

## PROPOSIÇÃO DE MODELO DE PREVISÃO PARA O COEFICIENTE DE ATRITO MEDIDO EM PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO

**José Breno Ferreira Quariguasi**  
**Francisco Heber Lacerda de Oliveira**  
Universidade Federal do Ceará  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes  
**Saulo Davi Soares e Reis**  
Departamento de Física

### RESUMO

Pousos e decolagens são as operações mais críticas de um voo, pois são as fases mais suscetíveis à ocorrência de acidentes. Em muitos casos, as condições de aderência pneu-pavimento – representados pelos parâmetros coeficiente de atrito e macrotextura – são um dos fatores contribuintes no que se refere à eficácia de frenagem da aeronave. Diante disso, a Agência Nacional de Aviação Civil estabelece a verificação periódica desses parâmetros para atestar a segurança das operações. Tais verificações, contudo, são dispendiosas, pois demandam bastante tempo e elevados custos de execução. Através do uso de Redes Neurais Artificiais, pretende-se elaborar um modelo para prever o coeficiente de atrito em pavimentos aeroportuários. Para isso serão utilizados, inicialmente, dados de coeficiente de atrito, macrotextura, manutenção, tráfego de aeronaves do Aeroporto Internacional de Fortaleza, além de variáveis climáticas. Os resultados preliminares mostram-se favoráveis e compatíveis à estimativa do coeficiente de atrito na pista de pouso e decolagem analisada.

### 1. PROPOSTA DA PESQUISA

A manutenção do revestimento, seja de rodovias ou pistas de pouso e decolagem (PPD), está relacionada, principalmente, às medições das características da superfície do pavimento. Porém, essas medições são dispendiosas e nem sempre são feitas quando necessárias. Assim, uma das fases críticas de um Sistema de Gerência de Pavimentos é garantir o desempenho adequado do pavimento, sua avaliação e a geração do banco de dados. Ferramentas computacionais, portanto, podem ser úteis a gestores e órgãos reguladores na tomada de decisão, uma vez que são capazes de fazer estimativas com significativa acurácia.

Santos *et al.* (2018) analisaram os acidentes aéreos por fase de operação entre 2008 e 2017, e constataram que 66,7% ocorrem durante o pouso, decolagem e corrida após pouso. Esse número se eleva para 72,9% quando se analisam os incidentes graves. Portanto, os parâmetros de aderência pneu-pavimento podem ser a principal causa, ou pelo menos parte, desses acidentes, uma vez que contribuem para diminuição da eficácia de frenagem das aeronaves.

Diante disso, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2019) estabelece procedimentos para monitorar e garantir a segurança das operações nas PPD. Tais medições das características superficiais das PPD têm a frequência estabelecida de acordo com o número de pousos de aeronaves de asa fixa com motor à reação. Assim, aeroportos com mais operações de aeronaves devem realizar mais medições e, conseqüentemente, precisam despender mais recursos, seja diretamente no procedimento de medição ou indiretamente devido ao fechamento da PPD.

Portanto, considerando o exposto, esta pesquisa tem como finalidade o desenvolvimento de um modelo de previsão para o coeficiente de atrito medido em pista de pouso e decolagem. Para a elaboração dos resultados preliminares apresentados, foram utilizados os dados do Aeroporto Internacional de Fortaleza e técnicas de *Machine Learning*, tais como Redes Neurais Artificiais (RNA), através da linguagem de programação *Python*.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A manutenção das condições dos pavimentos é fortemente condicionada por um número significativo de variáveis. Estas variáveis são inter-relacionadas e afetam o tempo de vida do pavimento, seja em termo funcional quanto estrutural. Tais variáveis, portanto, podem ser utilizadas em modelos de previsão, que são ferramentas essenciais em um Sistema de Gerência de Pavimentos. Esses modelos são baseados em dados de desempenho e estabelecem leis de evolução sobre a degradação do pavimento, determinando a relação entre as causas e os efeitos da degradação do pavimento (SANTOS *et al.*, 2014).

Existem vários modelos de previsão para diferentes situações. Alguns modelos, como de Markov, são utilizados com mais frequência, pois permitem a inserção de informações relacionadas à reabilitação. Por outro lado, quando os dados históricos são insuficientes para desenvolver um algoritmo numérico, outros modelos, mais complexos, podem ser empregados, tais como as Redes Neurais Artificiais (RNA) (SANTOS *et al.*, 2014).

Santos *et al.*, (2014) desenvolveram um modelo de previsão, utilizando regressão linear múltipla, para coeficiente de atrito em rodovias de Portugal e obtiveram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre 0,69 a 0,83. Ademais, constataram que o coeficiente de atrito era inversamente proporcional à macrotextura e ao tráfego.

Na Itália, pesquisadores elaboraram um modelo para verificar a tendência de deterioração do atrito em algumas rodovias do país. Para tanto, utilizaram como variáveis a idade do pavimento e dados de tráfego, além de medições de atrito. Através dos resultados, notaram que a perda de atrito ao longo do tempo poderia ser representada, com significativa acurácia, por meio de uma equação polinomial de terceiro grau (SUSANNA *et al.*, 2017).

Com relação ao uso dessa ferramenta na Engenharia de Transportes, as RNA foram empregadas com sucesso para a previsão do *International Roughness Index* (IRI) em rodovias norte-americanas. Com a utilização de uma estrutura composta de sete variáveis de entrada, duas camadas ocultas com nove neurônios cada e uma camada de saída (7-9-9-1), o modelo apresentou 0,027 de erro, utilizando como critério o *Root Mean Squared Error* (RMSE) (HOSSAIN *et al.*, 2018).

No que diz respeito ao desenvolvimento de modelos de previsão em pavimentos aeroportuários, pesquisadores fizeram uso de técnicas *data mining*, procedimento que pode ser entendido como detecção de padrões em grandes conjuntos de dados através de algoritmos de aprendizagem ou classificação baseados em redes neurais e estatística, para elaborar um modelo de predição do coeficiente de atrito medido na PPD do Aeroporto Internacional de Lamezia Terme, localizado na Itália, a fim de determinar o momento mais adequado para a remoção do acúmulo de borracha da pista. Para tanto, foram coletados dados de, aproximadamente, 5 anos de medições de atrito com a utilização do equipamento Griptester. Como resultado, os autores constataram que o modelo foi capaz de antecipar a necessidade de remoção de borracha entre 5 e 6 meses em relação ao previsto em manuais (DE LUCA *et al.*, 2016).

## 3. METODOLOGIA

Inicialmente, foram feitas coletas de dados por meio da Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária da Agência Nacional de Aviação Civil (SIA/ANAC), em que foram obtidos dados de medição de coeficiente de atrito, macrotextura e de número de operações. Também

foram coletadas variáveis climáticas empregadas no modelo oriundas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A Tabela 1 apresenta os dados anteriormente mencionados, entre outros, com suas respectivas explicações.

**Tabela 1:** Variáveis utilizadas no modelo desenvolvido.

Variável	Explicação
Distância	Distância entre o local de medição de atrito e a cabeceira mais solicitada
Macrotextura	Macrotextura obtida pelo método da mancha de areia
Remoção do acúmulo de borracha	Procedimento de manutenção realizado periodicamente
Número de operações	Número de operações contabilizados entre medições de atrito
Precipitação	Precipitação dos últimos 30 dias antes da medição de atrito
Amplitude térmica	Diferença entre temperatura máxima e mínima
Umidade relativa média	Umidade relativa do ar
Coefficiente de atrito	Coefficiente de atrito obtido por equipamento

Após a coleta, foi realizado um processo de tratamento dos dados, uma vez que as variáveis podem apresentar alguma inconsistência, ausência ou incoerência. Diante disso, é necessário verificar como proceder, a saber, a medição de macrotextura é realizada a cada 100 m, alternadamente entre lado esquerdo e direito, conseqüentemente são deixadas algumas lacunas e como forma de preenchê-las optou-se por utilizar a média dos resultados antecessores e sucessores. Destaca-se que o modelo descrito neste estudo foi elaborado com dados das medições realizadas a 3 m do eixo da pista de pouso e decolagem, pois a essa distância também são realizadas medições de macrotextura, variável também adotada.

O código foi elaborado em linguagem de programação *Python* e com o uso de técnicas de *Machine Learning* através de bibliotecas como NumPy e Scikit-Learn. Ressalta-se que se trata de um modelo supervisionado, portanto, é fornecida a resposta que o algoritmo deve encontrar, ou seja, nesse caso, o coeficiente de atrito. O critério utilizado para analisar o erro foi o *Root Mean Squared Error* (RMSE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para verificação da acurácia.

#### 4. RESULTADOS PRELIMINARES

Para a elaboração dos resultados preliminares aqui apresentados, foram utilizados os dados do Aeroporto Internacional de Fortaleza entre os de 2012 a 2018, totalizando 28 medições de macrotextura e coeficiente de atrito. Destaca-se que as medições de atrito foram feitas com os equipamentos Griptester e Skiddometer, sendo os totais de 19 e 9, respectivamente.

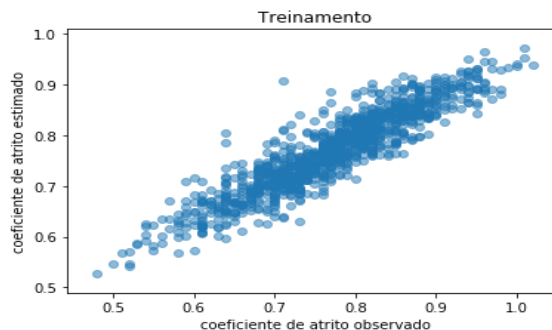
Os dados foram divididos, aleatoriamente, entre 80% para treinamento e 20% para teste e validação do modelo. O algoritmo é constituído de 7 variáveis de entrada, 2 camadas ocultas com 100 neurônios cada e uma camada de saída. A Tabela 2 mostra um resumo dos resultados.

**Tabela 2:** Resumo dos resultados encontrados na análise.

	Acurácia (%)	RMSE
Treinamento	83,74	0,039
Teste	50,24	0,062
Geral	77,99	0,044

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2: Resumo dos resultados, percebe-se que há um viés significativo na fase de teste a ser ajustado futuramente, bem como alguns melhoramentos também devem ser feitos nas outras fases para que o modelo melhore a acurácia e reduza o erro. De modo a melhorar os resultados do algoritmo, destaca-se o aprimoramento

do código e da reprodução dos métodos descritos na metodologia para a aquisição de novos dados, ressaltando-se a possibilidade da inclusão de outros aeroportos. A Figura 1 apresenta um gráfico de dispersão entre os valores de coeficiente de atrito observados e estimados para a fase de treinamento.



**Figura 1:** Valores observados e estimados.

## 5. CONCLUSÕES PRELIMINARES

De forma preliminar, é possível concluir que tal ferramenta tem significativo potencial para realizar estimativas do coeficiente de atrito em pavimentos aeroportuários, considerando as limitações em que modelo foi elaborado. Também é válido destacar a possibilidade desta ferramenta em auxiliar tomadores de decisão, sejam operadores de aeroportos ou órgão regulador, de forma que possam determinar momentos e/ou serviços mais adequados de manutenção dos pavimentos ou atividades de fiscalização da aviação civil, a fim de preservar a segurança das operações de pousos e decolagens.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária da Agência Nacional de Aviação Civil (SIA/ANAC) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização dos dados.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAC (2019) *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à Emergência* (RBAC nº 153). Brasília, DF.
- De Luca, M., Abbondati, F., Pirozzi, M., e Žilioniene, D. (2016) Preliminary Study on Runway Pavement Friction Decay Using Data Mining. *6th Transportation Research Procedia*, v. 14, p. 3751 – 3760.
- Hossain, M. I., Gopiseti, L. S. P., e Miah, M. S. (2018) International roughness index prediction of flexible pavements using neural networks. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 145(1).
- Santos, A., Freitas, E., Faria, S., Oliveira, J. R. M., e Rocha, A. M. A. C. (2014) Degradation prediction model for friction in highways. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8581 LNCS(PART 3), 606–614.
- Santos, L. C. B., Almeida, C. A., e Peixoto, D. D. M. (2018) *Aeródromos - Sumário Estatístico 2008-2017*. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Brasília, DF.
- Susanna, A., Crispino, M., Giustozzi, F., e Toraldo, E. (2017) Deterioration trends of asphalt pavement friction and roughness from medium-term surveys on major Italian roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5), 421–433.

---

José Breno Ferreira Quariguasi (brenoquariguasi@det.ufc.br)

Francisco Heber Lacerda de Oliveira (heber@det.ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes,

Saulo Davi Soares e Reis (saulo@fisica.ufc.br)

Departamento de Física

Universidade Federal do Ceará,

Av. Mister Hull, s/n - Pici – Fortaleza, CE, Brasil