

Evolução dos métodos de classificação de pavimentos aeroportuários: **do sistema ACN/PCN ao ACR/PCR**

THIAGO FIORAVANTI - COORD. DE ENG. - (thiago@lpe.eng.br) — **LPE Engenharia e Consultoria**

RESUMO

OMÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS É ESSENCIAL PARA GARANTIR A COMPATIBILIDADE ENTRE AERONAVES E PISTAS, PRESERVANDO A INTEGRIDADE ESTRUTURAL E A SEGURANÇA OPERACIONAL. DURANTE DÉCADAS, O SISTEMA ACN/PCN (*AIRCRAFT CLASSIFICATION NUMBER/PAVEMENT CLASSIFICATION NUMBER*, EM LÍNGUA INGLESA), PROPOSTO PELA *INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION*, EM LÍNGUA INGLESA, ORGANIZAÇÃO DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL (ICAO) EM 1983, FOI AMPLAMENTE ADOTADO EM TODO O MUNDO. ENTRETANTO, COM O AVANÇO DAS TÉCNICAS DE MODELAGEM NUMÉRICA, DOS MÉTODOS MECANICISTAS E DA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS, VERIFICOU-SE QUE O MODELO ACN/PCN APRESENTAVA LIMITAÇÕES, ESPECIALMENTE QUANTO À REPRESENTATIVIDADE REAL DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES NAS CAMADAS DO PAVIMENTO. EM RESPOSTA, A ICAO INTRODUZIU EM 2020 O NOVO MÉTODO ACR/PCR (*AIRCRAFT CLASSIFICATION RATING/PAVEMENT CLASSIFICATION RATING*), QUE REFORMULA O CONCEITO DE CAPACIDADE ESTRUTURAL COM BASE EM ANÁLISES COMPUTACIONAIS MULTICAMADAS E CRITÉRIOS DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTES. ESTE ARTIGO DISCUTE A EVOLUÇÃO CONCEITUAL ENTRE OS DOIS SISTEMAS, DESCREVE SUAS BASES TEÓRICAS E APRESENTA UM COMPARATIVO TÉCNICO QUE EVIDENCIA AS VANTAGENS DO NOVO MODELO NO CONTEXTO ATUAL DA ENGENHARIA AEROPORTUÁRIA.

PALAVRAS-CHAVE: PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS, ACN/PCN, ACR/PCR, CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento e a avaliação estrutural dos pavimentos aeroportuários representam um dos pilares da engenharia de transportes, dada a elevada magnitude

das cargas transmitidas pelas aeronaves e a necessidade de garantir níveis adequados de segurança e desempenho ao longo da vida útil da infraestrutura (Horonjeff *et al.*, 2010).

Até o início da década de 1980, a avaliação da capacidade de suporte das pistas era feita de forma não padronizada entre os países, o que dificultava a compatibilização entre o peso das aeronaves e a resistência dos pavimentos. Com o intuito de estabelecer uma linguagem técnica universal, a ICAO (1983) introduziu o sistema ACN/PCN (*Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number*), cujo objetivo era permitir que operadores e autoridades aeroportuárias comparassem, de modo simples, a capacidade estrutural de um pavimento com o nível de solicitação gerado por uma aeronave.

Apesar de seu sucesso e ampla difusão, o sistema ACN/PCN baseia-se em simplificações significativas, como o uso de um modelo empírico para diferentes tipos de pavimento e subleito (FAA, 2009). Na prática, tais simplificações conduzem a resultados conservadores ou imprecisos, uma vez que podem não representar adequadamente o comportamento real das estruturas multicamadas submetidas a cargas repetidas.

Com o avanço dos métodos mecanicistas-empíricos e a disseminação de ferramentas de elementos finitos e teorias multicamadas elásticas, surgiu a necessidade de atualizar o método de classificação de pavimentos, refletindo melhor a realidade física e mecânica das solicitações e respostas estruturais. Assim, em 2020, a ICAO pu-

blicou o *Aerodrome Design Manual*, introduzindo o novo sistema ACR/PCR (*Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating*), substituindo gradualmente o sistema anterior (ICAO, 2020).

O objetivo deste artigo é discutir a evolução conceitual e metodológica dos sistemas de classificação de pavimentos aeroportuários, abrangendo os fundamentos teóricos que sustentam o ACR/PCR, suas diferenças em relação ao ACN/PCN, as implicações práticas de sua adoção e exemplos de aplicação. O trabalho também busca evidenciar a importância da modernização dos métodos de avaliação para o planejamento e gestão da infraestrutura aeroportuária no cenário contemporâneo.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Fundamentos do sistema ACN/PCN

O sistema ACN/PCN foi introduzido pela ICAO em 1983 com o objetivo de padronizar a comunicação entre operadores aeroportuários e companhias aéreas sobre a capacidade de suporte estrutural dos pavimentos (ICAO, 1983). O conceito baseia-se na analogia direta entre o nível de solicitação da aeronave (ACN) e a capacidade estrutural do pavimento (PCN).

Quando o $ACN \leq PCN$, a operação da aeronave é permitida sem restrições estruturais, assumindo que o pavimento está em boas condições e o tráfego está dentro dos limites previstos.

Existem dois modelos matemáticos que podem ser empregados para determinar o valor de ACN, variando conforme

o tipo de pavimento analisado. Para pavimentos rígidos, aplica-se a Teoria de Westergaard (Yoder, 1975), que considera uma placa elástica apoiada sobre uma fundação do tipo Winkler e adota como referência uma tensão admissível do concreto de 2,75 MPa (ANAC, 2016). Já no caso de pavimentos flexíveis ou semi-flexíveis, o cálculo depende do valor do *California Bearing Ratio* (CBR) e utiliza a solução de Boussinesq, que se baseia nos deslocamentos e esforços de um meio contínuo homogêneo e isotrópico (Oliveira, 2016).

A determinação do ACN é feita considerando uma aeronave de referência com carga máxima de decolagem MTOW (*Maximum Takeoff Weight*, em língua inglesa) aplicada a um pavimento padrão composto por duas camadas elásticas: a camada de revestimento e o subleito. O subleito é caracterizado pela resistência do subleito normalizada e classificado em quatro categorias (A a D), conforme mostrado na Tabela 1 para pavimentos rígidos e Tabela 2 para pavimentos flexíveis.

2.2 Limitações do sistema ACN/PCN

Apesar de ter sido amplamente aceito por quase quatro décadas, o sistema ACN/PCN apresenta limitações técnicas e operacionais importantes:

- Simplificação geométrica e mecânica, que considerada a presença de apenas duas camadas homogêneas e isotrópicas, o que ignora a interação real entre as diversas camadas e os efeitos de confinamento e tensões não lineares (Ullidz, 1998);
- Dependência de correlações empíricas fixas, de modo que os valores de ACN são calculados para condições padronizadas de subleito, o que limita a representatividade para aeroportos com materiais locais de comportamento diferenciado (FAA, 2009);
- Ausência de critério de desempenho explícito: o ACN/PCN não está diretamente ligado a um limite de fadiga ou deformação, mas apenas a uma condição de suporte idealizada;
- Incompatibilidade com métodos mecânistas-empíricos modernos: o modelo é inconsistente com ferramentas analíticas como FAARFIELD, LEDFAA ou EverFE, que consideram resposta

TABELA 1

CATEGORIAS DE SUBLEITO PARA O MÉTODO ACN/PCN EM PAVIMENTOS RÍGIDOS

Categoría do subleito	Resistência do subleito k (MN/m ³)	Resistência do subleito normalizada k (MN/m ³)	Código
Alta	$k \geq 120$	150	A
Média	$60 < k < 120$	80	B
Baixa	$25 < k \leq 60$	40	C
Ultrabaixa	$k \leq 25$	20	D

FONTE: ANAC (2016)

TABELA 2

CATEGORIAS DE SUBLEITO PARA O MÉTODO ACN/PCN EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Categoría do subleito	Resistência do subleito CBR (%)	Resistência do subleito normalizada CBR (%)	Código
Alta	$CBR \geq 13$	15	A
Média	$8 < CBR < 13$	10	B
Baixa	$4 < CBR \leq 8$	6	C
Ultrabaixa	$CBR \leq 4$	3	D

FONTE: ANAC (2016)

multicamadas e acúmulos de dano (Kim e Tutumluer, 2016).

Essas limitações impulsionaram a ICAO (2020) e outras autoridades, como a FAA (2021) e a EASA (2024), a desenvolver um sistema mais coerente com os métodos de análise estrutural atualmente empregados.

2.3 Introdução ao sistema ACR/PCR

O sistema ACR/PCR, introduzido oficialmente pela ICAO em 2020, representa uma modernização substancial do processo

de classificação de pavimentos aeroportuários. O novo método adota conceitos mecânistas de resposta estrutural, em que a capacidade do pavimento é avaliada considerando as tensões, deformações e fadiga acumulada nas camadas constituintes (ICAO, 2020; FAA, 2021).

Diferentemente do ACN/PCN, o ACR/PCR é baseado em modelagem multicamadas, levando em conta o número de repetições de carga admissível até a ocorrência de um critério de falha (fadiga ou deformação permanente). Assim, o ACR é o valor que representa o nível de solicitação gerado pela aeronave, enquanto o PCR indica o limite de resistência do pavimento.

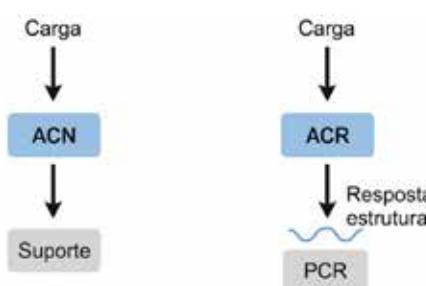
A Figura 1 apresenta o conceito de equivalência entre o antigo e o nosso sistema: enquanto o ACN/PCN compara carga e suporte de forma empírica, o ACR/PCR relaciona resposta estrutural e desempenho limite com base mecânica.

A avaliação do PCR pode ser realizada com o auxílio de softwares compatíveis com modelos multicamadas, como o FAARFIELD (*FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*), da FAA (*Federal Aviation Administration*), ou o LEAF (*Layered Elastic Analysis for Flexible*

FIGURA 1

RELAÇÃO CONCEITUAL ENTRE ACN/PCN E ACR/PCR

FONTE: AUTOR (2025)



Pavements), que calculam as tensões principais, deformações e número de repetições de carga admissíveis até falha (Huang, 2004).

A Tabela 3 resume as principais diferenças entre os dois métodos.

Em termos práticos, o ACR/PCR permite ajustar o PCR ao desempenho real do pavimento, considerando o tráfego efetivo e as condições locais de solo e clima. Isso viabiliza operações mais seguras e econômicas, reduzindo intervenções prematuras e otimizando os custos de manutenção (Kim e Tutumluer, 2016; FAA, 2021).

2.4 Aplicações práticas e estudos comparativos

Desde a introdução do ACR/PCR pela ICAO (2020), diversas pesquisas vêm comparando os resultados obtidos por ambos os métodos em condições reais de operação. Os estudos indicam que, embora o ACR/PCR mantenha a filosofia de equivalência estrutural entre solicitação e capacidade, ele produz classificações mais consistentes com o comportamento observado em campo.

Loizos e Charonitis (2019) analisaram pavimentos de aeródromos europeus e verificaram que os valores de PCN obtidos pelo método tradicional tendiam a divergir dos níveis reais de dano mensurados por meio de retroanálises mecanicistas. Em contrapartida, os PCRs calculados com base no FAARFIELD apresentaram correlação direta com as deflexões e fadigas acumuladas nas camadas de base, refletindo com maior precisão a condição estrutural das pistas.

Em estudo conduzido pela FAA, em cooperação com a Norwegian University of Science and Technology (NTNU/FAA,

2023), foi realizada uma comparação entre os valores de PCN e PCR em pistas de grande e médio porte nos Estados Unidos e Europa. Observou-se que o PCR tende a ser, em média, 10 a 20% inferior ao PCN previamente reportado, revelando que o método antigo subestimava o efeito acumulado de danos repetitivos em pavimentos com materiais mais rígidos.

Zhang *et al.* (2023) confirmaram essa tendência em pavimentos rígidos, demonstrando que o método ACN/PCN não captava adequadamente o comportamento de flexão das placas de concreto sob carregamentos múltiplos, enquanto o ACR/PCR, por meio da análise multcamada e da contabilização da fadiga, aproximou-se dos resultados obtidos por ensaios de campo.

Outros estudos recentes, como o de Sun *et al.* (2022), mostraram que a retroanálise de PCN por ensaios de deflectometria (FWD/HWD) apresenta grandes variações, dependendo das hipóteses assumidas, o que reforça a necessidade de um método mais mecanicista, como o ACR/PCR.

Esses resultados evidenciam que o novo sistema proporciona maior rastreabilidade, consistência técnica e reproduzibilidade, aspectos críticos para a gestão moderna da infraestrutura aeroportuária.

2.5 O papel do CDF (Cumulative Damage Factor)

Um dos principais avanços introduzidos pelo sistema ACR/PCR é a incorporação explícita do CDF - *Cumulative Damage Factor*, conceito que quantifica o dano acumulado no pavimento devido às repetições de carga das aeronaves (ANAC, 2023).

O CDF já estava implicitamente pre-

sente no raciocínio do ACN/PCN, porém, de forma empírica e sem rastreabilidade. No ACR/PCR, esse parâmetro torna-se parte central do cálculo do PCR, sendo obtido diretamente de modelos mecanicistas calibrados.

De acordo com o Manual de Cálculo de PCR de Pavimentos Aeroportuários (ANAC, 2023), o CDF representa a fração da vida de projeto consumida pela fadiga do material ou pela deformação permanente do subleito. A formulação segue o conceito clássico da Lei de Miner (Miner, 1945), expresso pela Equação 1:

$$[1] \quad DF = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}}$$

Onde NV_i = número de passagens da aeronave i no período considerado; N_{fi} = número de passagens até a falha se apenas a aeronave i atuasse; e n = número total de tipos de aeronaves no mix operacional.

Quando $CDF = 1,0$, significa que a vida útil de projeto foi totalmente consumida; valores menores indicam margem de vida remanescente e valores acima de 1,0 indicam esgotamento estrutural (Figura 2).

O FAARFIELD, software oficial da FAA para análises mecanicistas-empíricas, calcula o número de repetições até falha (N_{fi}) com base nas respostas elásticas e nas equações de fadiga calibradas por ensaios em pistas experimentais. O método considera a configuração do trem de pouso, os desvios laterais de tráfego,

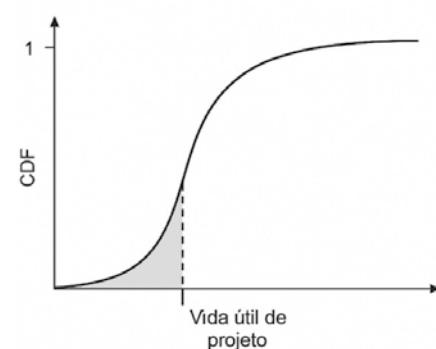


FIGURA 2

INTERPRETAÇÃO DO CDF EM TERMOS DE CONSUMO DA VIDA ÚTIL DE PROJETO

FONTE: ADAPTADO DE ANAC (2023)

TABELA 3
COMPARATIVO DE CARACTERÍSTICAS ENTRE ACN/PCN E ACR/PCR

Aspecto	ACN/PCN	ACR/PCR
Base conceitual	Empírico simplificado	Mecanístico-empírico
Critério de avaliação	Reação do subleito	Fadiga e deformação
Tipo de resultado	Comparativo	Relacionado à vida útil
Representatividade	Limitada	Alta
Ferramenta de cálculo	Simplificado	Softwares especializados

FONTE: AUTOR (2025)

as condições de temperatura e o módulo resiliente das camadas. Segundo a ANAC (2023), o PCR é determinado de forma que o CDF total seja igual a 1,0 ao final da vida útil de projeto adotada (geralmente 20 anos). Isso assegura que o pavimento opere dentro dos limites de segurança estrutural, permitindo ainda a reavaliação periódica conforme novos dados de tráfego ou intervenções de manutenção.

2.6 Implicações para a engenharia e gestão aeroportuária

A introdução do sistema ACR/PCR implica mudanças significativas no processo de dimensionamento, manutenção e operação dos pavimentos aeroportuários:

- a) Integração com o gerenciamento de pavimentos. O PCR, por ser recalculável conforme o consumo de dano (CDF), permite o monitoramento contínuo do desempenho, auxiliando na priorização de intervenções e na previsão de vida útil residual;
- b) Maior precisão na avaliação estrutural.

O método mecanicista-empírico fornece uma relação direta entre tensões, deformações e falhas potenciais, resultando em estimativas mais realistas da capacidade do pavimento;

- c) Compatibilidade internacional e interoperabilidade. A ICAO (2020) destaca que o ACR/PCR foi desenvolvido em conjunto com a FAA e a EASA, assegurando uniformidade global e facilitando a comparação entre aeroportos; e
- d) Repercussões econômicas e ambientais. Ao reduzir o risco de intervenções prematuras e superdimensionamentos, o ACR/PCR contribui para o uso racional de materiais e a sustentabilidade na gestão da infraestrutura (NTNU/FAA, 2023).

A ANAC (2023) recomendou que a transição para o sistema ACR/PCR no Brasil fosse gradual, com a coexistência temporária dos dois métodos. Durante essa fase, os aeroportos poderiam publicar simultaneamente os valores de PCN e PCR, garantindo comparabilidade com os registros históricos e adaptação operacional.

3. CONCLUSÕES

A transição do ACN/PCN para o ACR/PCR representa um avanço conceitual e prático significativo na engenharia de pavimentos aeroportuários. O novo sistema baseia-se em princípios mecanicistas-empíricos, integrando critérios de fadiga e deformação, e introduz o conceito de CDF como parâmetro central de desempenho.

Ao permitir uma avaliação mais realista das solicitações estruturais e do consumo de vida útil, o ACR/PCR melhora a precisão das análises, a gestão de manutenção e a segurança operacional das pistas. Estudos recentes confirmam sua superioridade técnica e sua maior coerência com o comportamento real dos pavimentos.

Embora demande maior rigor técnico e conhecimento especializado, a adoção do ACR/PCR se alinha às melhores práticas internacionais e estabelece uma base sólida para o futuro da infraestrutura aeroportuária. ☰

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANAC (2016). Instrução Suplementar – IS Nº 153.103-001 – Revisão A. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília.
- [2] ANAC (2023). Manual de cálculo de PCR de pavimentos aeroportuários. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília.
- [3] EASA (2024) Guidance for the implementation of the new Aircraft Classification Rating (ACR) – Pavement Classification Rating (PCR) method in the EASA Member States – Revision 1. European Union Aviation Safety Agency.
- [4] FAA (2009). Airport Pavement Design and Evaluation. Advisory Circular 150/5320-6E. Federal Aviation Administration, Washington, D.C.
- [5] FAA (2021). Advisory Circular 150/5335-5D – Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength: ACR-PCR Method. Federal Aviation Administration, Washington, D.C.
- [6] Sun, J.; Chai, G.; Oh, E.; Bell, I. (2022). A Review of PCN Determination of Airport Pavements Using FWD/HWD Test. International Journal of Pavement Research and Technology
- [7] Horonjeff, R.; McKelvey, F. X.; Sproule, W. J.; Young, S. B. (2010). Planning and Design of Airports. 5th ed. McGraw-Hill, New York.
- [8] Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design. 2nd ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- [9] ICAO (1983). Aerodrome Design Manual – Part 3: Pavements (Doc 9157). International Civil Aviation Organization, Montreal.
- [10] ICAO (2020). ACR/PCR Methodology Implementation Manual. International Civil Aviation Organization, Montreal.
- [11] Kim, S.; Tutumluer, E. (2016). Evaluation of Airport Pavement Structural Capacity Using Mechanistic-Empirical Approaches. Transportation Research Record, 2569(1), 12-22.
- [12] Loizos, A.; Charonitis, G. (2019). Investigation of Classification Parameters and Assumptions for Rigid and Flexible Airfield Pavements. Journal of Transportation Engineering, ASCE.
- [13] Miner, M. A. (1945). Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, 12(3), 159-164.
- [14] Oliveira, F. H. L (2016). Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- [15] Zhang, Y.; Sun, J.; Yang, Z.; Oh, E.; Chai, G.; Ong, D. E. L.; Bell, P. (2023). Assessment of ACR-PCR for Rigid Airport Pavements: Comparison with ACN-PCN System. Transportation Research Information Database.
- [16] Ullidtz, P. (1998). Modeling Flexible Pavement Response and Performance. Polyteknisk Forlag, Copenhagen.
- [17] Yoder, E. J.; Witczak, M. W. (1975). Principles of Pavement Design. John Wiley & Sons, New York.