

ESTADO DA ARTE DA AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS: DA TRANSIÇÃO DO MÉTODO ACN/PCN PARA ACR/PCR

STATE OF THE ART IN AIRPORT PAVEMENT ASSESSMENT: FROM
THE TRANSITION OF THE ACN/PCN METHOD TO THE ACR/PCR
METHOD

Laiana Alves Trindade Araujo

lat3@discente.ifpe.edu.br

Mario José Ribeiro Da Silva

marioribeiro@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

A crescente evolução das aeronaves e o aumento das demandas operacionais dos aeroportos têm impulsionado o desenvolvimento de metodologias mais precisas para a avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos aeroportuários. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a evolução dos métodos de avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários, com enfoque na transição do sistema Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number para o sistema Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica de natureza qualitativa, baseada na análise de documentos técnicos, normas, manuais e publicações científicas relacionadas à engenharia aeroportuária. Os resultados demonstraram que o método tradicional contribuiu significativamente para a padronização internacional da avaliação da capacidade dos pavimentos, porém apresenta limitações decorrentes de sua abordagem predominantemente empírica. Em contrapartida, a metodologia mais recente incorpora conceitos mecanístico-empíricos, propriedades mecânicas dos materiais e modelos de dano acumulado, proporcionando avaliações mais compatíveis com o comportamento estrutural real dos pavimentos. Conclui-se que a adoção da nova metodologia representa um avanço significativo para a engenharia aeroportuária, contribuindo para avaliações mais precisas, melhor planejamento das intervenções de manutenção e gestão mais eficiente da infraestrutura aeroportuária.

Palavras-chave: Pavimentos aeroportuários; ACR/PCR; ACN/PCN; Avaliação estrutural; Engenharia aeroportuária.

ABSTRACT

The continuous evolution of aircraft and the increasing operational demands of airports have driven the development of more accurate methodologies for evaluating the structural capacity of airport pavements. In this context, this study aimed to analyze

the evolution of airport pavement structural evaluation methods, focusing on the transition from the Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number system to the Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating system. The research was conducted through a qualitative bibliographic review based on the analysis of technical documents, standards, manuals, and scientific publications related to airport engineering. The results showed that the traditional method played a significant role in the international standardization of pavement capacity assessment; however, it presents limitations associated with its predominantly empirical approach. In contrast, the more recent methodology incorporates mechanistic-empirical concepts, material mechanical properties, and cumulative damage models, providing evaluations that are more consistent with the actual structural behavior of pavements. It is concluded that the adoption of the new methodology represents a significant advancement in airport engineering, contributing to more accurate assessments, improved maintenance planning, and more efficient airport infrastructure management.

Keywords: Airport pavements; ACR/PCR; ACN/PCN; Structural evaluation; Airport engineering.

1 INTRODUÇÃO

O transporte aéreo desempenha papel estratégico no desenvolvimento econômico e na integração entre regiões, exigindo que a infraestrutura aeroportuária acompanhe o crescimento da demanda operacional. Nesse contexto, os pavimentos aeroportuários assumem função essencial para a segurança e a eficiência das operações, sendo responsáveis por suportar cargas elevadas e repetitivas impostas pelas aeronaves ao longo de sua vida útil.

Durante décadas, a avaliação da capacidade estrutural desses pavimentos foi realizada por meio do sistema Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number (ACN/PCN), desenvolvido pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) com o objetivo de padronizar a compatibilidade entre aeronaves e pavimentos em aeroportos de diferentes países. Embora amplamente utilizado, esse método apresenta limitações decorrentes de sua abordagem predominantemente empírica, baseada em parâmetros simplificados para representar o comportamento estrutural dos materiais.

A evolução das aeronaves, o aumento das cargas por eixo e a crescente complexidade das operações aeroportuárias impulsionaram o desenvolvimento de metodologias mais avançadas para avaliação estrutural. Como resposta a essa necessidade, a ICAO promoveu a transição para o sistema Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating (ACR/PCR), fundamentado em conceitos mecanístico-empíricos e na análise do dano acumulado provocado pelo tráfego aeronáutico. Diferentemente do método anterior, o novo sistema considera as propriedades mecânicas dos materiais, a resposta estrutural das camadas do pavimento e a composição real do tráfego, proporcionando avaliações mais compatíveis com as condições operacionais dos aeroportos (FAA, 2022; ICAO, 2022).

Segundo Castro e Oliveira (2024), a adoção do sistema ACR/PCR representa uma das mais significativas mudanças recentes na engenharia aeroportuária, uma vez que amplia a capacidade de análise estrutural dos pavimentos e fornece subsídios mais consistentes para o planejamento da manutenção e da gestão da infraestrutura. Além disso, estudos recentes indicam que a nova metodologia permite estimativas mais realistas da vida útil dos pavimentos e dos efeitos provocados pelo tráfego de diferentes tipos de aeronaves (WHITE, 2024).

Diante desse cenário, torna-se relevante compreender os fundamentos que motivaram a substituição do sistema ACN/PCN e os impactos decorrentes da implementação do método ACR/PCR. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a transição entre esses sistemas de classificação estrutural, apresentando seus fundamentos teóricos, identificando suas principais diferenças metodológicas e discutindo as contribuições do método ACR/PCR para a avaliação, o gerenciamento e a manutenção dos pavimentos aeroportuários.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentos aeroportuários: conceitos e classificação

Os pavimentos aeroportuários constituem a principal infraestrutura de suporte às operações de pouso, decolagem e movimentação de aeronaves em solo. Sua função é distribuir adequadamente as cargas transmitidas pelos trens de pouso para as camadas inferiores da estrutura, garantindo condições adequadas de segurança, conforto operacional e durabilidade ao longo da vida útil do pavimento.

Diferentemente dos pavimentos rodoviários, os pavimentos aeroportuários estão sujeitos a cargas significativamente mais elevadas e concentradas, decorrentes do peso das aeronaves e das configurações específicas dos conjuntos de rodas. Além disso, as solicitações repetidas provocadas pelo tráfego aéreo podem gerar mecanismos de deterioração estrutural relacionados à fadiga dos materiais e à deformação permanente das camadas constituintes (HORONJEFF et al., 2010).

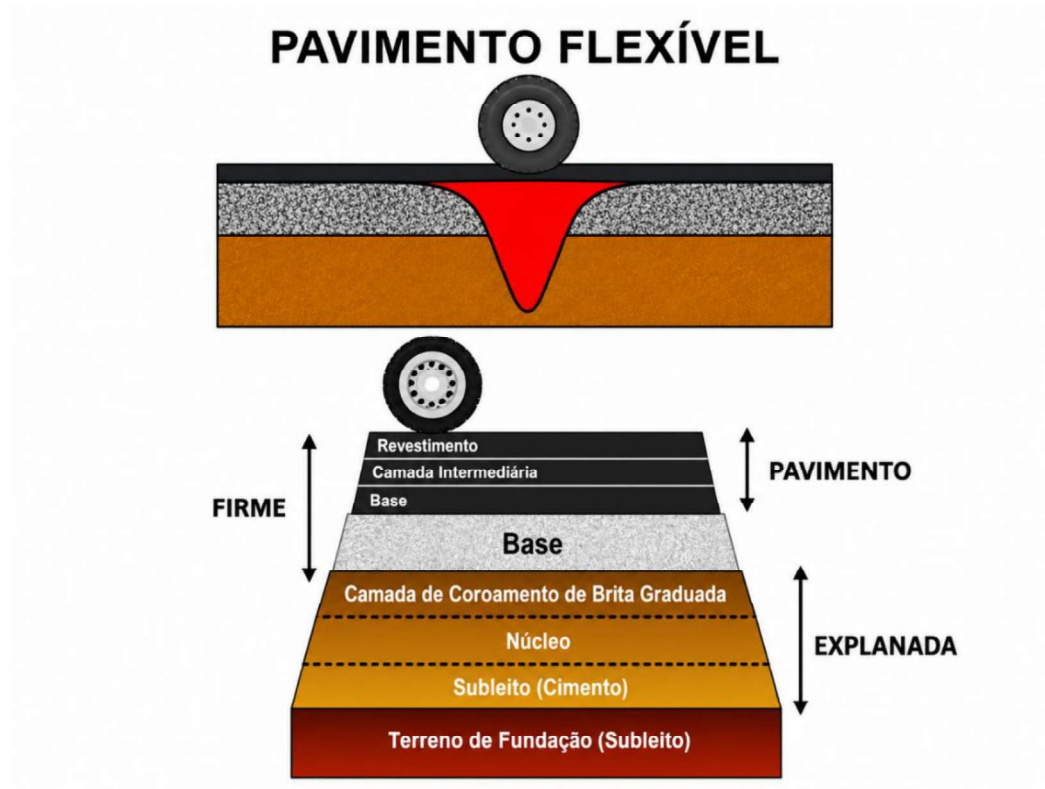
De forma geral, os pavimentos aeroportuários podem ser classificados em flexíveis e rígidos. Os pavimentos flexíveis são compostos por camadas de revestimento asfáltico, base, sub-base e subleito, distribuindo gradualmente as tensões geradas pelas cargas aplicadas. Já os pavimentos rígidos utilizam placas de concreto de cimento Portland como principal elemento estrutural, transferindo as cargas para áreas maiores do subleito por meio da elevada rigidez do material (BALBO, 2009).

Independentemente da tipologia adotada, o desempenho estrutural do pavimento depende diretamente das propriedades mecânicas dos materiais empregados em cada camada e da capacidade de suporte do subleito. Segundo Huang (2004), o comportamento dessas estruturas pode ser representado por sistemas multicamadas,

nos quais as tensões e deformações produzidas pelo carregamento são distribuídas progressivamente em profundidade.

A Figura 1 apresenta uma representação simplificada da estrutura típica de um pavimento aeroportuário flexível e da distribuição das tensões produzidas pela carga aplicada por uma aeronave.

Figura 1 – Estrutura típica de um pavimento aeroportuário flexível e distribuição das tensões



Fonte: Adaptado de Huang (2004) e FAA (2022).

Conforme ilustrado na Figura 1, as cargas aplicadas pelas aeronaves são distribuídas progressivamente entre as diferentes camadas do pavimento, reduzindo os níveis de tensão transmitidos ao subleito. Esse comportamento constitui um dos princípios fundamentais do dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Aplicada e a área de contato do pneu com o revestimento. Essa relação permite compreender como a intensidade das tensões varia em função das características do carregamento, sendo expressa pela Equação (1).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Onde:

σ = tensão aplicada (MPa);

P = carga aplicada pela roda da aeronave (N);

A = área de contato entre o pneu e o pavimento (m²).

Observa-se que, para uma mesma área de contato, o aumento da carga aplicada resulta em maiores tensões transmitidas às camadas estruturais do pavimento. De forma análoga, a redução da área de contato dos pneus também eleva as tensões atuantes, influenciando diretamente o desempenho estrutural e os mecanismos de deterioração do pavimento ao longo de sua vida útil.

2.2 Sistema Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number (ACN/PCN)

O sistema Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number (ACN/PCN) foi desenvolvido pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) com o objetivo de estabelecer um procedimento padronizado para a avaliação da compatibilidade entre aeronaves e pavimentos aeroportuários. Desde sua implementação, o método tornou-se a principal referência internacional para a divulgação da capacidade estrutural dos pavimentos, permitindo que operadores, projetistas e autoridades aeronáuticas utilizassem uma linguagem comum para avaliar a viabilidade das operações aeroportuárias (ICAO, 2022).

O princípio fundamental do sistema consiste na comparação entre o Aircraft Classification Number (ACN), que representa o efeito relativo de uma aeronave sobre um pavimento, e o Pavement Classification Number (PCN), que expressa a capacidade estrutural da infraestrutura aeroportuária. De forma geral, considera-se que uma aeronave pode operar sem restrições quando seu valor de ACN é igual ou inferior ao PCN publicado para o pavimento. Essa abordagem simplificada contribuiu para a ampla aceitação do método em aeroportos de diferentes portes, tornando-o um importante instrumento para o gerenciamento operacional da infraestrutura aeronáutica (HORONJEFF et al., 2010; FAA, 2021).

A determinação dos valores de ACN e PCN foi historicamente baseada em metodologias de caráter predominantemente empírico. Para pavimentos flexíveis, as análises estruturais utilizavam parâmetros derivados do California Bearing Ratio (CBR), enquanto os pavimentos rígidos eram avaliados a partir das formulações clássicas desenvolvidas por Westergaard para placas de concreto apoiadas sobre fundação elástica. Embora essas abordagens tenham representado um avanço significativo para a época, elas foram concebidas em um contexto de limitada capacidade computacional e reduzida disponibilidade de ferramentas para modelagem estrutural avançada (HUANG, 2004; BALBO, 2009).

Com a evolução das aeronaves e o aumento progressivo das cargas operacionais, tornou-se evidente que os métodos tradicionais apresentavam limitações para representar adequadamente o comportamento real dos pavimentos aeroportuários.

Conforme destacam Huang (2004) e White (2024), o sistema ACN/PCN não considera explicitamente a evolução dos danos provocados por carregamentos repetidos nem incorpora, de forma detalhada, as propriedades mecânicas dos materiais que compõem a estrutura do pavimento. Como consequência, pavimentos com diferentes condições estruturais podem apresentar classificações semelhantes, dificultando avaliações mais precisas de desempenho e vida útil.

Diante desse cenário, a comunidade técnica internacional passou a buscar metodologias capazes de incorporar conceitos mecanístico-empíricos e modelos de previsão de desempenho mais representativos das condições reais de operação. Esse movimento culminou na introdução do sistema Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating (ACR/PCR), oficialmente adotado pela ICAO como evolução do método ACN/PCN, proporcionando avaliações estruturais mais compatíveis com as demandas da aviação contemporânea (ICAO, 2022; WHITE, 2024).

$$p = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Onde:

p = pressão de contato (Pa);

P = carga aplicada pelo trem de pouso (N);

A = área de contato entre os pneus e o pavimento (m^2).

A Equação (2) demonstra que o aumento da carga aplicada ou a redução da área de contato dos pneus resulta em maiores pressões transmitidas ao revestimento. Essas pressões são distribuídas pelas camadas estruturais do pavimento até atingirem o subleito, cuja capacidade resistente influencia diretamente o desempenho da estrutura. Embora essa representação seja simplificada, ela auxilia na compreensão dos princípios físicos envolvidos na avaliação estrutural realizada pelo sistema ACN/PCN.

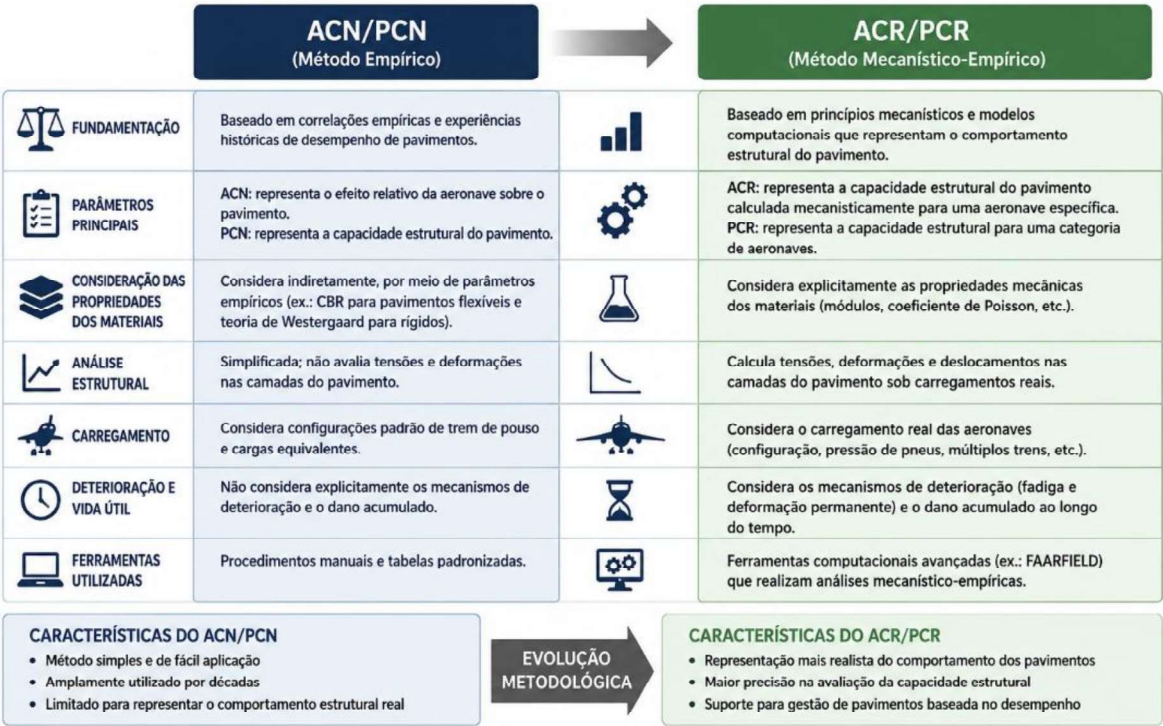
2.3O Novo Método ACR/PCR: Conceituação e Avanços Mecanísticos

A evolução das aeronaves, associada ao aumento das cargas operacionais e à necessidade de maior precisão na avaliação estrutural dos pavimentos aeroportuários, evidenciou limitações do sistema ACN/PCN para representar adequadamente as condições reais de operação. Nesse contexto, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) introduziu o sistema Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating (ACR/PCR), baseado em princípios mecanístico-empíricos e em modelos computacionais capazes de simular o comportamento estrutural dos pavimentos de forma mais realista (ICAO, 2022).

Diferentemente do método ACN/PCN, fundamentado predominantemente em procedimentos empíricos, o sistema ACR/PCR considera explicitamente as

propriedades mecânicas dos materiais, as características geométricas das camadas do pavimento e as condições efetivas de carregamento impostas pelas aeronaves. Essa abordagem permite avaliar de forma mais consistente a interação entre a estrutura do pavimento e o tráfego aeronáutico, fornecendo resultados mais compatíveis com o desempenho observado em campo (ARMENI; LOIZOS, 2022; WHITE, 2024).

Figura 2 – Comparação conceitual entre os sistemas ACN/PCN e ACR/PCR.



Fonte: Adaptado de ICAO (2022) e FAA (2022).

A principal inovação do sistema ACR/PCR consiste na utilização de análises mecanístico-empíricas para estimar a resposta estrutural do pavimento sob carregamentos repetidos. Nessa metodologia, as tensões, deformações e deslocamentos desenvolvidos nas diferentes camadas são avaliados por meio de modelos matemáticos e computacionais, permitindo uma representação mais fiel das condições de operação aeroportuária. Segundo a FAA (2022), essa abordagem possibilita avaliar não apenas a capacidade estrutural imediata do pavimento, mas também sua evolução ao longo da vida útil.

Entre as ferramentas utilizadas nesse processo destaca-se o FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design), software desenvolvido pela Federal Aviation Administration para o dimensionamento e a avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários. O programa utiliza modelos de análise multicamadas e critérios mecanístico-empíricos para estimar o desempenho estrutural frente às diferentes configurações de aeronaves e condições de tráfego, constituindo

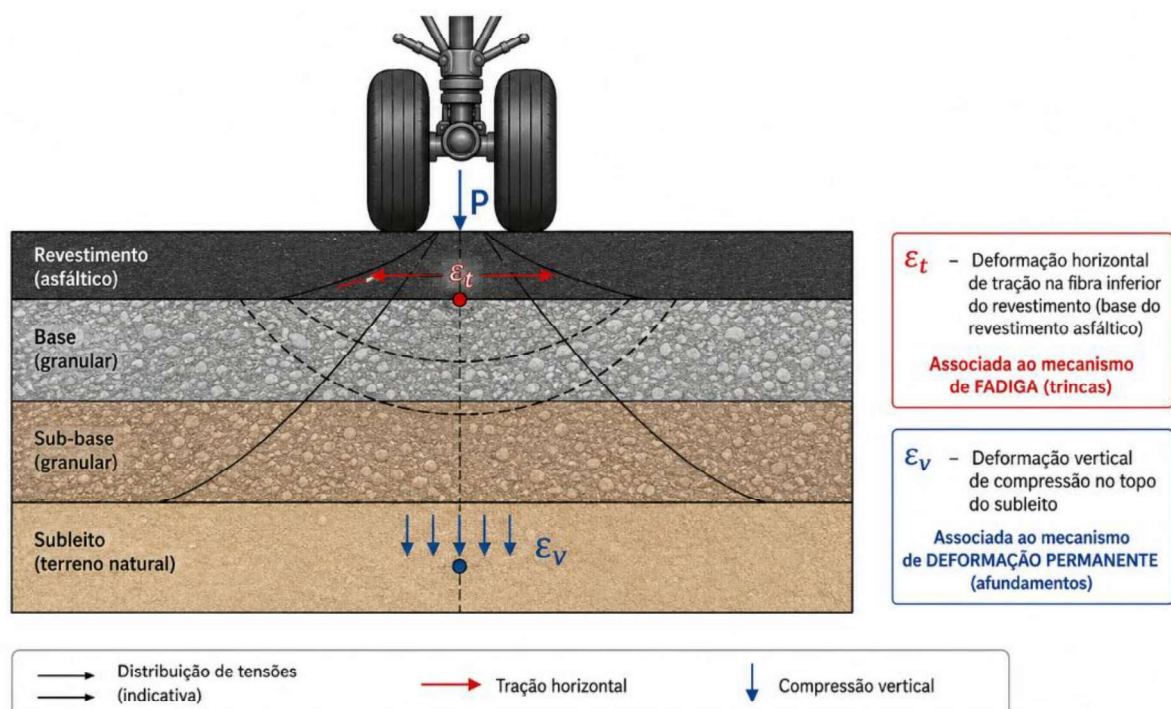
atualmente uma das principais referências internacionais para projetos aeroportuários (FAA, 2022; CASTRO; OLIVEIRA, 2024).

A adoção do sistema ACR/PCR representa, portanto, uma mudança de paradigma na avaliação da capacidade operacional dos pavimentos aeroportuários. Ao incorporar conceitos relacionados ao comportamento estrutural dos materiais e aos mecanismos de deterioração induzidos pelo tráfego, o método permite análises mais precisas e compatíveis com as exigências da aviação contemporânea. Esses mecanismos de deterioração e os critérios utilizados para estimar o dano acumulado são apresentados na seção seguinte.

2.4 Mecanismos de Deterioração: Fadiga e Deformação Permanente

A avaliação estrutural dos pavimentos aeroportuários modernos está diretamente associada à compreensão dos mecanismos de deterioração provocados pelas sucessivas aplicações de carga das aeronaves. Diferentemente das abordagens empíricas tradicionais, os métodos mecanístico-empíricos buscam representar o comportamento real da estrutura do pavimento por meio da análise das tensões, deformações e deslocamentos desenvolvidos nas diferentes camadas. Essa abordagem permite estimar a evolução do dano ao longo da vida útil do pavimento e constitui a base dos procedimentos atualmente empregados pelo sistema ACR/PCR (FAA, 2022; WHITE, 2024).

Figura 3 – Tensões e deformações críticas em pavimentos flexíveis submetidos ao carregamento de aeronaves.



Fonte: Elaborado pela autora utilizando inteligência artificial generativa, 2026.

Conforme ilustrado na Figura 3, duas respostas estruturais são particularmente importantes na análise mecanístico-empírica dos pavimentos flexíveis: a deformação horizontal de tração na base do revestimento asfáltico (ϵ_t) e a deformação vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v). A primeira está associada ao desenvolvimento de trincas por fadiga nas camadas asfálticas, enquanto a segunda está relacionada à acumulação de deformações permanentes e à formação de afundamentos ao longo do tempo (HUANG, 2004; BALBO, 2009).

A determinação dessas deformações depende das propriedades mecânicas dos materiais que compõem a estrutura do pavimento. Nesse contexto, a Lei de Hooke estabelece a relação fundamental entre tensão e deformação para materiais com comportamento elástico, sendo expressa por:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

Onde:

σ = tensão aplicada;

E = módulo de elasticidade do material;

ϵ = deformação específica.

onde σ representa a tensão aplicada, E corresponde ao módulo de elasticidade do material e ϵ representa a deformação específica. Essa relação constitui uma das bases das análises mecanísticas utilizadas para estimar a resposta estrutural das camadas do pavimento sob carregamentos repetidos.

Para os materiais granulares e para o subleito, um dos parâmetros mais utilizados na caracterização estrutural é o Módulo de Resiliência (MR), que representa a capacidade do material de recuperar deformações após a remoção das cargas. Em análises preliminares, o MR pode ser estimado a partir do Índice California Bearing Ratio (CBR) por meio da seguinte correlação:

$$MR = 1500 \times CBR \quad (4)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência do material (psi);

CBR = California Bearing Ratio (%).

em que MR é expresso em psi e CBR corresponde ao índice de suporte do material. Embora amplamente utilizada em avaliações simplificadas, essa correlação

vem sendo progressivamente substituída por ensaios laboratoriais específicos capazes de determinar diretamente o comportamento resiliente dos materiais (HUANG, 2004).

Nos pavimentos rígidos, a análise estrutural clássica baseia-se na teoria desenvolvida por Westergaard para placas de concreto apoiadas sobre fundação elástica. Um dos parâmetros fundamentais desse modelo é o raio de rigidez relativa da placa, calculado por:

$$l = [Eh^3 / 12(1 - \mu^2) k]^{1/4} \quad (5)$$

Onde:

l = raio de rigidez relativa da placa;

E = módulo de elasticidade do concreto;

h = espessura da placa;

μ = coeficiente de Poisson;

k = coeficiente de reação do subleito.

onde l representa o raio de rigidez relativa, E o módulo de elasticidade do concreto, h a espessura da placa, μ o coeficiente de Poisson e k o coeficiente de reação do subleito. Esse parâmetro expressa a capacidade da placa em distribuir as tensões provenientes das cargas aplicadas, influenciando diretamente seu desempenho estrutural (BALBO, 2009).

A repetição das cargas das aeronaves ao longo do tempo promove a acumulação progressiva de danos na estrutura do pavimento. Nas camadas asfálticas, esse processo manifesta-se principalmente por meio da fadiga, caracterizada pelo surgimento e propagação de trincas decorrentes da repetição de tensões de tração. Paralelamente, ocorre a deformação permanente, associada ao acúmulo de deformações plásticas nas camadas granulares e no subleito, resultando em afundamentos e perda de regularidade superficial (HUANG, 2004; FAA, 2022).

Para quantificar o efeito combinado das diferentes solicitações ao longo da vida útil do pavimento, os métodos mecanístico-empíricos utilizam conceitos de dano acumulado baseados na Regra de Miner. Segundo essa abordagem, cada passagem de aeronave consome uma parcela da vida estrutural disponível, sendo o dano total representado pelo Cumulative Damage Factor (CDF), calculado por:

$$CDF = \sum (n_i / N_i) \quad (6)$$

Onde:

CDF = fator de dano acumulado;

n_i = número de aplicações de carga observadas;

N_i = número admissível de aplicações até a falha;

n = número de condições de carregamento analisadas.

onde n_i representa o número de aplicações de carga observadas para uma determinada condição e N_i corresponde ao número admissível de aplicações antes da ocorrência da falha estrutural. Quando o valor de CDF se aproxima da unidade, considera-se que a estrutura atingiu sua condição limite de desempenho (FAA, 2022; ARMENI; LOIZOS, 2022).

Dessa forma, a consideração explícita das propriedades mecânicas dos materiais, dos mecanismos de deterioração e do dano acumulado constitui um dos principais avanços dos métodos mecanístico-empíricos em relação às abordagens tradicionais. Esses conceitos permitem que o sistema ACR/PCR represente de maneira mais realista o comportamento estrutural dos pavimentos aeroportuários, fornecendo suporte técnico mais consistente para a gestão, manutenção e planejamento da infraestrutura aeroportuária.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza qualitativa, com objetivos exploratórios e descritivos, desenvolvido por meio de revisão bibliográfica. Segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica permite reunir, analisar e interpretar conhecimentos produzidos sobre determinado tema, contribuindo para a compreensão do estado atual do conhecimento em uma área específica.

Neste trabalho, a revisão foi direcionada à análise da evolução dos métodos de avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários, com ênfase na transição do sistema Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number (ACN/PCN) para o sistema Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating (ACR/PCR). O estudo buscou identificar os principais fundamentos teóricos, conceitos estruturais, vantagens e limitações associados a cada metodologia, bem como os impactos dessa mudança para a gestão da infraestrutura aeroportuária.

3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O levantamento bibliográfico foi realizado a partir da consulta a documentos técnicos, normas, manuais e publicações científicas relacionados à engenharia aeroportuária e ao dimensionamento de pavimentos. Entre as principais fontes utilizadas destacam-se os documentos da International Civil Aviation Organization (ICAO), os manuais da Federal Aviation Administration (FAA), regulamentações da

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), além de livros e artigos científicos especializados em pavimentação aeroportuária.

A seleção do material bibliográfico considerou sua relevância técnica, aderência ao tema proposto e contribuição para a compreensão dos métodos ACN/PCN e ACR/PCR. Também foram priorizadas publicações recentes relacionadas à implementação do novo sistema de classificação de pavimentos aeroportuários e aos conceitos mecanístico-empíricos empregados na avaliação estrutural.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

A pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas principais. Inicialmente, realizou-se o levantamento e a análise da literatura relacionada aos pavimentos aeroportuários e aos métodos de avaliação estrutural historicamente utilizados no setor. Em seguida, foram estudados os fundamentos e as limitações do sistema ACN/PCN, buscando compreender seu funcionamento e sua importância para a aviação civil.

Na terceira etapa, foi realizada a análise do sistema ACR/PCR, destacando seus princípios mecanístico-empíricos, os parâmetros estruturais considerados e as ferramentas computacionais utilizadas em sua aplicação. Por fim, procedeu-se à comparação entre os dois sistemas, identificando suas principais diferenças conceituais e operacionais, bem como os benefícios e desafios associados à adoção da nova metodologia.

Os resultados obtidos foram organizados de forma analítica e interpretativa, permitindo a elaboração de uma síntese crítica sobre a evolução dos métodos de avaliação de pavimentos aeroportuários e suas implicações para a engenharia aeroportuária contemporânea.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DA LITERATURA

4.1 Impacto na Gestão de Pavimentos e Variação da Vida Útil Teórica

A evolução dos métodos de avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários resultou em diferenças significativas entre os sistemas ACN/PCN e ACR/PCR. Enquanto o primeiro foi desenvolvido com base em abordagens predominantemente empíricas, o segundo incorpora conceitos mecanístico-empíricos que permitem representar de forma mais realista o comportamento estrutural dos pavimentos. A Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa dos principais aspectos que diferenciam as duas metodologias.

Tabela 1 – Comparativo Técnico das Diferenças entre os Sistemas ACN/PCN e ACR/PCR

Parâmetro Técnico	Antigo Sistema ACN/PCN	Novo Sistema ACR/PCR	Significado Prático na Engenharia
 Abordagem Científica	Fundamentado predominantemente em métodos empíricos, utilizando conceitos como CBR e teoria de Westergaard.	Fundamentado em metodologia mecanístico-empírica baseada na teoria das Camadas Elásticas (<i>Layered Elastic Design</i> – LED).	Permite representar com maior fidelidade o comportamento estrutural das camadas do pavimento sob carregamentos aeronáuticos.
 Caracterização do Solo	Utilização de parâmetros isolados, como CBR para pavimentos flexíveis e fator de reação k para pavimentos rígidos.	Utilização do Módulo de Resiliência (MR), expresso em MPa, como parâmetro mecânico representativo do subleito.	Substitui ensaios de caráter predominantemente empírico por propriedades elásticas que representam melhor o comportamento do material em serviço.
 Tratamento do Mix de Tráfego	Baseado na definição de uma única "aeronave crítica" representativa do tráfego do aeroporto.	Considera individualmente cada aeronave da frota operacional por meio do <i>Cumulative Damage Factor</i> (CDF).	Possibilita identificar a contribuição específica de cada aeronave para o consumo da vida útil do pavimento.
 Pressão de Pneus	Classificação em quatro categorias discretas (W, X, Y e Z).	Avaliação contínua baseada na pressão efetiva de contato transmitida ao pavimento.	Proporciona maior precisão na avaliação dos efeitos localizados de cisalhamento e deformação superficial.
 Modelos Computacionais	Aplicação do software COMFAA, baseado em procedimentos simplificados de análise.	Aplicação do software FAARFIELD, baseado em análises iterativas de sistemas multicamadas.	Permite representar adequadamente configurações complexas de trens de pouso e distribuições de carga.
 Ordem de Grandeza Numérica	Escala tradicional com valores relativamente reduzidos (ex.: PCN 70).	Escala ampliada, frequentemente resultando em valores superiores a PCR 400.	Diferença numérica introduzida para evitar interpretações equivocadas entre os sistemas antigo e atual.

Fonte: Elaborada pela autora com base em FAA (2022) e Castro e Oliveira (2024).

Os dados apresentados na Tabela 1 evidenciam que a principal diferença entre os sistemas ACN/PCN e ACR/PCR está na forma como a capacidade estrutural dos pavimentos aeroportuários é avaliada. Enquanto o método ACN/PCN foi concebido com base em procedimentos predominantemente empíricos, o sistema ACR/PCR incorpora conceitos mecanístico-empíricos que permitem representar de forma mais realista o comportamento estrutural dos pavimentos submetidos às cargas das aeronaves. De acordo com a ICAO (2022) e a FAA (2022), essa mudança possibilita que a avaliação da capacidade operacional seja fundamentada em parâmetros físicos e mecânicos diretamente relacionados ao desempenho da estrutura.

Outro aspecto relevante refere-se à consideração explícita das propriedades mecânicas dos materiais e das respostas estruturais desenvolvidas nas diferentes camadas do pavimento. Conforme discutido por Armeni e Loizos (2022), a utilização de modelos mecanísticos permite avaliar tensões, deformações e mecanismos de deterioração que não são contemplados de forma direta pelo sistema ACN/PCN. Como consequência, as estimativas obtidas pelo ACR/PCR tendem a apresentar maior compatibilidade com as condições reais de operação observadas nos aeroportos.

Além disso, a incorporação de ferramentas computacionais como o FAARFIELD representa um avanço significativo na análise estrutural dos pavimentos aeroportuários. Segundo a FAA (2022), a utilização desses modelos permite simular diferentes cenários operacionais e configurações de aeronaves, contribuindo para avaliações mais precisas da capacidade estrutural e para o planejamento de intervenções de manutenção e reabilitação. Nesse sentido, o sistema ACR/PCR não apenas moderniza os procedimentos de classificação dos pavimentos, mas também amplia as possibilidades de gestão baseada em desempenho.

4.2 Benefícios da adoção do sistema ACR/PCR

A adoção do sistema Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating (ACR/PCR) representa um avanço significativo para a engenharia aeroportuária, principalmente em função da maior precisão proporcionada pelas avaliações estruturais. Diferentemente do sistema ACN/PCN, cuja metodologia é baseada predominantemente em procedimentos empíricos, o ACR/PCR utiliza conceitos mecanístico-empíricos que permitem representar de forma mais realista o comportamento dos pavimentos submetidos às cargas das aeronaves. De acordo com a ICAO (2022) e a FAA (2022), essa abordagem possibilita avaliações mais compatíveis com as condições operacionais observadas em campo, contribuindo para uma melhor compreensão da capacidade estrutural da infraestrutura aeroportuária.

Outro benefício importante está relacionado à incorporação explícita das propriedades mecânicas dos materiais que compõem o pavimento. Enquanto o sistema ACN/PCN utiliza parâmetros simplificados para representar a capacidade estrutural, o ACR/PCR considera características como módulo de resiliência, espessuras das camadas e propriedades elásticas dos materiais, permitindo análises mais detalhadas das respostas estruturais desenvolvidas sob carregamentos repetidos. Segundo Armeni e Loizos (2022), essa capacidade de representar o comportamento real dos materiais constitui um dos principais fatores responsáveis pela maior confiabilidade das avaliações produzidas pela nova metodologia.

Além disso, o sistema ACR/PCR possibilita a consideração dos mecanismos de deterioração responsáveis pela redução progressiva da capacidade estrutural dos pavimentos aeroportuários. Entre esses mecanismos destacam-se a fadiga das camadas asfálticas e a deformação permanente das camadas granulares e do subleito, fenômenos que influenciam diretamente a vida útil da estrutura. Conforme discutido anteriormente, esses processos podem ser avaliados por meio de parâmetros mecanísticos e modelos de dano acumulado, permitindo estimativas mais consistentes do desempenho estrutural ao longo do tempo (WHITE, 2024).

Outro aspecto relevante refere-se à utilização de ferramentas computacionais avançadas, como o FAARFIELD, desenvolvido pela Federal Aviation Administration (FAA). Por meio dessas ferramentas, torna-se possível simular diferentes combinações de aeronaves, frequências de operação e configurações estruturais, permitindo análises mais precisas da capacidade operacional dos pavimentos. Segundo a FAA (2022), essa abordagem contribui para a redução das incertezas associadas aos processos de dimensionamento, avaliação e planejamento de intervenções de manutenção e reabilitação.

Os benefícios observados no sistema ACR/PCR estão diretamente relacionados à incorporação de parâmetros estruturais que representam de forma mais adequada o comportamento dos pavimentos aeroportuários. Entre esses parâmetros destacam-se o módulo de resiliência dos materiais, as deformações críticas associadas à fadiga e à deformação permanente e os modelos de dano acumulado empregados para estimar a vida útil da estrutura. Conforme ressaltam White (2024) e Castro e Oliveira

(2024), a consideração explícita desses mecanismos permite avaliações mais consistentes da capacidade operacional dos pavimentos, reduzindo as limitações inerentes às abordagens empíricas tradicionalmente utilizadas pelo sistema ACN/PCN.

Sob essa perspectiva, a transição para o ACR/PCR não representa apenas uma atualização metodológica, mas uma mudança na forma de compreender e gerenciar o desempenho estrutural dos pavimentos aeroportuários. Ao possibilitar análises fundamentadas em critérios físicos e mecânicos, a nova metodologia contribui para decisões mais eficientes relacionadas à manutenção, reabilitação e expansão da infraestrutura aeroportuária, fortalecendo a segurança operacional e promovendo uma gestão mais sustentável dos ativos aeroportuários.

4.3 Desafios Práticos na Implantação e Calibração de Modelos Locais

Apesar das vantagens técnicas proporcionadas pelo sistema ACR/PCR, sua implementação apresenta desafios que devem ser considerados pelos gestores aeroportuários e órgãos reguladores. A principal dificuldade está relacionada à necessidade de informações estruturais mais detalhadas sobre os pavimentos, uma vez que a metodologia mecanístico-empírica depende de dados referentes às espessuras das camadas, propriedades mecânicas dos materiais, condições do subleito e características operacionais do tráfego aeronáutico. Diferentemente do sistema ACN/PCN, que pode ser aplicado com base em parâmetros simplificados, o ACR/PCR exige uma base de dados mais completa e atualizada para produzir resultados confiáveis (ICAO, 2022; FAA, 2022).

Outro desafio refere-se à obtenção dos parâmetros necessários para a caracterização estrutural dos pavimentos. A determinação de propriedades como módulo de resiliência, módulo de elasticidade e demais parâmetros utilizados nos modelos mecanístico-empíricos frequentemente requer a realização de ensaios laboratoriais e investigações de campo específicas. Segundo Castro e Oliveira (2024), a indisponibilidade dessas informações pode comprometer a precisão das análises e dificultar a aplicação plena da metodologia em aeroportos que não possuem histórico técnico consolidado de seus pavimentos.

A utilização de ferramentas computacionais avançadas também representa um fator relevante no processo de transição entre os sistemas. Embora softwares como o FAARFIELD ampliem significativamente a capacidade de análise estrutural, sua utilização demanda conhecimentos específicos relacionados à engenharia de pavimentos aeroportuários e à interpretação dos resultados gerados pelos modelos. Nesse contexto, a capacitação técnica das equipes responsáveis pela gestão da infraestrutura torna-se um elemento fundamental para garantir a correta aplicação da metodologia e a confiabilidade das avaliações realizadas (FAA, 2022).

Além dos aspectos técnicos, a implementação do ACR/PCR pode envolver investimentos adicionais relacionados à coleta de dados, realização de ensaios, aquisição de equipamentos e treinamento de pessoal. Em um primeiro momento,

esses custos podem representar uma barreira para alguns operadores aeroportuários, especialmente em aeroportos de menor porte. Entretanto, diversos estudos apontam que a melhoria da precisão das avaliações estruturais e a possibilidade de planejamento mais eficiente das intervenções de manutenção tendem a compensar esses investimentos ao longo do ciclo de vida da infraestrutura (ARMENI; LOIZOS, 2022; WHITE, 2024).

Dessa forma, observa-se que os desafios associados à implementação do sistema ACR/PCR estão relacionados principalmente à disponibilidade de informações técnicas, à necessidade de capacitação profissional e aos investimentos requeridos para adequação dos procedimentos de avaliação estrutural. Contudo, considerando os benefícios proporcionados pela metodologia e as exigências crescentes da aviação moderna, a transição para o novo sistema configura-se como uma evolução necessária para a gestão eficiente e sustentável dos pavimentos aeroportuários.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar a evolução dos métodos de avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários, com enfoque na transição do sistema Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number (ACN/PCN) para o sistema Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating (ACR/PCR). A partir da revisão bibliográfica realizada, foi possível compreender os fundamentos de cada metodologia, bem como identificar as principais mudanças conceituais e operacionais associadas à adoção da nova abordagem proposta pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO).

Os resultados demonstraram que o sistema ACN/PCN desempenhou papel fundamental na padronização internacional da avaliação da capacidade operacional dos pavimentos aeroportuários, constituindo durante décadas a principal referência para a compatibilização entre aeronaves e infraestrutura aeroportuária. Entretanto, observou-se que sua natureza predominantemente empírica apresenta limitações para representar adequadamente o comportamento estrutural dos pavimentos submetidos às crescentes demandas operacionais da aviação contemporânea.

Verificou-se que o sistema ACR/PCR representa uma evolução significativa em relação ao método tradicional ao incorporar conceitos mecanístico-empíricos capazes de considerar explicitamente as propriedades mecânicas dos materiais, os mecanismos de deterioração e os efeitos do dano acumulado ao longo da vida útil dos pavimentos. Além disso, a utilização de ferramentas computacionais avançadas, como o FAARFIELD, possibilita avaliações mais precisas da capacidade estrutural e do desempenho operacional da infraestrutura aeroportuária.

Apesar dos desafios associados à sua implementação, especialmente no que se refere à obtenção de dados estruturais, realização de ensaios e capacitação técnica dos profissionais envolvidos, os benefícios proporcionados pela nova metodologia demonstram sua relevância para a gestão moderna dos pavimentos aeroportuários. Nesse contexto, a adoção do sistema ACR/PCR contribui para avaliações mais

confiáveis, para o planejamento mais eficiente das intervenções de manutenção e para a utilização mais racional dos recursos destinados à infraestrutura aeroportuária.

Conclui-se, portanto, que a transição do sistema ACN/PCN para o ACR/PCR representa não apenas uma atualização metodológica, mas uma mudança de paradigma na avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários. Ao alinhar os procedimentos de classificação aos avanços da engenharia de pavimentos e às demandas atuais da aviação civil, a nova metodologia fortalece a segurança operacional, amplia a eficiência da gestão aeroportuária e fornece bases mais consistentes para o desenvolvimento sustentável da infraestrutura aeronáutica.

6 DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Este trabalho contou com o apoio de ferramentas de inteligência artificial generativa para auxiliar na organização da estrutura textual, revisão gramatical, adequação da linguagem acadêmica e aprimoramento da redação. A seleção das referências bibliográficas, a análise crítica do conteúdo, a interpretação dos resultados e as conclusões apresentadas foram realizadas e validadas pelo autor, que assume integral responsabilidade pelas informações e argumentos expostos neste estudo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Manual de cálculo de PCR de pavimentos aeroportuários**. Brasília: ANAC, 2022.

ARMENI, A.; LOIZOS, A. Preliminary evaluation of the ACR-PCR system for reporting the bearing capacity of flexible airfield pavements. **Transportation Engineering**, v. 8, p. 1-12, 2022.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2022.

CASTRO, C. C. O.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise comparativa entre a determinação do PCN e PCR na avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 34., 2020, Brasília. **Anais [...]** Brasília: ANPET, 2020.

CASTRO, C. O.; OLIVEIRA, F. H. L. Effect of replacing resistance classification methods for flexible airport pavements. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 150, n. 3, p. 04024021, 2024.

CHAVES, J. W. R.; ALMEIDA, L. C.; OLIVEIRA, F. H. L. Simulações de dimensionamento e vida útil de pavimento aeroportuário a partir de segmentos homogêneos retroanalisados por distintos softwares. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32., 2023, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Foz do Iguaçu: ABPv, 2023.

CHAVES, J. W. R.; OLIVEIRA, F. H. L. Impacts of backcalculation software selection on airport flexible pavements using the Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating method. **Transportation Research Record**, v. 2678, p. 415-428, 2024.

CHAVES, J. W. R.; FRANCELINO, C. A.; LEITE, M. A.; ALMEIDA, L. C.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise da condição estrutural de uma pista de pouso e decolagem a partir de dados deflectométricos. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA / REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (ENACOR/RAPV), 2025, Belo Horizonte. **Anais [...]** Belo Horizonte: ABDER/ABPv, 2025.

FABRE, C.; VAURS, G. Paradox: why the heaviest commercial airplane remains the most pavement friendly aircraft at large hub airports. In: AIRFIELD AND HIGHWAY PAVEMENTS CONFERENCE, 2019, Chicago. **Proceedings [...]** Chicago: ASCE, 2019. p. 320-331.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Airport pavement design and evaluation** – AC 150/5320-6G. Washington, DC: FAA, 2021.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Standardized method of reporting airport pavement strength – PCR** – AC 150/5335-5D. Washington, DC: FAA, 2022.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Airport pavement management program** – AC 150/5380-7B. Washington, DC: FAA, 2014.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Use of nondestructive testing in the evaluation of airport pavements** – AC 150/5370-11B. Washington, DC: FAA, 2011.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **FAARFIELD 2.1.1** – Airport Pavement Design Software & User Manual. Washington, DC: Federal Aviation Administration, 2022.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **FAARFIELD 2.0** – Airport Pavement Design Software & User Manual. Washington, DC: Federal Aviation Administration, 2023.

HORONJEFF, R.; MCKELVEY, F. X.; SPRULES, W. E.; YOUNG, S. B. **Planning and design of airports**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Aerodrome design manual** – Part 3: Pavements. 3. ed. Montreal: ICAO, 2022.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Procedures for air navigation services** – Aerodromes (Doc 9981). Montreal: ICAO, 2022.

LIMA, J. P.; FONTUL, S.; COUTO, P.; LIMA, R. Avaliação da capacidade de carga de pavimentos aeroportuários – modelação e digitalização em BIM. In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE BUILDING INFORMATION MODELLING, 5., 2023, Guimarães. **Anais [...]** Guimarães: ptBIM, 2023.

OLIVEIRA, F. H. L. **Proposição de estratégias de manutenção de pavimentos aeroportuários baseadas na macrotextura e no atrito**: estudo de caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza. 2009. Tese (Livre-Docência em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SHAHIN, M. Y. **Pavement management for airports, roads and parking lots**. 2. ed. New York: Springer, 2005.

WHITE, G. Critical review and potential improvement of the new international airport pavement strength rating system. **Applied Sciences**, v. 14, n. 18, p. 8325, 2024.