

Análise dos Fatores de Desgaste dos Pneus de Aeronaves em Operações Militares

Raoni dos Reis Miranda Barros¹, Mauro Caetano¹, Ricardo Sutério²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – O presente estudo apresenta a utilização de ferramentas de design e análise de experimentos para avaliar a diferença na média de durabilidade dos pneus entre as diferentes marcas utilizadas nas operações com as aeronaves E-99M e R-99 da Força Aérea Brasileira. A partir dos dados do sistema de informações logísticas SILOMS, foram realizadas análises quantitativas referentes à durabilidade dos pneus considerando os diferentes fatores, como fabricante e posição dos pneus em relação ao trem de pouso principal. Com isso, o estudo contribui para um aprimoramento na gestão logística dos pneus, fornecendo estimativas de durabilidade, bem como insights na área de aquisição de materiais, com a demonstração de que as marcas não representam diferenças operacionais no que tange a durabilidade dos pneus.

Palavras-Chave – Eficiência operacional, Manutenção de aeronaves, Transporte aéreo.

I. INTRODUÇÃO

A segurança nas operações de pousos e decolagens está relacionada à aderência pneu-pavimento, inspeções detalhadas e manutenção metódica de todos os sistemas de uma aeronave. Entre os componentes críticos de uma aeronave, os pneus desempenham um papel crucial durante o pouso, suportando a carga total, acelerações abruptas e aumentos quase instantâneos de temperatura no momento do contato com a pista, além de derrapagens durante as frenagens. Portanto, a avaliação do desempenho em termos de durabilidade e fatores de desgaste dos pneus pode fornecer insights valiosos para aprimorar a segurança de voo e a gestão logística de materiais aeronáuticos.

Este estudo se concentra na análise quantitativa do desgaste dos pneus das aeronaves E-99 e R-99, operadas por uma Unidade da Força Aérea Brasileira. Essas aeronaves são versões militares do jato regional ERJ-145, amplamente aceito e disseminado no mercado global, tornando esta plataforma ideal para uma avaliação abrangente do desgaste de pneus de aeronaves desta categoria. A avaliação aqui realizada está focada exclusivamente nos pneus do trem de pouso principal, cuja configuração é indicada na Fig. 1.

Os dados para esta análise são derivados de pneus cujos históricos foram registrados no banco de dados do Sistema Integrado de Manutenção e Logística (SILOMS), uma ferramenta de gestão utilizada pela Força Aérea Brasileira (FAB). A análise preliminar do histórico dos pneus utilizados como amostra neste estudo possibilitou a identificação de dois possíveis fatores que podem influenciar a sua taxa de desgaste: a marca (ou fabricante) e a sua posição no trem de pouso principal. A variável de resposta neste contexto é definida como o número de ciclos de voo (compreendendo uma decolagem e um pouso) que o pneu suportou entre sua instalação e subsequente remoção da aeronave.

Portanto, o objetivo deste estudo concentra-se em determinar quais desses fatores têm significância estatística na variação da durabilidade dos pneus em termos de número de pousos. Além disso, apresentam-se aplicações de como a percepção desses fatores pode levar a melhorias nas práticas gerenciais e logísticas, bem como na operação dessas aeronaves.



Fig. 1. Disposição dos pneus nos trens de pouso principais.

II. REVISÃO DE LITERATURA

Todas as movimentações de uma aeronave no solo produzem atrito e, em algum grau, desgaste dos pneus. A literatura, porém, indica que o desgaste alcança maior intensidade no pouso e na frenagem. O desgaste de um pneu é algo esperado e fundamental para a parada da aeronave no momento do pouso. Embora muitas aeronaves contem com o sistema de reversão, o atrito das rodas com o pavimento é o maior responsável pela desaceleração. Os estudos subsequentes envolvem o entendimento da dinâmica do desgaste dos pneus pelo atrito com o pavimento no momento do pouso.

A velocidade de aproximação de aeronaves a jato, como o Embraer-145, varia em torno de 240 a 270 km/h. Os pneus apresentam velocidade zero em relação à aeronave imediatamente antes do toque, porém, no momento do pouso, as rodas são forçadas a acelerar do repouso relativo à velocidade da aeronave em relação ao solo em aproximadamente 0.1s [3]. Dentro desse período de aceleração, o pneu sofre um deslizamento cuja distância varia na ordem de dezenas de metros [9]. O calor gerado pelo deslizamento do pneu no toque é suficiente para derreter uma fina camada de borracha da banda de rodagem [10]. A Fig. 2 ilustra a fumaça decorrente da queima da borracha no momento do pouso.



Fig. 2. Fumaça provocada pelo toque do pneu com a pista.

Embora a derrapagem dos pneus seja intensa durante a aceleração no toque, a maior parte do calor gerado ocorre quando a roda está derrapando no momento da frenagem [7]. A energia cinética da aeronave durante a frenagem é convertida em energia térmica, fumaça e desgaste dos pneus. Do material desprendido sob a roda derrapando, cerca de um terço são partículas de borracha queimadas e dissipadas na forma de fumaça, enquanto o restante da borracha permanece aderida à pista [2]. O derretimento e queima de borracha por atrito resultam na perda de material e no consequente desgaste dos pneus. Esse fenômeno pode ser observado, por exemplo, no estudo apresentado por Bennett, Christie e Graham (2011) com a aeronave Boeing 747, demonstrando que a cada pouso são desprendidos cerca de 1 Kg de borracha dos pneus em resíduos que se prendem ao solo ou dissipados na forma de fumaça.

Quanto maior a velocidade de toque dos pneus com o pavimento, maior a temperatura decorrente da fricção e, consequentemente, maior será o desgaste dos pneus. Uma redução na velocidade de derrapagem reduziria a temperatura de atrito, o desgaste prematuro dos pneus, a poluição ambiental e resultaria em um aumento no número de pousos por pneu [1]. Para referência, o número de ciclos (decolagem e pouso) com um conjunto de pneus é da ordem de 300 para aviões a jato comerciais de grande porte [12].

A velocidade de aproximação da aeronave e o seu toque na pista podem ser identificados no estudo de Padovan, Kazenpour e Kim (1991), em que os autores apresentam modelos de simulação para o cálculo do desgaste dos pneus de ônibus espaciais, concluindo que o desgaste aumentava proporcionalmente ao quadrado da velocidade horizontal de pouso em relação ao solo, à taxa de afundamento e devido aos coeficientes de atrito entre os pneus e o pavimento. Com isso, tem-se que a quantidade de material desprendido do pneu no momento do pouso é consideravelmente afetada pela velocidade das aeronaves no momento do pouso [9].

Embora a dinâmica do pouso tenha se mostrado de extrema relevância na parcela de desgaste dos pneus, Li et al. (2011) propõem um estudo onde são modelados matematicamente outros fatores que se relacionam com o desgaste dos pneus. Os autores demonstram, por exemplo, que o aumento da pressão nos pneus causa aumento na deformação, maior rigidez e diminuição da geração de calor durante o pouso, resultando em um menor desgaste dos pneus. Por outro lado, Wu et al. (2021) demonstram que a temperatura decorrente do aquecimento em resposta ao toque com o pavimento representa um fator significativo no desgaste quando o ângulo de derrapagem entre a direção de rotação do pneu e a direção do deslocamento da aeronave em relação ao solo é superior a 10° . No mesmo estudo, foi demonstrado experimentalmente uma diferença no coeficiente de atrito em diferentes tipos de pavimento. Pavimentos do tipo asfáltico apresentam um maior coeficiente de atrito que pavimentos de concreto, por exemplo.

Os estudos anteriores forneceram modelos, simulações e experimentos laboratoriais para identificar os fatores predominantes no desgaste dos pneus. No entanto, observou-se uma lacuna em trabalhos que consideram dados experimentais do desgaste de pneus que estiveram

efetivamente em voo em aeronaves reais (não simuladas). A literatura indica que o pouso é o momento em que ocorre o maior desgaste dos pneus. Portanto, é possível afirmar que existe uma relação direta entre o número de pousos e a durabilidade de um pneu. Este trabalho tem como foco avaliar os possíveis fatores que interferem na vida útil dos pneus de aeronaves, utilizando o conceito de durabilidade como o número de pousos suportados por um pneu. Como referência, foram utilizadas as aeronaves E-99 e R-99 de um Esquadrão da FAB, considerando como possíveis fatores os dados registrados pelas equipes de manutenção no momento das substituições dos pneus.

III. MÉTODOS

Os dados amostrais deste estudo foram obtidos a partir do SILOMS, para o período de 18/11/2020 a 03/04/2023. Toda substituição de pneus realizada pelas equipes de manutenção é registrada no SILOMS para controle do setor de manutenção da Base Aérea que sedia o Esquadrão. As informações registradas incluem a data de instalação, número de pousos realizados, marca, posição no trem de pouso e data da remoção.

As equipes de manutenção realizam inspeções nas aeronaves entre cada pouso e decolagem, examinando cuidadosamente cada pneu. Quando detectam a exposição da primeira lona (camada imediatamente abaixo da banda de rodagem), o pneu é substituído, encerrando a contagem do número de pousos para essa amostra. A Fig. 3 ilustra o desgaste na banda de rodagem alcançando a primeira lona.



Fig. 3 - Primeira camada de lona exposta.

Os dados por pneu foram coletados de maneira aleatorizada no banco de dados do SILOMS de forma a obter amostras que preencham todas as combinações possíveis entre os fatores.

A. Identificação dos Fatores

Neste estudo, as duas marcas de pneus previstas no manual técnico da aeronave são consideradas como dois níveis (M1 e M2) do fator MARCA. É importante salientar que o manual de operação da Embraer permite a instalação de pneus de marcas distintas no mesmo trem de pouso das aeronaves E/R-99.

Em uma consulta preliminar com as equipes de manutenção das aeronaves E/R-99 sobre os possíveis fatores de desgaste a serem avaliados neste estudo, foi possível verificar que os mecânicos dessas aeronaves observaram que

os pneus externos apresentam maior desgaste do que os pneus internos. Essa observação motivou a consideração da posição dos pneus no trem de pouso principal como um fator que pode influenciar a durabilidade. A Fig. 4 apresenta os pneus de um mesmo trem principal com desgastes heterogêneos, indicando que o fator posição pode representar diferenças significativas nas médias de durabilidade entre pneus internos e externos.



Fig. 4. Desgaste heterogêneo de pneus em um mesmo trem de pouso.

Os dois trens principais das aeronaves E-99 e R-99 dispõem dois pneus lateralmente em posições internas e externas, as quais constituem os níveis “INTERNO” e “EXTERNO” do fator posição, respectivamente, conforme ilustrado na Fig. 5.

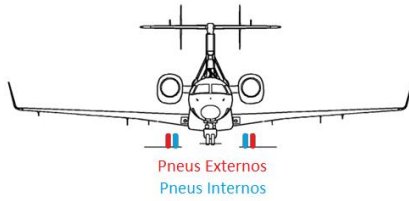


Fig. 5. Posição dos pneus em relação ao trem de pouso principal.

Embora este estudo esteja limitado a dois fatores em função da disponibilidade das informações contidas no banco de dados, outros fatores que podem aumentar ou reduzir o número de pousos por pneu. Eventos como abortivas de decolagem também podem gerar um desgaste excessivo dos pneus, alterando consideravelmente o número de pousos suportados. Esses fatores incontrolláveis constituem ruído ou erro aleatório na variável de resposta. A Fig. 6 demonstra o desgaste prematuro de um pneu da aeronave E-99M que sofreu travamento do sistema de freio no momento do taxiamento, provocando desgaste e deformação no pneu e sua consequente substituição prematura.



Fig. 6. Pneu da aeronave E-99 com desgaste prematuro provocado por intensa derrapagem.

B. Dados Amostrais e Modelagem para Análise Estatística

Os dados amostrais referentes à vida útil dos pneus coletados para este estudo estão compilados na Tabela 1. Esses dados constituem a variável '*df_pneus*', do tipo '*data.frame*', que será utilizada para análise estatística no RStudio. No cabeçalho da tabela, da esquerda para a direita, estão dispostas as seguintes informações: marca dos pneus, posição no trem de pouso principal, data de instalação, data de remoção e o número de pousos que a aeronave realizou no período entre a instalação e a remoção dos pneus.

O estudo do desgaste envolve a modelagem matemática da durabilidade, que é representada pelo número de pousos suportados, em função dos fatores 'marca' e 'posição'. A durabilidade de cada pneu é representada pela variável y_{ij} , que indica o número de pousos entre a instalação e a remoção do pneu. A média geral do número de pousos de todas as amostras é representada por μ . O termo τ_i ($i = 1, 2$) refere-se à influência produzida pelo fator 'marca'. A influência do fator 'posição' é caracterizada pelo termo τ_j ($j = 1, 2$). Os fatores incontrolláveis ou fatores de ruído não considerados nesse estudo são representados por ε_{ij} . Esses termos compõem a expressão que relaciona o número de pousos de cada pneu às variáveis consideradas, conforme apresentado em (1).

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \tau_j + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2 \\ j = 1, 2 \end{cases} \quad (1)$$

A influência de cada fator na resposta número de pousos será analisada por meio da análise de variância (ANOVA) considerando-se como pressupostos a homoscedasticidade da variância, a independência das amostras e a normalidade dos resíduos dos dados amostrais [8]. Considerando-se a constância na variância σ^2 e normalidade dos dados amostrais, sua distribuição é apresentada em (2).

$$y_{ij} \sim N(\mu + \tau_i + \tau_j, \sigma^2) \quad (2)$$

A Análise de Variância é derivada de uma divisão da variabilidade total em suas partes componentes [8]. No modelo proposto em (1), a Soma Total dos Quadrados (SS_{TOTAL}) está relacionada com a Soma dos Quadrados dos Fatores (SS_{MARCA} e $SS_{POSICAO}$) e dos erros aleatórios (SS_{ERRO}), conforme expresso em (3).

$$SS_{TOTAL} = SS_{MARCA} + SS_{POSICAO} + SS_{ERRO} \quad (3)$$

A relação em (3) permite uma clara percepção das origens da variabilidade total no número de pousos suportados por pneu. Para este estudo, é esperado que o erro aleatório seja expressivo, uma vez que a limitação de fatores do banco de dados impossibilita a identificação de todas as fontes de variabilidade do desgaste dos pneus. No entanto, é possível verificar se os fatores considerados (marca e posição) têm significância na alteração dessa média.

TABELA I. DADOS AMOSTRAIS

marca	posição	instalação	remoção	n° de pousos
M1	Pneus Internos	10/02/2021	15/03/2022	135
		15/03/2022	26/10/2022	142
		26/10/2022	14/02/2023	33
		29/12/2020	16/09/2021	91
		16/09/2021	09/06/2022	135
		09/06/2022	03/04/2023	126
		17/03/2021	10/12/2021	105
		10/12/2021	15/07/2022	76
	Pneus Externos	26/07/2021	03/03/2022	63
		13/04/2021	21/03/2022	114
		03/05/2021	29/10/2021	40
		29/10/2021	15/07/2022	122
		28/09/2021	17/05/2022	114
		05/11/2021	21/03/2022	56
		08/03/2021	16/09/2021	63
		16/09/2021	07/12/2021	26
M2	Pneus Internos	16/09/2021	03/06/2022	157
		28/07/2021	01/10/2021	86
		01/10/2021	14/04/2022	82
		14/04/2022	26/08/2022	125
		30/04/2021	29/10/2021	42
		29/10/2021	22/06/2022	106
		29/12/2020	15/12/2021	84
		24/07/2021	03/07/2022	121
	Pneus Externos	21/03/2022	09/06/2022	47
		09/08/2021	05/11/2021	87
		11/08/2021	28/10/2021	73
		07/12/2021	09/06/2022	107
		18/11/2020	13/04/2021	86
		13/04/2021	04/03/2022	72
		04/03/2022	04/07/2022	105
		04/07/2022	03/04/2023	107

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Resultados

Utilizando o modelo matemático formulado em (1), procedeu-se à análise de variância dos dados amostrais. A seguir, são apresentados os códigos de input em linguagem R e os resultados fornecidos como outputs na Fig. 7.

```
df_pneus <- data.frame(
  M = c(rep("M1", 14), rep("M2", 14)),
  P = c(rep(c(rep("int", 7), rep("ext", 7)), 2)),
  N = c(135, 142, 91, 135, 126, 105, 76,
        63, 114, 122, 114, 56, 63, 26,
        157, 86, 82, 125, 106, 84, 121,
        87, 73, 107, 86, 72, 105, 107))
df_pneus$N
POSICAO <- factor(df_pneus$P)
MARCA <- factor(df_pneus$M)
anova <- aov(Y ~ POSICAO + MARCA)
summary(anova)
```

OUTPUT:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
POSICAO	1	5049	5049	6.785	0.0153 *
MARCA	1	32	32	0.043	0.8370
Residuals	25	18603	744		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fig. 7. Código de Input e Output da ANOVA no RSudio.

O resultado da ANOVA apresenta um p-valor de 0.8370 para o fator marca. Considerando uma significância de 0.05 (5%), o resultado indica fortemente que a diferença na média do número de pousos em função da marca dos pneus é estatisticamente insignificante. Por outro lado, a posição dos pneus apresenta uma contribuição irrefutável na variação do número de pousos, apresentando um p-valor de 0.0153. Tal resultado indica que a posição dos pneus no trem de pouso definitivamente altera a vida útil dos pneus. A média de pousos por marca apresentou valores de aproximadamente 98 pousos para a marca M1 e 100 pousos para a marca M2. A posição interna apresentou média de aproximadamente 112 pousos e a posição externa apresentou média de 85 pousos por pneu. Note-se que a posição interna garante uma vida útil 30% maior em comparação com a posição externa. A Fig. 8 com o gráfico boxplot de distribuição do número de pousos em função da

marca confirma o resultado da ANOVA, em que não é possível verificar alterações na média em função desse fator. No gráfico, também é possível verificar que a marca M2 apresentou menor variabilidade no número de pousos.

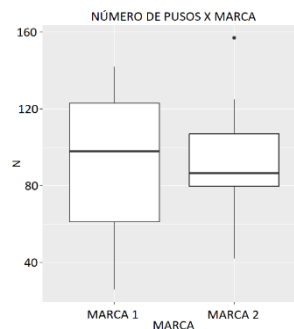


Fig. 8. Boxplot número de pousos (N) x marca dos pneus

A Fig. 9, que apresenta o gráfico boxplot de distribuição do número de pousos em função da posição dos pneus, confirma a diferença entre a média no número de pousos e uma variância similar, em consonância com os resultados da ANOVA.

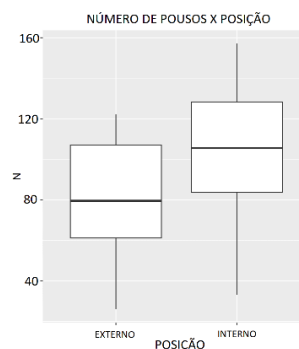


Fig. 9. Boxplot número de pousos (N) x posição dos pneus (P)

É possível verificar que a marca M2 apresentou menor variabilidade que a marca M1, porém, essa observação não altera a impossibilidade de verificar qualquer alteração na média da durabilidade em decorrência deste fator.

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk tem como hipótese nula a normalidade dos dados amostrais [11]. A Fig. 10 apresenta os códigos em RStudio para a aplicação do teste de normalidade nos resíduos dos dados amostrais. Observa-se um p-valor de aproximadamente 0.36, o que indica uma alta probabilidade de normalidade dos resíduos, tornando inviável a rejeição da hipótese nula de normalidade.

```
INPUT:
> shapiro.test(anova$residuals)

OUTPUT:
Shapiro-wilk normality test
data: anova$residuals
W = 0.96084, p-value = 0.3649
```

Fig. 10. Teste de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk.

Em consonância com o teste anterior, A Fig. 11 apresenta o gráfico de distribuição dos resíduos, no qual é possível verificar uma forte correlação com os valores teóricos de uma distribuição normal.

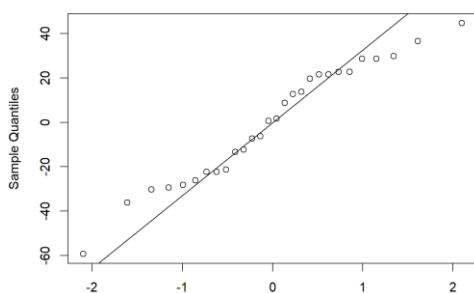


Fig. 11. Comparação entre a distribuição de resíduos com os valores teóricos de uma distribuição normal representados pela reta.

Essa aproximação apresentada na Fig. 11 reforça a validade da ANOVA, uma vez que um dos pressupostos para sua utilização é a distribuição normal dos resíduos. As Figuras 12 e 13 apresentam os gráficos de distribuição dos resíduos em função da marca e da posição, respectivamente.

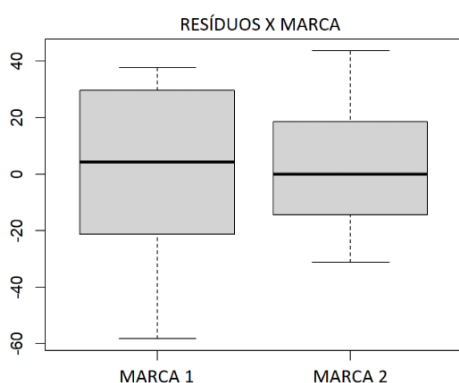


Fig. 12. Comparação entre a distribuição de resíduos para cada posição dos pneus.

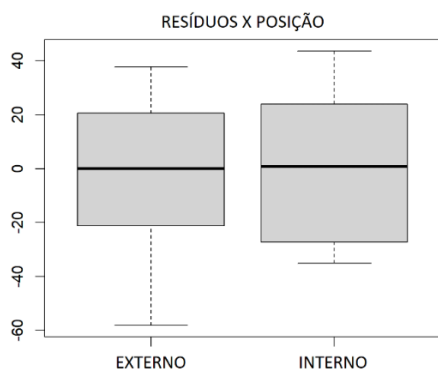


Fig. 13. Comparação entre a distribuição de resíduos para cada posição dos pneus.

Pela análise das Figuras 12 e 13, observa-se que ambos os fatores produziram resíduos com a mesma média e distribuição, fornecendo mais um indício de normalidade do erro aleatório na variação do número de pousos na vida útil dos pneus.

B. Discussão

A análise de variância deixou claro que a marca dos pneus não tem significância estatística na alteração da média do

número de pousos. No entanto, a posição dos pneus produz alterações significativas na vida útil. Em média, os pneus internos suportam 30% mais pousos do que os pneus externos. Esses resultados podem fornecer suporte aos gestores logísticos na estimativa da duração dos estoques e no dimensionamento da aquisição de novos lotes de pneus. Considerando-se, hipoteticamente, uma média de 2 horas de voo por pouso, é possível estimar que os pneus internos e externos serão substituídos após aproximadamente 225 horas e 170 horas de voo, respectivamente. Esses valores permitem estimar o número de horas de voo para a operação com base no número de pneus em estoque. A Fig. 14 apresenta o resultado do software AMPL de uma programação linear de estimativa de horas de voo para um estoque de 50 pneus, considerando uma média de 2h por pouso. O resultado indicou que este estoque pode suportar uma operação de aproximadamente 1210 horas de voo.

```
MINOS 5.51: optimal solution found.
1 iteration, objective 1210.443038
ampl: printf "Quantidade de pneus externos: %
d\n", x1;
Quantidade de pneus externos: 28
ampl: printf "Quantidade de pneus internos: %
d\n", x2;
Quantidade de pneus internos: 22
ampl: printf "Horas máximas de voo: %f\n", z;
Horas máximas de voo para 50 pneus: 1210.44
```

Fig. 14. Output do Software AMPL para solução de programação linear de estimativa de horas de voo para um estoque de 50 pneus.

A capacidade de estimar as horas de voo por estoque fornece uma ferramenta valiosa para os gestores de manutenção e logística. O controle do estoque pode ser realizado com mais segurança, baseando-se nas horas de voo disponíveis para a operação, fornecendo aos gestores estimativas confiáveis dos prazos para solicitação de aquisição de novos pneus para reabastecimento do estoque. A conclusão de que as marcas dos pneus não têm significância estatística para o efeito considerado também produz informações úteis na prática. O valor de aquisição unitário dos pneus do trem principal das aeronaves E-99 e R-99, em pregão eletrônico de 2022, foi de R\$ 3.946,43 para 70 unidades, representando um valor global de compra de R\$ 276.250,10 [4]. Em 2023, foram adquiridas 30 unidades ao preço unitário de R\$ 4.137,96, com um valor global de R\$ 122.887,50 [5]. Esses valores demonstram o alto custo de aquisição dos pneus para essas aeronaves, portanto, a opção pela marca mais barata é a melhor, uma vez que este fator não representa ganhos operacionais no número de pousos suportados.

Os fatores avaliados aqui só foram possíveis devido ao registro em banco de dados do histórico de cada pneu, porém os fatores não avaliados, como demonstrado na revisão de literatura, também têm significância no consumo dos pneus. Em particular, [9] e [1] demonstraram que o desgaste aumenta proporcionalmente ao quadrado da velocidade de toque dos pneus com a pista. Esta proposição pode servir de alerta aos operadores de aeronaves, pois a precisão na velocidade de cruzamento da cabeceira pode representar, além de maior segurança de voo, maior vida útil para os pneus e menor tempo de indisponibilidade das aeronaves.

Os resultados deste estudo confirmam fortemente os estudos de que o pouso e a frenagem explicam a maior parcela de desgaste dos pneus. O fato de que a posição dos pneus apresenta uma durabilidade diferenciada em termos de número de pousos é uma consequência de que o número de pousos em si é uma medida de durabilidade dos pneus. A média geral de número de pousos aproxima-se de 100 pousos por pneu, com um desvio padrão geral de 30 pousos. Embora a variação seja considerável, é importante lembrar que a operação real de aeronaves sempre contará com fatores aqui não considerados que alteram a durabilidade dos pneus. Por exemplo, um fator não considerado neste estudo foi a pressão dos pneus devido à impossibilidade de aferir a pressão dos pneus a cada inspeção entre voos. Conforme [6], a pressão correta reduz o desgaste, o que indica que uma rotina de aferição de pressão e calibração dos pneus por parte das equipes de manutenção tem o potencial de extensão de vida útil. Outro fato a ser observado é que a média geral de vida útil de 100 pousos por pneu do E/R-99 difere significativamente da referência de 300 pousos por pneus apontada por [12]. Isso pode indicar que os pneus podem estar sendo substituídos prematuramente antes do final da sua vida útil ou que alguns fatores de desgaste não avaliados neste trabalho estejam acelerando o desgaste dos pneus das aeronaves E/R-99.

Embora outras aplicações sejam viáveis, aquelas anteriormente apontadas têm um potencial de gerar benefícios diretos aos operadores e gestores das aeronaves E-99 e R-99. No entanto, o método aqui apresentado não se restringe a essas aeronaves, podendo ser aplicado a outras aeronaves com diferentes configurações de trem de pouso e número de pneus, com algumas pequenas modificações na modelagem da análise.

V. CONCLUSÃO

Neste estudo foram utilizados dados de registro da vida útil de pneus das aeronaves E-99 e R-99 de uma unidade da Força Aérea Brasileira. Os dados foram obtidos de maneira aleatória de um banco de dados de gestão de logística e avaliamos os fatores que poderiam influenciar a vida útil do pneu, caracterizada como o número de pousos suportados por cada amostra. A análise de variância mostrou que apenas a posição gera uma variação significativa no número de pousos suportados por cada pneu. As duas marcas indicadas pelo fabricante não geram diferença estatística significativa na média de pousos suportada por pneu, sugerindo que a opção de compra pela marca mais barata deve ser considerada nos processos de aquisição realizados pelos gestores das cadeias de manutenção e logística. A análise da influência dos fatores baseou-se nos registros dos dados da vida útil de cada pneu, e embora a posição dos pneus mostrasse uma parcela significativa na soma dos quadrados de toda a variação dos dados, os erros ainda indicavam que muitos outros fatores não avaliados estão presentes na variação da resposta número de pousos. Isso abre a possibilidade de mais investigações na variabilidade da média da vida útil de pneus em experimentos que considerem mais fatores na análise.

Por fim, o estudo demonstrou que a investigação de fenômenos na aviação que produzem pequenas modificações

em procedimentos ou em gestão pode levar a economias significativas para as instituições. A economia não se limita aos recursos financeiros, mas também inclui a economia de recursos naturais, que é crucial na busca por um mundo mais racional e sustentável.

VI. AGRADECIMENTOS

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos graças à valiosa colaboração do T Cel Av David Dantas da Silva (Comandante do 2º/6º GAV), Cap Av Fabrício de Almeida Gomes (2º/6º GAV) e 3º Sgt BMA Lucas Dias Couto (Base Aérea de Anápolis). Mesmo imersos em suas rotinas diárias, relacionadas a voos e manutenções das aeronaves E/R-99, eles dedicaram tempo e esforço extra para fornecer os dados necessários. Além disso, a revisão criteriosa dos Professores Doutores Mauro Caetano e Ricardo Sutério foi essencial para conferir maturidade formal e metodológica ao trabalho. Expressamos aqui nosso profundo reconhecimento e gratidão a todos os envolvidos. Agradecimentos também do Prof. Mauro Caetano ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Produtividade em Pesquisa – PQ, Processo 304919/2022-5).

REFERÊNCIAS

- [1] Alroqi, A. A., Wang, W., & Zhao, Y. (2017). Aircraft Tire Temperature at Touchdown with Wheel Prerotation. *Journal of Aircraft*, 54(3), 926–938. doi:10.2514/1.c033916
- [2] Bennett, M., Christie, S. M., Graham, A., Thomas, B. S., Vishnyakov, V., Morris, K., Ansell, C. (2011). Composition of Smoke Generated by Landing Aircraft. *Environmental Science & Technology*, 45(8), 3533–3538. doi:10.1021/es1027585
- [3] Besselink, I.J.M. (2000). Shimmy of aircraft main landing gears. Delft: Technische Universiteit Delft. PhD thesis. Retrieved from <http://www.tue.nl/en/publication/ep/p/d/ep-uid/227775/>
- [4] COMPRASNET. Portal de compras do Governo Federal. Gerenciado pelo Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Disponível em: <<http://comprasnet.gov.br/livre/Pregao/FornecedorResultadoDecreto.asp?prgCod=1034130>>. Acessado em junho de 2023.
- [5] COMPRASNET. Portal de compras do Governo Federal. Gerenciado pelo Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Disponível em: <<http://comprasnet.gov.br/livre/Pregao/FornecedorResultadoDecreto.asp?prgCod=1034130>>. Acessado em junho de 2023.
- [6] Li, Y., Zuo, S., Lei, L., Yang, X., & Wu, X. (2011). Analysis of impact factors of tire wear. *Journal of Vibration and Control*, 18(6), 833–840. doi:10.1177/1077546311411756
- [7] McCarty, J. L., “Wear and Related Characteristics of an Aircraft Tire During Braking,” NASA TN D-6963, 1972.
- [8] Montgomery, Douglas C. Design and Analysis of Experiments. Eighth edition, John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [9] Padovan, J., Kazenpour, A., & Kim, Y. H. (1991). Aircraft landing-induced tire spinup. *Journal of Aircraft*, 28(12), 849–854. doi:10.2514/3.46108
- [10] Saibel, E. A., & Tsai, C. (1973). Tire wear by ablation. *Wear*, 24(2), 161–176. doi:10.1016/0043-1648(73)90229-9
- [11] Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591–611. doi:10.1093/biomet/52.3-4.591
- [12] Tooley, M., et al., *Aerospace Engineering e-Mega Reference*, 1st ed., Elsevier, Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K., 2009, pp. 133–134.
- [13] Wu, J., Chen, L., Chen, D., Wang, Y., Su, B., & Cui, Z. (2021). Experiment and Simulation Research on the Fatigue Wear of Aircraft Tire Tread Rubber. *Polymers*, 13(7), 1143. doi:10.3390/polym13071143