



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CAIO BRAGA KARBAGE NOGUEIRA

VERIFICAÇÃO DO IMPACTO DA ALTERAÇÃO DO FLUXO DE AERONAVES NA
CLASSIFICAÇÃO ACR/PCR DE AEROPORTOS

FORTALEZA

2026

CAIO BRAGA KARBAGE NOGUEIRA

VERIFICAÇÃO DO IMPACTO DA ALTERAÇÃO DO FLUXO DE AERONAVES NA
CLASSIFICAÇÃO ACR/PCR DE AEROPORTOS

Projeto de Graduação submetido à coordenação
do Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial para
obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda
de Oliveira

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N711v Nogueira, Caio Braga Karbage.
Verificação do impacto da alteração do fluxo de aeronaves na classificação ACR/PCR de aeroportos
/ Caio Braga Karbage Nogueira. – 2026.
48 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.
1. Método ACR/PCR. 2. Composição do fluxo de aeronaves. 3. Modelo matemático. I. Título.
CDD 620
-

CAIO BRAGA KARBAGE NOGUEIRA

VERIFICAÇÃO DO IMPACTO DA ALTERAÇÃO DO FLUXO DE AERONAVES NA
CLASSIFICAÇÃO ACR/PCR DE AEROPORTOS

Projeto de Graduação submetido à coordenação
do Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial para
obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Aprovado em 22/01/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Marisete Dantas de Aquino
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter sido luz no meu caminho, um ombro amigo nos momentos de dificuldade e por ter me protegido em todas as ocasiões, me ajudando a conquistar objetivos e a crescer como pessoa.

Aos meus pais, Francisco André Karbage Nogueira e Cristiane Braga de Lima, por terem se dedicado da melhor maneira possível a serem pais maravilhosos e prover tudo o necessário em âmbito educacional, pessoal e em todos os outros, além de me entregarem todo o amor do mundo, fazendo com que eu me torne a quem sou hoje, meu mais amoroso obrigado.

Ao meu irmão, Igor Braga Nogueira, por ter cuidado de mim quando criança e sempre se mostrar disposto a apoiar e cuidar de mim quando necessário, sou muito grato por você.

À minha namorada, Juliana Moraes Gurjão, por ter sido minha dupla inseparável desde o colégio, se mostrando sempre atenciosa, conselheira e amorosa, não poderia pedir um par melhor, saiba que amo estar junto a ti.

Aos meus amigos, Antônio Mazini Lima Neto, João Pedro Nobre Tomaz e Pedro Jairo Pinheiro, pela amizade sincera e por todos os momentos de companhia mesmo estando fora do ambiente universitário.

Ao Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira, pela paciente e excelente orientação, pelo exemplo de profissional e dedicação a uma área do conhecimento e pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

Aos participantes da banca examinadora, Eng. Me. Lucas Cavalcante de Almeida e Prof. Dra. Marisete Dantas de Aquino, por aceitarem o convite, se disponibilizarem e pelas valiosas colaborações e sugestões.

À toda a minha família, por parte de mãe e de pai, por serem ancora da minha vida e tornarem minha vida mais feliz, não seria nada sem o cuidado e amor de vocês.

Aos colegas de turma de graduação, em especial Samuel Nepomuceno, Patrick Ribeiro, Pedro Henrique Alves, Adailson Araujo, Hadassa Braga, Fernando Antônio, Marcos José Machado, Pedro Santos e Leticia Façanha por todos os momentos vividos juntos que deixaram a caminhada mais leve e feliz, que todos tenham um excelente futuro profissional.

À toda a família da minha namorada, por todo o acolhimento, carinho e amor comigo dentro desse período.

À equipe docente, à coordenação do curso de Engenharia Civil e os funcionários do bloco, composta por profissionais altamente qualificados e que foram necessários no processo.

À Universidade Federal do Ceará, por ter me dado a oportunidade de ingressar no curso de Engenharia Civil, meu sonho pessoal desde a infância.

“Hoje o tempo voa nas asas de um avião
Sobrevoa os campos da destruição
É um mensageiro das almas dos que virão ao mundo
Depois de nós.” (Carlos Maltz).

RESUMO

O método de classificação estrutural de pavimentos aeroportuários ACR/PCR (*Aircraft Classification Rating / Pavement Classification Rating*), adotado pela Organização da Aviação Civil Internacional, baseia-se em uma abordagem empírico-mecanística que considera a resposta estrutural do pavimento à ação repetida do tráfego aéreo no pavimento. Diferentemente do ACN/PCN, o ACR/PCR incorpora a influência do fluxo de aeronaves, do volume anual de operações e das características estruturais do pavimento, tornando a análise da capacidade estrutural dependente da configuração do fluxo. Nesse contexto, a compreensão do impacto da variação do fluxo de aeronaves sobre a classificação do pavimento é fundamental para a adequada gestão da infraestrutura aeroportuária. Este trabalho tem como objetivo analisar se a combinação e a variação do fluxo anual de aeronaves influenciam a classificação ACR/PCR aplicada a pavimentos aeroportuários flexíveis. Para tanto, foram avaliadas pistas de pouso e decolagem de nove aeroportos brasileiros, considerando diferentes composições estruturais e distintos níveis de fluxo. As análises foram realizadas por meio do *software* FAARFIELD, no qual foram simulados diferentes cenários de fluxos de aeronaves e volumes anuais de operações, possibilitando a obtenção dos valores de ACR/PCR. Os resultados indicam que a classificação ACR/PCR é sensível tanto à variação do volume de tráfego quanto à composição do fluxo de aeronaves, observando-se uma relação linear direta entre o aumento do fluxo anual e os valores finais de PCR. Verificou-se que alterações no fluxo de aeronaves podem produzir impactos na classificação estrutural, mesmo para volumes totais de tráfego semelhantes. Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo matemático baseado em *machine learning* artificial, capaz de estimar a classificação ACR/PCR a partir das propriedades estruturais do pavimento e do fluxo de aeronaves, apresentando resultados compatíveis com aqueles obtidos pelo *software*, demonstrando na composição do método a influência dos aumentos do tráfego na redução da classificação do pavimento. Conclui-se que o método de classificação ACR/PCR fornece uma representação consistente do comportamento estrutural dos pavimentos aeroportuários quando associada a uma análise criteriosa do fluxo de aeronaves. Entretanto, a dependência da classificação em relação à composição do fluxo reforça a necessidade de estudos detalhados para entender quando a classificação é impactada pela aeronave crítica ou pelo volume de aeronaves.

Palavras-chave: método ACR/PCR; composição do fluxo de aeronaves; modelo matemático.

ABSTRACT

The **ACR/PCR (Aircraft Classification Rating / Pavement Classification Rating)** structural classification method for airport pavements, adopted by the **International Civil Aviation Organization (ICAO)**, is based on an **empirical–mechanistic approach** that considers the structural response of the pavement to the repeated action of aircraft traffic. Unlike the ACN/PCN method, ACR/PCR incorporates the influence of aircraft traffic flow, annual operation volume, and the structural characteristics of the pavement, making the assessment of structural capacity dependent on the traffic flow configuration. In this context, understanding the impact of variations in aircraft traffic flow on pavement classification is essential for the proper management of airport infrastructure.

The objective of this study is to analyze whether the combination and variation of annual aircraft traffic flow influence the ACR/PCR classification applied to flexible airport pavements. To this end, runway pavements from nine Brazilian airports were evaluated, considering different structural configurations and distinct traffic levels. The analyses were performed using the FAARFIELD software, in which different aircraft traffic flow scenarios and annual operation volumes were simulated, allowing the determination of ACR/PCR values.

The results indicate that the ACR/PCR classification is sensitive to both variations in traffic volume and the composition of the aircraft flow, with a direct linear relationship observed between the increase in annual traffic and the final PCR values. It was verified that changes in aircraft flow composition can produce impacts on structural classification, even for similar total traffic volumes. Additionally, a mathematical model based on artificial machine learning was developed to estimate the ACR/PCR classification from the structural properties of the pavement and the aircraft traffic flow, presenting results consistent with those obtained from the software and demonstrating, within the formulation of the method, the influence of traffic increases on the reduction of pavement classification.

It is concluded that the ACR/PCR classification method provides a consistent representation of the structural behavior of airport pavements when associated with a careful analysis of aircraft traffic flow. However, the dependence of the classification on traffic flow composition reinforces the need for detailed studies to understand whether the classification is primarily impacted by the critical aircraft or by the overall aircraft traffic volume.

Keywords: ACR/PCR method; aircraft traffic flow composition; mathematical model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estrutura de Pavimentos	18
Figura 2	- Tipos de pavimentos	19
Figura 3	- Esforços no pavimento flexível	20
Figura 4	- Determinação do tipo de pavimento no FAARFIELD	30
Figura 5	- Determinação do <i>mix</i> de aeronave no FAARFIELD (Valores Aleatórios) ...	30
Figura 6	- Exemplo de classificação realizada no FAARFIELD (Valores Aleatórios).	31
Figura 7	- PCR X Tráfego (Completo)	35
Figura 8	- ER_i X PCR (FAARFIELD).....	39
Figura 9	- PCR X Tráfego	40
Figura 10	- PCR X Tráfego	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Etapas metodológicas para a determinação do PCR por Avaliação Técnica (T).....	22
Tabela 2	- Classificação da Sub-base	24
Tabela 3	- Classificação da pressão dos pneus permitida	24
Tabela 4	- Caracterização das camadas dos aeroportos	26
Tabela 5	- Fluxo de aeronaves dos aeroportos de estudo	27
Tabela 6	- Classificação do fluxo de aeronaves	28
Tabela 7	- Alteração na nomenclatura dos fluxos de aeronaves	29
Tabela 8	- Classificação PCR dos Pavimentos conforme o Mix de Aeronaves	34
Tabela 9	- Valores dos coeficientes	36
Tabela 10	- Resultados do PCR por meio do modelo matemático (antes do ajuste)	37
Tabela 11	- Resultado Matemático/Classificação Software (%) (antes do ajuste)	37
Tabela 12	- Resultados do ACR/PCR por meio do modelo matemático (após ajuste).	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil (BR)
ANAC	Autoridade Nacional da Aviação Civil (PT)
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
ACR	<i>Aircraft Classification Rating</i>
PCR	<i>Pavement Classification Rating</i>
PPD	Pista de Pouso e Decolagem
PEQ1	Fluxo Pequeno de Aeronaves 1
PEQ2	Fluxo Pequeno de Aeronaves 2
PEQ3	Fluxo Pequeno de Aeronaves 3
MED1	Fluxo Médio de Aeronaves 1
MED2	Fluxo Médio de Aeronaves 2
MED3	Fluxo Médio de Aeronaves 3
ALT1	Fluxo Alto de Aeronaves 1
ALT2	Fluxo Alto de Aeronaves 2
ALT3	Fluxo Alto de Aeronaves 3
PIB	Produto Interno Bruto
IA	Inteligência Artificial
ABEAR	Associação Brasileira de empresas Aéreas
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização Histórica	12
1.2	Problema da Pesquisa	14
1.3	Justificativa	15
1.4	Objetivos	16
1.5	Estrutura.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Pavimento	17
2.2	Pavimento Flexível	19
2.3	Método de Classificação ACR/PCR	20
3	METODOLOGIA	26
3.1	Caracterização dos Aeroportos	26
3.2	Definição do <i>Mix</i> de Aeronaves	27
3.3	Método de Classificação Estrutural ACR-PCR e utilização do software FAARFIELD	29
3.4	Estudos de Correlação e Estatísticos	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5	CONCLUSÃO	43
5.1	Principais Conclusões	43
5.2	Limitações do Estudo	43
5.3	Proposição de Estudos Futuros	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma contextualização histórica do início da aviação, da infraestrutura de transporte aéreo e o atual método de classificação dos pavimentos aeroportuários. Também são apresentados o problema de pesquisa, a justificativa, os objetivos e, por fim, a estrutura do trabalho.

1.1.Contextualização

Este trabalho, aborda a classificação da capacidade estrutural das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos denominado ACR/PCR. Esse é um setor de relevância econômica e foi responsável por empregar diretamente cerca de 1,1 milhão de pessoas no Brasil no ano de 2024, arrecadando R\$ 38,9 bilhões em tributos e contribuindo com R\$ 107,5 bilhões para o PIB Nacional (ABEAR, 2025).

O progresso dos meios de transporte foi impulsionado pela necessidade da humanidade em superar as limitações espaciais e temporais dos já existentes sistemas de transporte terrestres e aquáticos, culminando no desenvolvimento do transporte aéreo. Apesar de, desde o século XVIII, já existirem os primeiros relatos de equipamentos do que a humanidade um dia desenvolveria e chamaria de balão, a sua utilização para locomoção ainda era bastante devagar e a depender de períodos de vento (Vasconcellos, 1908).

Em 23 de outubro de 1906, o inventor brasileiro Alberto Santos Dumont executou com sucesso o primeiro voo autônomo e controlado a bordo do seu avião 14-bis (FAB), em Paris. Tal feito, que ocorreu após uma tentativa prévia realizada em 7 de setembro do mesmo ano, marcou o início da era da aviação, impulsionando o desenvolvimento tecnológico de aeronaves em escala global. A demonstração de uma aeronave mais pesada que o ar, capaz de decolar e pousar por meios próprios, estabeleceu um marco crucial na história da engenharia aeronáutica (CHÂTEAU DE VERSAILLES, [s.d.]).

Decorridos os anos, os avanços foram se espalhando por outros países da Europa, Nova Zelândia e Estados Unidos. Durante a Primeira Guerra Mundial, o avião passou a ser utilizado com fins militares, como arma de espionagem e reconhecimento, transporte de cargas e facilidade de locomoção. No intervalo entre a Primeira e a Segunda Guerra mundial, (1918 – 1939), deu-se início a chamada Era de Ouro da Aviação, a qual acarretou avanços tecnológicos possibilitando o desenvolvimento de aeronaves com maior capacidade, capazes de percorrer longas distâncias e alcançar altitudes elevadas, chegando a velocidades de até 320Km/h (Rosa *et al.*, 2015).

Com o final da Segunda Guerra Mundial, a aviação comercial passou a se

desenvolver de forma independente da aviação militar. As empresas produtoras passaram a criar aviões especialmente destinados à aviação civil, e as linhas aéreas abandonaram a prática, então habitual, de usar aviões militares modificados, para o transporte de passageiros. (Dias, 2023)

Impulsionada pelo crescimento da aviação civil no século XX, ocorre a Convenção de Aviação Civil Internacional em Chicago-EUA no ano de 1944. A qual foi responsável pela criação das primeiras padronizações globais da aviação e a criação da *International Civil Aviation Organization* (ICAO), organização responsável por padronizar a aviação civil, para que ela opere de forma segura.

Até o ano de 1983 não havia padronização na classificação da capacidade estrutural dos pavimentos entre os países, tornando difícil a compatibilização da resistência dos pavimentos e dos esforços realizados pelas aeronaves. Nesse ano, a ICAO implementa o método de classificação ACN/PCN (*Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number*). Esse método de classificação estrutural tinha como objetivo principal permitir que os operadores dos aeroportos comparassem a capacidade estrutural de cada pista de pouso e decolagem, possibilitando identificar quais aeronaves poderiam operar em cada aeroporto (Fioravanti, 2025)

O método de classificação da capacidade estrutural das pistas de pouso e decolagem ACN/PCN foi amplamente utilizado durante seu período de vigência, sendo fundamentado na comparação do valor do ACN, que representa o efeito estrutural da aeronave sobre o pavimento, e o PCN, que expressa a capacidade estrutural da pista de pouso e decolagem. De acordo com esse método, a operação de uma aeronave era considerada permitida sem restrições quando a condição $ACN \leq PCN$ era atendida (ICAO, 1983). Embora o método tenha proporcionado uma padronização internacional, sua aplicação apresentava limitações técnicas e operacionais que comprometiam a representatividade do comportamento estrutural real dos pavimentos.

Entre as principais limitações do método ACN/PCN destacava-se a dependência de correlações empíricas fixas, uma vez que o valor de ACN era sempre calculado considerando condições padronizadas de subleito. Essa simplificação restringia a adequada representação da variabilidade dos solos e das estruturas de pavimento existentes nos pavimentos, reduzindo a precisão das classificações estruturais (FAA, 2009). Além disso, o método não incorporava critérios explícitos de desempenho, pois a classificação não estava associada a parâmetros estruturais relacionados à deformação permanente ou às deformações das camadas do pavimento, o que dificultava a análise do dano acumulado ao longo da vida útil (Fioravanti, 2025).

Diante dessas limitações, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO), em

conjunto com a *Federal Aviation Administration* (FAA) e a *European Union Aviation Safety Agency* (EASA), iniciou o desenvolvimento de um novo método de classificação que desempenhasse uma melhor função de classificação da capacidade estrutural de um pavimento aeroportuários que o método ACN/PCN. O resultado desse trabalho, foi apresentado em 2020 o método *Aircraft Classification Rating / Pavement Classification Rating* (ACR/PCR), baseado em conceitos mecanístico-empíricos, com melhor representação da resposta estrutural do pavimento, considerando deformações e efeitos de fadiga acumulados no pavimento decorrentes do tráfego aéreo, para além de melhor descrição das camadas compositoras da PPD (FAA, 2021).

Nesse novo contexto, o método ACR/PCR passa a classificar a capacidade estrutural dos pavimentos a partir do impacto real do tráfego de aeronaves sobre as camadas do pavimento e do subleito, permitindo uma avaliação mais consistente das condições operacionais e estruturais. Essa abordagem possibilitou a otimização das operações aeroportuárias e a racionalização das estratégias de manutenção, ao fornecer resultados mais alinhados ao comportamento mecânico dos materiais e às solicitações impostas pelo tráfego aéreo (Kim; Tutumluer, 2016).

1.2.Problema da Pesquisa

O crescimento da aviação civil, junto à introdução de novas aeronaves e à intensificação da operação de modelos já existentes, tem resultado em alterações no mix de aeronaves que operam nos aeroportos. Essas mudanças impactam o carregamento aplicado aos pavimentos aeroportuários, uma vez que diferentes aeronaves apresentam configurações distintas de peso bruto, pressão de pneus, arranjos de trem de pouso e frequências de operação, fatores que influenciam o nível de dano estrutural acumulado no pavimento ao longo do tempo (FAA, 2021).

O método ACR/PCR, introduz uma abordagem mecanístico-empírica, considerando a resposta estrutural do pavimento, os efeitos do dano acumulado decorrentes do tráfego aéreo (ICAO, 2020). No entanto, a correta aplicação desse método depende da caracterização adequada do tráfego, especialmente ao se tratar da composição do *mix* de aeronaves. Alterações nesse *mix* podem resultar em variações significativas nos danos estruturais previstos e, consequentemente, nos valores de PCR atribuídos aos pavimentos (Kim e Tutumluer, 2016).

A presença de uma avaliação sistemática dos impactos associados ao aumento e à diversificação do *mix* de aeronaves conduz a classificações que representem adequadamente o comportamento estrutural real do pavimento. No entanto, caso haja classificações imprecisas

por meio dos operadores dos aeroportos, por alguma razão, essas podem permitir operações que acelerem os danos estruturais, reduzindo a vida útil do pavimento e elevando os custos de manutenção e reabilitação ou podem impor restrições operacionais desnecessárias, afetando a capacidade operacional do aeroporto (FAA, 2021).

Dessa forma, evidencia-se um problema relacionado à compreensão do impacto que a alteração do mix de aeronaves exerce sobre a classificação da capacidade estrutural dos pavimentos segundo o método de classificação estrutural ACR/PCR. Assim essa relação pode dificultar a tomada de decisão por parte de operadores aeroportuários, projetistas e órgãos reguladores, sobretudo no que se refere ao planejamento operacional e à compatibilização entre a infraestrutura existente e a demanda crescente do transporte aéreo (ICAO, 2020).

1.3.Justificativa

A infraestrutura aeroportuária representa um investimento elevado e estratégico, sendo a adequada avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos um elemento essencial para a preservação desses ativos ao longo de sua vida útil. Decisões relacionadas à operação, manutenção e reabilitação dos pavimentos dependem diretamente da confiabilidade dos métodos de classificação estrutural empregados, uma vez que classificações inadequadas podem resultar tanto em custos excessivos de intervenção quanto em riscos associados à degradação prematura da estrutura (Yoder e Witczak, 1975; Pigossi *et al.*, 2012).

Nesse contexto, a evolução dos métodos de avaliação estrutural, com a adoção de abordagens mecanístico-empíricas, ampliou a capacidade de representação do comportamento real dos pavimentos aeroportuários. Entretanto, a aplicação desses métodos exige maior rigor na definição dos parâmetros de entrada, especialmente no que se refere à caracterização do tráfego aéreo. A composição do fluxo de aeronaves assume papel central nesse processo, pois influencia diretamente os mecanismos de dano considerados nas análises estruturais e, consequentemente, os resultados de classificação obtidos (Kim; Tutumluer, 2016).

Dessa forma, justifica-se a realização deste trabalho pela necessidade de aprofundar a compreensão sobre os efeitos do aumento do fluxo de aeronaves no método de classificação ACR/PCR dos pavimentos aeroportuários. A análise proposta contribui para o aprimoramento da aplicação prática do método, fornecendo subsídios técnicos para avaliações mais consistentes da capacidade estrutural, com impactos positivos na gestão da infraestrutura aeroportuária, na segurança operacional e na otimização dos recursos destinados à manutenção.

1.4.Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar se a alteração do fluxo anual de aeronaves impacta o método de classificação ACR/PCR aplicado a pavimentos aeroportuários.

Como objetivos específicos podem ser mencionados:

- a) Analisar se há relação linear da classificação PCR dos pavimentos ao simular a troca de fluxo de aeronaves entre aeroporto tem comportamento linear;
- b) Avaliar diferentes cenários de tráfego aéreo, com variações no mix de aeronaves, utilizando o software FAARFIELD, de modo a obter os valores de classificação estrutural PCR correspondentes;
- c) Aferir a precisão um modelo matemático, baseado em técnicas de inteligência artificial, capaz de estimar a classificação ACR/PCR em função das propriedades estruturais do pavimento e do fluxo de aeronaves.

1.5.Estrutura

A estrutura deste trabalho está organizada em cinco capítulos. Além do presente capítulo introdutório, o segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica, fundamental para a fundamentação teórica da pesquisa, apresentando as definições dos principais conceitos discutidos. O terceiro capítulo destina-se à definição da pista de pouso e decolagem, a caracterização dos mix de aeronaves utilizados nos aeroportos a serem estudados, e ao detalhamento das etapas metodológicas empregadas. No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, o quinto capítulo seção contempla as principais conclusões do estudo, suas limitações e as sugestões para futuras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada e discutida a revisão bibliográfica deste projeto de graduação na qual se descreve os principais conceitos e considerações relativos aos pavimentos flexíveis e à classificação da capacidade estrutural dos pavimentos aeroportuários. São descritas as limitações e concepções do método vigente e do que entrara em vigor em 2022. Também são apresentados alguns programas computacionais que auxiliam a aplicação do método ACR/PCR.

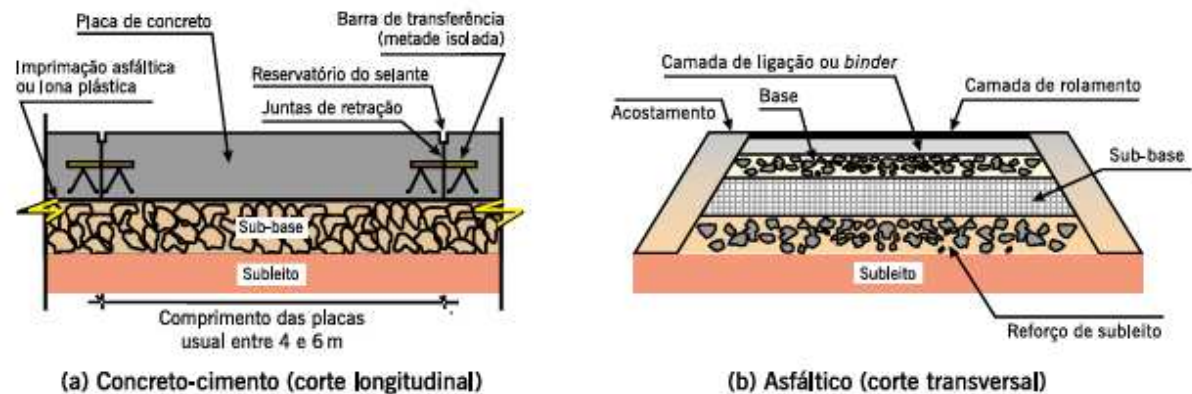
2.1 Pavimento

Segundo a Autoridade Nacional de Aviação Civil de Portugal (ANAC, 2015) uma pista se caracteriza somente como uma área retangular definida em um aeródromo terrestre preparada para a aterrissagem e a decolagem de aeronaves. Dessa forma, torna-se necessário entender as possibilidades de preparação da pista para que ela seja capaz de atender aos requisitos de operação do aeródromo.

Um pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, constituídas sobre a superfície final de terraplanagem destinada técnica e economicamente a resistir os esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (Bernucci *et al.*, 2022). Além disso, o pavimento é a estrutura responsável por resistir aos esforços horizontais que atuam na sua estrutura, sendo assim capaz de resistir ao tráfego em sua superfície (ABNT, 1982).

Dessa forma, o pavimento é composto por camadas que tem como objetivo receber cargas das camadas seguintes e reduzirem os esforços para as camadas inferiores de forma a diluir a força, evitando sempre a deformação e danos a qualquer outra parte da estrutura. Tratando-se da estrutura dos pavimentos, as camadas são, como ilustrado na Figura 1, o pavimento e o subleito que é delimitado na parte superior pelo revestimento e pode ser composto por até cinco componentes, sendo elas a base, a sub-base, o reforço do subleito, a camada de regularização e o próprio subleito (DNIT, 2023).

Figura 1 – Estrutura de Pavimentos



Fonte: Benucci *et al.* (2010)

A base é a camada do pavimento que sofre com as maiores tensões de compressão após o revestimento asfáltico, sendo necessário ser composta por materiais com um entrosamento granular adequado, enfatizado que a escolha do material deve ser escolhida conforme a que melhor atender ao tráfego projetado para recebimento, desde que possua uma alta resistência a deformação permanente (Balbo, 2007). E a Sub-base seria uma camada de pavimentação, complementar à base, utilizada principalmente quando o subleito tem baixa capacidade de suporte de cargas, para além disso pode ser utilizada afim de reduzir a espessura da base, por uma questão econômica (Balbo, 2007).

Em tratando do subleito, o DNIT (2023) classifica-o como o terreno de fundação preparado para receber a(s) camada(s) do pavimento. Em relação a regularização do subleito o DNIT (2010) classifica-o como camadas de operação destinada a conformar o leito estradal, transversal e longitudinalmente, obedecendo às larguras e cotas constantes das notas de serviço de regularização de terraplenagem do projeto, compreendendo cortes ou aterros até 20 cm de espessura e em casos necessários o subleito é reforçado por uma camada estabilizada granulometricamente, executada sobre subleito compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito (DNIT,2023).

Por fim o revestimento é a camada exterior, com finalidade de resistir as ações do tráfego e transmiti-las para as camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de conforto e segurança dos seus usuários (Benucci *et al.*, 2022). Cabe destacar que o revestimento pode ser classificado como flexível e rígido, a depender do tipo de revestimento a ser utilizado (Figura 2).

Figura 2 – Tipos de pavimentos



Fonte: DNIT, (2006).

2.2 Pavimento Flexível

O pavimento flexível constitui-se de uma camada asfáltica sobre camadas granulares de base, sub-base e reforço do subleito que, sob a aplicação de cargas, manifestam deformação elástica em todos os seus componentes (Souza, Santana e Pinheiro, 2022). Dentro dessa estrutura, o revestimento asfáltico destaca-se como a camada mais nobre, tendo a função de resistir ao desgaste direto do tráfego e garantir a qualidade do rolamento (Guel; Locastro; Jorge, 2024).

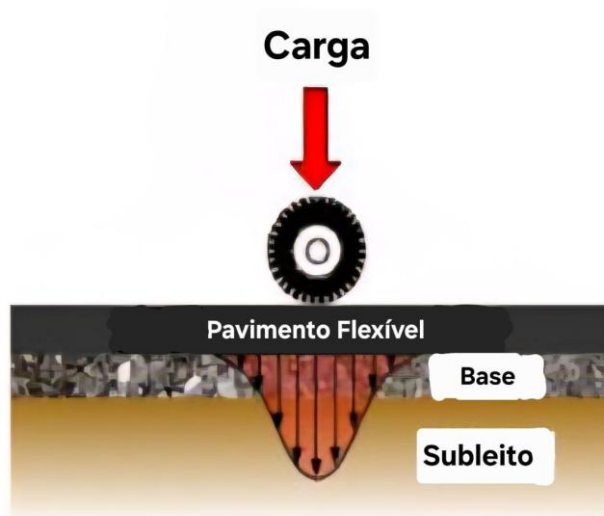
Em função de sua versatilidade, Mohod e Kardan (2016) apontam que o emprego desse tipo de pavimento é recorrente em pistas rodoviárias de baixo, médio e alto volume de tráfego. Os autores ressaltam, ainda, sua ampla aplicação no setor aeroportuário, abrangendo desde pátios de carga até pistas de pouso, decolagem e taxiamento.

Por outro lado, a camada de base deve resistir e distribuir os esforços ocasionados pelo tráfego, sendo a sub-base uma complementação a ela comumente utilizada em dimensionamentos com uma camada de base robusta (Senço, 2007). Continuando o raciocínio da sub-base, o seu fator primário é complementar a base sendo composta por materiais menos nobres e, conseqüentemente, mais baratos, a sua composição pode ser feita por misturas de solos e agregados, variedades de mix de britas, britas estabilizadas com concreto ou ligante asfáltico, dentre outras possibilidades (CNT, 2017).

Com isso a única camada que resta para o detalhamento é a camada de subleito e o seu reforço. O reforço de subleito é definido como uma camada de espessura constante na direção transversal, posicionada acima do subleito regularizado (CNT, 2017). Esta camada,

quando sua aplicação é necessária, possui propriedades tecnológicas superiores às do subleito, mas inferiores às da sub-base. Seguindo o padrão anteriormente citado, os materiais mais nobres nas camadas superficiais e os menos nobres nas camadas inferiores. A espessura dessa camada varia longitudinalmente conforme o dimensionamento estrutural do pavimento. A execução do reforço de subleito é usualmente motivada pela baixa capacidade de suporte da fundação ou pela previsão de elevadas cargas de tráfego, pois apesar de não receber diretamente as cargas do pavimento, sofre com deformações devido a elas (Figura 3)

Figura 3 – Esforços no pavimento flexível



Fonte: Guel et al.,2024 (Adaptado)

2.3 Método de Classificação ACR/PCR

Tratando-se da classificação estrutural de pavimentos aeroportuários é utilizado o método ACR/PCR, método desenvolvido pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO) e apresentado na ICAO Air Navigation Committee em julho de 2020 com o intuito de substituir o método de classificação estrutural ACN/PCN, vigente na época. A implementação do novo método de classificação dos pavimentos demoraria cerca de 4 anos, sendo necessária a imigração para o novo método até o período de novembro de 2024, sendo já necessário que os 193 países signatários da organização estejam utilizando o método ACR/PCR (FAA, 2024).

A utilização do ACR reflete o impacto gerado pelo conjunto de aeronaves em diferentes tipos de pavimentos. Conforme explicam Armeni e Loizos (2022), é necessário que os fabricantes forneçam os dados das aeronaves para os cálculos desse índice, pois o processo depende de especificações técnicas da fabricação, tais como o espaçamento entre os eixos dos pneus do trem de pouso, o centro de gravidade da aeronave e a pressão dos pneus. Somando-se

a isso o peso máximo de decolagem, que representa a carga mais elevada de uma aeronave comercial em operação padrão (FAA, 2024).

Para que o cálculo do ACR seja aceito, a FAA (2024) estabeleceu critérios fundamentais que diferem de métodos anteriores. Entre essas diretrizes, destaca-se a aplicabilidade da metodologia tanto em estruturas rígidas quanto flexíveis, sendo representadas por camadas homogêneas, elásticas e com estrutura isotrópica, além disso a substituição do índice CBR pelo Módulo de Elasticidade (E) para expressar a resistência da sub-base. O método pressupõe, também, o contato simultâneo de todas as rodas com o pavimento, fixa a pressão padrão dos pneus em 1,5 MPa e define a utilização do DWSL em ordem de grandeza de 100 e não 1000, como no método de classificação estrutural anteriormente utilizado, o ACN/PCN.

Dessa maneira um material elástico é caracterizado pela capacidade de retornar ao estado geométrico original após a conclusão de um ciclo de carregamento e descarregamento, sem a presença de deformações residuais (TIMOSHENKO, 1970 *apud* SOUSA, 2014). A isotropia é caracterizada por manter as características elásticas em todas as suas direções (Barros, 2004), que é refutado por Castro (2021), que afirma que os solos costumam representar deformações permanentes e que a distribuição anisotrópica não é realista nesse caso.

A capacidade de suporte estrutural de um pavimento aeroportuário é uma função multivariada, dependente da composição específica do tráfego aeronáutico, da frequência operacional (número de ciclos), da configuração estrutural da seção de pavimento e das condições de resistência do subleito. O Método de Avaliação Técnica (T) constitui o procedimento recomendado para a integração rigorosa destas variáveis, culminando na determinação de um valor representativo e consistente da resistência do pavimento (FAA, 2022).

Conforme estipulado pela FAA (2022), verifica-se que, para uma dada estrutura de pavimento, o número permitido de operações decresce à medida que a intensidade do carregamento (aumento do peso da aeronave) se eleva, dado o critério de acúmulo de dano. Apesar disso, o decréscimo dessa classificação não é explícito no método de classificação.

Ressalta-se que estruturas de pavimento distintas podem, em princípio, resultar em classificações de resistência similares. Contudo, as operações aeronáuticas permissíveis e a vida de serviço remanescente podem divergir significativamente. Tal variabilidade exige que o operador do aeroporto reconheça as classificações de pavimento não como valores absolutos, mas, sim, como estimativas, podendo ser necessárias limitações operacionais adicionais não intrínsecas ao método de classificação ACR/PCR.

Para que a precisão almejada na avaliação estrutural seja atingida, o método

técnico exige o conhecimento de informações específicas, diferenciando-se dos procedimentos simplificados ao requerer uma combinação de inspeções *in-situ*, ensaios de suporte de carga e o emprego de julgamento de engenharia qualificado. É necessário o entendimento de que a determinação da adequação estrutural não se baseia em um critério de falha imediata, mas sim no impacto acumulado de tensões e deformações ao longo da vida útil projetada ou remanescente do pavimento (Kim e Tutumluer, 2016).

No caso de pavimentos flexíveis, a deformação é acumulada diretamente no subleito. Por essa razão, o dimensionamento é projetado para que a deformação máxima permitida seja atingida ao completar 36.500 passagens da aeronave de projeto. Esse volume de tráfego equivale, de forma simplificada, a uma frequência de 10 passagens diárias ao longo de 10 anos, ou 5 passagens por dia durante um período de 5 anos (FAA, 2021; Fabre e Balay, 2013).

Para a determinação de um PCR por Avaliação Técnica (T), é mandatório o conhecimento detalhado dos seguintes parâmetros:

- a) Composição e frequência do tráfego de aeronaves (espectro de carregamento);
- b) Espessura, tipo de material, resistência e propriedades mecânicas (módulos de elasticidade e Coeficiente de Poisson) de cada camada da estrutura do pavimento;
- c) Módulo de elasticidade do subleito (*resilient modulus*).

Com base nessas informações, o procedimento de cálculo segue uma abordagem iterativa e normalizada. O procedimento visa converter a mistura de tráfego de aeronaves em serviço em uma aeronave crítica equivalente, a qual, operando em seu Peso Bruto Máximo Permitido (*Maximum Allowable Gross Weight - MAGW*), induzirá um Fator de Dano Cumulativo (CDF) igual a 1,0 (unidade de dano) na estrutura avaliada. A Tabela 1 detalha o fluxo metodológico para o cálculo do *Pavement Classification Rating* (PCR) baseado na avaliação técnica do pavimento (FAA, 2022).

Tabela 1: Etapas metodológicas para a determinação do PCR por Avaliação Técnica (T)

(continua)

Etapas	Descrição Metodológica
1.	Coleta de Dados Estruturais e Operacionais: Obtenção de todos os dados relevantes do pavimento (espessuras de camada, módulos de elasticidade, razões de Poisson) e definição precisa do espectro de tráfego aeronáutico (tipo, número de partidas, peso operacional).

Etapa	Descrição Metodológica	(conclusão)
2.	Definição da Mistura de Aeronaves: Estabelecimento do conjunto de aeronaves, com suas respectivas partidas anuais e pesos operacionais, que se espera que o pavimento suporte durante o período de análise.	
3.	Cálculo e Registro do ACR Máximo: Determinação do <i>Aircraft Classification Rating</i> (ACR) para cada aeronave na mistura em seu peso operacional. Identificação da aeronave que apresenta o valor máximo de ACR.	
4.	Determinação do Dano Cumulativo Máximo (CDF): Cálculo do Fator de Dano Cumulativo (CDF) total induzido pela mistura de aeronaves no pavimento em análise. Registro do valor máximo obtido.	
5.	Seleção da Aeronave Crítica Inicial: Identificação e seleção da aeronave que contribui com a maior parcela do CDF total. Esta aeronave é designada como a aeronave crítica (AC(i)) para a primeira iteração.	
6.	Ajuste das Partidas (Normalização do CDF): Ajuste iterativo do número de partidas anuais da aeronave crítica (AC(i)) até que o CDF recalculado iguale o valor máximo de CDF registrado na Etapa 4. Registro do número de partidas anuais equivalentes.	
7.	Determinação do Peso Bruto Máximo Permitido (MAGW): Ajuste iterativo do peso da aeronave crítica (AC(i)) para que ela gere um CDF máximo de 1,0 para o número de partidas obtido na Etapa 6. Este peso final representa o Peso Bruto Máximo Permitido.	
8.	Cálculo do PCR(i): Determinação do ACR da aeronave crítica (AC(i)) operando no Peso Bruto Máximo Permitido. Este valor é registrado como o PCR(i) para a iteração.	
9.	Seleção do PCR Final (Valor Mínimo): Repetição das Etapas 5 a 8, designando sequencialmente as demais aeronaves como críticas. O PCR final para o pavimento é o valor mínimo de todos os PCR(i) calculados.	
10.	Extensão da Análise: Repetição sequencial das Etapas 1 a 9 para todas as seções estruturalmente homogêneas e relevantes do pavimento aeroportuário.	

Fonte: Castro, 2021 (Adaptado)

Após o cálculo dos valores numéricos é necessária a expressão final que definirá a classificação padronizada que cada aeroporto deve apresentar para suas pistas para que ela possa operar de forma segura. A expressão da classificação do pavimento é composta por 5 elementos separado por uma “/” seguindo o padrão: ACR/Tipo de Pavimento/Resistência da Sub-base/Pressão dos Pneus/Utilização dos pavimentos.

Ainda sobre a método de classificação a FAA (2024), destaca que o tipo de pavimento pode ser classificado como Rígido ou Flexível, seguindo o padrão de abreviação da primeira letra em inglês R ou F para *Rigid* ou *Flexible*, respectivamente. Tratando-se agora da

utilização do pavimento a classificação realizada serve para identificar se o estudo real de um aeroporto em operação ou para estudo técnico, seguindo o mesmo padrão de classificação do tipo de pavimento, com a letra utilizada sendo a primeira letra da nomenclatura em inglês das possibilidades U e T para *Using* e *Technical*, respectivamente. Destacando as classificações de resistência da sub-base e das pressões dos pneus, a sua representação segue nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Classificação da Sub-base

Categoria	A	B	C	D
Resistência	Alto	Médio	Baixo	Muito Baixo
Valor de E (MPa)	200	120	80	50
Intervalo (MPa)	$E \geq 150$	$150 > E \geq 100$	$100 > E \geq 60$	$60 > E$

Fonte: FAA, 2024 (Adaptado)

Tabela 3 – Classificação da pressão dos pneus permitida

Categoria	Pressão Máxima permitida (MPa)
W	Ilimitada
X	$\leq 1,75$
Y	$\leq 1,25$
Z	$\leq 0,5$

Fonte: ANAC, 2022 (Adaptado)

Todo o processo de dimensionamento baseia-se na utilização de softwares como o FAARFIELD 2.0, *Alizé-Aéronautique* ou *PAVERS* ferramentas desenvolvidas para a classificação de pavimentos aeroportuários. Tratando-se do uso do *software* FAARFIELD 2.0, teve seu desenvolvimento realizado pela ICAO, funcionando a partir de métodos mecanísticos-empíricos, sua utilização inicia-se com a caracterização das camadas da pista, integrando dados de espessura e resistência que podem ser personalizados conforme o projeto ou obtidos em modelos padrão do método. Complementarmente, a análise demanda a definição do fluxo de aeronaves, permitindo que o usuário utilize o banco de dados nativo do software ou adicione novas aeronaves com propriedades customizadas para simular cenários específicos.

Já sobre o *software Alizé-Aéronautique*, desenvolvido pelo *Service Technique de l'Aviation Civile* (STAC), da França, baseia-se no método de dimensionamento racional aplicado a pavimentos aeroportuários. Em contraste com abordagens estritamente empíricas, o programa adota a teoria da elasticidade para sistemas multicamadas, permitindo a determinação

dos estados de tensão e deformação induzidos pelo carregamento do trem de pouso das aeronaves. No contexto da transição para o sistema ACR/PCR, o Alizé possibilita uma representação detalhada da estrutura do pavimento, bem como a avaliação do dano acumulado ao longo da vida útil, consolidando-se como uma ferramenta relevante para a verificação da capacidade de suporte de pistas submetidas às regulamentações europeias e às diretrizes internacionais da ICAO.

A versatilidade do Alizé decorre, sobretudo, da ampla possibilidade de customização dos parâmetros mecânicos dos materiais e das condições de interface entre as camadas estruturais. Essa flexibilidade permite a estimativa do PCR com base em um procedimento estritamente técnico, alinhado aos princípios do método mecanístico-empírico. Ademais, ao incorporar bibliotecas atualizadas com os valores de ACR das aeronaves, o *software* viabiliza análises comparativas entre a agressividade do tráfego aéreo e a resistência estrutural do pavimento projetado. Dessa forma, o Alizé consolida-se como uma alternativa robusta ao FAARFIELD, particularmente em estudos e projetos que demandam a aplicação do modelo francês para a gestão de ativos aeroportuários.

No caso do sistema PAVERS (*Pavement Analysis, Visualization, and Evaluation Reporting System*), por sua vez, constitui uma solução integrada de última geração para o gerenciamento e a avaliação de pavimentos aeroportuários. Desenvolvido com ênfase tanto na análise estrutural quanto funcional, o software emprega algoritmos avançados para o processamento de dados provenientes de bacias de deflexão, possibilitando a retroanálise e a determinação do módulo de resiliência das camadas *in situ*. No âmbito do novo paradigma ACR/PCR, o PAVERS atua como uma ferramenta de diagnóstico, ao correlacionar a vida útil remanescente do pavimento com os níveis de carregamento operacional, permitindo que o operador aeroportuário determine o PCR de maneira técnica e fundamentada em dados reais de campo.

Além da avaliação estrutural, o PAVERS destaca-se por suas funcionalidades de visualização e geração de relatórios de conformidade técnica, o que facilita a interpretação dos resultados em consonância com os anexos da ICAO. O software traduz a complexidade inerente aos cálculos de transferência de carga e aos mecanismos de fadiga dos materiais em indicadores objetivos de capacidade de suporte, sendo ainda capaz de simular cenários complexos de mistura de tráfego. Assim, posiciona-se como um sistema estratégico para a manutenção preventiva e para a classificação estrutural de pistas, assegurando que o PCR atribuído represente, com precisão, o comportamento mecânico do pavimento frente às solicitações da frota atual e futura.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia deste projeto de graduação. Primeiramente, descrevem-se os pavimentos e os fluxos de aeronaves escolhidos para as simulações. Em seguida, detalham-se o método de classificação, as ferramentas computacionais utilizadas e a abordagem aplicada para o tratamento dos dados.

3.1. Caracterização dos Aeroportos

Para este estudo, foi realizada a classificação da resistência estrutural da PPD de nove aeroportos, das cidades de Manaus/AM (SBEG), Cruzeiro do Sul/AC (SBCZ), Porto Velho/RO (SBPV), Goiânia/GO (SBGO), Petrolina/PE (SBPL), São Luís/MA (SBSL), Curitiba/PR (SBCT), Foz do Iguaçu/PR (SBFI) e Joinville/SC (SBJV) devido a possuírem fluxos e características estruturais distintas. Suas características físicas básicas, como localização, dimensões e orientação da pista foram obtidas por meio das publicações de Informação Aeronáutica do Brasil (DECEA, 2023).

Quanto às características físicas das PPD estudadas, os nove aeroportos selecionados apresentam três variações de pavimento flexível: sem reforço na sub-base, com reforço na sub-base e com base de solo-cimento (Tabela 4). Foram realizados testes no *software* FAARFIELD 2.0 com o objetivo de comparar o desempenho tanto entre pavimentos de mesma tipologia quanto entre as diferentes estruturas.

Tabela 4 – Caracterização das camadas dos aeroportos de estudo

Código do Aeroporto (ICAO)	Camada de CBUQ (MPa)	Base tratada com cimento (MPa)	Base Granular (MPa)	Sub-base Granular (MPa)	Subleito (MPa)
Pavimento flexível sem reforço na subbase					
SBCZ	1.647	-	530	-	275
SBPV	2.338	-	135	-	398
Pavimento flexível com reforço na subbase					
SBCT	2.168	-	892	300	148
SBSL	1.783	-	784	561	216
SBGO	5.289	-	1.022	516	134
SBJV	5.760	-	2.166	304	49
Pavimento flexível com base de solo-cimento					
SBEG	1.019	4.335	-	3.785	422
SBFI	8.467	363	-	589	165
SBPL	5.137	420	-	169	163

Fonte: Adaptado pelo autor (Santilli e Souza, 2024)

3.2. Definição do *Mix* de Aeronaves

Os fluxos de aeronaves que foram utilizados também foram obtidos da ANAC (2021), e são referentes aos nove aeroportos selecionados para estudo (Tabela 5). Para além disso, foi utilizado para essa etapa uma classificação dos tipos de fluxo por meio da definição da *EUROCONTROL* (2024). A definição da *EUROCONTROL* foi realizada em 2024, em um relatório de análise econômica do espaço aéreo europeu com todos os aeroportos membros da *European Civil Aviation Conference* (ECAC) com codificação ICAO ou IATA (*International Air Transport Association*), com o intuito de classificar os aeroportos por meio do seu fluxo de decolagens de aeronaves. A classificação divide os aeroportos e seus fluxos aéreos anuais de decolagem em Muito Grande, Grande, Médio, Pequeno e Outros (sendo esse grupo composto por aeroportos com baixo número de decolagens anuais, mas que compuseram 83% do fluxo anual total da amostra estudada do tráfego aéreo da região europeia) (Tabela 6).

Tabela 5 – Fluxo de aeronaves dos aeroportos de estudo (2021)

(continua)

Aeronave	SBCT	SBCZ	SBEG	SBFI	SBGO	SBJV	SBPL	SBPV	SBSL
Airbus A318	44	-	-	-	12	-	-	-	-
Airbus A319	2.863	-	741	634	1.927	934	-	94	294
Airbus A320	10.577	-	3.065	5.216	7.651	962	2.066	1.620	3.074
Airbus A321	3.607	-	3.438	1.592	-	-	-	-	2.020
Airbus A330-200	190	-	826	-	-	-	-	-	-
ATR-72-600	4.276	-	-	420	2.577	1.183	-	-	-
Beechcraft Baron	-	356	-	273	2.108	-	92	-	-
Beechcraft King	-	-	-	-	3.377	-	98	-	-
Air									
Boeing 727-200	876	-	244	-	-	-	-	-	-
Boeing 737-300	99	-	68	-	894	-	-	-	201
Boeing 737-400	109	-	838	-	66	-	-	-	40
Boeing 737-700	5.774	192	130	736	1.513	502	32	52	306
Boeing 737-800	9.685	606	7.669	4.976	3.734	728	570	2.786	2.863
Boeing 737 Max 8	-	-	220	-	-	-	-	22	-
Boeing 747-400	146	-	334	-	-	-	32	-	-
Boeing 747-8	66	-	84	-	-	-	-	-	-
Boeing 767-300	193	-	1.851	-	-	-	-	-	-

Aeronave	SBCT	SBCZ	SBEG	SBFI	SBGO	SBJV	SBPL	(conclusão) SBPV	SBSL
Cessna 152	-	-	-	-	1.836	151	-	-	-
Cessna 206	-	68	-	-	-	-	-	-	-
Station Air									
Cessna 208	-	202	-	-	-	-	248	2781	-
Caravan									
Cirrus SR22	-	-	-	-	-	-	86	-	-
Embraer 135	-	-	124	-	-	-	-	-	-
Embraer 170	-	-	50	-	-	-	-	-	-
Embraer 175	-	-	36	-	-	-	-	-	-
Embraer 190	3.016	-	423	562	2.227	162	80	28	36
Embraer 195	17.062	-	3.716	3.092	10.000	566	1.212	3.157	4.749
Embraer Phenom 100	611	-	-	-	-	-	-	-	-
Piper Cherokee Arrow	-	30	-	-	-	-	-	-	-
Piper P28B Dakota	-	156	-	-	-	-	-	-	-
Piper PA-32 Cherokee	-	2.867	-	-	-	-	-	-	-
Piper Seneca	-	543	-	393	4.624	270	170	633	769
Total	59.194	5.020	23.857	17.894	42.546	5.458	4.686	11.173	14.352

Fonte: Adaptado (ANAC, 2021)

Tabela 6 – Classificação do fluxo de aeronaves (EUROCONTROL, 2024).

Classificação	Fluxo anual de Aeronaves
Muito Grande	>250.000
Grande	250.000-150.000
Médio	149.999-40.000
Pequeno	39.999-15.000
Outros	<15.000

Fonte: Adaptada EUROCONTROL (2025)

Após a definição do fluxo de operações anuais de pouso e decolagens e da seleção dos aeroportos, as unidades foram nomeadas com base nos critérios estabelecidos pela

EUROCONTROL. Essa padronização foi adotada na Tabela 7 para simplificar o entendimento da intensidade do fluxo operacional em cada caso estudado.

Tabela 7 - Alteração na nomenclatura dos fluxos de aeronaves

Aeroporto de origem do Fluxo	Nova nomenclatura do Fluxo
SBPL	OUT5
SBCZ	OUT4
SBJV	OUT3
SBPV	OUT2
SBSL	OUT1
SBFI	PEQ2
SBEG	PEQ1
SBGO	MED2
SBCT	MED1

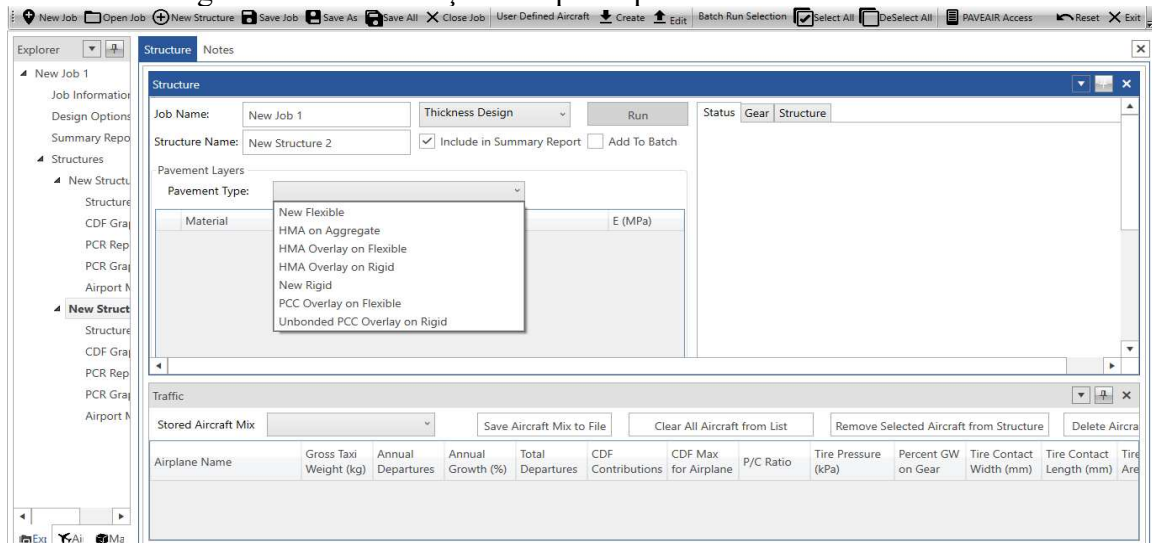
Fonte: Elaborada pelo Autor

3.3 Método de Classificação Estrutural ACR-PCR e Utilização do *Software* FAARFIELD

Utilizando os dados de resistências e espessuras dos pavimentos provenientes na literatura disponibilizados pelo DECEA, é possível determinar os valores de PCR, sub CDF (*Subgrade Cumulative Damage Factor*), tempo de vida e HMA CDF (*Hot Mix Asphalt Cumulative Damage Factor*) para cada pista analisada. Essas determinações são necessárias para caracterizar o impacto da variação do tráfego em cada tipo de estrutura e, conseqüentemente, quantificar sua real magnitude.

Em relação à utilização do *software*, os testes foram conduzidos na opção *New Flexible*, como o estudo foi realizado para pavimentos flexíveis (Figura 4). A inserção dos parâmetros estruturais das camadas do pavimento é realizada com base nos dados bibliográficos previamente levantados do DECEA. É importante destacar uma limitação do *software* FAARFIELD 2.0 no que se refere ao subleito: o programa restringe a inserção de valores de Módulo de Elasticidade (E) até 344,73 MPa, uma vez que utiliza o valor do CBR (*California Bearing Ratio*) para a simulação, realizando a conversão do módulo (E em MPa) para o CBR. Essa conversão impõe a limitação, visto que a faixa de CBR suportada pelo *software* varia, tipicamente, entre 0,7% e 33,3%

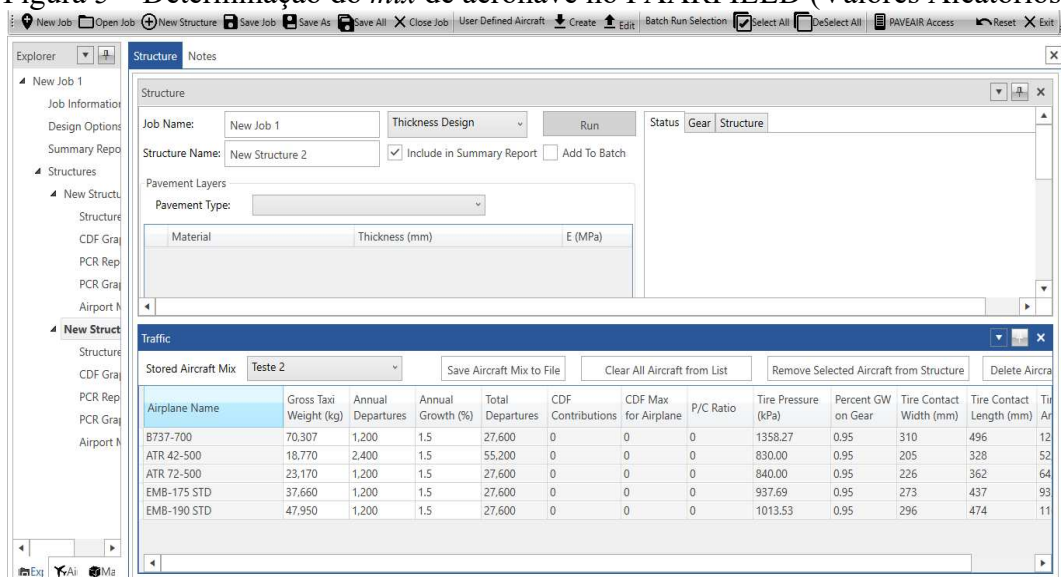
Figura 4 – Determinação do tipo de pavimento no FAARFIELD



Fonte: Elaborada pelo Autor

Após a seleção do tipo de pavimento a ser estudado (rígido ou flexível), é realizada a inserção dos dados de tráfego previamente definidos na aba *Traffic* do *software* (Figura 5). Destaca-se, também, as limitações encontradas devido à biblioteca do FAARFIELD 2.0 em relação a algumas aeronaves: as aeronaves ATR-72-600 e Cessna 152 não estavam presentes e foram substituídas, respectivamente, pelo ATR-72-500 e pelo Cessna 172, que apresentavam características similares. Por outro lado, as aeronaves Cirrus SR22 e Embraer Phenom 100 foram removidas da análise, pois a biblioteca do programa não dispunha de modelos semelhantes para substituição e seus dados não foram encontrados para serem adicionadas.

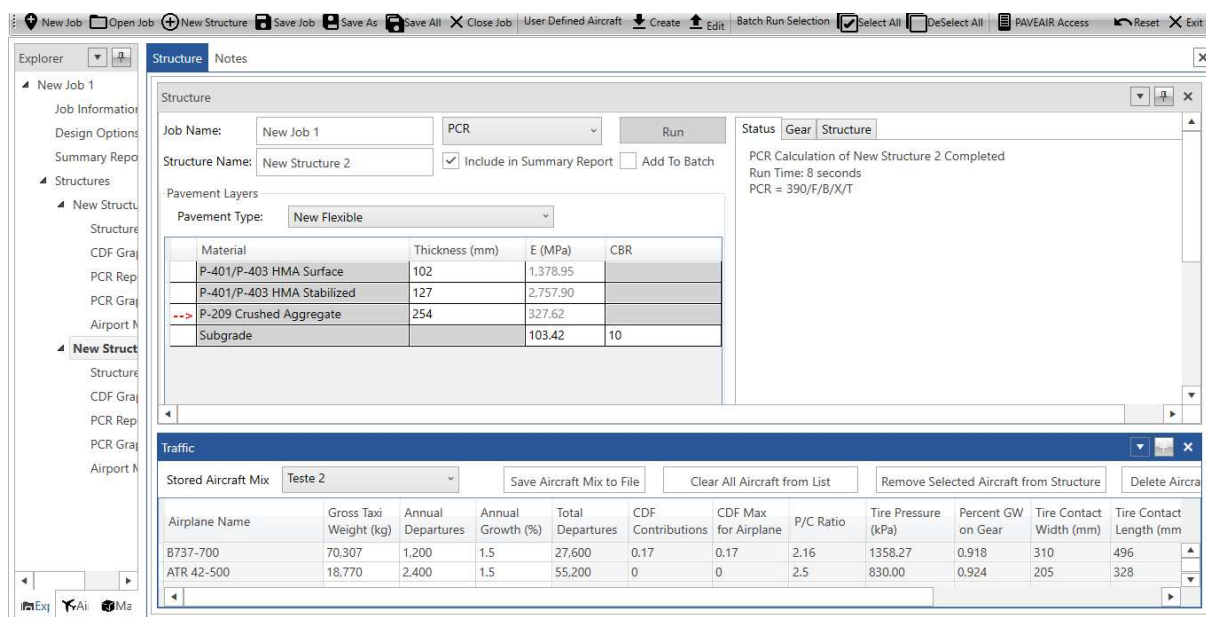
Figura 5 – Determinação do *mix* de aeronave no FAARFIELD (Valores Aleatórios)



Fonte: Elaborada pelo Autor

Para a finalização do teste, foi rodado o estudo de PCR no *software* que classificara o pavimento para o determinado tráfego a ser estudado (Figura 6). Os dados obtidos no software foram utilizados para que o modelo matemático fosse calibrado.

Figura 6 – Exemplo de classificação realizada no FAARFIELD (Valores Aleatórios)



Fonte: Elaborada pelo Autor

A partir dos dados de tráfego pré-selecionados, realizou-se o tratamento dos valores de PCR para cada pista de pouso e decolagem. Essa análise buscou verificar se há uma correlação matemática capaz de indicar o nível de impacto que a variação do fluxo aéreo exerce sobre a integridade estrutural do pavimento, cabe ressaltar que os valores de SUB CDF e HMA CDF não foram analisados.

3.4 Estudos de Correlação e Estatísticos

Para estabelecer um modelo matemático capaz de representar o comportamento estrutural dos pavimentos aeroportuários analisados, adotou-se uma abordagem baseada em *machine learning* de Inteligência Artificial (IA) com os *softwares* Gemini AI e Chat GPT, utilizando técnicas de regressão não linear. Essa escolha fundamenta-se no fato de que as relações entre as características dos materiais (espessura e propriedades mecânicas) e o tráfego não apresentam comportamento linear simples entre as variáveis.

A utilização de IA permitiu avaliar simultaneamente a influência das múltiplas características das camadas do pavimento e dos fluxos de tráfego considerados com os dados

obtidos na classificação PCR por meio do *software* FAARFIELD 2.0. Dessa forma, o modelo foi ajustado com base no comportamento observado nos resultados de referência, garantindo a aderência dos resultados obtidos pelo modelo com os dados de referência.

As variáveis utilizadas no modelo foram as mesmas para todas as pistas que foram estudadas, independentemente de possuírem determinada camada ou não. Tais variáveis compreendem o módulo de resiliência das camadas (MPa), a espessura das camadas (metros), o nível de tráfego anual e o valor de ACR/PCR encontrado em cada pista por meio do *software*.

Para os casos de camadas inexistentes, foram adotados os valores de 0,001 para a potência afim de evitar que o valor, por ser inexistente, influencie no resultado. A alimentação do modelo de IA foi realizada por meio da seguinte estrutura de dados (1):

$$\{HMA, CTB, GB, GsB, SB, h_{HMA}, h_{CTB}, h_{GB}, h_{GsB}, Fluxo\} \rightarrow ACR/PCR \quad (1)$$

Para a definição do modelo matemático de previsão do impacto do aumento do fluxo de aeronaves na classificação do pavimento, adotou-se um modelo multiplicativo baseado em expoentes. Essa formulação permite correlacionar as propriedades da camada de asfalto (HMA), da base de solo-cimento (CTB), da base granular (GB), da subbase granular (GsB) e do subleito (SB), juntamente com suas respectivas espessuras (h_{HMA} , h_{CTB} , h_{GB} , h_{GsB}) além do fluxo T , ao valor da classificação PCR (R).

Cabe ressaltar que, no processo de calibração do modelo, foi incorporado um fator global de correção associado ao número de Euler (e), cuja função é ajustar sistematicamente a equação aos resultados obtidos por meio do software de dimensionamento, contribuindo para o aumento da precisão do modelo. A expressão matemática correspondente ao modelo proposto é apresentada na Equação (2).

$$R \approx e^x * HMA^{\alpha_1} * CTB^{\alpha_2} * GB^{\alpha_3} * GsB^{\alpha_4} * SB^{\alpha_5} * HMA^{\beta_1} * CTB^{\beta_2} * GB^{\beta_3} * GsB^{\beta_4} * T^\gamma \quad (2)$$

A etapa seguinte consistiu em submeter o modelo a uma linearização logarítmica (3). Esse processo foi crucial para reduzir a variabilidade entre as ordens de grandeza das variáveis e permitir que os coeficientes (expoentes) fossem identificados diretamente pelos algoritmos de regressão. Vale destacar que o coeficiente x aplicado ao número de Euler serve como fator geral de correção.

$$\ln(R) = \ln(x) + \alpha_1 * \ln(HMA) + \alpha_2 * \ln(CTB) + \dots + \gamma * \ln(T) \quad (3)$$

Com a inserção dos dados na ferramenta de Inteligência Artificial (IA) e a equação já linearizada foi utilizado o modelo de Regressão Linear Multivariada (RLM), para determinar os valores iniciais e o comportamento das variáveis com a alteração dos expoentes. Além disso, foram utilizadas técnicas de regularização por métodos de regressão Ridge (L2), incluindo a otimização por meio do Ridge CV (Validação Cruzada), bem como o ajuste sistemático dos parâmetros para o aprimoramento dos resultados devido a erros encontrados quando aplicados somente a IA.

A avaliação do desempenho foi conduzida com base no erro quadrático médio, no desvio padrão dos resultados previstos em relação aos valores de referência, na análise de resíduos e em verificação por meio de um intervalo de confiança. Essa etapa de validação e ajuste fino mostrou-se essencial para garantir que o modelo final fosse não apenas estatisticamente adequado, mas também representativo do comportamento estrutural dos pavimentos aeroportuários analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os procedimentos e parâmetros de simulação previamente definidos no *software* FAARFIELD 2.0 resultaram nos valores de PCR apresentados na Tabela 8. Observou-se que a variação do fluxo de aeronaves provoca alterações perceptíveis nas classificações estruturais dos pavimentos analisados. Entretanto, essa variação não se apresenta de forma linear em relação ao volume do tráfego simulado, uma vez que quando os testes de classificações foram realizados com os tráfegos OUT2, PEQ1 e MED1 houve uma alta nos valores, como visto na Tabela 8, assim não se identificou uma correlação linear explícita entre a magnitude do valor de PCR com o aumento volume de tráfego simulado. Dessa forma, buscou-se identificar a razão para ausência de somente uma decadência dos valores de PCR conforme o aumento do fluxo.

Tabela 8 – Classificação PCR dos Pavimentos conforme o Mix de Aeronaves.

	OUT5	OUT4	OUT3	OUT2	OUT1
SBPL	2020/F/A/X/T	1220/F/A/X/T	1200/F/A/X/T	2080/F/A/X/T	1100/F/A/X/T
SBCZ	3460/F/A/X/T	1450/F/A/X/T	1420/F/A/X/T	2750/F/A/X/T	1270/F/A/X/T
SBJV	2360/F/D/X/T	1170/F/D/X/T	1160/F/D/X/T	1750/F/D/X/T	1070/F/D/X/T
SBPV	8080/F/A/X/T	2920/F/A/X/T	2870/F/A/X/T	4640/F/A/X/T	2700/F/A/X/T
SBSL	1160/F/A/X/T	750/F/A/X/T	730/F/A/X/T	1350/F/A/X/T	660/F/A/X/T
SBFI	2670/F/A/X/T	1620/F/A/X/T	1580/F/A/X/T	2700/F/A/X/T	1430/F/A/X/T
SBEG	9650/F/A/X/T	3710/F/A/X/T	3650/F/A/X/T	5830/F/A/X/T	3500/F/A/X/T
SBGO	3270/F/B/X/T	1820/F/B/X/T	1790/F/B/X/T	2800/F/B/X/T	1660/F/B/X/T
SBCT	1670/F/B/X/T	930/F/B/X/T	910/F/B/X/T	1570/F/B/X/T	830/F/B/X/T
	PEQ2	PEQ1	MED2	MED1	
SBPL	1120/F/A/X/T	1330/F/A/X/T	1050/F/A/X/T	1520/F/A/X/T	
SBCZ	1310/F/A/X/T	1220/F/A/X/T	1190/F/A/X/T	1460/F/A/X/T	
SBJV	1090/F/D/X/T	1530/F/D/X/T	1030/F/D/X/T	1650/F/D/X/T	
SBPV	2750/F/A/X/T	4170/F/A/X/T	2520/F/A/X/T	5340/F/A/X/T	
SBSL	670/F/A/X/T	700/F/A/X/T	640/F/A/X/T	780/F/A/X/T	
SBFI	1460/F/A/X/T	1600/F/A/X/T	1370/F/A/X/T	1840/F/A/X/T	
SBEG	3570/F/A/X/T	5100/F/A/X/T	3230/F/A/X/T	6590/F/A/X/T	
SBGO	1690/F/B/X/T	2570/F/B/X/T	1580/F/B/X/T	2780/F/B/X/T	
SBCT	850/F/B/X/T	1300/F/B/X/T	800/F/B/X/T	1400/F/B/X/T	

Fonte: Elaborada pelo Autor

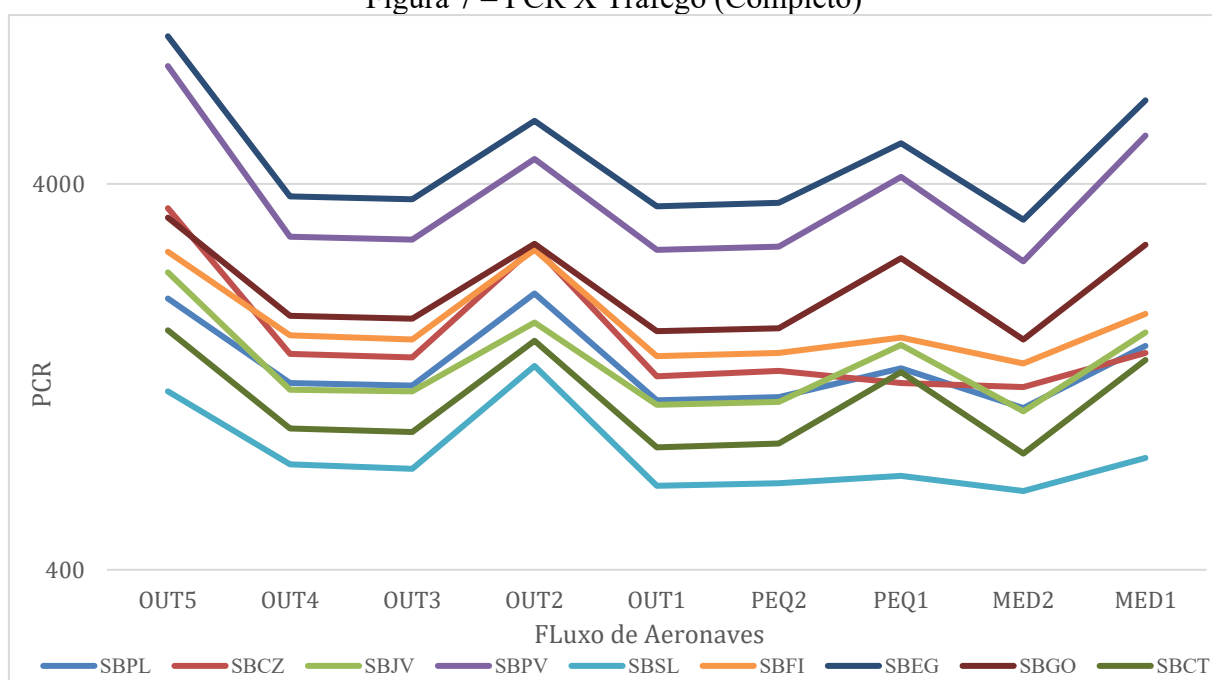
Destaca-se que para o estudo foi necessário somente o valor numérico da classificação do pavimento, tendo em vista que os sufixos da classificação (não dependentes da intensidade do tráfego aéreo em operação e somente de sua condição estrutural e realização das simulações) foram imutáveis durante os testes. Dessa forma, como todos os pavimentos estudados foram do

tipo flexível a obtenção da classificação F foi geral. Por sua vez, em se tratando de suas sub-bases, elas foram classificadas com resistências altas (A), médias (B) ou muito baixas (D), valor esse que se mantém constante por PPD realizada para simulação. Já a pressão máxima nos pneus nas aeronaves dos fluxos inseridos é constante em 1,75Mpa, classificando todos os pavimentos como X nesse critério, para além do sufixo T, presente em todas as classificações estruturais, por se tratar de uma avaliação técnica.

Observando-se os valores de ACR obtidos nos testes, destaca-se a variação de valores superior a 1.500%, sendo o menor ACR encontrado o de 640 no aeródromo SBSL (quando exposto ao segundo tráfego de maior intensidade) e o maior sendo de 9.650 no aeroporto SBEG (quando classificado com a utilização do menor tráfego selecionado para estudo). Como descrito anteriormente, a classificação ACR é dada pelo esforço da aeronave em um determinado pavimento. Dessa forma, torna-se compreensível o fato de a variação ocorrer conforme o *mix* de aeronaves no mesmo e em diferentes tipos de pavimentos.

Para além disso, fazendo uma análise da Figura 7, é possível perceber que quando os tráfegos OUT5, OUT2, PEQ1 e MED1 foram aplicados, a classificação dos pavimentos apresentaram uma alta no valor da sua classificação. Esse comportamento indica que esses fluxos possuem características de impacto estrutural distintas, reforçando a importância de considerar não apenas o volume, mas também a natureza do tráfego na avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos.

Figura 7 – PCR X Tráfego (Completo)



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a obtenção das classificações por meio do FAARFIELD 2.0, os dados de características físicas das pistas e dos fluxos, foram exportados para os *softwares* de IA (Gemini Ai e Chat GPT), o qual correlacionou as dimensões e resistências das camadas que compõem os pavimentos com os fluxos de tráfego analisados. A partir dessa correlação, foi proposta a formulação matemática (4) capaz de estimar o valor numérico de classificação do pavimento, cujos coeficientes para sua utilização são apresentados na Tabela 9. Essa abordagem teve como objetivo verificar a possibilidade de estimar a classificação estrutural de forma aproximada, sem a necessidade do uso direto do software de dimensionamento.

$$R \approx e^x * HMA^{\alpha 1} * CTB^{\alpha 2} * GB^{\alpha 3} * GsB^{\alpha 4} * SB^{\alpha 5} * HMA^{\beta 1} * CTB^{\beta 2} * GB^{\beta 3} * GsB^{\beta 4} * T^{\gamma} \quad (4)$$

Tabela 9 – Valores dos coeficientes

Expoente	Valor
x	0,0838697
$\alpha 1$	0,64549
$\alpha 2$	0,59584
$\alpha 3$	0,08265
$\alpha 4$	-0,09558
$\alpha 5$	0,63789
$\beta 1$	0,4349
$\beta 2$	-0,79632
$\beta 3$	0,51454
$\beta 4$	0,2102
γ	-0,07614

Fonte: Elaborada Pelo Autor

Cabe destacar que alguns coeficientes do modelo matemático apresentaram valores negativos, em especial aqueles associados ao módulo de resiliência da camada granular de reforço da sub-base e à espessura da camada de reforço por cimento. Esses valores não indicam que tais variáveis reduzem a classificação do pavimento conforme aumentam, mas sim que se fazem necessários para garantir a consistência do modelo em situações nas quais determinadas camadas estruturais não estão presentes, evitando distorções nos resultados obtidos pelo modelo.

A aplicação inicial do modelo matemático aos dados estudados resultou nos valores apresentados na Tabela 10. Quando comparados aos resultados obtidos pelo FAARFIELD 2.0, observou-se a variação percentual apresentada na Tabela 11, com uma média de 4% acima do valor calculado pelo software e um desvio padrão de 26%. Esses resultados indicam que, embora o modelo matemático consiga reproduzir a ordem de grandeza das classificações, sua precisão inicial ainda se mostra limitada dentro da amostra analisada.

Tabela 10 - Resultados do PCR por meio do modelo matemático (antes do ajuste)

	OUT5	OUT4	OUT3	OUT2	OUT1	PEQ2	PEQ1	MED2	MED1
SBJV	1.489	1.482	1.472	1.394	1.368	1.345	1.316	1.259	1.228
SBPV	4.027	4.006	3.980	3.769	3.698	3.636	3.557	3.404	3.320
SBEG	5.066	5.040	5.008	4.742	4.652	4.575	4.476	4.283	4.176
SBGO	2.328	2.316	2.301	2.179	2.138	2.102	2.057	1.968	1.919
SBCT	1.191	1.185	1.178	1.115	1.094	1.076	1.052	1.007	982
SBCZ	1.741	1.732	1.721	1.629	1.598	1.572	1.538	1.471	1.435
SBSL	868	864	858	813	797	784	767	734	716
SBFI	1.905	1.895	1.883	1.783	1.749	1.720	1.683	1.610	1.570
SBPL	1.480	1.473	1.463	1.386	1.359	1.337	1.308	1.251	1.220

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 11 - Resultado matemático/Classificação *software* (%) (antes do ajuste)

(continua)

	OUT5	OUT4	OUT3	OUT2	OUT1	PEQ2	PEQ1	MED2	MED1
SBJV	63%	127%	127%	80%	128%	123%	86%	122%	74%
SBPV	50%	137%	139%	81%	137%	132%	85%	135%	62%
SBEG	53%	136%	137%	81%	133%	128%	88%	133%	63%
SBGO	71%	127%	129%	78%	129%	124%	80%	125%	69%

	(conclusão)								
	OUT5	OUT4	OUT3	OUT2	OUT1	PEQ2	PEQ1	MED2	MED1
SBCT	71%	127%	129%	71%	132%	127%	81%	126%	70%
SBCZ	50%	119%	121%	59%	126%	120%	126%	124%	98%
SBSL	75%	115%	118%	60%	121%	117%	110%	115%	92%
SBFI	71%	117%	119%	66%	122%	118%	105%	118%	85%
SBPL	73%	121%	122%	67%	124%	119%	98%	119%	80%

Fonte: Elaborada pelo autor

Com o estudo realizado, observou-se que ao aplicar a equação matemática nos fluxos OUT4, OUT3, OUT1, PEQ2 e MED2 o resultado comportou-se de forma semelhante, com o resultado variando entre 15% e 37% acima do valor. Em função desse padrão, um novo estudo foi feito somente com esses fluxos, sem a alteração dos expoentes com exceção do coeficiente x , que corresponde à potência do número de Euler, esse foi ajustado para o valor de $-0,14265$. A reaplicação do modelo com esse ajuste resultou nos valores apresentados na Tabela 12, os quais apresentaram uma variação percentual média de apenas 0,26% em relação aos resultados do FAARFIELD 2.0, com desvio padrão reduzido para 5%, indicando um ganho significativo de precisão do modelo.

Tabela 12 - Resultados do PCR por meio do modelo matemático (após ajuste)

(continua)

	OUT4	OUT3	OUT1	PEQ2	MED2
SBJV	1.181	1.174	1.090	1.072	1.004
SBPV	3.194	3.173	2.948	2.899	2.714
SBEG	4.018	3.992	3.709	3.647	3.414
SBGO	1.846	1.834	1.704	1.676	1.569

	OUT4	OUT3	PEQ1	PEQ2	(conclusão) MED2
SBCT	945	939	872	858	803
SBCZ	1.380	1.372	1.274	1.253	1.173
SBSL	689	684	636	625	585
SBFI	1.511	1.501	1.394	1.371	1.284
SBPL	1.174	1.167	1.084	1.066	998

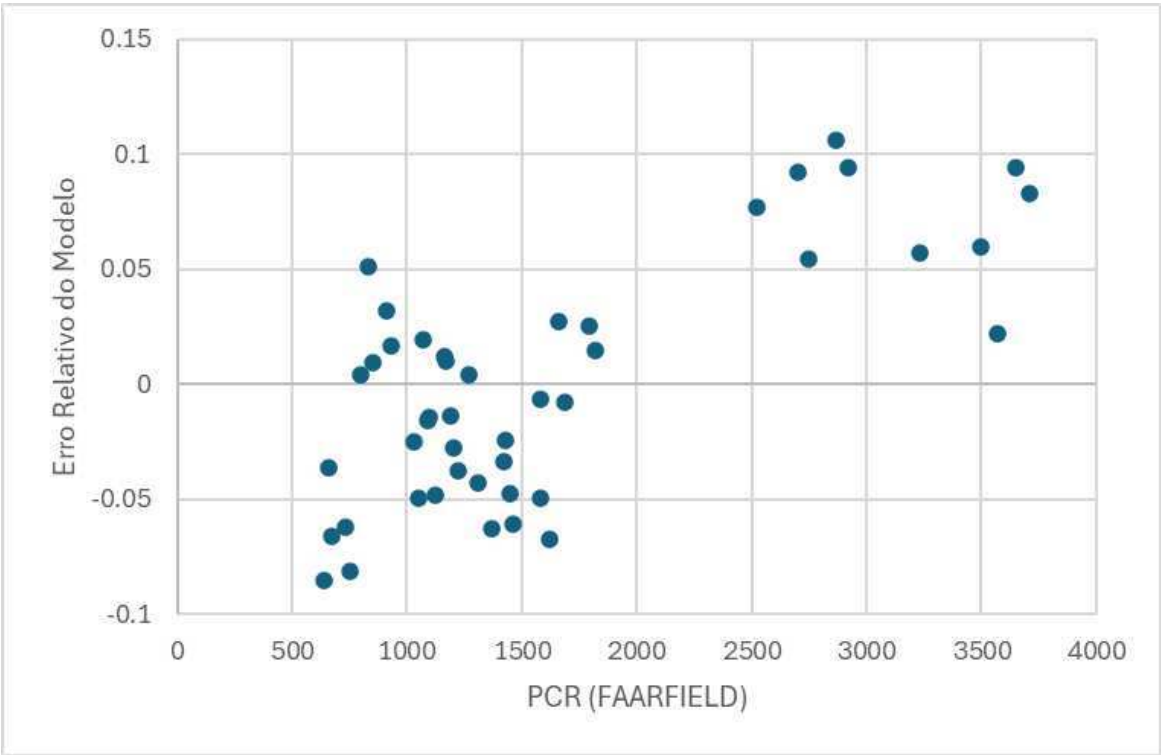
Fonte: Elaborada pelo autor

Além disso, a avaliação do desempenho do modelo foi complementada por meio da análise dos resíduos, definida a partir do erro relativo entre os valores de PCR estimados pelo modelo matemático e aqueles obtidos pelo software FAARFIELD 2.0. A verificação foi feita por meio da equação de análise de resíduos (5) e demonstrada na Figura 8.

$$ER_i = \frac{PCR_{modelo} - PCR_{FAARFIELD}}{PCR_{FAARFIELD}}$$

(5)

Figura 8 – ER_i X PCR (FAARFIELD)



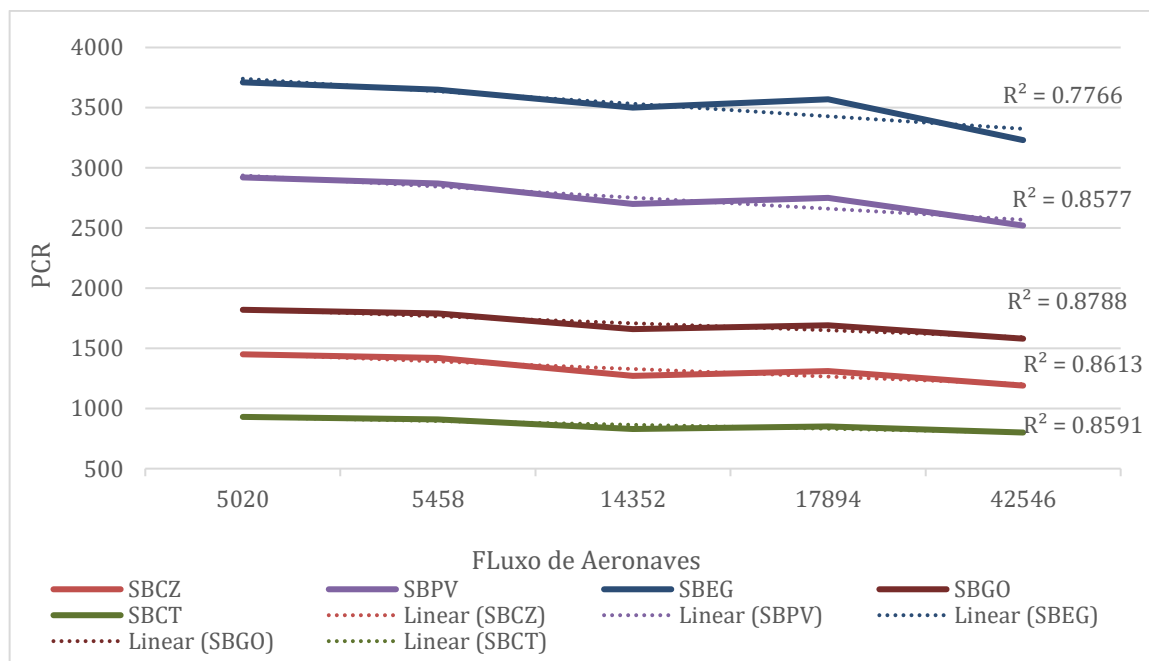
Fonte:Elaborada pelo Autor

Observa-se que os resíduos se distribuem de forma aproximadamente aleatória em torno do valor zero, sem evidência de tendência sistemática em função da variável independente, indicando ausência de viés associado à magnitude do PCR analisado. Ademais, a análise do intervalo de confiança de 95% do erro relativo médio obtido por meio da fórmula (6), na qual $\overline{ER}$ representa o erro relativo médio, σ_{ER} o desvio padrão do erro relativo e n o número de variações, para o modelo proposto situa-se entre $-1,52\%$ e $+1,52\%$, englobando o valor zero e apresentando amplitude reduzida. Esse resultado indica a ausência de viés estatisticamente significativo, bem como elevada precisão média do modelo, evidenciando sua adequação para a estimativa da classificação PCR dos pavimentos aeroportuários analisados.

$$IC_{95\%} = \overline{ER} \pm 1,96 * \frac{\sigma_{ER}}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

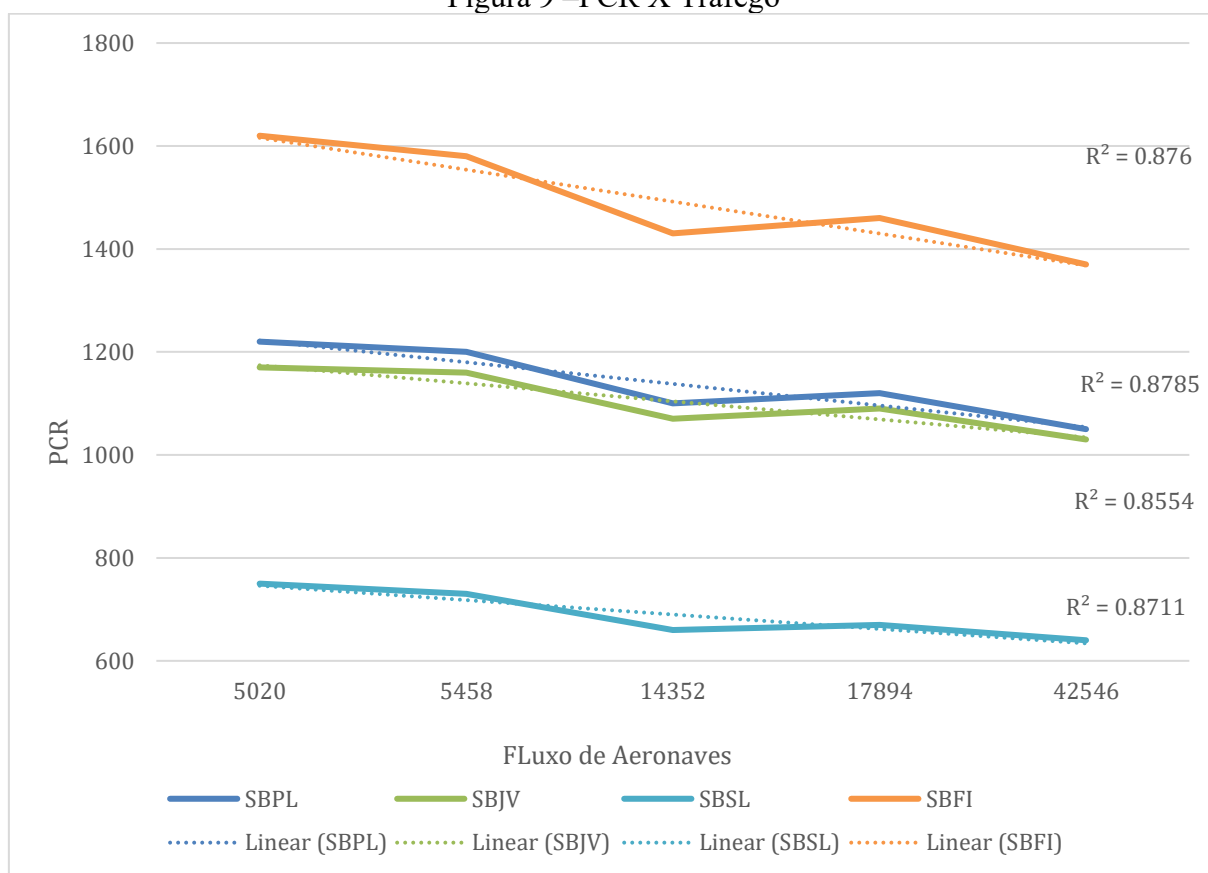
Por fim, ao avaliar os pavimentos estudados exclusivamente os fluxos utilizados para a calibração do modelo matemático, observa-se que as classificações obtidas pelo FAARFIELD de resistência dos pavimentos apresentadas nas Figuras 9 e 10 exibem comportamento próximo ao linear. A aplicação de linhas de tendência por meio de equações lineares resultou em um coeficiente de determinação médio (R^2) de 0,87, além de um fator de multiplicação do tráfego sempre negativo. Esse resultado reforça a consistência do comportamento observado entre tráfego e classificação estrutural dentro do conjunto de dados utilizado na calibração.

Figura 9 –PCR X Tráfego



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 –PCR X Tráfego



Fonte: Elaborado pelo autor

Tratando-se da diferença de comportamento quando a classificação estrutural do pavimento era realizada por meio do *software* ou pelo modelo matemático, a diferença se dava pelo fato da presença de aeronaves de maior porte como o Boeing 737 Max 8, Boeing 747-400, Boeing 747-8 e Boeing 767- 300 nos fluxos OUT5, OUT2, PEQ1 e MED1. A presença dessa aeronaves aumentava o valor de PCR do pavimento, uma vez que essas aeronaves possuem um maior valor de ACR e para que sua operação fosse possível no pavimento, o valor de PCR subia, uma vez que parte da classificação se dá pelo ACR da aeronave crítica. Essa observação é crucial também para o modelo matemático proposto, uma vez que o foi calibrado excluindo os fluxos com as maiores aeronaves, limitando sua utilidade para fluxos que possuam composição semelhantes ao conjunto de aeronaves dos fluxos OUT4, OUT3, OUT1, PEQ2 E MED2.

A análise dos resultados obtidos neste estudo evidenciou que a classificação estrutural dos pavimentos aeroportuários pelo método ACR/PCR é sensível às variações no mix de aeronaves considerado, mas não apresentando comportamento linear ao se aplicar qualquer composição de fluxo e ao seu aumento. Observou-se que diferentes composições de tráfego,

mesmo com intensidades semelhantes, resultaram em valores distintos de classificação, reforçando que a resposta estrutural do pavimento depende não apenas da quantidade de operações, mas principalmente das características das aeronaves que compõem o fluxo analisado.

Os resultados também indicaram que determinados fluxos de tráfego apresentaram comportamento semelhante entre si, permitindo a calibração de um modelo matemático capaz de estimar, de forma aproximada, a método de classificação ACR/PCR sem a necessidade do uso direto do software FAARFIELD. Embora a aplicação inicial do modelo tenha apresentado elevada dispersão, o ajuste dos coeficientes para os fluxos com comportamento convergente resultou em significativa redução da variação percentual e do desvio padrão, demonstrando a viabilidade do método proposto dentro do conjunto de dados analisado.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a importância de uma caracterização criteriosa do *mix* de aeronaves na aplicação do método ACR/PCR, bem como a necessidade de análises complementares que auxiliem na interpretação dos resultados fornecidos pelos *softwares* de dimensionamento. O estudo contribui para uma melhor compreensão da influência do tráfego aéreo na classificação estrutural dos pavimentos, oferecendo subsídios técnicos para avaliações mais consistentes e alinhadas às condições operacionais reais dos aeródromos.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho, como também suas limitações para o uso do modelo matemático somente para fluxos de aeronaves semelhantes. As sugestões para pesquisas futuras estão registradas no final deste capítulo.

5.1. Principais Conclusões

A classificação estrutural dos pavimentos aeroportuários pelo método de classificação ACR/PCR é sensível às variações no *mix* de aeronaves, não apresentando comportamento linear em relação ao aumento do volume de tráfego aéreo de qualquer maneira, mas sim quando apresentado a aumento de fluxo com a mesma base de aeronaves. Assim, verificou-se que diferentes composições de aeronaves resultam em níveis distintos de solicitação estrutural, mesmo em cenários com intensidades de tráfego semelhantes, evidenciando que a resposta do pavimento depende das características das aeronaves que compõem cada fluxo analisado.

Determinados fluxos de aeronaves apresentaram comportamentos semelhantes, possibilitando a calibração de um modelo matemático capaz de estimar, de forma aproximada, o método de classificação ACR/PCR. Após o ajuste dos coeficientes, observou-se uma redução da variação média em relação aos valores obtidos por meio do *software* FAARFIELD, indicando que o modelo proposto se mostrou viável dentro do conjunto de dados analisado e adequado para representar a tendência observada nas classificações estruturais.

De modo geral, os resultados reforçam a importância de uma caracterização criteriosa do tráfego aéreo operante na PDD para a aplicação do método ACR/PCR, evidenciando que a consideração do volume de operações não é suficiente para representar adequadamente o impacto estrutural das aeronaves dos pavimentos aeroportuários. Assim, a composição do fluxo de aeronaves destaca-se como importante na avaliação da capacidade estrutural.

5.2. Limitações do Estudo

Este estudo apresenta limitações relacionadas à base de dados analisada, uma vez que as simulações foram realizadas a partir de um conjunto específico de estruturas de pavimento e fluxos de aeronaves. Além disso, o modelo matemático desenvolvido foi calibrado com base em cenários particulares, o que restringe sua aplicação direta a outras condições estruturais e operacionais sem ajustes adicionais.

5.3. Proposição de Estudos Futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados à classificação de resistência estrutural de pavimentos aeroportuários podem ser destacadas, a saber:

- a) Propor novos modelos matemáticos que consigam ser mais precisos e servir de alternativa para a classificação do pavimento, para além do uso de *softwares*;
- b) Analisar a precisão do modelo matemático proposto para a classificação estrutural de pavimentos de estrutura rígida;
- c) Analisar se o impacto do aumento dos fluxos das aeronaves na classificação estrutural ACR do pavimento é relevante quando é realizado em pavimentos rígidos.

REFERÊNCIAS

ABEAR - Associação Brasileira Das Empresas Aéreas. **Panorama ABEAR**: dados do setor aéreo. Versão 12.25.1. [S. l.]: ABEAR, 2025. Dashboard interativo. Disponível em: <https://l1nq.com/ABEAR2025>. Acesso em: 4 jan. 2026.

ABNT. **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Manual de Cálculo de PCR de Pavimentos Aeroportuários**. [Brasília, DF]: ANAC, 2022.

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários – SGPA**. 1. ed. [Brasília, DF]: ANAC, 2017

ANAC (2021) **Banco de Dados - Concessões de Aeroportos**. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/conteudo/aviacao/banco-de-dados>. Acesso em: 05/20/2021.

ANAC – AUTORIDADE NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. **Glossário da Aviação Civil**. Lisboa: ANAC – Autoridade Nacional da Aviação Civil, 2015.

ANDRADE JUNIOR, Pedro Roberto de; REIS, Elton Aparecido Prado dos. **Principais diferenças entre o pavimento flexível e o pavimento rígido**. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (ETIC), 2018, [S. l.].

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

BARROS, Joaquim. **Conceitos básicos da teoria da elasticidade**. 2004. Capítulo 2 Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/13006/6/capa_Cap2.pdf. Acesso em 31 dezembro de 2025.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2022. 750 p. ISBN 978-85-69658-02-3.

CASTRO, Cecilia Catarina Oliveira de. **Análise comparativa entre os métodos ACN/PCN e ACR/PCR para classificação de resistência de pavimentos flexíveis aeroportuários / Cecilia Catarina Oliveira de Castro**. - 2021. 143 f: il color

CHÂTEAU DE VERSAILLES. **First hot air balloon flight**. [S. l.], [20--?]. Disponível em: <https://en.chateauversailles.fr/discover/history/key-dates/first-hot-air-balloon-flight>. Acesso em: 9 jul. 2025.

CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília, 2017.

DECEA (2023) **Informações Aeronáuticas do Brasil**. Disponível em: <https://aisweb.decea.mil.br/>. Acesso em 12 de outubro 2024).

DIAS, P. D. **Aviação Civil: História**. Sorocaba-SP: [s. n.], 2023. Slide de aula. Disponível em: <https://www.pdias.com.br/wp-content/uploads/2023/10/Aviacao-Civil-Historia.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2025.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentos rígidos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 445/2023 - ES: Terraplenagem - Revestimento primário - Especificação de serviço**. Brasília, DF: IPR, 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 137/2010-ES: Pavimentação - Regularização do subleito - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 141/2022 - ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Brasília, DF: IPR, 2022.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 139/2010 - ES: Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

EUROCONTROL. **EUROCONTROL Standard Inputs for Economic Analyses**. Edição 10.0. Bruxelas: EUROCONTROL, maio 2024. Disponível em: <https://ansperformance.eu/economics/cba/standard-inputs/>. Acesso em: 1 jan. 2026

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation. Advisory Circular 150/5320-6E**. Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 2009

FAA. **Advisory Circular 150/5320-6G: Airport Pavement Design and Evaluation**. Washington. Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 2021

FAA. **Advisory Circular 150/5335-5D: Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCR**. Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 2024.

FAA. **FAARFIELD 2.0: Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design**. Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 2022.

FABRE, C.; BALAY, J.-M. **The New ICAO Method for Reporting Airport Pavement Strength. In:** Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements. Los Angeles: ASCE, 2013. p. 1104-1115.

FIORAVANTI, Thiago. **Evolução dos métodos de classificação de pavimentos aeroportuários: do sistema ACN/PCN ao ACR/PCR. Concreto**, São Paulo, ed. 120, p. 47-50, out./dez. 2025.

GUEL, Karina Cristina; LOCASTRO, João Karlos; JORGE, Gabriel Xavier. **Análise técnica comparativa entre pavimento rígido e flexível. Journal of Exact Sciences - JES**, [S. l.], v. 42, n. 2, jul./set. 2024.

ICAO (1983). **Aerodrome Design Manual – Part 3: Pavements (Doc 9157)**. International Civil Aviation Organization, Montreal.

ICAO (2020). **Aerodrome Design Manual – Part 3: Pavements 2. ed (Doc 9157)**. International Civil Aviation Organization, Montreal.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS (Brasil). **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

Kim, S.; Tutumluer, E. (2016). **Evaluation of Airport Pavement Structural Capacity Using Mechanistic-Empirical Approaches**. Transportation Research Record, 2569(1), 12–22.

LIZ, Tenente Wanessa. Força Aérea Brasileira. **Independência do Brasil - O Fato Histórico de Santos Dumont em 7 de setembro: Um Marco na Aviação**. Brasília, DF, [2023].

Disponível em:

<https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/41497/INDEPEND%C3%8ANCIA%20DO%20BRASIL%20-%20O%20Fato%20Hist%C3%B3rico%20de%20Santos%20Dumont%20em%207%20de%20setembro:%20Um%20Marco%20na%20Avia%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MATIAS, Rubens Feitosa. **Revisão bibliográfica sobre pavimento rígido e pavimento flexível considerando dimensionamento e custos**. 2022. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MOHOD, Milind V.; KADAM, K. N. **A comparative study on rigid and flexible pavement: a review. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, [S. l.], v. 13, n. 3, Ver. VII, maio/jun. 2016.

PIGOSSI, Delma de Mattos. **Estudo do método de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA**. 2012. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2012.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos: com exercícios resolvidos em unidades SI**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROSA, José Eduardo Fernandes; MATA, Miguel Melo; SABINO, Diogo Ferreira; MACEDO, Paulo Luís Granja; MONTEIRO, Pedro Manuel Brito. **História da Aviação: Das Primeiras Ideias à Primeira Guerra Mundial**. Trabalho acadêmico. Lisboa, 2015.

Disponível em:

<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428727971/Grupo%2015.pdf>>. Acesso em: Jul. 2025.

SANTILLI, S. R.; CORREIA, N. de S. **Análise do fator de dano acumulado (CDF) de 20 pavimentos aeroportuários brasileiros utilizando FAARFIELD e BAKFAA**. *Transportes*, [S. l.], v. 32, n. 2, 2024. DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2973. Disponível em: <https://transportes.anpet.org.br/anpet/article/view/2973>. Acesso em: 3 jan. 2026.

SENÇO, Wladimir. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: PINI, 2007.

SILVA, Odair Vieira da; SANTOS, Rosiane Cristina dos. **Trajetória histórica da aviação mundial**. *Revista Científica Eletrônica de Turismo*. Ano VI – Número 11 – Junho de 2009 – Periódicos Semestral

SILVA, Carla de Oliveira; ALVES, Gleidiane Lopes de Souza; GOTARDO, Isadora Portiguara. **Pavimento flexível no Brasil: um estudo bibliográfico**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, [S. l.], ed. 04, n. 02, v. 01, jul. 2017.

SOUZA, Ruiter da Silva. **Terraplanagem e Pavimentação: Aula 2 - Definição e Classificação do Pavimento**. [S. l.]: [s.n.], [s.d.]. Notas de aula.

SOUZA, M. A. P. **Análise do efeito do comportamento não linear dos solos em radier estaqueado**. 2014. 165 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) -Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SOUZA, Rodrigo de Azevedo; SANTANA, Sabrina da Silva; PINHEIRO, Érika Cristina Nogueira Marques. **Aplicação de pavimento flexível – estudo de caso da recuperação do sistema viário no município de Urucará/Amazonas**. *Brazilian Journal of Development (BJD)*, [S. l.], v. 8, n. 11, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n11-244.

VASCONCELLOS, A. de **Actualidades científicas. A aeroestação**. Porto, Livraria Portuense de Lopes & c. Successor, 1908

YODER, Eldon Joseph; WITCZAK, Matthew W. **Principles of pavement design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.