XXI SITRAER
2024 | Air Transportation Symposium

ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES E TEMPO DE SIMULAÇÃO EM PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO

Lucas Cavalcante de Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará - UFC, Departamento de Engenharia de Transportes – DET

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

PAPER ID: SIT851372

ABSTRACT

This study verified the accuracy and efficiency of different simulation models for airport pavements, focusing on vertical deformation at the top of the subgrade. Using ABAQUS 2020 software, complete 3D models, symmetrical 3D models, and a 2D model (reproduced in AEMC software) were compared. The research problem was the importance of understanding aircraft landing gear configurations and how they influence load distribution on the pavement. Landing gear configurations, such as single wheel, dual wheel, and dual tandem, among others, have a direct impact on pavement response, requiring precise modeling for accurate life expectancy estimates. The models were subjected to loads from a Boeing B767 aircraft to determine the impact on subgrade top deformation and simulation time. The results showed that 3D models offer greater accuracy compared to the 2D model, which exhibited higher deformations. However, symmetrical 3D models stood out by significantly reducing simulation time without compromising accuracy. It was concluded that the adoption of 3D models, especially symmetrical ones, is recommended for airport pavement design.

Keywords: Strain, Pavement Modeling, Computational Efficiency, AEMC, 3D Models.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento adequado de pavimentos aeroportuários é importante para garantir a segurança das operações aéreas. Com o crescimento do tráfego aéreo e o aumento do peso bruto das aeronaves, é essencial utilizar métodos de simulação que ofereçam uma análise correta das tensões e deformações no pavimento, pois são parâmetros utilizados no dimensionamento de pavimentos aeroportuários. Os modelos tridimensionais (3D) são utilizados para fornecer uma visão detalhada das interações entre as cargas aplicadas e as diferentes camadas do pavimento. No entanto, esses modelos demandam alto poder computacional e longos tempos de processamento.

Para diminuir o tempo de processamento, métodos de simulação com simetria e bidimensionais (2D) podem ser empregados. Esses modelos simplificados reduzem o tempo de processamento sem comprometer a precisão dos resultados. No entanto, a eficácia dessas simplificações deve ser avaliada, especialmente quando se aplicam cargas complexas, como aquelas de eixos tandem duplos (*Boeing* modelo B767) ou tandem triplos de aeronaves (*Boeing* modelo B777). De acordo com Shafabakhsh, Kashi, & Akbari (2016), é importante compreender os danos causados às pistas por diferentes aeronaves e configurações de trem de pouso, pois, essas variações impactam nos danos causados nos pavimentos aeroportuários.

Neste estudo, foram verificadas as deformações no topo do subleito de um pavimento aeroportuário submetido à carga de uma aeronave Boeing modelo B767. Utilizando os *softwares* ABAQUS 2020 e AEMC v.2.4.6 (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), foram realizadas simulações em quatro tipos de modelos: 3D completo, 3D com um eixo de simetria, 3D com dois eixos de simetria e um modelo 2D. Diante do exposto, o objetivo deste estudo é analisar se há diferenças entre os tempos de processamento e as deformações no topo do subleito de um pavimento aeroportuário submetido à carga de uma aeronave com eixo tandem duplo entre os modelos mencionados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um fator considerado no dimensionamento de pavimentos aeroportuários é a forma como as cargas são aplicadas pelo trem de pouso das aeronaves, conforme afirma Tamagusko (2020). Compreender as configurações dos trens de pouso pode otimizar o desempenho do pavimento. As configurações básicas de trem de pouso incluem roda simples, roda dupla e tandem duplo, além de arranjos mais complexos como duplo tandem duplo, tandem triplo e tandem duplo com tandem triplo. A Figura 1 ilustra essas diferentes configurações de trens de pouso.

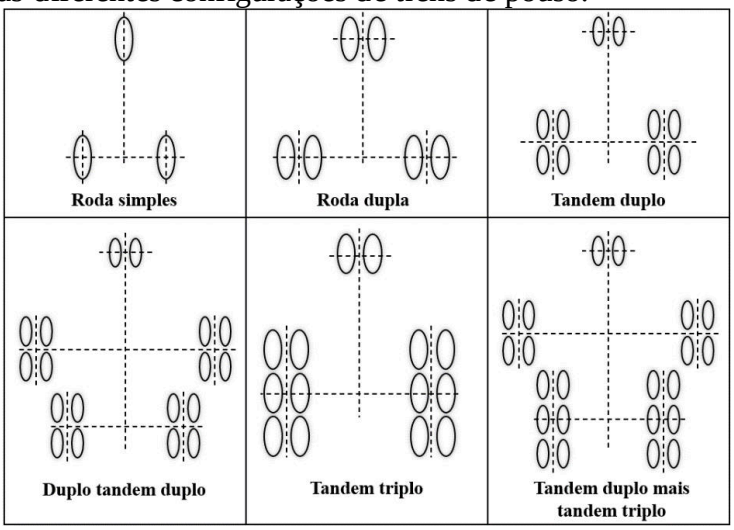


Figura 1 Tipos de trem de pouso. Fonte: Tamagusko (2020).

Informações como a distância entre rodas, distância entre eixos, pressão recomendada para os pneus, área de contato entre o pneu e o pavimento e a carga suportada por roda são dados essenciais fornecidos por cada fabricante de aeronaves, pois são utilizados no dimensionamento de pavimentos. De acordo com Horonjeff (2010) e Almeida *et al.* (2022), dependendo do número de rodas e da distribuição das cargas, o impacto no pavimento pode ser significativo, influenciando diretamente no projeto de dimensionamento do pavimento. Em comparação, enquanto a pressão dos pneus em pavimentos rodoviários é da ordem de 0,8 MPa e a carga por roda é aproximadamente de 3 toneladas, para pavimentos aeroportuários, a pressão dos pneus das aeronaves é da ordem de 1,7 MPa e a carga por roda pode chegar a aproximadamente 25 toneladas (AAA, 2017).

Segundo AAA (2017) e Garg *et al.* (2018), cargas por rodas mais altas exigem pavimentos mais espessos, assim como pressões dos pneus mais elevadas. Portanto, os pavimentos aeroportuários são, geralmente, mais espessos e devem possuir materiais de qualidade adequada, pois as aeronaves são menos tolerantes a superfícies irregulares. Vale ressaltar que, para Almeida *et al.* (2022), as aeronaves com maior peso máximo de decolagem (PMD) não são necessariamente as que mais contribuem para os maiores deslocamentos no topo do subleito, principalmente devido à distribuição do peso pela quantidade de rodas presentes no trem de pouso.

Outro parâmetro a ser considerado no dimensionamento de pavimentos aeroportuários é a pressão nos pneus (ALMEIDA *et al.,* 2023). De acordo com Wesolowsky *et al.* (2020), a área de contato entre o pneu e o pavimento deve ser considerada nas operações aeroportuárias, pois a correta transferência da carga para o pavimento garante a segurança das operações. A superfície de contato também influencia as tensões na estrutura do pavimento, afetando sua durabilidade. Wesolowsky *et al.* (2020) destacaram que as equações tradicionalmente usadas para calcular a área de contato entre o pneu e o pavimento diferem dos resultados obtidos em testes laboratoriais. Raposo (2017) também afirma que as soluções analíticas tradicionais assumem que as cargas impostas no pavimento possuem um formato circular.

Huang (2004) e Alkasawneh, Pan e Green (2008) afirmam que a pressão de enchimento e as dimensões dos pneus para cargas pesadas podem ser melhor representadas por outras formas geométricas, como retangular, quadrada e oval. Na análise de Raposo (2017), diversas formas de contato entre pneu e pavimento foram simuladas em um pavimento flexível rodoviário, incluindo formas circulares, ovais, quadradas e retangulares. Determinou-se o número de repetições admissíveis com base nos critérios de falha por fadiga para o revestimento asfáltico e deformação permanente para o subleito. Os resultados indicaram que o dimensionamento do pavimento depende do formato de carregamento utilizado. Formatos circulares, geralmente assumidos em projetos de pavimentação, podem subestimar as tensões e deformações ao longo da estrutura quando comparados aos formatos elípticos.

A análise e o dimensionamento de pavimentos aeroportuários têm evoluído com o advento de metodologias avançadas, como o Método de Elementos Finitos (MEF), em comparação com os métodos tradicionais Elástico-Linear (LE). Essas abordagens são fundamentais para entender a resposta estrutural dos pavimentos sob cargas complexas, especialmente considerando as configurações diversas dos trens de pouso das aeronaves.

Segundo Shafabakhsh, Kashi e Tahani (2018), a utilização do MEF proporciona uma visão detalhada das tensões e deformações ocasionadas em pavimentos aeroportuários. A análise tridimensional das tensões verticais no subleito e das tensões na superfície do pavimento sob diferentes velocidades de decolagem de aeronaves mostrou que o MEF pode capturar variáveis que o método LE simplifica ou ignora.

Shafabakhsh e Kashi (2015) corroboraram essa ideia ao comparar os resultados obtidos pelo MEF e pelo LE na avaliação do impacto das variações do módulo de elasticidade do concreto asfáltico. Enquanto o MEF pode considerar o comportamento viscoelástico do concreto asfáltico, o método LE tende a superestimar ou subestimar as tensões devido à sua simplificação do comportamento dos materiais.

Al-Qadi e Wang (2009) verificaram os danos causados no pavimento por diferentes *designs* de pneus, utilizando tanto testes acelerados quanto o MEF. Os resultados indicaram que a precisão do MEF em prever o comportamento do pavimento sob diferentes configurações de carga é superior ao método LE, que não consegue capturar a complexidade das interações entre o pneu e o pavimento.

Kim (2007) analisou pavimentos flexíveis utilizando MEF e considerando o comportamento não-linear do subleito foi evidenciada as limitações do método LE. Foi demonstrado que o MEF é capaz de representar de forma mais realista do comportamento elastoplástico das camadas de base e subleito, enquanto o LE simplifica essas propriedades, resultando em previsões menos precisas das tensões e deformações.

Em relação aos modelos computacionais para simular os pavimentos aeroportuários, os modelos 3D oferecem a vantagem de capturar de forma mais precisa e detalhada as respostas do pavimento às cargas aplicadas. Eles consideram mais variáveis e complexidades envolvidas na interação entre a estrutura do pavimento e as cargas das aeronaves, incluindo as variações nas tensões e deformações em diferentes pontos do pavimento. Shafabakhsh, Kashi e Tahani (2018) demonstraram que a análise 3D permite uma avaliação dos impactos das cargas, especialmente em configurações de trem de pouso complexas. No entanto, esses modelos, exigem maior poder de processamento e tempo de simulação.

Para superar esses desafios, modelos 3D com simetria e 2D podem ser utilizados. Esses modelos reduzem a complexidade computacional ao considerar apenas uma parte do pavimento, aproveitando a simetria das cargas aplicadas. Apesar de serem menos detalhados que os modelos 3D completos, eles ainda fornecem uma representação das tensões e deformações (ALMEIDA *et al.*, 2022). A principal vantagem é a redução significativa no tempo de processamento, sendo viável para análises iterativas ou quando se necessita de múltiplas simulações.

Os modelos 2D, particularmente os axissimétricos, simplificam ainda mais a análise ao representar o pavimento e as cargas aplicadas em duas dimensões. Essa abordagem é eficiente em termos de recursos computacionais e tempo de processamento. Segundo Kim (2007) e Shafabakhsh e Kashi (2015), os modelos 2D podem ser utilizados para obter resultados aproximados com menor custo computacional. No entanto, eles podem falhar em capturar toda a complexidade das interações tridimensionais das cargas aplicadas.

Os modelos 2D são especialmente úteis para análises preliminares e quando se necessita de uma rápida estimativa do comportamento do pavimento. No entanto, para casos mais complexos, os modelos 3D (completos ou com simetria) são preferíveis. Hernandez e Al-Qadi (2015) mostram que, apesar das limitações, os modelos 2D ainda são amplamente utilizados devido à sua simplicidade e rapidez, mas os resultados devem ser interpretados com cautela, especialmente para pavimentos sujeitos a cargas complexas e variáveis.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Foram utilizados quatro modelos para realizar as simulações. O primeiro foi o modelo 3D completo, empregado para representar estruturas sem restrições de geometria. Os outros dois modelos são modelos axissimétricos com uma rotação e com duas rotações. O último modelo foi 2D simulado no AEMC v.2.4.6 com as mesmas características do trem de pouso utilizado nos modelos anteriores. A Figura 2 mostra o trem de pouso e suas características para uma aeronave *Boeing* modelo B767.

DOIS EIXOS DUPLOS EM TANDEM	
Análise	Semi-eixo
Número de rodas:	4
Carga do semi-eixo (ton)	77,78
Carga de roda (ton):	**19,44495**
Pressão de pneus (MPa):	**1,31**
Ty (cm):	**142,24**
Tx (cm):	**114,3**
Lx (cm):	181,00
Área (cm²):	1484,35
Raio (cm):	21,74

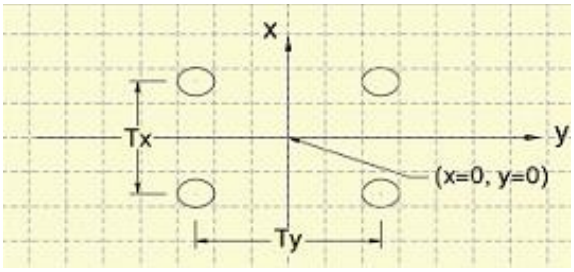


Figura 2 Característica do trem de pouso utilizado na simulação. Fonte: adaptado de AEMC v.2.4.6 (2023)

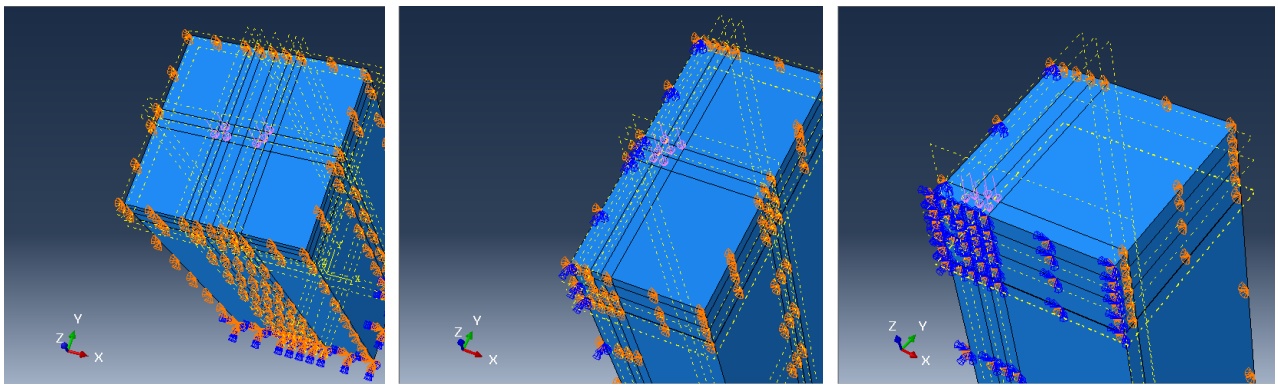
A área de contato, considerada retangular no *software* ABAQUS 2020, foi de 145.265 mm² com a medida de contato pneu-pavimento transversal de 34 cm e medida de contato longitudinal igual a 42,725 cm. No *software* AEMC v.2.4.6, que considera a carga circular, a área de contato (148.435 mm²) é fornecida por meio da relação força sobre a pressão dos pneus. Logo, percebe-se uma diferença na área de contato entre pneu-pavimento para os modelos 3D e 2D simulados.

A Tabela 1 mostra a descrição da estrutura do pavimento utilizado na simulação. Essas configurações foram utilizadas em todos os cenários de simulação, considerando os materiais elástico lineares e a deformação foi medida a 0,5 cm abaixo do topo do subleito (evitar a interface com a sub-base) tanto na linha de projeção embaixo da roda como entre rodas. As malhas (*mesh*) utilizadas em todas as simulações dos modelos 3D foram de tamanho 7,5 cm. Os parâmetros de análise foram os tempos de simulação e a deformação do subleito para cada modelo.

Tabela 1 Características da estrutura do pavimento analisado neste estudo

Camada	*Espessura (cm)*	*Módulo de Elasticidade (MPa)*	*Coeficiente de Poisson*
Revestimento	20	2000	0,30
Base	30	400	0,35
Sub-base	40	200	0,35
Subleito	∞	150	0,40

Para o cálculo da espessura do subleito (modelo 3D), assim como do comprimento e da largura do pavimento, foi adotada a metodologia descrita por Franco (2004). Segundo essa abordagem, a espessura do subleito foi determinada como sendo aproximadamente 40 vezes o raio da área de contato, assumida como circular para simplificação do cálculo. As dimensões radiais do pavimento, correspondentes à sua largura e comprimento, foram definidas como 20 vezes o raio estabelecido. A Figura 3 mostra os modelos 3D completo (a), com uma rotação (b) e com duas rotações (c).



(a) **(b)** **(c)**

Figura 3 Modelos de pavimento simulados neste estudo (pré-processamento).

Os valores de deformação foram extraídos para cada configuração e analisados comparativamente para avaliar as variações de deformação no topo do subleito. O tempo necessário

para completar cada simulação foi registrado para avaliar a eficiência computacional. Com isso, foi possível realizaram-se análises comparativas entre os modelos 3D, 3D axissimétricos e 2D para identificar as reduções de tempo de simulação e a variação da deformação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

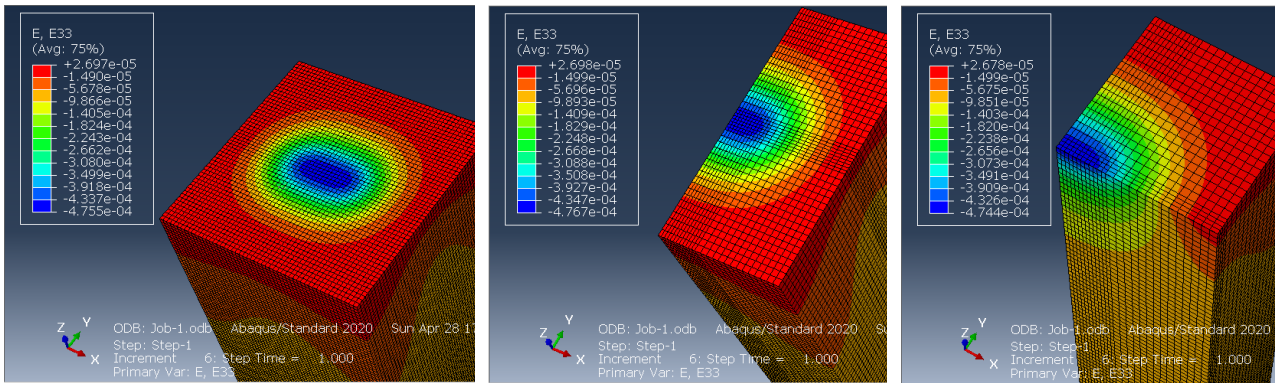
Os resultados das simulações realizadas os quatro modelos utilizados neste trabalho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Valores de deformação no topo do subleito e tempo de simulação

Modelo	*Deformação (m/m) x 10^{-4}*		*Tempo de simulação (s)*
	Embaixo da roda	*Entre rodas*	
3D completo	4,54	4,24	3244
3D (uma rotação)	4,43	4,24	841
3D (duas rotações)	4,43	4,24	89
2D (AEMC)	5,30	5,03	0,004

As deformações verticais medidas sob a roda e entre rodas mostraram variações entre os diferentes modelos. Os modelos 3D com uma rotação e duas rotações apresentaram valores inferiores sob a roda, mas mantiveram constante as deformações entre rodas. A diferença entre os pontos analisados foi de 0,3 x 10^{-4} m/m para o modelo 3D completo e de 0,19 x 10^{-4} m/m para os modelos com aplicação de simetria. Isso indica que a simplificação do modelo 3D para uma ou duas rotações não afetou as deformações entre rodas, mas resultou em uma redução nas deformações embaixo da roda.

O modelo 2D (AEMC), por outro lado, apresentou valores de deformação maiores, tanto embaixo da roda quanto entre rodas. Esses maiores valores de deformação podem ser atribuídos às limitações do modelo 2D, que simplifica a representação tridimensional da distribuição de carga. A Figura 4 mostra o resultado da simulação para os modelos 3D (completo (a), uma rotação (b) e duas rotações (c)) no topo do subleito.



(a) **(b)** **(c)**

Figura 4 Modelos de pavimento simulados neste estudo (pós processamento).

Os tempos de simulação variaram entre os modelos. O modelo 3D completo exigiu um tempo de simulação de 3244 segundos, evidenciando a alta demanda computacional associada a esse tipo de análise. A simplificação para uma rotação reduziu o tempo de simulação para 841 segundos, e para duas rotações, obteve-se um tempo de 89 segundos. Essa redução no tempo de processamento (3155 s) destaca a eficiência das simplificações axissimétricas, sem comprometer a precisão dos resultados de deformação.

O modelo 2D (AEMC) apresentou um tempo de simulação de 0,004 segundos, demonstrando a eficiência computacional desse método. No entanto, essa eficiência vem acompanhada de uma imprecisão nas estimativas de deformação. Considerando modelo 3D completo como padrão, houve uma diferença de 16,74% para o ponto embaixo da roda e 18,63% para o ponto entre rodas em relação

aos valores de deformação. Isso pode resultar em estimativas imprecisas de dimensionamento do pavimento quando considerado um modelo 2D.

Os resultados indicam que, enquanto os modelos 3D completos fornecem a maior precisão nas estimativas de deformação, o custo computacional associado é alto. As simplificações axissimétricas, como os modelos 3D com uma ou duas rotações, oferecem um equilíbrio entre precisão e eficiência computacional, tornando-se opções viáveis para análises que requerem múltiplas iterações ou grandes volumes de dados.

Em comparação, o modelo 2D (AEMC), apesar de ser eficiente em termos de tempo de processamento, pode subestimar as deformações, o que pode levar a decisões de projeto inadequadas. Essas observações ressaltam a importância de escolher a metodologia de simulação adequada com base nas necessidades específicas, considerando tanto a precisão necessária quanto os recursos computacionais disponíveis. A adoção de modelos 3D axissimétricos pode ser particularmente útil em cenários onde a eficiência computacional é importante, sem comprometer a precisão dos resultados.

Em relação ao número de coberturas, percebe-se que quanto maior a deformação, menor será o número de coberturas e o cálculo se dá em função da deformação vertical no topo do subleito. Portanto, ao projetar pavimentos aeroportuários, é importante utilizar modelos de simulação mais precisos, como os modelos 3D completos ou com simetria, para obter valores precisos de deformação no topo do subleito. Isso pode assegurar que as estimativas de vida útil do pavimento sejam confiáveis, evitando erros que possam levar a falhas prematuras de modo a diminuir a vida útil do pavimento.

5. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou a importância de utilizar modelos de simulação precisos na análise de pavimentos aeroportuários. Comparando os modelos 3D completos, 3D com simetria e 2D (AEMC), constatou-se que os modelos 3D oferecem resultados mais exatos em relação à deformação vertical no topo do subleito. A precisão desses modelos é importante para estimar corretamente a vida útil do pavimento, uma vez que deformações menores correspondem a um maior número de coberturas suportadas, prolongando a durabilidade do pavimento.

Os resultados mostraram que os modelos 3D, especialmente aqueles com simetria, reduzem o tempo de simulação em comparação ao modelo 3D completo. Esse equilíbrio entre precisão e eficiência computacional torna os modelos 3D com simetria uma alternativa viável e possivelmente recomendada para projetos de pavimentos aeroportuários. Por outro lado, o modelo 2D apresentou valores de deformação mais elevados.

Portanto, a adoção de modelos 3D, com ou sem simetria, é recomendada para o dimensionamento de pavimentos aeroportuários. A aplicação correta desses modelos pode resultar em pavimentos mais duráveis, garantindo a segurança e eficiência das operações aeroportuárias.

6. REFERÊNCIAS

AAA. (2017). *Airfield Pavement Essentials Airport Practice Note 12*.

Alkasawneh, W., Pan, E., & Green, R. (2008). The effect of loading configuration and footprint geometry on flexible pavement response based on linear elastic theory. *Road materials and pavement design.*

Almeida, L. C.; Almeida, A. F. M.; Leite, M. A. e Oliveira, F. H. L. (2023). Análise das deformações em função da variação do CBR do subleito para diferentes aeronaves. *Proceedings of the 2023 Air Transportation Symposium*. Joinville, Brazil: SBTA - Brazilian Air Transportation Research Society, 2023.

Almeida, L. C.; Almeida, A. F. M.; Magalhães L. M.; Cava, F. H. e Oliveira, F. H. L. (2022). Análise das deformações nas camadas de pavimentos aeroportuários para diferentes configurações de

trens de pouso. *Proceedings of the 2022 Air Transportation Symposium*. São José dos Campos, Brazil: SBTA - Brazilian Air Transportation Research Society, 2022. 120-128.

Al-Qadi, I. L., & Wang, H. (2009). Evaluation of pavement damage due to new tire designs. *FHWA-ICT-09-048*.

Brill, D. R., & Kawa, I. (2017). Advances in FAA pavement thickness design *software*: FAARFIELD 1.41. *In Airfield and Highway Pavements 2017* (pp. 92-102).

Franco, F.A.C.P. (2004). Versão da macro de Excel Desenvolvida para o Programa FEPAVE de maio de 2004. *Divulgação Interna*. Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Garg, N., Kazmee, H., Ricalde, L., & Parsons, T. (2018). Rutting evaluation of hot and warm mix asphalt concrete under high aircraft tire pressure and temperature at national airport pavement and materials research center. *Transportation Research Record*, 2672(23), 117-127.

Horonjeff, R. (2010). *Planning and Design of Airports*, Fifth Edition.

Hernandez, J. A., & Al-Qadi, I. L. (2015). Airfield pavement response caused by heavy aircraft takeoff: Advanced modeling for consideration of wheel interaction. *Transportation Research Record*, 2471(1), 40-47.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. 2a edicão. Ed. Pearson prentice Hall. ISBN: 0-13-142473-4. USA.

Kim, M. (2007). *Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior*. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Raposo, S. (2017). *Pavimentos Rodoviários: Análise Estrutural e Desempenho*. 1ª ed. Lisboa: Editora Ex-Libris.

Shafabakhsh, G. A., Kashi, E., & Akbari, A. (2016). A comparison effect of aircraft main gear configuration on runway damages by LED and FE method. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 14(2), 362-372.

Shafabakhsh, G., & Kashi, E. (2015). Evaluation of aircraft wheel load on pavement damages by layered elastic method. *International Journal of Damage Mechanics*, *24*(8), 1141-1154.

Shafabakhsh, G., Kashi, E., & Tahani, M. (2018). Analysis of runway pavement response under aircraft moving load by FEM. *Journal of Engineering, Design and Technology*, *16*(2), 233-243.

Tamagusko, T. B. (2020). *Airport pavement design*. Tese de Doutorado, University of Coimbra.

Wesołowski, M., Blacha, K., Pietruszewski, P., & Iwanowski, P. (2020). *Analysis of the actual contact surface of selected aircraft tires with the airport pavement as a function of pressure and vertical load*. Coatings, 10(6), 591.