ANÁLISE DAS DESFORMAÇÕES NAS CAMADAS DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TRENS DE POUSO

Lucas Cavalcante de Almeida, Antonia Fabiana Marques Almeida, Lucas Moreira Magalhães, Felipe Hernandes Cava, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

*** E-mail do autor de correspondência**: lucascavalcante@det.ufc.br

PAPER ID: SIT181

RESUMO

Algumas características específicas das operações aeroportuárias fazem da condição estrutural dos pavimentos de um aeródromo um dos fatores mais importantes a serem avaliados para garantia da segurança operacional de pousos e decolagens. Nesse sentido, a forma como a carga aplicada pelas diferentes configurações dos trens de pouso das aeronaves é distribuída nas camadas do pavimento torna-se uma das principais influências nos projetos de pavimentação aeroportuária. Portanto, diante do exposto, este artigo tem como objetivo determinar as deformações obtidas pelos *softwares* AEMC e o MePADS, que trabalham de forma elástica linear, para três configurações de trens de pouso de aeronaves e em quatro locais diferentes de análise para os deslocamentos da fibra inferior do revestimento e do topo do subleito. No estudo comparativo foram utilizados cinco tipos de aeronaves com diferentes configurações de trem de pouso (rodas duplas, tandem duplo e tandem triplo) e de peso máximo de decolagem (PMD). Foi verificado que, a depender da distribuição e do número de rodas, as deformações das camadas podem variar consideravelmente. Por consequência, cada fabricante deve fornecer os pesos típicos, pressão dos pneus e configurações de trens de pouso de aeronaves, pois esses dados servem como referência para o projeto de um pavimento aeroportuário. Os resultados mostraram que as aeronaves que possuem maior PMD não são as que mais contribuem para os maiores deslocamentos nos locais de análise do pavimento aeroportuário independente do *software* utilizado, requerendo, portanto, análises mais detalhadas das aeronaves de menores pesos.

Palavras-chave: Pavimento, Aeroporto, Trem de pouso, Deformações.

1. INTRODUÇÃO

A condição estrutural dos pavimentos aeroportuários é um dos fatores mais importantes a ser monitorado para garantir a segurança nas operações. As demandas por transporte de maiores quantidades de passageiros e de cargas gera uma necessidade de operação de aeronaves de maior porte. Essas aeronaves, consequentemente, são mais pesadas, gerando aumento das cargas aplicadas à estrutura dos pavimentos.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), a função de um pavimento é proteger as camadas inferiores da carga imposta na estrutura, proporcionando uma superfície de rolamento adequada para os usuários com conforto e segurança. No caso de aeroportos, além dos usuários é importante garantir a integridade das aeronaves, sobretudo seus trens de pouso.

Os pavimentos aeroportuários não são substancialmente distintos dos rodoviários, diferindo-se basicamente na repetição e amplitude de cargas aplicadas. No caso das infraestruturas aeroportuárias, existe uma magnitude superior da força aplicada pelas aeronaves durante pousos e decolagens, ocasionadas por: pressão de enchimento e largura dos pneus, configuração dos trens de pouso, posicionamento do centro de gravidade das aeronaves, seção geométrica da via e espessuras das camadas do pavimento (Yoder & Witczak, 1975 *apud* Durán, 2015).

Nesse sentido, entre os principais fatores que influenciam o projeto de pavimentos aeroportuários, é como a carga aplicada pela aeronave será avaliada nas camadas do pavimento. Portanto, é fundamental a compreensão sobre a geometria das aeronaves, sobretudo da configuração do trem de pouso.

Diante do exposto, este artigo tem o objetivo de determinar as deformações (na base do revestimento e no topo do subleito) obtidos por dois *softwares* que trabalham de forma elástica linear para diferentes configurações de trens de pouso de aeronaves. Ambos os *softwares* fazem o cálculo de tensões e das deflexões teóricas que as estruturas sofrem em decorrência de carregamentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O pavimento aeroportuário, sobretudo a pista de pouso e decolagem, está sujeita ao desgaste tanto funcional quanto estrutural devido às cargas impostas pelas aeronaves. Para cumprir requisitos de conforto e segurança para o usuário, faz-se necessário estudar os fatores, incluindo as aeronaves que solicitarão respostas estruturais adequadas do pavimento aeroportuário.

2.1. Configurações de trens de pouso

Em pavimentos aeroportuários, as aeronaves utilizadas na aviação civil utilizam diversas configurações de trem de pouso. Nesse sentido, conforme Horonjeff (2010), existem três configurações básicas de trem de pouso: rodas simples, rodas duplas e tandem duplo, conforme pode ser observado na Figura 1.

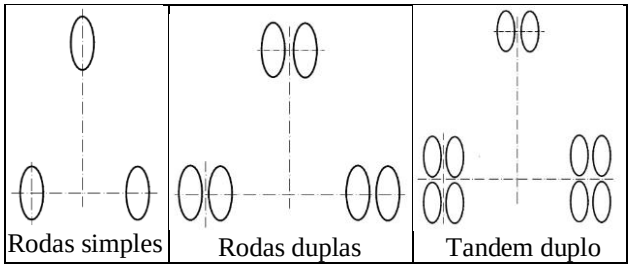


Figura 1 Configurações tradicionais do trem de pouso (Fonte: FAA, 2005).

Ainda de acordo com Horonjeff (2010), existem configurações mais complexas como as utilizadas no Boeing 747, Boeing 777 e Airbus 380. As configurações dos trens de pouso das aeronaves mencionadas são apresentadas na Figura 2.

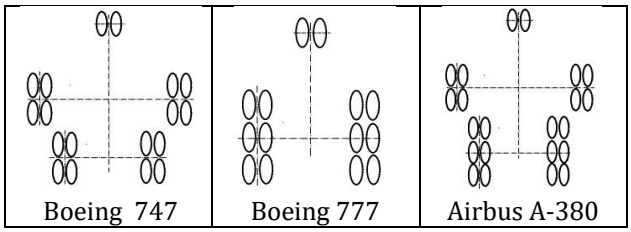


Figura 2 Configurações complexas de trem de pouso (Fonte: FAA, 2005).

É fundamental, de acordo com Vieira (2015), compreender as configurações dos trens de pouso, haja vista que eles distribuem o peso da aeronave ao pavimento, proporcionando impacto significativo no projeto dos pavimentos dos aeródromos. A depender do número e da

distribuição das rodas, a magnitude (em termos de deslocamento e de deformação das camadas) pode ser maior ou menor. Consequentemente, cada fabricante deve fornecer os pesos típicos (Peso Máximo de Decolagem – PMD, sobretudo), pressão dos pneus e configurações de trens de pouso de aeronaves, pois esses dados servem como referência para o projeto de um pavimento aeroportuário.

As diferenças de configuração de trens de pouso de aeronaves podem causar solicitações diferentes ao pavimento durante operações, mesmo que a distribuição de peso para cada pneu seja semelhante. Shabani & Zarei (2017) e Rezende (2018) estudaram as tensões verticais e horizontais em pavimentos de concreto e de asfalto para as aeronaves Boeing 777-300R e Airbus 380-800, por meio de elementos finitos no software ABAQUS. Para todos os tipos de pavimentos, as tensões observadas na aeronave B777-300R foram maiores, expondo que o A380-800 tem melhor configuração e distribuição de cargas para as situações estudadas.

2.2 Deformações em camadas de pavimentos aeroportuários

Por meio do avanço de tecnologia computacional, tornou-se possível investigar e analisar o comportamento estrutural dos pavimentos aeroportuários, seja por *softwares* que trabalham de forma elástica-linear ou com aplicação do método de elementos finitos (MEF).

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), tratando-se de pavimentos, as tensões horizontais, deformações e deslocamentos verticais são os mais importantes para sua análise ou dimensionamento, pois são os parâmetros com valores mais expressivos. Assim, o comportamento dos pavimentos flexíveis deve ser analisado em função da deformação permanente, controlada pela deformação vertical no topo do subleito, e por trincas de fadiga, determinada pela tensão horizontal na base do revestimento.

As deformações verticais atuantes em uma estrutura de pavimento são relevantes na verificação de possíveis rupturas das camadas granulares, haja vista que deformações plásticas podem ocorrer na estrutura. Esses critérios de ruptura abordam as deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico e de compressão no topo da camada do subleito, e suas formulações podem ser observadas nas equações (1) para o revestimento e (2a) e (2b) para o topo do subleito (FAA, 2009).

$$\log C = 2{,}68 - 5 \log \varepsilon H - 2{,}655 \log E_A \quad (1)$$

Onde:

C = número de aplicações de tensões máximas sobre a superfície do pavimento aeroportuário para a ruptura decorrentes das decolagens anuais;

εH = máxima deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico;

E_A = módulo elástico do revestimento asfáltico (psi).

$$C = \left(\frac{0{,}004}{\varepsilon_v}\right)^{8{,}1}, \text{ quando } C \leq 12.100 \quad (2a)$$

$$C = \left(\frac{0{,}002428}{\varepsilon_v}\right)^{14{,}21}, \text{ quando } C > 12.100 \quad (2b)$$

Onde:

ε_v = máxima deformação de compressão no topo do subleito.

Wabulita & Van de Ven (2000) denotam a importância da análise de tensões para a modelagem de estruturas de misturas asfálticas, principalmente para camadas delgadas de rolamento. Foi observado que os fatores preponderantes na mudança do tempo de serventia do pavimento foram a espessuras da camada, a constante elástica do material e o carregamento aplicado a camada.

2.3 Avaliação estrutural de pavimentos por simulação computacional

As simulações computacionais para a verificação de tensões na implementação de pistas são recorrentes em projetos aeroportuários. Portanto, cumprem as condições ideais de serventia necessárias para atender as operações nos aeroportos.

Kawa *et al.* (2007) avaliaram diferentes *softwares* (LEDFAA, FEDFAA e FAARFIELD), sendo os resultados desse último mais de acordo com os valores reais obtidos por meio de testes. Isso pode ser explicado pelo

FAARFIELD incorporar o cálculo de tensão por meio de elementos finitos tridimensionais.

Além do método dos elementos finitos, análises multicamadas também são empregadas no dimensionamento e avaliação de pavimentos, tanto rodoviário quanto aeroportuário. O AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) é um *software* de análise de tensões e deformações em conjunto com o MeDiNa (Franco & Mota, 2010).

Os usos acadêmicos do AEMC incluem os estudos de Lima *et al*. (2020) na avaliação do comportamento mecânico de solos lateríticos simulados com testes de modulo de resiliência e deformação permanente. Os resultados indicaram que a capacidade estrutural das amostras avaliadas para deformação permanente máxima foi suficiente para as condições de tráfego rodoviários.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O método desenvolvido neste artigo compreende três etapas: (i) obtenção das deformações na fibra inferior do revestimento; (ii) obtenção das deformações no topo do subleito; e (iii) análise comparativa dos dados obtidos nos dois *softwares*.

Para a análise foram considerados os trens de pouso de cinco aeronaves: Embraer 195 (E-195), Airbus 320 (A320) e três modelos de Boeing (B737-800, B767 e B777). Os *softwares* utilizados foram o AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), desenvolvido no Brasil, e o MePADS (*Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Desing Software*) com desenvolvimento na África do Sul.

3.1 Características do pavimento e das aeronaves analisadas

O pavimento aeroportuário no qual foram realizadas as simulações possui as características expostas na Tabela 1. Os módulos de elasticidade foram obtidos por meio de retroanálises a partir de dados do equipamento HWD (*Heavy Weight Deflectometer*) em uma pista de pouso e decolagem brasileira no ano de 2020.

Tabela 1 Características do pavimento

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Revestimento	18	3.738
Base	28	1.321
Sub-base	28	388
Subleito	-	480

A Tabela 2 apresenta as informações das cinco aeronaves consideradas na análise. Foram dispostos dados de características físicas e mecânicas para auxiliar na compreensão das deformações que as aeronaves geram no pavimento aeroportuário.

Tabela 2 Informações físicas e mecânicas das aeronaves para dimensionamento (semieixo)

Parâmetros	Dados				
Aeronave	E195	A320	B737-800	B767	B777
Trem de Pouso	Rodas duplas	Rodas duplas	Rodas duplas	Tandem Duplo	Tandem Triplo
Número de rodas	2	2	2	4	6
% Trem de Pouso	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475
PMD (kg)	48.950	70.400	79.242	204.570	352.442
Carga por roda (kN)	116,256	167,200	188,200	242,927	279,017
Dual *spacing* (mm)	864	927	864	1163	1397
Tandem *spacing* (mm)	-	-	-	1372	1463
Pressão de Pneus (kPa)	1062	1220	1407	1482	1503

A Figura 3 fornece as informações do trem de pouso das aeronaves E-195, A-320 e B737-800. A Figura 4 apresenta o trem de pouso do B767. A Figura 5 ilustra o trem de pouso do B777. A Figura 6 representa as deformações nos pontos analisados do pavimento aeroportuário: a fibra inferior do revestimento asfáltico (ε_t) e o topo do subleito (ε_c).

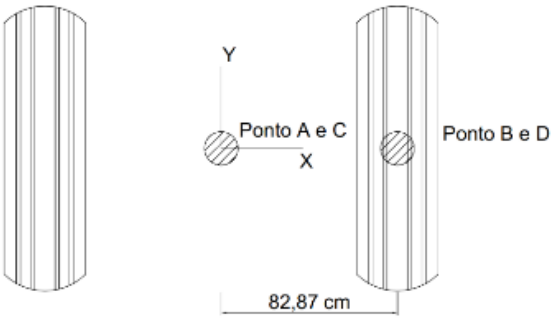


Figura 3 Trem de pouso das aeronaves E-195, A-320 e B737-800.

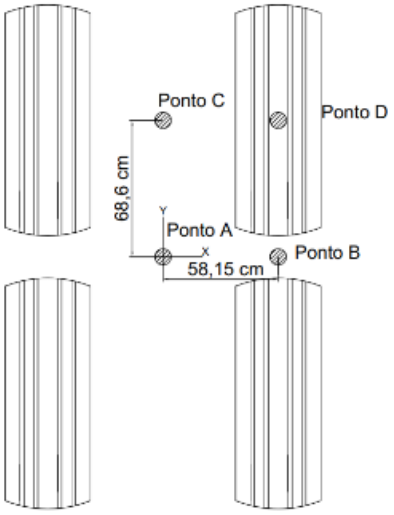


Figura 4 Trem de pouso da aeronave B767.

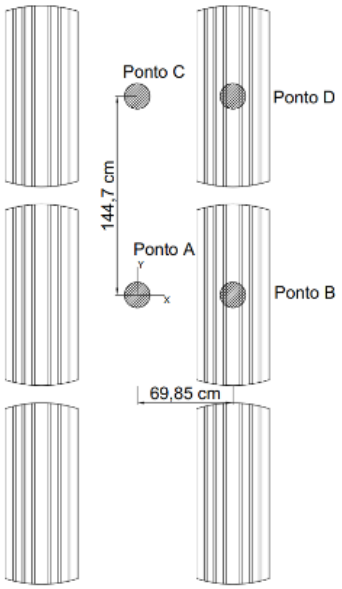


Figura 5 Trem de pouso da aeronave B767.

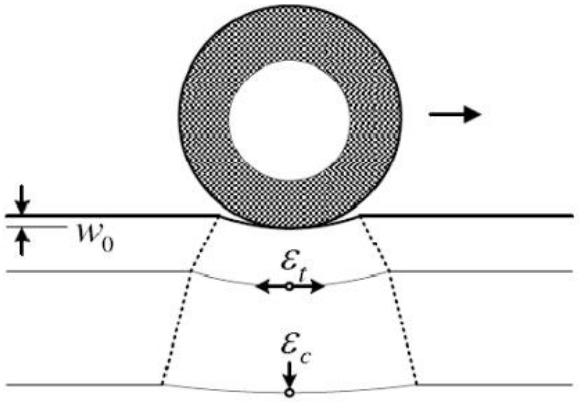


Figura 6 Indicação das deformações na fibra inferior do revestimento (ε_t) e no topo do subleito (ε_c) analisadas (Fonte: Jaritngam *et al.*, 2010)

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando os PMD das aeronaves selecionadas observou-se que os trens de pouso de rodas duplas possuem menor PMD, e as duas consideradas com tandem, o duplo e o triplo, tem esse parâmetro superior. Como exemplo, o B767 tem cerca de 258% a mais de PMD quando comparado ao B737-800.

Com relação às cargas que são aplicadas por roda, em kN, a variação ocorre da mesma forma que o PMD, sendo os valores maiores para àquelas aeronaves com trem de pouso do tipo tandem. Nesse caso, porém, a diferença é inferior, sendo o B767 com cerca de 129% a mais de carga por roda em relação ao B737-800.

Foram calculadas as deformações resultantes dessas cargas em dois pontos: na fibra inferior do revestimento e no topo do subleito. O intuito foi verificar a homogeneidade dos resultados obtidos entre os dois. Os gráficos das Figuras 7 e 8 apresentam as deformações, considerando as cinco aeronaves e quatro diferentes pontos de análise: o centro de gravidade (CG) (A), entre as rodas tandem (B), entre as rodas (C) e abaixo da roda (D). Foram originados os gráficos apresentados pelas figuras 5 e 6, de deformação horizontal na fibra inferior do revestimento e a deformação vertical no topo do subleito, respectivamente. Nesses gráficos, adotou-se um código em que o primeiro algarismo se refere ao *software* utilizado, AEMC (A) ou MePADS (M), seguido de hífen com a sigla da aeronave considerada.

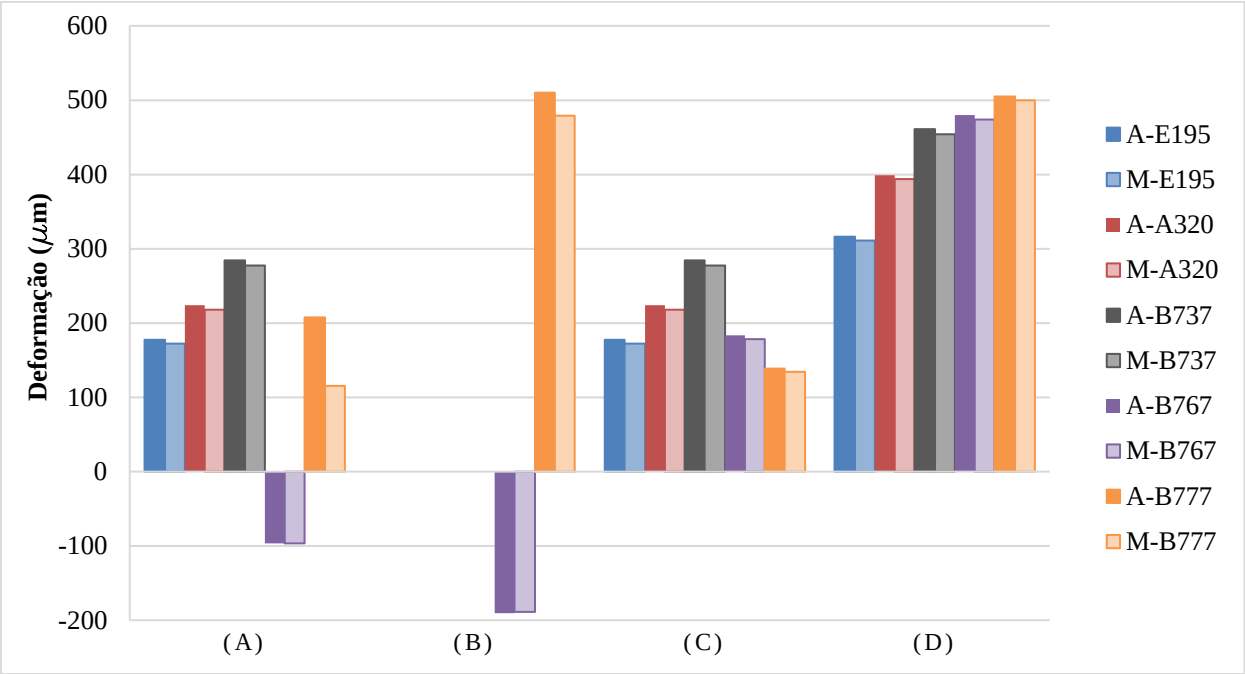


Figura 7 Tensão na Fibra Inferior do Revestimento.

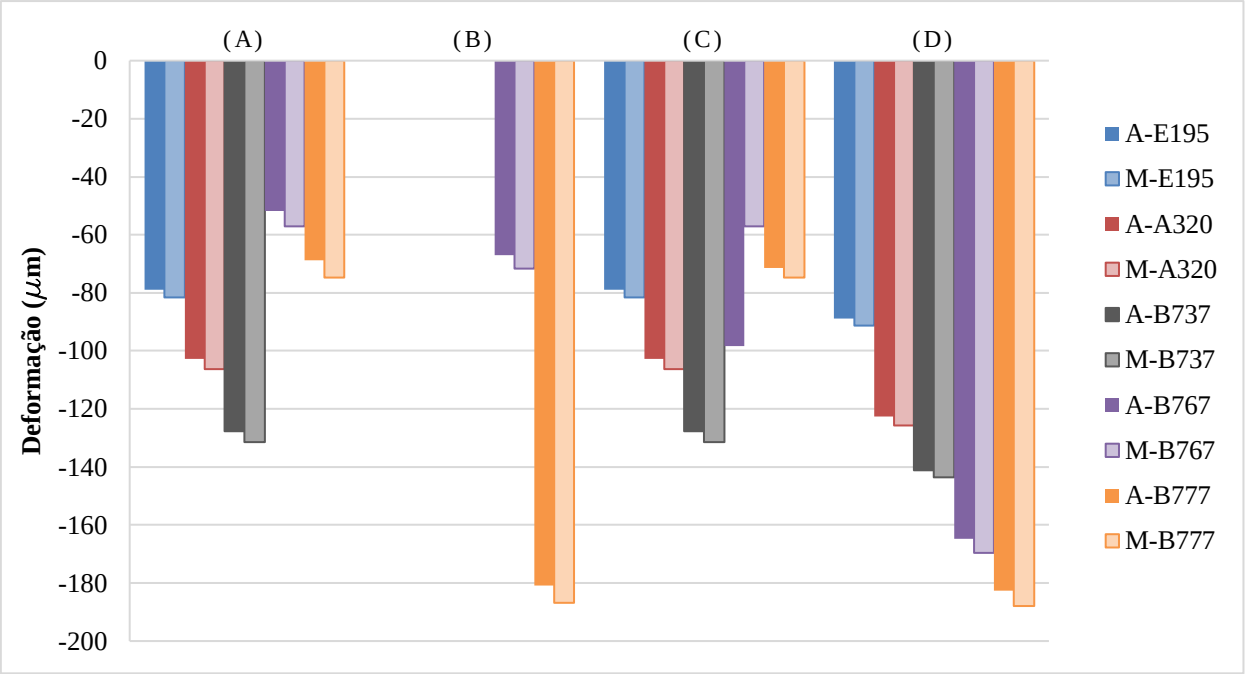


Figura 8 Deformação no Topo do Subleito.

Da Figura 7 observa-se que, com exceção das deformações nas regiões do centro de gravidade e entre rodas em tandem do B767, os valores obtidos foram positivos, somente pelo fato de convenção dos sentidos adotados pelos *softwares*. As maiores deformações foram ocasionadas pelas aeronaves de maior porte somente na região abaixo da roda. Nas regiões do centro de gravidade e entre as rodas, o B737-800 foi a aeronave que resultou nos maiores valores de deformação na fibra inferior do revestimento. Na região entre as rodas tandem, quando analisada a fibra inferior do revestimento, existe uma disparidade ao comparar as duas aeronaves com trem de pouso do tipo tandem, possivelmente devido ao fato do princípio da superposição dos efeitos.

Do gráfico da Figura 8 nota-se que todos os valores de deformações são negativos (convenção dos sentidos dos *softwares*). Outra observação é que, dependendo do local de análise, as aeronaves com maior valor de PMD não produzem as maiores deformações, como no caso analisado na fibra inferior do revestimento.

Ao verificar as deformações no topo do subleito nas regiões do centro de gravidade e entre rodas, a aeronave que ocasiona os maiores valores é o B737-800. Somente na região abaixo da roda as aeronaves de maior PMD geram as maiores deformações.

Ainda sobre as deformações no topo do subleito, ao verificar os dados obtidos pelo AEMC na região entre as rodas, a aeronave B777 resultou em menores valores quando comparada às demais aeronaves. Por sua vez, o B767, quando calculado pelo MePADS foi a aeronave que gerou as menores deformações na região entre as rodas.

A região abaixo da roda foi a que apresentou os maiores valores de deformações quando comparadas às demais regiões no topo do subleito. Assim, ao considerar que dependendo da região de análise não há uma uniformidade de crescimentos das deformações geradas, essa é uma região importante a ser considerada no dimensionamento da estrutura.

Para a fibra inferior do revestimento, constata-se que a região abaixo da roda também é de extrema importância. Com exceção da região entre rodas em tandem, a região abaixo da roda também resultou nos maiores valores de tensão e apresentam uma tendência de crescimento conforme aumenta a carga da aeronave analisada. Considera-se, assim, que a região abaixo da roda garante um dimensionamento que leva em consideração um fator de segurança aceitável em estruturas de pavimentos aeroportuários.

Vale ressaltar que nem sempre o maior PMD gera o maior deslocamento ou tensão na estrutura do pavimento aeroportuário, haja vista que a configuração dos trens de pouso interfere na distribuição do carregamento. Tal fato pode ser importante na etapa de projeto de implantação ou restauração de um pavimento aeroportuário, pois nem sempre a aeronave de projeto selecionada para o dimensionamento, causará maior solicitação, portanto deve-se trabalhar considerando o conjunto de aeronaves em detrimento da aeronave de projeto no que se refere a análise estrutural ou dimensionamento do pavimento aeroportuário.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foram utilizados dois *softwares* (AEMC e MePADS) para a determinação das deformações na fibra inferior do revestimento asfáltico e no topo do subleito de um pavimento aeroportuário. Foi verificado que os resultados podem ser considerados os mesmos quanto comparados os dois *softwares*, validando o uso do nacional (AEMC) para o cálculo das deformações dessas estruturas.

Foram verificadas cinco aeronaves na análise, considerando uma variedade quanto ao peso máximo de decolagem. Também foram considerados quatro pontos distintos de análise: o centro de gravidade, entre as rodas, abaixo da roda e entre as rodas tandem (somente as duas maiores aeronaves).

No centro de gravidade os menores valores de deformação, tanto na fibra inferior do revestimento, quanto no topo do subleito, foram originados pelas maiores aeronaves analisadas. Na região entre as rodas os menores valores identificados foram calculados a partir da maior aeronave considerada, o B777, tanto na fibra inferior do revestimento quanto no topo do subleito.

Na região abaixo da roda os valores das deformações seguiram a mesma ordem dos PMD das aeronaves: as com menor PMD geraram os menores deslocamentos nessa região, e as de maior PMD causaram as maiores deformações. A pressão dos pneus e as cargas das rodas podem ser as razões pelas quais, nessa região, as maiores aeronaves ocasionam maiores deformações. Na região entre as rodas tandem, onde foram verificados somente o B767 e o B777, os deslocamentos foram maiores com a aplicação de carga da maior aeronave.

Observou-se que nem sempre a aeronave que possui maior PMD, é a que causa maiores deformações nos pontos analisados do pavimento. Para obter estruturas mais ajustadas às solicitações impostas pela movimentação é necessário considerar todas as aeronaves com diferentes configurações de trem de pouso e pode impactar consideravelmente no dimensionamento do pavimento aeroportuário.

Referências

Bernucci, L. B., Mota, L. M. G., Cerati, J. A. P., & Soares, J. B. (2010) *Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras. Abeda. Rio de Janeiro, RJ.

Durán, J.B.C. (2015). *Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários: Estudo de Caso no Aeroporto Estadual de Araraquara*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo.

FAA. (2005). *Federal Aviation Administration. Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations*. U.S. Department of Transportation.

FAA. (2009). *Federal Aviation Administration. FAARFIELD – User Manual*. U.S. Department of Transportation.

Franco, F. A. C. P., & Motta, L. M. G (2018). *Guia para utilização de Método Mecanístico-Empírico–Apresentação de programas desenvolvidos*. Rio de Janeiro: UFRJ.

Horonjeff, R., McKelvey, F., Sproule, W., & Young, S. (2010). *Planning and design of airports*. New York: McGraw-Hill Companies.

Jaritngam, S.; Somchainuek, O.; Yandell, W. O.; Prachasaree, W.; Thongchim, P. & Taneerananon, P. (2010). *Journal of Society for Transportation and Traffic Studies 1.4*, 51-59.

Kawa, I., Brill, D. R., & Hayhoe, G. F. (2007). FAARFIELD – New FAA Airport Thickness Design Software, in *Proceedings of the 2007 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, New Jersey.

Lima, C.D.A, Motta, L.M.G., Aragão, F.T.S., & Guimarães A.C.R. (2020). Mechanical Characterization of Fine Grained Lateritic Soils for Mechanistic Empirical Flexible Pavement Design. *J Test Eval*;48(1):1–14. https://doi.org/10.1520/JTE20180890.

Rezende, C.W.A. (2018). *Estudo do impacto durante o pouso de aeronaves modernas pesadas em pavimentos flexíveis de pistas de aeroportos*. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, – Curitiba, 2018.

Shabani, S., & Zarei., S. (2017). Assessing the Effect of Wide-Body Aircraft Landing Gear Configuration on the Stresses Acting on the Composite Pavements using Numerical Analysis. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12: 5205-5211. DOI: 10.36478/jeasci.2017.5205.5211.

Vieira, R.A.C. (2015). *Dimensionamentos de Pavimentos Aeroportuários: a consideração de novas orientações. Tese de Doutorado*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Yoder, E.J., &Witczak, M.W. (1975). *Principles of Pavement Engineering Design*. 2nd Edition. John Wiley & Sons. New York.