



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 3D E 3D AXISSIMÉTRICO NA ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SUBLEITO SOB CARGA AEROPORTUÁRIA

Lucas Cavalcante de Almeida¹; Mateus de Oliveira Serafim² & Francisco Heber Lacerda de Oliveira³

RESUMO

O dimensionamento de pavimentos aeroportuários é um processo que afeta diretamente a segurança e a eficiência das operações aeroportuárias. Alguns *Softwares* são usados para modelar as respostas do pavimento sob carga aeroportuária, mas essas análises, geralmente, consideram simplificações que podem não refletir com exatidão o comportamento do pavimento. Este estudo comparativo utilizou o *software* de análise de elementos finitos ABAQUS 2020 para desenvolver modelos 3D e 3D axissimétricos, comparando-os com os dados obtidos pelo *software* AEMC, uma ferramenta bidimensional com análise elástica das camadas. O objetivo foi verificar a deformação vertical no topo do subleito, simulando a aplicação de carga de uma aeronave modelo Airbus A320. Foi observado que os valores de deformação gerados pelo modelo 3D foram inferiores aos do AEMC, com diferenças de 16,74% embaixo da roda e 1,03% entre rodas, demonstrando uma subestimação por parte do modelo 3D. No entanto, o tempo de processamento do modelo 3D foi mais lento que o AEMC, apontando um possível impeditivo de sua aplicação em situações que requerem múltiplas simulações iterativas. O modelo 3D axissimétrico, por outro lado, mostrou-se mais eficiente em termos de processamento, com pequenas diferenças de deformação quando comparado com o AEMC. Conclui-se que a adoção de modelos 3D, em particular o modelo 3D axissimétrico, pode ser uma abordagem eficiente e precisa para a simulação de pavimentos aeroportuários, equilibrando resultados e eficiência no processamento.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação; Modelos Tridimensionais; Processamento.

ABSTRACT

The design of airport pavements is a process that directly affects the safety and efficiency of airport operations. Some software programs are used to model pavement responses under airport load, but these analyses generally consider simplifications that may not accurately reflect pavement behavior. This comparative study used the finite element analysis software ABAQUS 2020 to develop 3D and 3D axisymmetric models, comparing them with data obtained from the AEMC software, a two-dimensional tool with layered elastic analysis. The objective was to verify the vertical deformation at the top of the subgrade, simulating the load application of an Airbus A320 aircraft. It was observed that the deformation values generated by the 3D model were lower than those of the AEMC, with differences of 16.74% under the wheel and 1.03% between wheels, demonstrating an underestimation by the 3D model. However, the processing time of the 3D model was slower than the AEMC, indicating a potential impediment to its application in situations requiring multiple iterative simulations. On the other hand, the 3D axisymmetric model proved more efficient in terms of processing, with small deformation differences when compared to the AEMC. It is concluded that the adoption of 3D models, particularly the 3D axisymmetric model, can be an efficient and accurate approach for the simulation of airport pavements, balancing results and processing efficiency.

KEY WORDS: Deformation; Three-dimensional models; Processing.

^{1,3} Universidade Federal do Ceará - UFC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN, Campus de Fortaleza, lucascavalcante@det.ufc.br; heber@det.ufc.br.

² Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus de Fortaleza, mateuserafim3@alu.ufc.br.



INTRODUÇÃO

O aumento constante no número de operações aeroportuárias e a necessidade de infraestrutura aeroportuária mais robusta têm impulsionado tanto o desenvolvimento quanto a renovação de pavimentos aeroportuários. No entanto, a manutenção de estruturas, como as pistas de pouso e decolagem, frequentemente não acompanha o ritmo necessário das operações aeroportuárias, contribuindo para a deterioração desses pavimentos. Essa deterioração pode resultar de vários fatores, incluindo as condições climáticas, o desgaste natural ao longo do tempo e as cargas aeroportuárias. Tal degradação é um fator significativo na ocorrência de incidentes e acidentes aeronáuticos, destacando a importância de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) mais robusto (OLIVEIRA, 2016).

Na indústria aeronáutica, a constante busca por expandir o alcance das aeronaves tem resultado no aumento do peso bruto operacional e da pressão dos pneus. Conforme Garg *et al.* (2018), isso demanda pavimentos aeroportuários com maior capacidade estrutural. Esse desenvolvimento requer uma adequação em relação aos métodos de dimensionamento de pavimentos atualmente utilizados no Brasil, que frequentemente se baseiam em práticas internacionais. É necessário verificar se os pavimentos das pistas de pouso e decolagem presentes no país são capazes de suportar essa elevação do peso bruto operacional.

Devido à ausência de um método nacional para o dimensionamento de pavimentos aeroportuários, os procedimentos desenvolvidos pela *Federal Aviation Administration* (FAA) são os mais utilizados no Brasil, conforme indicado por Ramos *et al.* (2017). Uma vantagem significativa dessa abordagem do *software* FAARFIELD, desenvolvido pela FAA, é a flexibilidade para ajustar parâmetros de cálculo, incluindo tipos de aeronaves, volume de tráfego, vida útil projetada, e a capacidade de suporte do subleito e das camadas subjacentes.

O *software* FAARFIELD, por meio do método LEAF (*Layered Elastic Analysis Program*), é amplamente utilizado para analisar pavimentos aeroportuários. No entanto, Shafabakhsh, Kashi e Akbari (2016) destacam que, apesar de sua ampla aceitação e fácil implementação, o LEAF enfrenta limitações significativas ao fornecer respostas estruturais imprecisas. Uma dessas limitações é a suposição de cargas axissimétricas na camada superficial, o que não reflete a realidade das cargas de rodas reais. Essa premissa leva frequentemente a um superdimensionamento do pavimento.

Em contraste, o método de Elementos Finitos (FE) em simulações tridimensionais (3D) oferece uma modelagem mais realista das condições de carga e interações dos materiais, proporcionando uma análise estrutural detalhada do comportamento do pavimento sob diferentes cenários de carga. Diante do exposto, o objetivo deste estudo é verificar a eficácia dos modelos 3D em comparação aos modelos 3D axissimétricos na obtenção de valores de deformação no topo do subleito (dado utilizado para dimensionamento de pavimentos aeroportuários), utilizando dados de simulações dos *softwares* ABAQUS 2020 e do AEMC para quantificar essas deformações e medir o impacto no tempo de simulação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



De acordo com Franco (2007), a resposta estrutural de um pavimento, considerando a caracterização dos materiais como módulos de resiliência e o coeficiente de Poisson, assim como a composição do tráfego, pode ser estimada calculando as tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura. Existem diversas ferramentas computacionais que empregam algoritmos para realizar esses cálculos. Segundo Heymsfield e Tingle (2019), o Método de Elementos Finitos (MEF) é frequentemente utilizado em pavimentos rígidos, enquanto a abordagem *Layered Elastic Design* (LED) é mais comum para pavimentos flexíveis. A Tabela 1 apresenta alguns *softwares* de análise estrutural utilizados em pavimentos flexíveis.

Tabela 1. *Softwares* utilizados em projetos de pavimentos flexíveis (adaptado de HEYMSFIELD E TINGLE, 2019)

<i>Software</i>	<i>Tipo de análise</i>
ILLI-SLAB	MEF – 2D axissimétrico
MICH PAVE	MEF – 2D axissimétrico
ABAQUS	MEF – 3D
AEMC	LED
DAMA	LED
KENLAYER	LED
CIRCLY	LED

Em 1995, a FAA incorporou o *software* LEDFAA, um método empírico-mecanicista baseado na teoria da elasticidade, que, apesar de sua ampla aceitação, possui limitações ao assumir que todas as camadas são elásticas lineares e que as cargas aplicadas são axissimétricas, o que não reflete a realidade de muitos trens de pouso. Shafabaksh, Kashi e Akbari (2016) afirmam que essas limitações podem ser superadas pelo uso de análise tridimensional por meio de elementos finitos, que oferecem uma simulação mais realista e precisão superior em parâmetros de tensão e deformação. Hernandez e Al-Qadi (2015) confirmam essa eficácia ao comparar resultados de simulações de decolagem de aeronaves pesadas em *softwares* que utilizam a teoria elástica linear e elementos finitos, demonstrando uma maior exatidão na deformação do subleito em velocidades variadas de decolagem, destacando a superioridade do método de elementos finitos sobre abordagens mais tradicionais como o LEDFAA. Vale ressaltar que não foram realizados comparativos com resultados de campo em condições controladas para as afirmações dos autores supracitados.

A análise de pavimentos aeroportuários, especialmente sob cargas elevadas de aeronaves como o *Boeing B-777* e *Airbus A-380*, requerem modelagens precisas das interações entre os pneus e as camadas do pavimento. Estudos como os de Myers, Roque e Birgisson (2001) e Kim (2007) indicam que, embora modelos tridimensionais (3D) ofereçam maior exatidão ao representar a estrutura real do pavimento, eles demandam mais recursos e tempo de processamento quando comparados a análises bidimensionais (2D), que ainda podem ser úteis ao reduzir a complexidade computacional.

Modelos 2D, embora úteis, falham em simular a forma elíptica real das cargas aplicadas por pneus (Raposo, 2017), enquanto modelos axissimétricos simplificam a carga para uma forma circular e não podem representar arranjos de rodas em tandem ou múltiplas, limitações que são significativas ao considerar a interação complexa de trens de pouso mais pesados. Rezende e Vicentini (2021) reforçam que as elevadas tensões e deformações em pavimentos aeroportuários, que são mais intensas do que em rodoviários, justificam a necessidade de estudos detalhados e a adoção de modelos 3D



através do Método de Elementos Finitos (MEF) para uma melhor representação das condições reais de carga e interação entre os materiais.

MÉTODO DE PESQUISA

A carga aeroportuária utilizada neste estudo foi baseada nas especificações da aeronave *Airbus A-320*, que possui um peso máximo de decolagem (PMD) de 73.900 kg. A pressão exercida pelos pneus é de 1,378 MPa. A área de contato, considerada retangular, foi de 124.690 mm² com a medida a igual a 31,5 cm e medida b igual a 39,58 cm (Figura 1). Todas essas informações foram extraídas do *software* FAARFIELD versão 2.1.1. O trem de pouso dessa aeronave utilizada caracteriza-se por ser do tipo eixo simples de rodas duplas (ESRD). Para a simulação utilizou-se o semi-eixo da aeronave.



Figura 1. Medidas para área de contato entre pneu e pavimento (AUTORES, 2024).

A Tabela 2 mostra a descrição do pavimento utilizado na simulação. Essas configurações foram utilizadas em todos os cenários de simulação (modelo 3D, modelo 3D axissimétrico e AEMC).

Tabela 2. Características do pavimento (AUTORES, 2024).

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

Elaboração da Simulação no *Software* ABAQUS 2020

O modelo tridimensional foi construído representando as camadas do pavimento: revestimento, base, sub-base e subleito. Cada camada foi modelada como um sólido homogêneo com propriedades elásticas lineares específicas. Foram elaboradas duas geometrias: um modelo 3D e um modelo 3D axissimétrico (Figura 2).

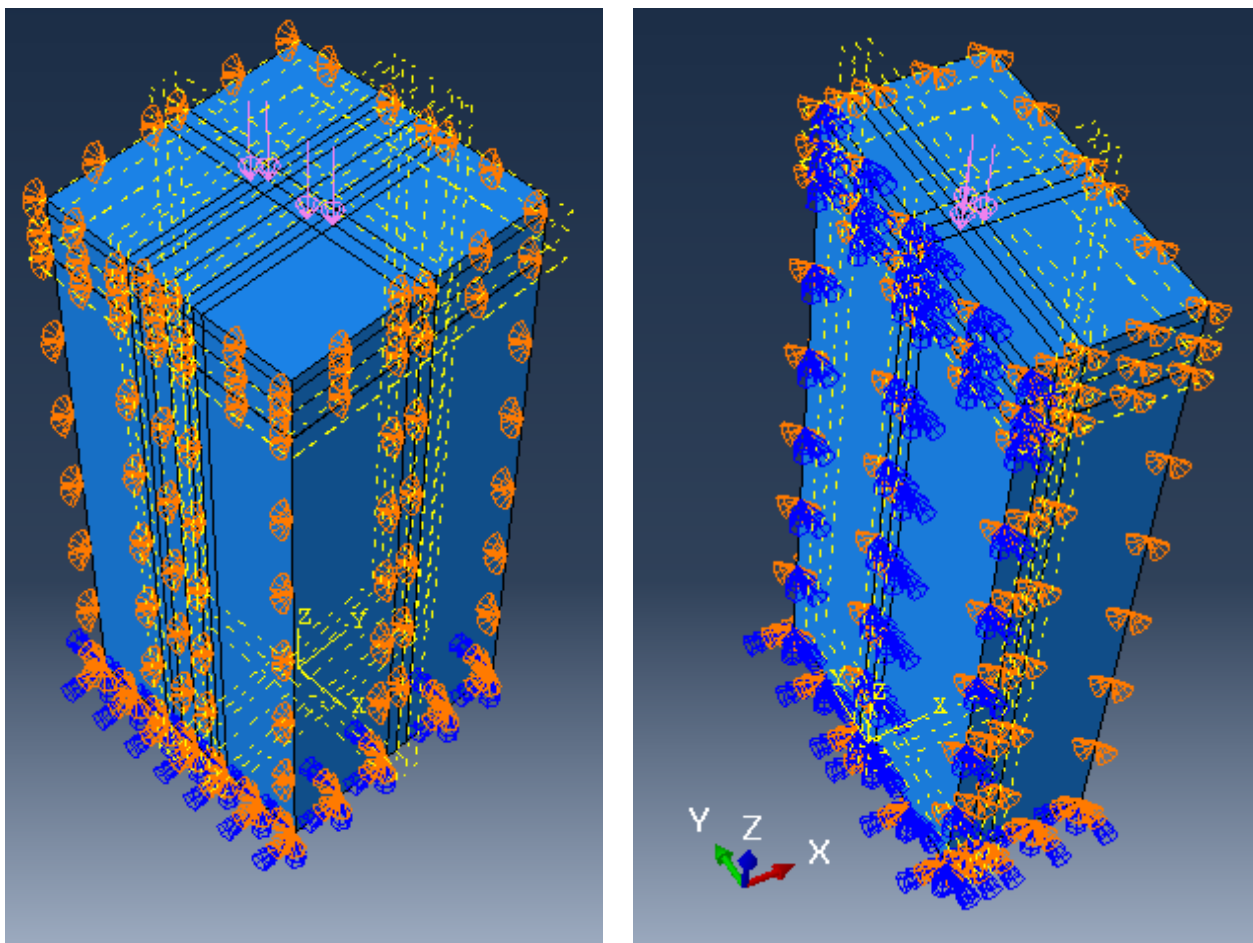


Figura 2. Modelo de pavimento com representação 3D e 3D axissimétrico (AUTORES, 2024).

As condições de contorno foram aplicadas para simular o comportamento do pavimento quando submetido ao carregamento. As bordas do modelo foram restritas para simular a continuidade infinita do pavimento. A base do subleito foi fixada em todos os graus de liberdade para simular a condição de engaste. Para o cálculo da espessura do subleito, bem como das dimensões de comprimento e largura do pavimento, foi adotada a metodologia descrita por Franco (2004) para pavimentos rodoviários. Nessa abordagem, a espessura do subleito foi definida como aproximadamente, 40 vezes o raio correspondente à área de contato, assumida como circular para simplificação do cálculo. As dimensões radiais, correspondentes à largura e ao comprimento do pavimento, foram estabelecidas em 20 vezes o raio definido. Quanto à configuração da malha utilizada na simulação numérica por elementos finitos, Zanetti (2008) ressalta a importância da otimização da malha. Esse processo permite a redução do tamanho dos elementos da malha sem que haja prejuízo à exatidão dos resultados obtidos nas análises.

Análise e Pós-processamento

Foram realizadas análises estáticas para avaliar as deformações resultantes. Os resultados foram extraídos especificamente no topo do subleito (embaixo da roda e entre rodas), local crítico para avaliação da integridade estrutural do pavimento (ZANETTI, 2008). Para evitar possíveis distorções



presentes nas interfaces entre as camadas, optou-se por extrair os valores de deformação a uma distância de 0,5 cm abaixo da interface entre a sub-base e o subleito. Essa abordagem foi escolhida para evitar potenciais distorções nos dados que poderiam ser causadas pelas variações materiais na interface. As análises de pós-processamento incluíram a visualização da distribuição de deformação, além de verificar a adequação das espessuras das camadas e a capacidade do pavimento em suportar as cargas aplicadas em um modelo 3D e um modelo 3D axissimétrico. O modelo foi comparado com resultados de modelos reproduzidos no *software* AEMC.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise da *Mesh* (Malha) e Tempo de Processamento – Modelo 3D e Modelo 3D Axissimétrico

A análise das deformações no topo do subleito revelou que a variação no tamanho da malha tem um impacto limitado nos resultados quando o tamanho é igual ou superior a 15 cm. Conforme evidencia a Figura 3, as deformações medidas diretamente abaixo da carga da roda e no ponto entre as rodas permanecem consistentes para todos os tamanhos de malha. Ficou evidente que malhas mais finas não resultam em variações significativas das deformações no topo do subleito (entre rodas e embaixo da roda) para o intervalo de tamanho testado.

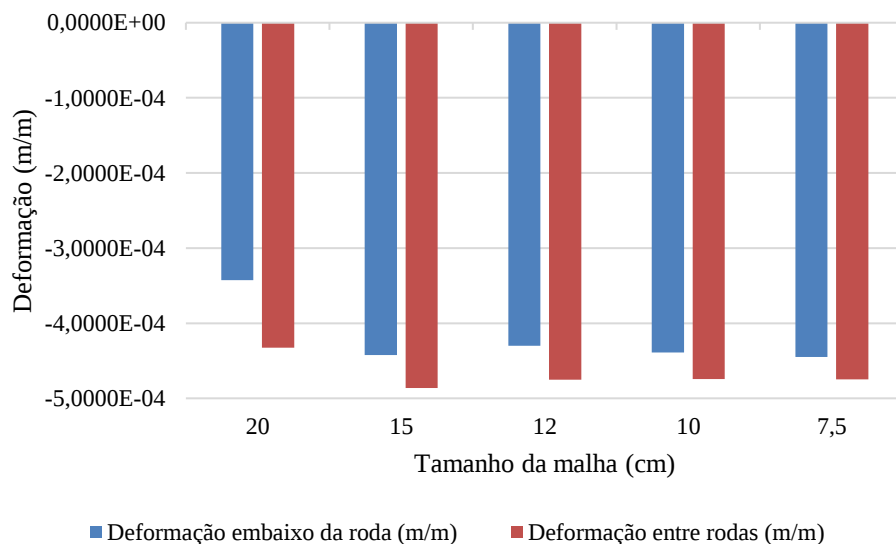


Figura 3. Deformação no topo do subleito – Modelo 3D (AUTORES, 2024).

No entanto, foi percebido que o tamanho da malha influencia diretamente o tempo de processamento computacional, com tempos mais longos associados a malhas mais discretizadas. Portanto, recomenda-se uma malha de 15 cm (do tipo tetraédrica) como uma escolha otimizada para balancear precisão e eficiência em simulações computacionais de pavimentos aeroportuários utilizando o *software* ABAQUS 2020. Os dados de tempo de simulação estão expostos na Tabela 3.



Tabela 3. Tempo de simulação (AUTORES, 2024).

Tamanho da malha (cm)	Tempo de simulação (s)	
	Modelo 3D	Modelo 3D Axissimétrico
20	32	10
15	73	29
12	151	71
10	881	164
7,5	2441	1233

Comparativo entre Deformações no Topo do Subleito para Modelo 3D e Modelo 3D Axissimétrico

Embora as simulações individuais nos modelos 3D e 3D axissimétricos apresentem tempos de processamento de 73 s e 29 s, respectivamente, essa diferença torna-se considerável quando for executado um elevado número de simulações, como é frequentemente o caso em estudos que empregam Redes Neurais Artificiais (RNA). Nesse contexto, a eficiência computacional é afetada e o tempo acumulado economizado em simulações axissimétricas pode contribuir para a viabilidade e velocidade de processamento. Portanto, ao planejar estudos envolvendo múltiplas simulações, a escolha entre um modelo 3D e sua versão axissimétrica pode impactar não apenas a precisão dos dados, mas também a eficiência do tempo do processo de análise.

Os valores de deformação obtidos pelo modelo 3D foram $-4,4254\text{E-}04$ m/m embaixo da roda e $-4,8630\text{E-}04$ m/m entre rodas, enquanto o modelo 3D axissimétrico mostrou $-4,2125\text{E-}04$ m/m e $-4,8478\text{E-}04$ m/m, respectivamente. A Tabela 4 resume o comparativo entre os métodos de análise incluindo o *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) v.2.4.6.

Tabela 4. Comparativo entre modelos (AUTORES, 2024).

Modelo/Software	Deformação (m/m) $\times 10^{-4}$		Diferença (%) entre deformações		Tempo de processamento (s)
	Embaixo da roda	Entre rodas	Embaixo da roda	Entre rodas	
3D	-4,4254	-4,8630	-	-	73
3D axissimétrico	-4,2125	-4,8478	4,81	0,31	29
AEMC	-5,1661	-4,9133	-16,74	-1,03	0,004

A diferença entre os dois modelos é de aproximadamente 4,8% embaixo da roda e 0,3% entre rodas. Embora as diferenças percentuais sejam pequenas, em termos de dimensionamento de pavimentos, mesmo pequenas variações podem influenciar a previsão da vida útil do pavimento. Ao considerar que a vida útil do pavimento é proporcional à capacidade do pavimento de resistir a deformações sob carga, uma diferença de 4,8% na deformação pode levar a uma alteração na previsão do número de coberturas (passagens de aeronaves) que o pavimento pode suportar antes de atingir o critério de falha.

Em resumo, cada modelo apresenta vantagens e desvantagens em termos de deformação e tempo de processamento. O modelo 3D axissimétrico e o AEMC são mais eficientes em termos de tempo de processamento, mas apresentam maior deformação em comparação com o modelo 3D. Considerou-se o modelo 3D como a referência, pois por apresentar maior quantidade de nós e consequentemente maior quantidade de iterações e equações diferenciais a serem resolvidas, a exatidão nos valores



deformação podem ser alcançadas. Portanto, a escolha do modelo apropriado para o projeto de pavimentação aeroportuária dependerá das necessidades específicas, como a capacidade de carga das aeronaves, o volume de tráfego, a frequência de manutenção necessária e os recursos computacionais disponíveis. Essas prioridades determinarão qual modelo pode oferecer o melhor equilíbrio entre precisão e eficiência para um projeto específico.

CONCLUSÃO

Esse estudo destacou a importância da modelagem de simulação apropriada para o cálculo da deformação no topo subleito em pavimentos aeroportuários, enfatizando a eficiência computacional. A comparação entre os modelos 3D, 3D axissimétrico e o *software* AEMC possibilitou verificar como diferentes abordagens podem influenciar os resultados da deformação causada no topo do subleito, parâmetro importante para a avaliação da vida útil dos pavimentos, já que esse parâmetro é utilizado no dimensionamento do pavimento.

Esses resultados evidenciaram a relevância de selecionar uma metodologia de simulação adequada que não só fornece resultados satisfatórios, mas também otimiza o uso de recursos computacionais. Isso é pertinente quando a simulação é aplicada em escala, como em análises iterativas ou na alimentação de dados para Redes Neurais Artificiais, nas quais o volume de dados e o tempo de processamento (a depender da quantidade de dados disponíveis) se tornam fatores críticos. Portanto, enquanto o AEMC fornece uma base para comparação, pois é um *software* consagrado na análise de tensão e deformação de pavimentos, os modelos 3D e 3D axissimétrico aplicados no ABAQUS 2020 demonstram ser alternativas eficientes, oferecendo uma alternativa favorável entre exatidão e eficiência computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMC: versão 2.4.6 [software]. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2023.
- Franco, F.A.C.P. Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2007.
- Garg, N., Kazmee, H., Ricalde, L., & Parsons, T. 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. 2018.
- Hernandez, J. A., & Al-Qadi, I. L. Airfield pavement response caused by heavy aircraft takeoff: Advanced modeling for consideration of wheel interaction. *Transportation Research Record*, 2471(1), 40-47. 2015.
- Heymsfield, E. e Tingle, J. State of the practice in pavement structural design/analysis codes relevant to airfield pavement design. *Engineering Failure Analysis*, 105, 12–24. 2019.
- Kim, M. Análise tridimensional de elementos finitos de pavimentos flexíveis considerando o comportamento não linear da fundação do pavimento. dissertação de doutorado, Universidade de Illinois em UrbanaChampaign. 2007.
- Myers, L. A., Roque, R., & Birgisson, B. Use of two-dimensional finite element analysis to represent bending response of asphalt pavement structures. *International Journal of Pavement Engineering*. 2001.
- Oliveira, F. H. L. Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação. 178 f. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2016.
- Raposo, S. Pavimentos Rodoviários: Análise Estrutural e Desempenho. 1ª ed. Lisboa: Editora Ex-Libris, 2017.



Ramos, B. A. S., Lima, D. C., Pitanga, H. N., e Silva, T. O. Aplicação de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA ao Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek. TRANSPORTES, 25(4), 57-67. 2017.

Rezende, C. W. de A., & Vicentini, D. F. Estudo da influência do a380 sobre pavimentos flexíveis aeroportuários nas condições de contorno Study of the influence of a380 on airport flexible sidewalks under boundary conditions. Brazilian Journal of Development, 7(3), 28817-28836. 2021.

Shafabakhsh, G. A., Kashi, E., & Akbari, A. 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. 2016.

Zanetti, F. S. O uso de redes neurais artificiais como ferramenta para auxiliar na determinação da vida útil de pavimentos flexíveis (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 2008.