para minimizar o número de acidentes que ocorrem como resultado de deficiências na aderência entre o pneu e o pavimento. O nível de adequação da aderência de um pavimento à segurança pode ser mensurado pela condição da superfície, como porosidade ou desgaste. (Flintsch et al., 2003).

Novos pavimentos, compostos de macrotextura aberta, microtextura áspera e com ausência de depósitos de borracha em sua superfície, apresentam melhores condições de atrito em situações críticas, com presença de película de água. No entanto, pavimentos que passaram por processo de desgaste, com microtextura polida, apresentam atrito reduzido e, conseqüentemente, oferecem frenagem deficiente. Além disso, o acúmulo de borracha preenche a macrotextura desses pavimentos, o que pode levar à ocorrência de hidroplanagem. (Leocádio, 2014)

Quariguasi et al. (2019) analisaram a evolução dos valores de coeficiente de atrito e macrotextura ao longo de um período de três anos. O objetivo do estudo foi examinar o desempenho desses parâmetros de em uma pista de pouso e decolagem com revestimento de Camada Porosa de Atrito (CPA). Foram realizados testes de igualdade de médias para a profundidade de macrotextura, por meio da análise das variâncias (ANOVA), em que a hipótese nula foi de que todas as médias eram iguais para um nível de significância de 5%. O teste não mostrou indícios suficientes para

rejeitar a hipótese nula de que os valores das médias dos grupos eram iguais.

Por meio da análise estatística Quariguasi *et al.* (2019) concluíram que o coeficiente de atrito apresentou pouca variação ao longo do período analisado, com variações cíclicas observadas e justificadas pela realização das remoções de borracha periódicas. Por fim, o estudo pontuou que a profundidade de macrotextura apresentou tendência de crescimento a longo prazo.

O estudo de Sales *et al.* (2021) avaliou três revestimentos distintos, com o objetivo de verificar a existência de correlação entre a prática de remoção de borracha e a melhoria da aderência pneu-pavimento. Os autores estudaram a CPA, o concreto asfáltico e o *grooving*, que tiveram profundidade de macrotextura e coeficiente de atrito analisados por meio de testes estatísticos.

Observou-se que a remoção de borracha é um processo de manutenção eficiente nos aeroportos, uma vez que ela possibilita que os níveis mínimos exigidos pelos regulamentos para macrotextura e coeficiente de atrito sejam mantidos. Percebeu-se que a remoção de borracha proporciona reações diferentes em cada tipo de revestimento. No entanto, o processo não garante aumentos significativos a longo prazo. Dessa forma, esse procedimento não deve ser a única ferramenta de manutenção das pistas de pouso e decolagem (Sales *et al.*, 2021).

Os resultados do estudo de Chen *et al.* (2008) indicaram que a borracha em um pavimento aumenta de espessura cerca de 0,05 μm a cada pouso de aeronave. Além disso, os autores observaram que, nas regiões de toque das aeronaves durante o pouso, os valores de coeficiente de atrito estavam abaixo do mínimo permitido. No que diz respeito à macrotextura, os autores concluíram que pequenas mudanças nesse parâmetro já influenciam no coeficiente de atrito, de maneira que os dois estão diretamente relacionados. Por fim, concluiu-se que um aumento de 0,4 mm na espessura de depósito de borracha impacta em um decréscimo de 0,2 no coeficiente de atrito mensurado pelo *Saab surface Friction Tester* (SFT).

O processo de remoção de borracha dos pavimentos aeroportuários é a principal

atividade de manutenção que ocorre nas pistas de pouso e decolagem brasileiras. No entanto, o estudo desenvolvido por Rodrigues Filho (2006) demonstrou que o processo realizado por meio de hidrojateamento reduz significativamente o coeficiente de atrito em uma pista, além de acelerar o processo de perda de finos e desagregação do revestimento.

A macrotextura é um fator de relativa importância para a segurança das pistas de pouso e decolagem. Segundo Rodrigues Filho (2006), a macrotextura é essencial à adequada drenagem de um pavimento aeroportuário. O estudo observou que, em pavimentos com alto teor de contaminação por acúmulo de borracha, a macrotextura apresenta redução em seus valores.

Silva (2008) observou que a execução de *grooving* em uma pista de pouso e decolagem proporciona melhorias significantes na aderência pneu-pavimento, devido a capacidade drenante desse tipo de revestimento. No entanto, o emborrachamento da superfície da pista compromete a segurança das operações, de maneira que se comprovou por meio de análises estatísticas que o processo de remoção por meio de hidrojateamento proporciona melhorias significativas na macrotextura do pavimento e conseqüentemente na drenabilidade. O estudo observou que a aderência apresentou condição três vezes superior após o procedimento de remoção do acúmulo de borracha.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O estudo foi realizado considerando uma pista de pouso e decolagem brasileira, com revestimento em Concreto Asfáltico. Os dados utilizados foram obtidos por meio dos relatórios técnicos de medição de macrotextura e de coeficiente de atrito fornecidos pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

Considerou-se neste estudo as informações do período de 2015 a 2019. Todas as medições obtidas seguiram as recomendações especificadas pelos regulamentos revogados e substituídos por ANAC (2021). Para os relatórios de macrotextura, os dados foram obtidos pelo ensaio de mancha de areia. Por sua vez, os dados de coeficiente de atrito foram levantados

por meio do *Grip Tester*, com velocidade de 65 km/h, a 3 m e 6 m a partir do eixo da pista de pouso e decolagem.

As datas de ocorrência de remoção de borracha, como atividade de manutenção da pista de pouso e decolagem analisada, foram obtidas a partir dos relatórios de macrotextura e de coeficiente de atrito. No total, foram analisados 21 relatórios de medição da macrotextura e 28 de coeficiente de atrito. Durante o período, observou-se a realização de 11 atividades de remoção de borracha.

Para a análise considerou-se a divisão da pista de pouso e decolagem em terços, para facilitar a visualização das informações. Além disso, cada terço está sujeito a solicitações diferentes, dependentes das condições de operações, seja pouso ou decolagem. Nesse sentido, o primeiro terço, por conter a zona de toque, é aquele que possui maior solicitação durante pousos e decolagens.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos relatórios das condições de aderência, macrotextura e coeficiente de atrito, foi possível observar as datas de remoção de borracha, ocorridas anterior a cada uma das medições. Além disso, conforme a média de pousos na pista de pouso e decolagem observou-se que, para 2015, a remoção de borracha, conforme ANAC (2021), deveria ser realizada a cada 120 dias, enquanto para os anos seguintes a cada 180 dias. As datas de remoção de borracha podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 Datas de remoção de borracha na PPD conforme relatórios considerados

<i>Data</i>	<i>Data</i>	<i>Data</i>
20/11/2014	23/10/2016	14/11/2017
04/04/2015	21/03/2017	13/05/2018
10/06/2015	24/03/2017	08/11/2018
10/11/2015	08/11/2017	15/05/2019
30/06/2016	12/11/2017	

As datas destacadas em negrito foram obtidas em diferentes relatórios e indicam a existência da realização da atividade de remoção de borracha em datas próximas, o que seria inconsistente, visto que é um curto

período, inferior a uma semana, entre remoções, e sugere que a data inserida em algum dos relatórios pode ter sido equivocada. Portanto, para este trabalho considerou-se as datas de remoção ocorridas em 21/03/2017 e 08/11/2017, para o conjunto destacado. Assim, percebeu-se que apenas 40% das remoções de borracha foram realizadas considerando a frequência estabelecida por ANAC (2021).

A atividade de remoção de borracha é uma atividade que contribui para a melhoria das condições de aderência pneu-pavimento e, por consequência, a resistência à derrapagem durante as operações de pousos e decolagens (Chen *et al.*, 2008; De Luca *et al.*, 2016; Biancardo *et al.*, 2020; Sales *et al.*, 2021). Diante disso, o não atendimento das frequências estabelecidas para essa atividade podem influenciar nos valores obtidos para o coeficiente de atrito e a macrotextura, de modo a aumentaram as chances de não atendimento aos limites estabelecidos.

Considerando cada ponto obtido na medição ao longo do comprimento da PPD, aproximadamente, 2,2% deles foram inferiores ao valor limite estabelecido em regulamento de 0,60mm. Destaca-se que dos valores inferiores ao limite, nenhum foi inferior à 0,50mm. Quando se analisa a média, por terço da pista de pouso e decolagem, por medição, todos os valores obtidos foram superiores ao limite (Figura 1).

Quanto à classificação da macrotextura, disponível em ANAC (2021), para o primeiro terço verificou-se que 90,5% foram classificadas como aberta e 9,5%, muito aberta. Para o segundo terço verificou-se que a média, por data de medição, classificou 4,8% dos pontos analisados como de macrotextura média, 81,0% como aberta e 14,3%, muito aberta. Enquanto isso o terceiro terço, com menor solicitação durante as operações teve 9,5% como macrotextura média, 85,7% como aberta e 4,8%, muito aberta.

Observa-se para a macrotextura, Figura 1, nas medições posteriores à atividade de remoção de borracha que apenas quatro tiveram inclinação positiva, indicando um aumento, em pelo menos um dos terços em relação à medição anterior. O primeiro terço, que contém a zona de toque das aeronaves nas operações de pouso, no geral, foi o que

apresentou maiores ganhos com a atividade, visto que sua ocorrência acontece, geralmente, nos locais que apresentam maior acúmulo de borracha. Além disso, não é comum a remoção

do acúmulo de borracha em todo o comprimento do segundo terço pela menor quantidade do contaminante presente neste.

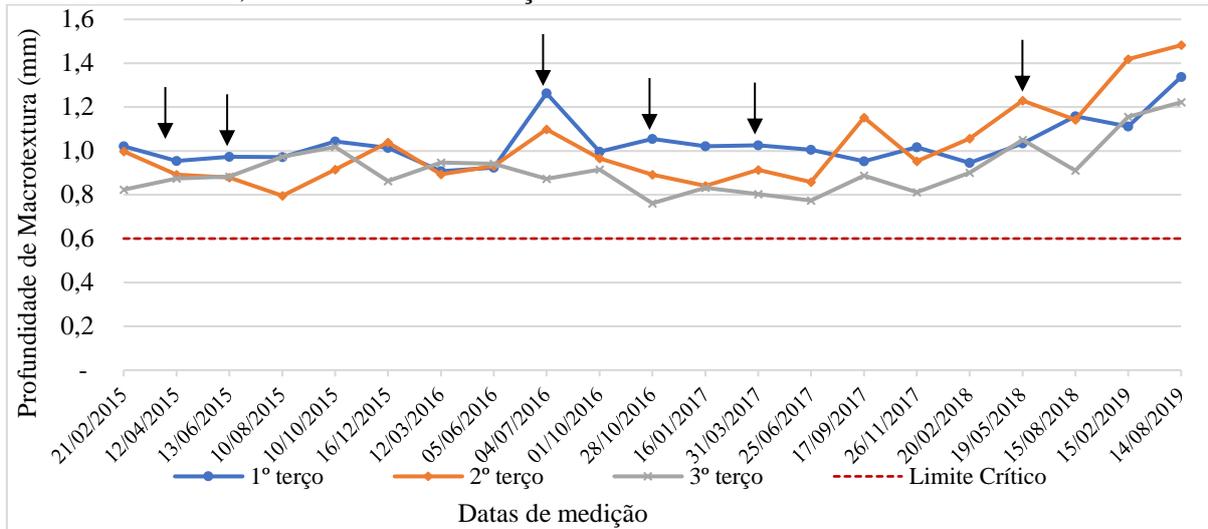


Figura 1 Média da Macrotextura por terço de PPD para cada medição.

A Figura 2 mostra o valor médio por terço, para cada uma das medições do coeficiente de atrito medido a 3m do eixo da pista de pouso e decolagem. Os valores médios observados se encontram acima dos limites críticos e de manutenção, de 0,43 e 0,53, respectivamente, estabelecidos em ANAC (2020). Além disso, o primeiro terço foi o que apresentou menores valores médios para o parâmetro, o que pode ser associado à maior

solicitação deste. Para as medições realizadas após a remoção do acúmulo de borracha do revestimento, verifica-se uma tendência de aumento nos valores médios. Para os valores pontuais medidos a 3m do eixo, a cada 100m, para ambos os lados, observou-se que apenas 0,38% estavam inferiores ao limite de manutenção, com valores maiores ou iguais a 0,5.

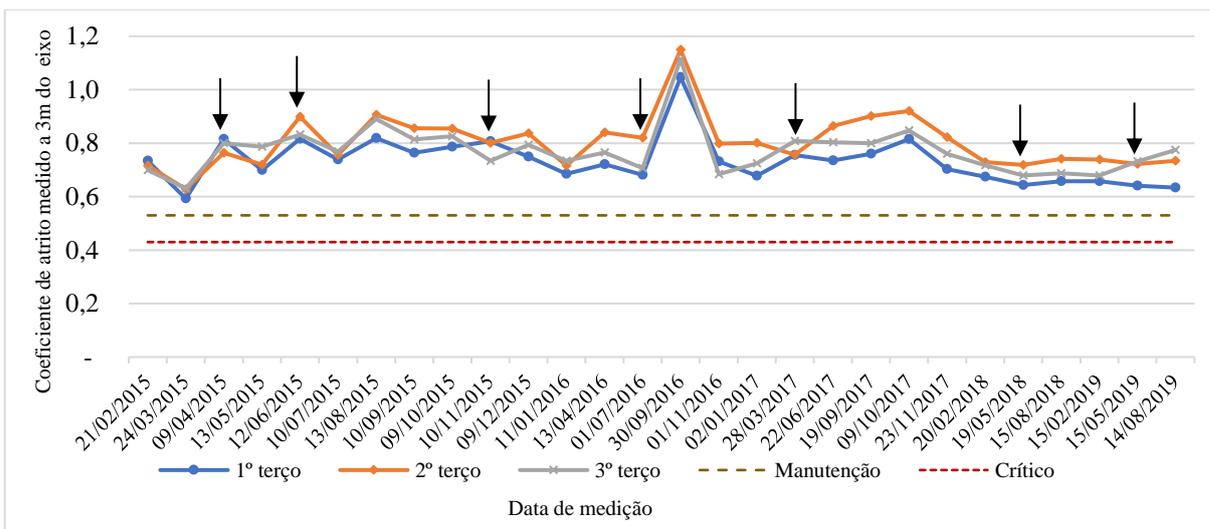


Figura 2 Média do coeficiente de atrito a 3 m do eixo, por terço de PPD, para cada medição.

A distribuição dos valores médios por terço e data de medição para o coeficiente de atrito medido a 6m do eixo da pista de pouso e decolagem pode ser observada na Figura 3.

Para a variável não houve a existência de valores pontuais inferiores ao limite de manutenção de 0,53 estabelecido em ANAC (2020). Como, para o caso analisado, a

utilização da pista pelas aeronaves para a distância a 6m do eixo não é tão frequente, devido ao mix de aeronaves que opera no aeroporto, verifica-se que não existe, no geral, um comportamento padrão de um terço mais solicitado. E ainda, nota-se que o primeiro

terço, entre novembro de 2015 e setembro de 2016, foi o que apresentou maiores valores da variável medida; o que não acontece para a medição realizada a 3m do eixo.

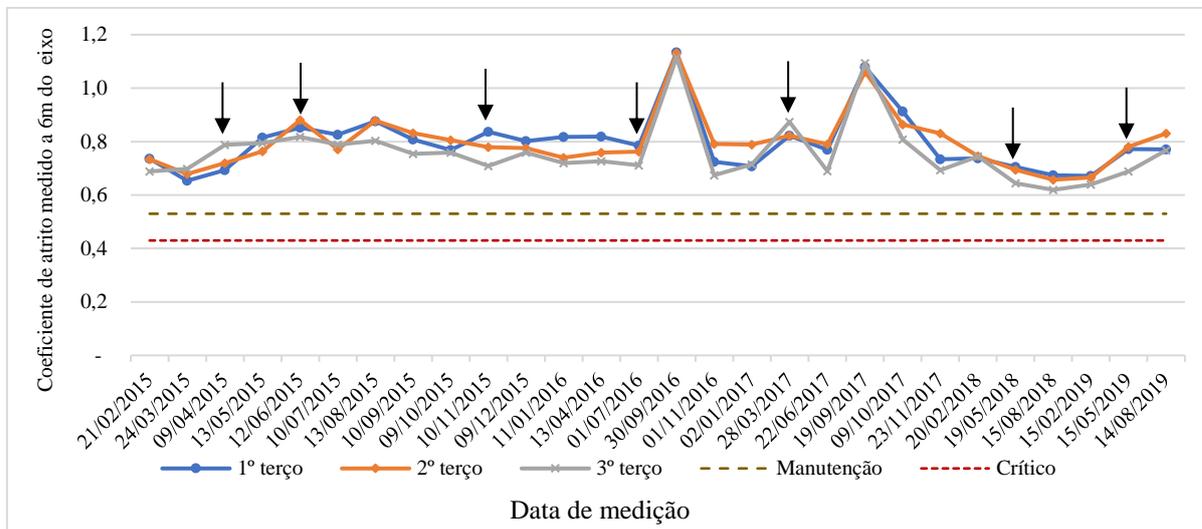


Figura 3 Média do coeficiente de atrito a 6 m do eixo, por terço de PPD, para cada medição.

Para os dados de coeficiente de atrito percebe-se que ocorre menor variação entre os terços por data de medição, em comparação aos de macrotextura. Essa menor variação pode ser decorrente ao fato de a macrotextura ainda considerar um método de medição manual, dependente do operador durante o ensaio de campo e de condições climáticas como o vento, por exemplo, no momento da medição. Quando se analisa o coeficiente de variação calculado com base na média e desvio padrão do terço para cada uma das medições, Tabela 2, nota-se que os valores máximos para a macrotextura são maiores em relação ao coeficiente de atrito.

Tabela 2 Coeficiente de Variação máximos e mínimos por terço de pista

Terço	Macrotextura	Coef. de atrito (3m)	Coef. de atrito (6m)
1º	36,26%	14,26%	14,75%
	12,60%	7,44%	5,70%
2º	24,85%	12,42%	14,31%
	5,77%	3,61%	3,92%
3º	38,59%	13,60%	11,49%
	10,94%	5,24%	3,20%

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a segurança operacional de um pavimento aeroportuário por meio da condição de aderência pneu-pavimento de uma pista de pouso e decolagem brasileira, com revestimento em Concreto Asfáltico. Os resultados indicaram variações em ambos os parâmetros analisados – macrotextura e coeficiente de atrito - que não podem ser explicadas unicamente pelo processo de remoção do acúmulo de borracha. No entanto, foram observadas maiores variações na profundidade de macrotextura, que foram associadas, principalmente, à realização manual do ensaio e ao fato de depender de condições técnicas do operador que o realiza.

Embora tenha sido realizado um número de remoção do acúmulo de borracha ao longo dos anos, menor do que o recomendado pelo regulamento brasileiro de aviação civil vigente, não foram constatados valores de macrotextura ou de coeficiente de atrito abaixo dos mínimos exigidos. Isso indica que, embora a remoção do acúmulo de borracha não seja eficiente em aumentar esses valores a longo

prazo, e de maneira estatisticamente perceptível, o processo é capaz de manter os parâmetros acima do exigido.

Por fim, conclui-se que o método de remoção do acúmulo de borracha por meio do processo de hidrojateamento a alta pressão aplicado é eficiente na manutenção da segurança operacional dos aeroportos brasileiros. O acompanhamento do comportamento do pavimento após sua execução é importante para o gerenciamento de operações de pousos e decolagens seguras.

Referências

- ANAC (2020) Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista pouso e decolagem. Instrução Suplementar Número 153.205-001, Revisão B. Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.
- ANAC (2021) Aeródromos - Operação, manutenção e resposta à emergência. Regulamento Brasileiro de Aviação Civil - RBAC Número 153, emenda número 05. Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.
- Biancardo, S. A., F. Abbondati, F. Russo, R. Veropalumbo & G. Dell'Acqua (2020). A broad-based decision-making procedure for runway friction decay analysis in maintenance operations. *Sustainability*, 12(9), 3516. DOI: 10.3390/su12093516.
- CENIPA (2021). Aeródromos: Sumário Estatístico 2010-2019. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Brasília, DF, 82 p.
- Chen, J. S., C. C. Huang, C. H. Chen & K. Y. Su (2008). Effect of rubber deposits on runway pavement friction characteristics. *Transportation Research Record*, n. 2068, p. 119–125.
- Cunha, D. A.; Andrade, M.; Prado, L. A.; Santana, L. O. Gonçalves da Silva, M. P. (2021) RISK assessment in airport maintenance runway condition using MCDA-C. *Journal of Air Transport Management*, v. 90, n. June 2019, p. 101948.
- De Luca, M., F. Abbondati, M. Pirozzi & D. Žilionienė, (2016). Preliminary study on runway pavement friction decay using data mining. *Transportation Research Procedia*, 14, 3751-3760. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.460.
- Flintsch, Gw; De Leon, E; Mcghee, Kk; Al-Qadi, I. L. (2003). Pavement surface macrotexture measurement and applications. *Pavement Assessment, Monitoring, and Evaluation: Pavement Design, Management, And Performance*. Book Series: *Transportation Research Record-Series*. Issue: 1860, p. 168-177.
- ICAO (2004). Manual on the regulation of international air transport. International Civil Aviation Organization. Montreal, Canada.
- Leocádio, A. S. (2014). Avaliação da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Manaus/Eduardo Gomes. Dissertação. Universidade Federal do Amazonas.
- Liou, James Jh; Yen, Leon; Tzeng, Gwo-Hshung (2008). Building an effective safety management system for airlines. *Journal of Air Transport Management*, v. 14, n. 1, p. 20-26.
- Mota, I. P. Der H., Oliveira, F. H. L., Aguiar. M. F. P. (2016). Verificação multicritério das condições físicas para a segurança operacional aeroportuária. *Transportes*. v. 24, n. 2, p. 21-26. DOI: /10.14295/transportes. v24i2.1033.
- Quariguasi, J. B. F.; Almeida, L. C.; Oliveira, F. H. L.; Prado, L. de A.; (2019) Análise da Aderência Pneu-Pavimento Aeroportuário em Revestimento de Camada Porosa de Atrito. *Anais do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Gramado, RS*. p. 1099–1109.
- Rodrigues Filho, O. S. (2006). Adherence characteristics of asphalt runway surfaces. Case of São Paulo/Congonhas International Airport. Dissertation. Escola Politécnica of the University of São Paulo (The Engineering School).

Sales, R. de S., Oliveira, F. H. L. & Prado, L. A. (2021). Performance of tire-asphalt pavement adherence according to rubber removal on runways. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 0, n. 0, p. 1–11.

Silva, João Paulo Souza (2008). Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários.

Zheng, B., Huang, X., Zhang, W., Zhao, R., & Zhu, S. (2018). Adhesion characteristics of tire-asphalt pavement interface based on a proposed tire hydroplaning model. *Advances in Materials Science and Engineering*.