

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Guilherme Ernando Simoes de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA
COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA
COMPATIBILIDADE OPERACIONAL ENTRE
AERONAVES E PISTAS DE AERÓDROMOS BASEADA
NOS ÍNDICES PCR E ACR**

Trabalho de Graduação
2025

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Guilherme Ernando Simoes de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA
COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA
COMPATIBILIDADE OPERACIONAL ENTRE
AERONAVES E PISTAS DE AERÓDROMOS BASEADA
NOS ÍNDICES PCR E ACR**

Orientadora

Prof^a. Dr^a. Cláudia Azevedo Pereira (ITA)

Coorientador

Cap. Eng. Edmir José dos Santos Júnior (CEPE)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Oliveira, Guilherme Ernando Simoes de

Desenvolvimento de ferramenta computacional para avaliação da compatibilidade operacional entre aeronaves e pistas de aeródromos baseada nos índices PCR e ACR / Guilherme Ernando Simoes de Oliveira.

São José dos Campos, 2025.

108f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cláudia Azevedo Pereira. Coorientador: Cap. Eng. Edmir José dos Santos Júnior.

1. Aeroportos. 2. Pavimentos. 3. Pistas (de pouso e decolagem). 4. Análise estrutural. 5. Engenharia civil. 6. Engenharia estrutural. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, Guilherme Ernando Simoes de. **Desenvolvimento de ferramenta computacional para avaliação da compatibilidade operacional entre aeronaves e pistas de aeródromos baseada nos índices PCR e ACR**. 2025. 108f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Guilherme Ernando Simoes de Oliveira

TÍTULO DO TRABALHO: Desenvolvimento de ferramenta computacional para avaliação da compatibilidade operacional entre aeronaves e pistas de aeródromos baseada nos índices PCR e ACR.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Guilherme Ernando Simoes de Oliveira
Rua Paraibuna, 443 - Jardim São Dimas
CEP 12250-021 – São José dos Campos - SP

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA
COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA
COMPATIBILIDADE OPERACIONAL ENTRE
AERONAVES E PISTAS DE AERÓDROMOS BASEADA
NOS ÍNDICES PCR E ACR**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Guilherme Ernando Simoes de Oliveira

Autor

Prof^a. Dr^a. Cláudia Azevedo Pereira (ITA)

Orientadora

São José dos Campos, 06 de novembro de 2025.

*À minha esposa Larissa, pelo amor,
paciência e apoio incondicional.*

*Por ser meu alicerce em cada conquista e
meu refúgio nos momentos de incerteza.*

Nada disso seria possível sem você.

Agradecimentos

A Deus, minha eterna gratidão, por ter me concedido o dom da vida e por iluminar cada passo da minha caminhada. Foi pela Sua graça que pude viver o sonho de estudar no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), um objetivo que um dia pareceu distante, mas que se tornou realidade através das oportunidades e forças que Ele me concedeu.

À minha família, dedico um agradecimento especial por todo o amor, apoio e compreensão ao longo de toda a trajetória. Cada palavra de incentivo e cada gesto de carinho foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha esposa, **Larissa**, minha eterna companheira, minha base e meu refúgio. Desde os tempos em que eu ainda nem imaginava estudar seriamente, lá no ensino fundamental, até a aprovação e, agora, conclusão no ITA, você esteve ao meu lado, acreditando em mim quando eu mesmo duvidava. Seu amor e sua presença constante foram o que me sustentaram nos momentos mais difíceis e me impulsionaram nas conquistas mais significativas.

À minha professora e orientadora, **Cláudia Azevedo Pereira**, expresso minha mais profunda admiração e gratidão. Sua orientação foi essencial não apenas para o desenvolvimento deste trabalho, mas para minha formação como engenheiro e como pessoa. No decorrer desse processo, ganhei não apenas uma orientadora excepcional, mas também uma verdadeira amiga e uma mãe acadêmica, cuja dedicação e apoio foram indispensáveis em todos os momentos.

Ao **Felipe Hernandez Cava**, fundador do *Além da Inércia* e uma grande referência na área de pavimentação no Brasil, registro meu sincero agradecimento por ter aceitado o convite para compor a banca avaliadora e por estar sempre disposto a contribuir, compartilhar conhecimento e oferecer ajuda ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua participação e disponibilidade foram uma honra e um privilégio.

A todos os meus colegas da Engenharia Civil, que tornaram essa jornada mais leve e significativa, em especial **Matheus Vasconcelos Vilela**, **Eduardo Bezerra Robalinho Dantas da Gama** e **João Victor dos Santos**. Agradeço pelas inúmeras horas de estudo, pelos projetos desafiadores, pelas conversas e pelas risadas que tornaram o caminho mais prazeroso.

Por fim, deixo meus sinceros agradecimentos ao **Centro de Estudos e Projetos de Engenharia da Aeronáutica (CEPE)** e a todo o seu efetivo, representado pelo seu comandante **Cel.**

Eng. Frank Cabral de Freitas Amaral e pelo meu coorientador, **Cap. Eng. Edmir José dos Santos Júnior**, pelo acolhimento, pela confiança e pelo apoio constante desde o estágio até a conclusão deste trabalho. A convivência e a troca de experiências com essa equipe foram determinantes para a realização deste projeto e para o meu amadurecimento profissional.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse possível, o meu mais sincero e profundo agradecimento.

“Não é falta de humildade conheceres o progresso da tua alma. - Assim podes agradecê-lo a Deus. - Mas não te esqueças de que és um pobrezinho, que veste um bom terno... emprestado.”
— SÃO JOSEMARIA ESCRIVÁ, *Caminho*, n.º 608

Resumo

O presente trabalho desenvolve uma ferramenta computacional para a avaliação automatizada da compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos aeroportuários, com base na metodologia ACR/PCR (*Aircraft Classification Rating / Pavement Classification Rating*), recentemente adotada pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO) em substituição ao sistema ACN/PCN. A ferramenta, foi implementada em C#, utilizando o framework .NET MAUI e a arquitetura MVVM, integrando a biblioteca oficial `ACRClassLib.dll` para o cálculo do índice ACR e um algoritmo iterativo baseado no Método da Secante para determinar o peso máximo operacional compatível com cada estrutura de pavimento. A aplicação opera a partir de bancos de dados XML que reúnem as principais estruturas de pavimento sob responsabilidade da Força Aérea Brasileira (FAB) e as aeronaves militares e civis que operam nesses aeródromos, permitindo análises automáticas e padronizadas. A validação frente ao software ICAO-ACR demonstrou elevada precisão, com erro inferior a 0,1%, confirmando a confiabilidade do sistema. A ferramenta representa um avanço significativo para a gestão da infraestrutura aeroportuária da FAB, alinhando-se às diretrizes da ICAO e contribuindo para a eficiência e segurança das operações aéreas.

Abstract

The present work develops a computational tool for the automated evaluation of operational compatibility between aircraft and airport pavements, based on the ACR/PCR (Aircraft Classification Rating / Pavement Classification Rating) methodology, recently adopted by the International Civil Aviation Organization (ICAO) to replace the ACN/PCN system. The system, was implemented in C#, using the .NET MAUI framework and the MVVM architecture, integrating the official library `ACRClassLib.dll` for the calculation of the ACR index and an iterative algorithm based on the Secant Method to determine the maximum operational weight compatible with each pavement structure. The application operates from XML databases that compile the main pavement structures under the responsibility of the Brazilian Air Force (FAB) and the military and civil aircraft that operate at these airfields, enabling automated and standardized analyses. Validation against the ICAO-ACR software demonstrated high accuracy, with an error of less than 0.1%, confirming the reliability of the system. The tool represents a significant advancement in the management of the FAB's airport infrastructure, aligning with ICAO guidelines and contributing to the efficiency and safety of air operations.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Paralisação do setor aeronáutico devido ao COVID-19	23
FIGURA 1.2 – Imagem ilustrativa de um <i>Falling Weight Deflectometer</i> (FWD)	24
FIGURA 1.3 – Capa do e-book	25
FIGURA 3.1 – Exemplo de danos estruturais em pavimentos devido a solicitações excessivas de aeronaves.	33
FIGURA 3.2 – Imagem ilustrativa que busca representar o conceito do CDF.	35
FIGURA 3.3 – Carga do trem de pouso no pavimento — Airbus A330-300.	42
FIGURA 3.4 – Representação esquemática do cálculo do ACR para pavimentos flexíveis.	43
FIGURA 4.1 – Etapas metodológicas do desenvolvimento da ferramenta computacional.	51
FIGURA 4.2 – Ambiente de desenvolvimento no Visual Studio 2022 Community Edition.	52
FIGURA 4.3 – Processo de compilação e execução no ambiente .NET, em que diferentes linguagens (C#, VB.NET, etc.) são convertidas em código intermediário comum (CIL) e executadas pelo CLR, garantindo interoperabilidade.	53
FIGURA 4.4 – Arquitetura multiplataforma do .NET MAUI, que permite compilar e executar uma mesma aplicação .NET de forma nativa em iOS, Android, macOS e Windows, garantindo portabilidade e desempenho uniforme.	55
FIGURA 4.5 – Representação simplificada do padrão arquitetônico MVVM. A <i>View</i> interage com o <i>ViewModel</i> por meio de <i>data binding</i> e comandos, enquanto o <i>ViewModel</i> atualiza o <i>Model</i> e recebe notificações das mudanças de estado.	56
FIGURA 4.6 – Arquitetura idealizada da ferramenta computacional.	57
FIGURA 4.7 – Fluxograma representando a lógica do algoritmo de determinação do peso máximo operacional.	64
FIGURA 4.8 – Camada de referência da estrutura PAT-1.a, com fundo transparente.	65

FIGURA 4.9 – Camada de referência da estrutura PAT-1.b, com fundo transparente.	65
FIGURA 4.10 – Resultado final da composição visual gerada para o aeródromo de Belém (SBBE).	66
FIGURA 4.11 – Fluxograma conceitual proposto para o funcionamento da ferramenta computacional.	68
FIGURA 4.12 – Tela 1 — Concepção inicial da seleção de aeronave disponível no banco de dados.	69
FIGURA 4.13 – Tela 2 — Concepção inicial da seleção do aeródromo de operação.	69
FIGURA 4.14 – Tela 3 — Concepção inicial da seleção das estruturas do aeródromo a serem avaliadas.	70
FIGURA 4.15 – Tela 4 — Concepção inicial da exibição dos resultados da análise de compatibilidade operacional.	71
FIGURA 5.1 – Tela 1 – Seleção da aeronave.	73
FIGURA 5.2 – Tela 2 – Seleção do aeródromo.	73
FIGURA 5.3 – Tela 3 – Seleção das estruturas de pavimento do aeródromo.	74
FIGURA 5.4 – Tela 4 – Exibição dos resultados de compatibilidade operacional.	75
FIGURA 5.5 – Tela de Ajuda – Estrutura base para futuras instruções de uso.	75
FIGURA 5.6 – Tela Sobre – Estrutura informativa da aplicação.	76
FIGURA 5.7 – Rota operacional selecionada para o A330 (KC-30) na Base Aérea de Boa Vista (SBBV) — Cenário 1.	78
FIGURA 5.8 – Rota operacional selecionada para o Boeing 777-300ER na Base Aérea de Canoas (SBCO) — Cenário 2.	78
FIGURA 5.9 – Resultado do FastACR para o Cenário 1 — A330 (KC-30) na Base Aérea de Boa Vista (SBBV).	80
FIGURA 5.10 – Resultado do FastACR para o Cenário 2 — Boeing 777-300ER na Base Aérea de Canoas (SBCO).	80
FIGURA A.1 – Estrutura completa de pastas e arquivos do projeto no <i>Visual Studio 2022 Community Edition</i> . As imagens mostram a hierarquia do código-fonte e a disposição dos diretórios conforme o padrão MVVM e os módulos auxiliares implementados.	86

-
- FIGURA A.2 – Diagrama representativo da arquitetura MVVM implementada. A figura ilustra a relação entre as três camadas principais — Model, ViewModel e View —, destacando a correspondência entre as classes de lógica (*.cs) e as interfaces gráficas (*.xaml), conforme o padrão de separação de responsabilidades característico dessa arquitetura. 88
- FIGURA E.1 – Tela do ICAO-ACR reproduzida do Manual da ANAC para cálculo do PCR, destacando os campos de peso bruto, percentagem do peso de rampa e pressão dos pneus, os quais devem ser ajustados proporcionalmente ao peso para seguir o procedimento do FAARFIELD. 95
- FIGURA E.2 – Relação entre ACR e peso bruto para o B737-300 em pavimento flexível, considerando pressão variável e pressão fixa para as categorias de subleito A, B, C e D. 96
- FIGURA E.3 – Exemplo de gráfico ACR–peso bruto fornecido por fabricante, com indicação de pressão de pneus constante em todo o intervalo de pesos. . . 97

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Componentes do Código PCN	37
TABELA 3.2 – Categorias padrão de subleito no método ACR/PCR.	40
TABELA 3.3 – Campos do código de reporte do PCR.	46
TABELA 3.4 – Categorias de subleito no método ACR/PCR.	46
TABELA 3.5 – Categorias de pressão máxima admissível de pneus.	46
TABELA 5.1 – Resumo dos Cenários de Validação Utilizados.	79
TABELA 5.2 – Comparação entre o ACR obtido no ICAO-ACR e o PCR da estrutura para o peso calculado pela Ferramenta.	81
TABELA B.1 – Resumo das aeronaves cadastradas no banco de dados da aplicação. . . .	90
TABELA C.1 – Resumo dos aeródromos analisados.	91

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACN	Aircraft Classification Number
ACR	Aircraft Classification Rating
AFA	Academia da Força Aérea
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CAA	Civil Aviation Authority (Autoridade de Aviação Civil)
CBR	California Bearing Ratio
CEPE	Centro de Estudos e Projetos de Engenharia da Aeronáutica
CDF	Cumulative Damage Factor (fator de dano acumulado)
CIL	Common Intermediate Language
CLR	Common Language Runtime
COMAER	Comando da Aeronáutica
COMPREP	Comando de Preparo
CS	Arquivo de código-fonte em C# (.cs)
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
DLL	Dynamic Link Library (biblioteca de vínculo dinâmico)
DSWL	Derived Single Wheel Load
DIRINFRA	Diretoria de Infraestrutura da Aeronáutica
ESWL	Equivalent Single Wheel Load
FAA	Federal Aviation Administration
FAB	Força Aérea Brasileira
FAARFIELD	Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design
FWD	Falling Weight Deflectometer
GUI	Graphical User Interface (interface gráfica do usuário)
IA	Inteligência Artificial
ICAO	International Civil Aviation Organization
IDE	Integrated Development Environment (ambiente de desenvolvimento integrado)
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica

JSON	JavaScript Object Notation
LEA	Linear Elastic Analysis (Análise Elástica Linear)
LINQ	Language Integrated Query
LCN	Load Classification Number
LTS	Long-Term Support (suporte de longa duração)
MAUI	Multi-platform App UI
MTW	Maximum Taxi Weight (peso máximo de rampa/táxi)
MVVM	Model-View-ViewModel
PCN	Pavement Classification Number
PCR	Pavement Classification Rating
PMD	Peso Máximo de Decolagem
RBAC	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil
SCOAM	Seção de Controle de Operações Aéreas Militares
T	Technical Evaluation (método de avaliação técnica do PCR)
U	Using Aircraft (método de avaliação por histórico operacional do PCR)
UI	User Interface (interface de usuário)
USACE	United States Army Corps of Engineers
VB.NET	Visual Basic .NET
XAML	Extensible Application Markup Language
XML	Extensible Markup Language
.NET	Plataforma .NET da Microsoft

Lista de Símbolos

$ACR(W_{max})$	Índice de classificação da aeronave no peso máximo operacional
$ACR(W_{max}, \text{ferram.})$	Índice de classificação obtido pela ferramenta desenvolvida
PCR	Índice de classificação do pavimento
W_{max}	Peso máximo operacional da aeronave
E_{rel}	Erro relativo percentual entre $ACR(W_{max})$ e PCR
E	Módulo de elasticidade do subleito (MPa), nas categorias padrão do método ACR/PCR
k	Coefficiente de reação do subleito (MN/m^3) no método ACN/PCN
t	Espessura de referência da laje de concreto no cálculo da DSWL para pavimentos rígidos
σ	Tensão horizontal máxima na base da laje de concreto (MPa)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Contexto e motivação	23
1.2	Definição do problema	26
2	OBJETIVOS	28
2.1	Objetivo geral	28
2.2	Objetivos específicos	28
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
3.1	Avaliação Estrutural de Pavimentos Aeroportuários	30
3.1.1	Definição	30
3.1.2	Importância e Necessidade	30
3.1.3	Simplificação do Processo de Análise Estrutural	31
3.1.4	Evolução Histórica	31
3.2	Conceitos Importantes	33
3.2.1	Compatibilidade Operacional Aeronave–Pavimento	33
3.2.2	O Conceito de Operações Irrestritas	34
3.2.3	Fator de Dano Acumulado (CDF)	34
3.3	O Método ACN/PCN	35
3.3.1	Fundamentos e Definições	35
3.3.2	Base Técnica (Empírica)	36
3.3.3	Estrutura do Código PCN	36
3.3.4	Avaliação Técnica (T)	37
3.3.5	Método por Experiência Operacional (U)	37

3.3.6	Limitações do Método ACN/PCN	38
3.4	O Método ACR/PCR	38
3.4.1	Estrutura normativa	38
3.4.2	Fundamentos e Definições	39
3.4.3	Determinação do ACR	40
3.4.4	Determinação do PCR	44
3.4.5	Reporte do PCR	45
3.5	Suporte Computacional à Metodologia ACR/PCR	47
3.5.1	Softwares oficiais da FAA	47
3.5.2	Biblioteca ACRCClassLib.dll	47
4	METODOLOGIA	49
4.1	Etapas Gerais do Desenvolvimento da Ferramenta	49
4.2	Requisitos da Ferramenta	51
4.3	Ambiente de Desenvolvimento e Ferramentas Utilizadas	52
4.3.1	Linguagem de Programação e Ambiente	52
4.3.2	Bibliotecas e Frameworks	53
4.3.3	Sistema Operacional Alvo	54
4.4	Arquitetura da Ferramenta Computacional (MVVM)	55
4.4.1	Visão Geral	55
4.4.2	Arquitetura Idealizada da Ferramenta	56
4.5	Estruturação e Gerenciamento dos Dados	58
4.5.1	Banco de Dados de Aeronaves	59
4.5.2	Banco de Dados de Aeródromos	60
4.5.3	Interface de Acesso aos Dados	60
4.6	Integração com a Biblioteca Externa ACRCClassLib.dll	61
4.7	Desenvolvimento do Algoritmo de Determinação do Peso Máximo Operacional	61
4.7.1	Fundamentação Teórica	61
4.7.2	Lógica do Algoritmo	62

4.7.3	Método de Otimização/Busca	63
4.7.4	Fluxograma	63
4.8	Desenvolvimento do Algoritmo de Composição de Imagem	64
4.9	Projeto e Implementação da Interface Gráfica do Usuário (GUI)	67
4.9.1	Requisitos de Projeto	67
4.9.2	Estrutura e Navegação	67
4.9.3	Telas	68
4.9.4	Uso de Ferramentas de Inteligência Artificial	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1	Apresentação da Ferramenta Computacional Desenvolvida	72
5.1.1	Visão Geral da Interface do Usuário (GUI)	72
5.1.2	Funcionalidades Implementadas	76
5.2	Validação da Ferramenta	77
5.2.1	Cenários de Teste Selecionados	77
5.2.2	Comparação e Análise de Precisão dos Resultados	79
5.3	Limitações da Ferramenta	81
5.3.1	Dependência dos Dados de Entrada	81
5.3.2	Dependência da Biblioteca Externa	82
5.4	Implicações e Aplicações Práticas para a FAB	82
6	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – ESTRUTURA DO PROJETO NO VISUAL STUDIO	86
	APÊNDICE B – BANCO DE DADOS DE AERONAVES	89
	APÊNDICE C – BANCO DE DADOS DE AERÓDROMOS	91
	APÊNDICE D – PSEUDOCÓDIGO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO	93
	APÊNDICE E – INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DOS PNEUS NO CÁLCULO DO ACR	94

ANEXO A – MANUAL DO USUÁRIO ICAO-ACR/ACRCLASSLIB.DLL	99
ANEXO B – COMUNICAÇÃO COM A FAA SOBRE O TRATAMENTO DA PRESSÃO DOS PNEUS NO FAARFIELD E NO MÉTODO ACR/PCR	105
GLOSSÁRIO	108

1 Introdução

Os pavimentos aeroportuários desempenham papel essencial na segurança e na eficiência das operações aéreas. São estruturas projetadas para suportar repetidas solicitações de carga das aeronaves durante pousos, decolagens e movimentações em solo, garantindo níveis adequados de conforto, aderência e durabilidade ao longo do tempo. O desempenho dessas estruturas depende de diversos fatores, como as características dos materiais constituintes, as condições do subleito, o clima local e, principalmente, o tipo e a frequência de operações das aeronaves que utilizam o aeródromo.

Considerando a relevância desses fatores, foi necessário desenvolver métodos padronizados que permitissem expressar a capacidade estrutural dos pavimentos aeroportuários e de quantificar, de forma comparável, o efeito relativo que cada aeronave exerce sobre uma estrutura de pavimento (ICAO, 2022b). Compreender essa relação é essencial para avaliar a severidade das solicitações impostas pelas diferentes frotas e, conseqüentemente, assegurar a compatibilidade operacional entre aeronaves e pistas em aeródromos ao redor do mundo.

De modo geral, a compatibilidade operacional representa o equilíbrio entre a capacidade de suporte do pavimento e a solicitação imposta pelas aeronaves que o utilizam, garantindo que as operações ocorram dentro de limites seguros e que a integridade estrutural da infraestrutura seja preservada ao longo do tempo (ICAO, 2022a). Essa compatibilidade é fundamental não apenas para o planejamento e a segurança das operações aéreas, mas também para o gerenciamento eficiente e sustentável da infraestrutura aeroportuária.

Por muitas décadas, essa relação foi expressa pela metodologia ACN/PCN (*Aircraft Classification Number / Pavement Classification Number*), adotada pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO) em 1981 (ANAC, 2020). Esse método proporcionou uma linguagem padronizada que permitiu comparar de forma prática a capacidade dos pavimentos com a solicitação das aeronaves. No entanto, sua formulação baseava-se em modelos essencialmente empíricos, apoiados em simplificações, como o uso do índice CBR (*California Bearing Ratio*) para representar a resistência do subleito e relações aproximadas entre carga, espessura e comportamento estrutural (ALVES, 2022). Essas simplificações, embora adequadas ao contexto histórico de sua criação, já não refletem os avanços computacionais em modelagem mecanístico-empírica e na caracterização moderna dos materiais que compõem os pavimentos aeroportuários.

Em resposta a essas limitações, a ICAO introduziu a nova metodologia ACR/PCR (*Aircraft Classification Rating / Pavement Classification Rating*), formalmente estabelecida em 2020 (ANAC, 2022). Esse modelo substitui o conceito simplificado do ACN/PCN por uma abordagem fundamentada em análise mecanístico-empírica e no método de dano acumulado (*Cumulative Damage Factor* — CDF). Além de representar de forma mais fiel o comportamento real dos pavimentos frente às solicitações das aeronaves, a metodologia alinha os critérios de avaliação de capacidade estrutural aos métodos modernos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários, promovendo maior coerência entre o projeto e a operação.

Na metodologia ACR/PCR, o índice ACR representa o efeito relativo de uma aeronave sobre um pavimento aeroportuário, considerando sua configuração de trem de pouso, carga por eixo, pressão de pneus e a capacidade portante do subleito, parâmetro fundamental para a estimativa das tensões e deformações transmitidas às camadas inferiores da estrutura. O índice PCR, por sua vez, expressa a capacidade estrutural do pavimento, obtida a partir de sua resposta elástica e da previsão de vida útil correspondente a um determinado nível de dano acumulado (CDF) (FAA, 2022).

Quando o valor de ACR de uma aeronave é menor ou igual ao PCR do pavimento, considera-se que a operação pode ocorrer de forma irrestrita, ou seja, sem necessidade de limitações quanto à carga de operação. Nessa condição, entende-se que o pavimento possui capacidade estrutural adequada para suportar as solicitações impostas pela aeronave ao longo do regime normal de operação previsto para aquela estrutura. Cabe destacar, contudo, que essa condição de operação irrestrita está vinculada à vida útil de projeto adotada na determinação do PCR, de modo que a frequência e o nível de carga das operações são compatíveis com o desempenho estrutural esperado até o atingimento do limite de dano acumulado considerado no cálculo (ANAC, 2022).

A adoção da metodologia ACR/PCR representa, portanto, um avanço metodológico e normativo na forma de avaliar e gerenciar pavimentos aeroportuários. Ao integrar os mesmos fundamentos analíticos empregados no dimensionamento de novas estruturas, o método assegura consistência entre projeto e avaliação, permitindo que a capacidade estrutural publicada para um pavimento reflita com maior precisão seu desempenho real frente às solicitações das aeronaves. Além disso, o ACR/PCR favorece a padronização internacional dos procedimentos de análise e publicação de dados de resistência, contribuindo para uma gestão mais eficiente e tecnicamente fundamentada da infraestrutura aeroportuária.

Nesse contexto, surge a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre a nova metodologia e desenvolver ferramentas que auxiliem engenheiros, operadores e gestores aeroportuários na interpretação e aplicação prática dos índices ACR e PCR. Essa demanda é particularmente relevante em instituições como a Força Aérea Brasileira, que administra uma rede de aeródromos de uso militar e compartilha parte dessa infraestrutura com a aviação civil.

1.1 Contexto e motivação

No âmbito da Força Aérea Brasileira (FAB), a gestão da infraestrutura aeroportuária representa um desafio contínuo, dada a diversidade de missões, regiões geográficas e tipos de aeronaves operadas. Entre os diversos componentes dessa infraestrutura, os pavimentos das pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátios de estacionamento constituem os ativos de maior valor e relevância operacional, uma vez que sua condição estrutural influencia diretamente a segurança das operações e a disponibilidade dos aeródromos militares.

Historicamente, a FAB manteve um controle eficiente sobre a operação de suas aeronaves, mesmo com a ausência de informações estruturais completas sobre os pavimentos. Essa lacuna era compensada por fatores como o baixo volume de tráfego, a constância dos tipos de aeronaves empregadas e o elevado coeficiente de segurança adotado nos projetos mais recentes. Assim, as movimentações eram realizadas com base em doutrina consolidada e experiência operacional, sem comprometer a segurança das operações.

Entretanto, a pandemia de COVID-19, em 2020, evidenciou a importância estratégica de dispor de informações estruturais precisas. A paralisação do tráfego aéreo civil gerou uma demanda emergencial por áreas de estacionamento para aeronaves comerciais, conforme representado pela Figura 1.1, e a FAB foi formalmente consultada sobre a disponibilidade e resistência de suas áreas de pátio e taxiamento. Nesse momento, verificou-se a inexistência de dados confiáveis de capacidade estrutural para grande parte das estruturas sob administração militar. A necessidade de resposta imediata levou à elaboração de um levantamento nacional de valores estimados de PCN, o que, embora atendesse à urgência, revelou inconsistências significativas e consolidou a percepção institucional de que era preciso estruturar um sistema de avaliação permanente.



FIGURA 1.1 – Paralisação do setor aeronáutico devido ao COVID-19

Fonte: Folhapress (2020).

Paralelamente, a Diretoria de Infraestrutura da Aeronáutica (DIRINFRA) implantava o Sistema de Gerência de Aeródromos Militares, no qual o índice de resistência do pavimento (agora expresso em PCR) passou a ser uma variável essencial para o planejamento de manutenção e priorização de investimentos. Nesse contexto, o Centro de Estudos e Projetos de Engenharia da Aeronáutica (CEPE) foi designado para conduzir as avaliações estruturais, utilizando o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), ilustrado pela Figura 1.2, após sua reativação e calibração em 2021.



FIGURA 1.2 – Imagem ilustrativa de um *Falling Weight Deflectometer* (FWD)

Fonte: Wikipedia (2025).

O projeto de avaliação e reforma da pista da Academia da Força Aérea (AFA), em Pirassununga, marcou o início desse novo ciclo de estudos. Seguiram-se as avaliações estruturais na Base Aérea do Galeão, ambas já aplicando o método ACR/PCR conforme as recomendações mais recentes da ICAO. A partir desses resultados, o Comando de Preparo (COMPREP) estabeleceu um cronograma nacional para a determinação do PCR das 34 localidades sob responsabilidade da FAB, delegando ao CEPE a execução das missões técnicas.

Esse processo revelou uma nova demanda operacional: a partir do momento em que os valores de PCR passaram a ser conhecidos, tornou-se necessário compará-los aos índices ACR das aeronaves para verificar a compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos. A realização dessa análise de forma manual, especialmente em escala abrangendo diversas aeronaves e localidades, mostrou-se trabalhosa, demorada e suscetível a erros, evidenciando a necessidade de uma solução automatizada e confiável.

Diante dessa necessidade, o CEPE desenvolveu, em 2025, um e-book institucional voltado ao apoio das Seções de Controle de Operações Aéreas Militares (SCOAM) e demais órgãos do COMAER na tomada de decisão sobre a possibilidade de operação de aeronaves nos pavimentos avaliados, apresentado na Figura 1.3. O material reúne, em formato digital, os valores de PCR

das pistas de pouso, táxi e pátios das bases já analisadas pelo CEPE e apresenta, para cada uma das 22 aeronaves consideradas — pertencentes à frota da FAB, de forças aéreas amigas e de operadores civis — o peso operacional máximo permitido para que o ACR da aeronave seja menor ou igual ao PCR da estrutura em análise. Dessa forma, o e-book viabiliza a verificação direta da compatibilidade operacional ACR/PCR em cada aeródromo avaliado.



FIGURA 1.3 – Capa do e-book

Fonte: Acervo CEPE.

Embora o e-book tenha representado um importante avanço na organização e disponibilização das informações estruturais, sua utilização no dia a dia ainda apresenta desafios operacionais. Por ser um material de consulta em formato fixo, a verificação da compatibilidade entre aeronaves e pavimentos requer múltiplas consultas. Esse processo, especialmente quando envolve diversas estruturas com valores distintos de PCR e diversos tipos de aeronaves, mostra-se demorado, suscetível a erros e pouco prático para as rotinas das equipes responsáveis pelo planejamento e gerenciamento das operações aéreas.

Em função dessas limitações, surgiu a demanda por uma ferramenta computacional inte-

rativa, capaz de reproduzir as funcionalidades do e-book de forma dinâmica, automatizada e amigável ao usuário. A aplicação proposta neste trabalho busca atender a essa necessidade, oferecendo uma interface intuitiva e de rápida utilização, que permita a verificação imediata da compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos sem a necessidade de múltiplas consultas ou cálculos manuais. Dessa forma, a ferramenta se insere como um complemento tecnológico ao e-book, consolidando-se como um instrumento de apoio essencial à tomada de decisão técnica no âmbito da Força Aérea Brasileira.

1.2 Definição do problema

O programa de avaliação estrutural de pavimentos implementado pelo COMPREP e executado pelo CEPE tem resultado na obtenção de um dado técnico essencial: o PCR das diversas estruturas de pavimento — pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátios de aeronaves — que compõem os aeródromos da FAB.

Entretanto, a simples disponibilidade desse dado não é suficiente para responder às demandas operacionais cotidianas dos planejadores de voo e gestores de infraestrutura. O PCR expressa a capacidade estrutural do pavimento, mas não indica diretamente quais aeronaves podem operar em determinada estrutura e sob quais condições. Assim, o avanço obtido na fase de avaliação estrutural gera um novo desafio: **converter a resistência do pavimento em limites operacionais práticos para uma frota diversificada de aeronaves.**

A questão central que emerge é: *"Dado o valor de PCR de uma estrutura de pavimento, qual é o peso máximo de operação que uma aeronave específica pode adotar para que seu índice de classificação (ACR) seja igual ou inferior ao do pavimento ($ACR \leq PCR$), garantindo a condição de compatibilidade operacional com operações irrestritas?"*.

Essa análise, quando realizada de forma manual, envolve uma matriz de combinações complexa — abrangendo 34 localidades com múltiplas estruturas de pavimento, cada uma com valores distintos de PCR, e uma frota de 22 aeronaves com características variadas. Além disso, como o valor de ACR que satisfaz a condição de compatibilidade operacional ($ACR \leq PCR$) depende diretamente do peso operacional da aeronave, o processo de determinação do peso máximo admissível deve ser conduzido de forma iterativa. Essa característica torna a análise manual lenta e suscetível a erros quando realizada por métodos convencionais.

Embora o CEPE tenha produzido o e-book de referência para apoiar essas análises, o formato consultivo do material ainda exige verificações e cruzamentos manuais, limitando sua aplicabilidade em situações que demandam agilidade.

Atualmente, não existe na FAB uma ferramenta computacional integrada e padronizada capaz de realizar essa avaliação de forma automatizada e sistemática. Assim, as consultas

sobre a operação de aeronaves continuam sendo tratadas de modo pontual, baseando-se em verificações manuais a partir dos dados disponíveis, o que pode resultar em inconsistências ou divergências na interpretação das informações estruturais e operacionais.

Dessa forma, o problema abordado neste trabalho consiste na ausência de um método automatizado, padronizado e intuitivo para a avaliação da compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos da FAB, conforme a nova metodologia ACR/PCR. Essa lacuna se manifesta na dificuldade de transformar, de modo ágil e confiável, os resultados de engenharia (PCR) em informações operacionais aplicáveis, criando um gargalo entre a análise técnica e o planejamento de missões aéreas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para a análise automatizada da compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos aeroportuários, com base na metodologia ACR/PCR.

A ferramenta proposta busca padronizar e agilizar a determinação do peso máximo de operação permitido para as aeronaves de interesse da FAB, considerando as condições estruturais das pistas, pátios e pistas de táxi avaliadas nos programas conduzidos pelo CEPE. O valor do PCR será tratado como dado de entrada para a aplicação, uma vez que resulta dos ensaios e análises estruturais executados pelo CEPE no âmbito de suas campanhas de avaliação. Assim, não serão abordados neste trabalho os procedimentos de cálculo e concepção do PCR, por já se tratarem de resultados consolidados e disponibilizados pelo órgão técnico competente.

Dessa forma, a aplicação transformará dados técnicos de engenharia (PCR) em informações operacionais de uso direto (peso máximo de operação), apoiando o planejamento e a coordenação de missões aéreas, além de contribuir para a gestão eficiente da infraestrutura aeroportuária militar.

2.2 Objetivos específicos

Para o alcance do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

1. Estruturar dois bancos de dados independentes e integráveis, de forma robusta e atualizada. O primeiro será dedicado às 22 aeronaves de interesse — pertencentes à frota da FAB, a forças aéreas parceiras e a operadores civis —, reunindo seus parâmetros técnicos e operacionais relevantes ao cálculo do ACR. O segundo reunirá as informações de infraestrutura das 34 localidades sob gestão da FAB, contemplando pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátios de estacionamento, com seus respectivos valores de PCR e características estruturais. Ambos os bancos deverão ser consistentes e de fácil atuali-

zação, permitindo a expansão futura do sistema conforme novas avaliações e aeronaves sejam incorporadas.

2. Integrar a ferramenta à biblioteca de cálculo `ACRClassLib.dll`, disponibilizada pela ICAO (ICAO, 2020), garantindo a execução dos cálculos nativos e padronizados do índice ACR, de acordo com os procedimentos oficiais da metodologia ACR/PCR. Essa integração deverá assegurar estabilidade, eficiência computacional e fidelidade aos resultados internacionais.
3. Desenvolver e implementar o algoritmo iterativo de otimização, responsável por determinar automaticamente o peso máximo de operação de cada aeronave em cada estrutura de pavimento. O algoritmo deverá ajustar progressivamente o peso da aeronave até convergir para o valor que satisfaça a condição $ACR \leq PCR$, com precisão controlada e tempo de resposta adequado para uso operacional.
4. Desenvolver um algoritmo dedicado à geração de respostas visuais na aplicação, capaz de realizar a sobreposição automática de imagens representativas das operações nas estruturas aeroportuárias selecionadas. Esse módulo deverá empregar diferentes cores e padrões visuais para indicar o resultado da análise de compatibilidade operacional entre a aeronave e cada uma das estruturas selecionadas, fornecendo ao usuário um retorno imediato e de fácil interpretação sobre as condições de operação em cada região avaliada.
5. Projetar e construir uma interface gráfica de usuário (GUI) com foco em simplicidade, clareza e usabilidade, permitindo que planejadores e gestores selecionem rapidamente a aeronave, o aeródromo e as estruturas desejadas, realizem as análises e visualizem os resultados de forma intuitiva e padronizada. A interface deverá traduzir dados técnicos complexos em informações operacionais objetivas, priorizando a navegabilidade e a coerência visual entre as diferentes telas do sistema.
6. Garantir a escalabilidade e a integridade da solução, permitindo futuras expansões, como inclusão de novas aeronaves, estruturas ou módulos analíticos (por exemplo, avaliação de sobrecarga).
7. Validar a funcionalidade e a precisão da ferramenta por meio de estudos de caso representativos, comparando os resultados obtidos com os valores de referência fornecidos pelo software ICAO-ACR, amplamente utilizado internacionalmente para o cálculo dos índices ACR. Essa comparação permitirá avaliar a consistência dos resultados e confirmar a confiabilidade técnica e a aplicabilidade prática da ferramenta desenvolvida.

O cumprimento desses objetivos garantirá a entrega de uma ferramenta robusta, confiável e de uso intuitivo, capaz de automatizar a análise de compatibilidade utilizando a metodologia ACR/PCR e fortalecer a capacidade técnica da FAB na gestão e no planejamento de suas operações.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Avaliação Estrutural de Pavimentos Aeroportuários

3.1.1 Definição

A gestão de pavimentos aeroportuários exige duas formas de avaliação distintas, mas complementares: a avaliação funcional e a avaliação estrutural. A avaliação funcional concentra-se na superfície do pavimento. Utiliza índices de serventia para mensurar, de forma predominantemente qualitativa, o grau com que o pavimento atende aos requisitos de conforto ao rolamento e segurança operacional. Em contrapartida, a avaliação estrutural, também referida como avaliação da capacidade de suporte, é um processo de natureza quantitativa. É tecnicamente definida como o processo de avaliação dos esforços aplicados ao pavimento pelas aeronaves, bem como o comportamento mecânico dos materiais nas múltiplas camadas, incluindo o subleito (ANAC, 2022).

3.1.2 Importância e Necessidade

A necessidade da avaliação estrutural reside no fato de que defeitos significativos nas camadas inferiores (base, sub-base e subleito) frequentemente não são detectáveis por uma avaliação visual superficial. A avaliação estrutural, portanto, permite emitir conclusões sobre a integridade e a capacidade de suporte dessas camadas ocultas. Essa análise indica a adequação do pavimento para resistir à deterioração causada pela passagem repetida das cargas das aeronaves. A análise estrutural calcula as respostas da estrutura (tensões, deformações e deflexões) à passagem dessas cargas, permitindo avaliar a capacidade de resistir aos mecanismos de degradação.

A correta avaliação da condição estrutural é essencial para a confiabilidade de duas atividades críticas de engenharia e gestão de ativos (ANAC, 2022):

1. **Diagnóstico de Problemas:** Permite a elaboração de diagnósticos precisos sobre o desempenho do pavimento, possibilitando a adoção de medidas de restauração eficazes do

ponto de vista econômico, pois atuam diretamente nos mecanismos que causam a degradação;

2. **Dimensionamento e Prognóstico:** É fundamental para o dimensionamento de reforços (pavimento restaurado) e para a estimativa da vida útil restante do pavimento existente.

3.1.3 Simplificação do Processo de Análise Estrutural

A análise estrutural detalhada (cálculo de tensões e deformações) é complexa. Com o objetivo de simplificar e padronizar esse processo para a comunidade aeronáutica global, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) estabeleceu métodos de classificação padronizados. Esses métodos abstraem a complexa análise estrutural em um sistema de classificação alfanumérico. O método conhecido como ACN/PCN foi o padrão global desde 1981. Nele, o *Pavement Classification Number* (PCN) expressa a capacidade de carga do pavimento, que é comparada ao *Aircraft Classification Number* (ACN), que expressa o efeito relativo da aeronave.

O processo é simplificado ao permitir que a capacidade de carga de um pavimento seja expressa por um único número (PCN), sem a necessidade de especificar informações estruturais detalhadas ou uma aeronave em particular. Da mesma forma, o efeito relativo da aeronave é expresso por outro número (ACN). A compatibilidade é verificada de uma forma simples: a operação é permitida se o ACN da aeronave for igual ou inferior ao PCN do pavimento ($ACN \leq PCN$), garantindo que o dano causado pela aeronave não seja superior à capacidade portante do pavimento.

Devido às limitações técnicas desse método, a ICAO iniciou uma transição, em 2020, para um novo padrão, o ACR/PCR. Neste novo sistema, o *Pavement Classification Rating* (PCR) representa a capacidade do pavimento, e o *Aircraft Classification Rating* (ACR) representa o efeito da aeronave. Da mesma forma que o método anterior, a compatibilidade é verificada comparando-se os índices ($ACR \leq PCR$). Ambos os métodos cumprem a função de simplificar a avaliação estrutural para fins operacionais e de compatibilidade.

3.1.4 Evolução Histórica

A metodologia para classificar a capacidade de suporte dos pavimentos evoluiu diretamente em resposta ao desenvolvimento de aeronaves mais pesadas e com trens de pouso mais complexos. As primeiras metodologias de classificação, nas décadas de 1920 e 1930, eram baseadas simplesmente na carga máxima permitida ou na máxima carga de roda. Este critério baseava-se no método empírico do *California Bearing Ratio* (CBR), que correlacionava a resistência do subleito (CBR) com a espessura de base granular necessária para suportar veículos rodoviários da época (ALVES, 2022).

A Segunda Guerra Mundial impulsionou a expansão desse método para a necessidade de um método rápido de construção de pavimentos aeroportuários. Curvas de dimensionamento eram desenvolvidas para aeronaves militares específicas, como por exemplo o B-29. Com o surgimento de trens de pouso mais complexos (tandem e duplo-tandem), o método foi refinado. Utilizando as equações de Boussinesq (para cálculo de tensões em meio semi-infinito) e gráficos de Newmark, os engenheiros passaram a calcular uma carga de roda simples equivalente *Equivalent Single Wheel Load* (ESWL), que representava o efeito combinado de múltiplas rodas em profundidade (ALVES, 2022).

O contínuo desenvolvimento da indústria aeronáutica tornou os métodos de roda simples insuficientes. Em 1965, a ICAO estabeleceu o *Load Classification Number* (LCN) como primeira forma padronizada de classificação, que ainda se baseava em uma carga de roda simples equivalente, mas considerava a pressão dos pneus e a resistência do subleito (ALVES, 2022). Em 1977, a ICAO iniciou a substituição do LCN pelo método ACN/PCN. Este método representou uma melhoria significativa, considerando de forma mais refinada o arranjo do trem de pouso e o comportamento dos materiais (rígido ou flexível).

O método ACN/PCN, desenvolvido em 1977, teve origem essencialmente empírica, fundamentando-se no índice CBR para pavimentos flexíveis e na teoria de Westergaard para pavimentos rígidos. Contudo, à época, o *US Corps of Engineers* (USACE) já havia introduzido métodos de dimensionamento baseados na análise elástica-linear (LEA - *Linear Elastic Analysis*), de natureza mecanicista-empírica. Assim, estabeleceu-se uma incoerência entre os métodos de dimensionamento e o método de avaliação estrutural, uma vez que a avaliação dos pavimentos permanecia empírica, enquanto o dimensionamento já avançava para modelos mecanicistas, resultando em uma incompatibilidade conceitual entre ambos os enfoques.

Foi precisamente essa incompatibilidade entre os métodos de dimensionamento e de classificação de resistência que motivou a próxima grande evolução. O método ACN/PCN, baseado em CBR, não conseguia modelar adequadamente os efeitos de trens de pouso com múltiplas rodas e altas pressões de pneu, ou os benefícios de materiais estabilizados modernos, levando frequentemente a um conservadorismo excessivo (restrições desnecessárias) ou, em outros casos, a uma avaliação imprecisa do dano. Em 2009, a ICAO formou um grupo de estudos para desenvolver uma nova metodologia compatível com os métodos de dimensionamento modernos. O resultado foi o método ACR/PCR, de abordagem empírico-mecanística e baseado na análise elástica-linear (LEA).

3.2 Conceitos Importantes

3.2.1 Compatibilidade Operacional Aeronave–Pavimento

A interação entre aeronave e pavimento constitui um dos elementos centrais no gerenciamento da infraestrutura aeroportuária. Cada aeronave exerce sobre a superfície de rolamento um padrão específico de carregamento, determinado pela sua massa, geometria do trem de pouso e pressão dos pneus. Por outro lado, cada pavimento possui uma capacidade estrutural finita, função da espessura e da rigidez de suas camadas e da resistência do subleito. A segurança e a durabilidade do sistema dependem do equilíbrio entre esses dois fatores.

Embora o termo compatibilidade operacional não seja formalmente definido em normas técnicas internacionais, ele é amplamente empregado por instituições especializadas, como CEPE, para expressar a condição em que o esforço imposto pela aeronave é menor ou igual a resistência do pavimento. Essa condição assegura que a aeronave pode operar sobre aquele pavimento, sem comprometer sua integridade estrutural ou reduzir significativamente sua vida útil projetada (ANAC, 2022).

Uma avaliação criteriosa da capacidade de carga dos pavimentos e das características das aeronaves é indispensável para o planejamento e a operação segura dos aeródromos. A ausência dessa compatibilidade pode levar ao surgimento de danos prematuros, como trilhas de roda e rupturas por cisalhamento, resultando em custos adicionais de manutenção, restrições operacionais e potenciais riscos à segurança das operações, conforme representado na Figura 3.1.



FIGURA 3.1 – Exemplo de danos estruturais em pavimentos devido a solicitações excessivas de aeronaves.

Fonte: ICAO (2024).

3.2.2 O Conceito de Operações Irrestritas

No contexto dos métodos de classificação, o termo operações irrestritas não deve ser confundido com operações ilimitadas. De acordo com o Manual de Cálculo de PCR de Pavimentos Aeroportuários da ANAC, uma operação é considerada irrestrita quando uma aeronave pode operar sem restrições de peso, desde que o seu índice de classificação seja menor ou igual ao índice de resistência do pavimento. Nessa condição, entende-se que o pavimento possui capacidade estrutural suficiente para suportar as solicitações impostas pela aeronave de referência, sem exceder os critérios de dano acumulado estabelecidos para o seu período de projeto. Entretanto, essa definição não implica em operações ilimitadas, pois operar de forma ilimitada é permitir a operação de qualquer tipo de aeronave, qualquer movimentação e sem qualquer preocupação com a vida útil do pavimento (ANAC, 2022).

3.2.3 Fator de Dano Acumulado (CDF)

O Fator de Dano Acumulado (CDF – *Cumulative Damage Factor*) constitui o elemento central do métodos ACR/PCR e ACN/PCN, representando a fração da vida útil estrutural consumida pelo pavimento devido aos esforços repetidos impostos pelo tráfego aeronáutico. O CDF expressa diretamente o processo de fadiga dos materiais, refletindo a degradação progressiva da capacidade resistente da estrutura.

A definição fundamental, conforme a ANAC (2022) é:

- **CDF = 0**: corresponde a uma estrutura ainda não solicitada por cargas repetidas, típica de pavimentos novos;
- **CDF = 1,0**: indica o esgotamento da capacidade estrutural, ponto em que a fadiga atingiu seu limite e a estrutura não consegue mais resistir adequadamente às solicitações.

A Figura 3.2 busca representar essa escala de degradação do pavimento por meio do CDF. Ela não representa todos os casos em que há esgotamento da capacidade portante do pavimento é apenas uma ilustração para se ter uma referência dos extremos que o CDF busca representar.

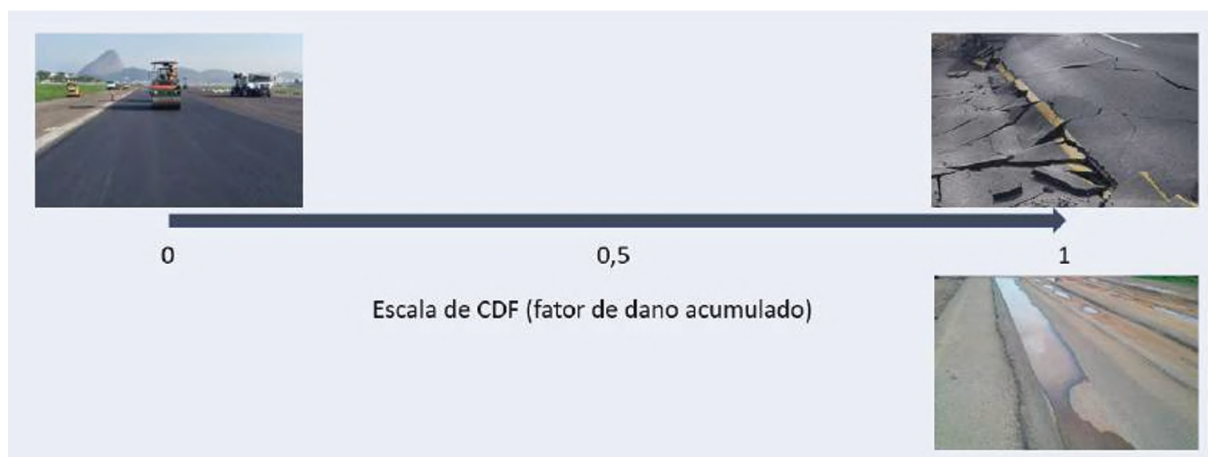


FIGURA 3.2 – Imagem ilustrativa que busca representar o conceito do CDF.

Fonte: (ANAC, 2022).

Valores intermediários representam o percentual de vida útil consumida. Por exemplo, CDF = 0,35 indica consumo de 35% da vida útil prevista para o pavimento. Matematicamente o CDF pode ser compreendido como:

$$\text{CDF} = \frac{\text{número de passagens efetivadas}}{\text{número de passagens para a falha}}$$

Embora o CDF possa ser computado para diferentes camadas, se estabelece que, para padronização, o cálculo do PCR deve considerar o CDF do subleito, ainda que o método permita também a avaliação de CDF em camadas superiores, como o revestimento asfáltico. A determinação do CDF depende do modelo mecanístico-empírico utilizado e considera as respostas estruturais obtidas para cada aeronave do mix — tensões e deformações induzidas nas camadas, número de repetições admissíveis e consumo percentual associado a cada solicitação (ANAC, 2022).

3.3 O Método ACN/PCN

3.3.1 Fundamentos e Definições

O método ACN/PCN, padronizado internacionalmente pela ICAO e adotado desde 1981, estabeleceu por décadas a principal linguagem utilizada para expressar a compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos aeroportuários. Seu objetivo central é fornecer uma forma simplificada e padronizada de comparação entre a solicitação imposta pela aeronave e a capacidade estrutural do pavimento. Assim, define-se:

- **ACN (*Aircraft Classification Number*)**: indicador que expressa o efeito relativo de uma

aeronave sobre um pavimento de referência, para uma categoria padronizada de subleito.

- **PCN (*Pavement Classification Number*):** índice que representa a capacidade de carga declarada de um pavimento, para fins de comparação com aeronaves que operam no aeródromo.

3.3.2 Base Técnica (Empírica)

Apesar de sua ampla adoção, o método ACN/PCN possui natureza essencialmente empírica. O cálculo do ACN parte de estruturas equivalentes definidas segundo modelos simplificados de subleito, diferenciando-se entre pavimentos flexíveis e rígidos:

- **Pavimentos Flexíveis (F):** utilizam o método *California Bearing Ratio* (CBR) como parâmetro de suporte. A espessura de pavimento necessária para suportar 10.000 coberturas é obtida em curvas empíricas, e, a partir dela, calcula-se o ACN.
- **Pavimentos Rígidos (R):** adotam formulações derivadas da teoria de Westergaard, empregando o módulo de reação do subleito (k) como parâmetro de suporte.

Para o cálculo do PCN, a ANAC recomenda o uso do software COMFAA, que converte a estrutura real do pavimento em uma estrutura equivalente de espessura única — processo que envolve fatores empíricos de equivalência, os quais constituem, conforme destaca Alves (2022), a principal fonte de incerteza da metodologia. Esses fatores não consideram explicitamente rigidez das camadas, posição do material na estrutura, nem interação complexa entre módulos elásticos.

Além disso, o COMFAA utiliza o CDF como critério de validação. Segundo orientações da ANAC (2020), o resultado somente é considerado representativo quando $0.15 \leq \text{CDF} \leq 1.00$. Caso o valor calculado seja inferior ao limite mínimo — situação comum em pavimentos robustos — o engenheiro deve aumentar artificialmente o tráfego adotado até que o cálculo atinja a faixa prescrita, reforçando a natureza gerencial e não intrínseca do PCN.

3.3.3 Estrutura do Código PCN

O PCN é publicado internacionalmente por meio de um código padronizado composto por cinco elementos, por exemplo **76/F/A/X/T**. Para facilitar a visualização, esses elementos são organizados na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Componentes do Código PCN

Elemento	Símbolo	Categorias / Descrição
Valor Numérico	76	Expressa a capacidade de carga declarada do pavimento.
Tipo de Pavimento	R / F	R: Pavimento rígido F: Pavimento flexível
Categoria do Subleito	A / B / C / D	A: Alta – $k > 120 \text{ MN/m}^3$ ou CBR > 13 B: Média – $60 \leq k \leq 120 \text{ MN/m}^3$ ou CBR 8–13 C: Baixa – $25 \leq k \leq 60 \text{ MN/m}^3$ ou CBR 4–8 D: Ultrabaixa – $k < 25 \text{ MN/m}^3$ ou CBR < 4
Pressão Máxima dos Pneus	W / X / Y / Z	W: Sem limite de pressão X: $\leq 1,75 \text{ MPa}$ Y: $\leq 1,25 \text{ MPa}$ Z: $\leq 0,50 \text{ MPa}$
Método de Avaliação	T / U	T: Avaliação técnica U: Experiência operacional

Fonte: (ANAC, 2020).

Embora padronizado e amplamente difundido, o código PCN possui natureza essencialmente descritiva, não fornecendo parâmetros estruturais fundamentais — como espessuras das camadas, propriedades dos materiais ou vida residual — limitando sua utilidade para análises estruturais aprofundadas (ALVES, 2022).

3.3.4 Avaliação Técnica (T)

Representa a abordagem mais formal disponível no sistema ACN/PCN, sendo baseado no cálculo do PCN por meio de uma avaliação estruturada do pavimento. Esse método depende da conversão da estrutura real do pavimento em uma estrutura equivalente de espessura única, conforme requerido pelo software COMFAA, o qual utiliza modelos empíricos para determinar a espessura necessária frente ao tráfego analisado. O procedimento exige ainda a verificação do CDF, que deve permanecer entre 0,15 e 1,00 para que o valor obtido seja considerado representativo.

3.3.5 Método por Experiência Operacional (U)

Constitui a abordagem mais simplificada para determinação do PCN, fundamentando-se exclusivamente no desempenho observado do pavimento frente às aeronaves que nele operam. Nessa metodologia, o valor declarado é definido a partir da aeronave mais restritiva (maior

ACN) que utiliza regularmente a área de movimento sem evidenciar manifestações superficiais de dano, pressupondo-se que todas as aeronaves com ACN inferior poderão operar de forma irrestrita. Por não envolver qualquer análise mecanicista, verificação estrutural ou modelagem das respostas internas da estrutura — como tensões, deformações ou fatores de dano acumulado — o método apresenta elevada dependência da qualidade das inspeções e da interpretação do inspetor acerca do que constitui ausência de dano. Desse modo, o PCN resultante tende a refletir predominantemente o histórico operacional e as condições observadas em campo, podendo divergir substancialmente da real capacidade estrutural do pavimento.

3.3.6 Limitações do Método ACN/PCN

As limitações inerentes ao sistema ACN/PCN, discutidas em profundidade por Alves (2022), manifestam-se de maneira distinta nos dois métodos de determinação. Na Avaliação Técnica (T), a dependência de fatores empíricos, a necessidade de converter a estrutura real do pavimento para um modelo equivalente de espessura única e a ausência de parâmetros mecanicistas capazes de representar adequadamente as respostas internas da estrutura — como tensões, deformações e mecanismos de fadiga — podem resultar em valores de PCN que não refletem, de forma fidedigna, a capacidade de suporte do pavimento.

No Método U, tais limitações são ainda mais pronunciadas, uma vez que o valor declarado depende exclusivamente de observações subjetivas e não fornece qualquer indicação quantitativa sobre vida útil remanescente, comportamento frente a variações de tráfego ou desempenho sob solicitações repetidas. Essas fragilidades conceituais e metodológicas evidenciam a necessidade de modernização do sistema, que motivou a transição para o método ACR/PCR, fundamentado em princípios mais coerentes com o dimensionamento estrutural de pavimentos aeroportuários.

3.4 O Método ACR/PCR

3.4.1 Estrutura normativa

O método está estabelecido em um conjunto de documentos que asseguram sua adoção consistente entre diferentes autoridades aeronáuticas:

- **ICAO Annex 14 – Volume I** (ICAO, 2022a), que torna obrigatório o uso do sistema ACR/PCR como o método padronizado para a comunicação da resistência dos pavimentos de aeródromos destinados a aeronaves pesadas (massa superior a 5.700 kg);
- **ICAO Doc 9157 – Aerodrome Design Manual, Part 3** (ICAO, 2022b), que detalha os

procedimentos de cálculo;

- **FAA AC 150/5335-5D** (FAA, 2022), que formaliza o sistema nos Estados Unidos e substitui as referências anteriores ao PCN;
- **Manual de Cálculo de PCR da ANAC** (ANAC, 2022), que estabelece a aplicação do método no Brasil.

3.4.2 Fundamentos e Definições

A implantação do método ACR/PCR pela ICAO decorre da necessidade de modernizar o sistema internacional de classificação de pavimentos aeroportuários, substituindo o ACN/PCN por um procedimento consistente com as práticas contemporâneas de dimensionamento estrutural de pavimentos aeroportuários. A transição foi motivada pela busca de um sistema mais transparente, tecnicamente rastreável e alinhado aos métodos mecanístico-empíricos (ICAO, 2022b). Dessa forma, o sistema ACR/PCR reduz ambiguidades operacionais e substitui procedimentos baseados em simplificações que já não atendiam às necessidades operacionais e regulatórias modernas. Conforme exposto em ICAO (2022b), define-se:

- **ACR (*Aircraft Classification Rating*)**: número que expressa o efeito estrutural relativo de uma aeronave sobre um pavimento, considerando uma categoria padronizada de subleito.
- **PCR (*Pavement Classification Rating*)**: número que expressa a capacidade de suporte do pavimento para operações irrestritas.

É importante destacar que o método ACR/PCR tem como finalidade exclusiva a publicação de dados de resistência de pavimentos em publicações de informação aeronáutica (AIPs). Ele não se destina ao dimensionamento ou à avaliação estrutural em si, nem impõe um procedimento específico de projeto ou avaliação aos operadores de aeródromos. Os Estados permanecem livres para adotar o método de dimensionamento/avaliação de sua preferência, desde que o PCR divulgado seja coerente com o conceito de fator de dano acumulado (CDF) e represente adequadamente a capacidade do pavimento frente ao tráfego atual e futuro analisado, devendo ser reavaliado sempre que houver alterações significativas nesse tráfego (ICAO, 2022b).

O método desloca o foco da avaliação direta do pavimento para uma avaliação padronizada da capacidade de carga das aeronaves, por meio do ACR, incorporando um procedimento comum para determinar esse índice. A resistência do pavimento passa a ser reportada em termos do valor de ACR que ele é capaz de suportar em base irrestrita, isto é, permitindo a operação de aeronaves sem restrição de peso sempre que o PCR for maior ou igual ao ACR, respeitados os limites de pressão de pneus.

Quanto aos pavimentos, o método prevê que, além do valor de PCR, sejam reportados o tipo de pavimento, a categoria de subleito, a pressão máxima admissível de pneus e o método de avaliação utilizado. Esses dados, organizados em categorias padronizadas de resistência de subleito e de pressão de pneus, têm como objetivo permitir que operadores de aeronaves identifiquem os tipos e massas de operação permitidos e que fabricantes verifiquem a compatibilidade entre aeronaves em desenvolvimento e a infraestrutura disponível (ICAO, 2022b). Quando possível, recomenda-se que o PCR seja obtido por meio de avaliação técnica detalhada (T); caso limitações financeiras ou de engenharia impeçam esse procedimento, admite-se o uso do método da aeronave (U) para fins de publicação de resistência (ICAO, 2022b).

3.4.3 Determinação do ACR

3.4.3.1 Elementos comuns ao cálculo do ACR

A determinação do *Aircraft Classification Rating* (ACR) segue um procedimento padronizado descrito no *Doc 9157 Aerodrome Design Manual* (ICAO, 2022b). De forma geral, os ACRs são obtidos a partir de duas fontes principais de informação:

1. Os documentos de características das aeronaves para planejamento de aeródromos (*Aircraft Characteristics for Airport Planning*), publicados pelos fabricantes;
2. O programa computacional ICAO–ACR, na sua versão vigente, que implementa o modelo de cálculo oficial do ACR.

Esses elementos, em conjunto, permitem transformar as características reais do trem de pouso (geometria, número de rodas, espaçamentos e pressão de pneus) e da massa da aeronave em um índice numérico único, comparável entre diferentes aeronaves e diretamente, também, com o PCR dos pavimentos. No âmbito do método ACR/PCR, o subleito não é tratado por meio de uma escala contínua de rigidez, mas por quatro categorias padrão de módulo de elasticidade (E), válidas tanto para pavimentos flexíveis quanto rígidos. Cada categoria é representada por um valor típico de E localizado aproximadamente no centro do intervalo correspondente. A Tabela 3.2 resume essas categorias.

TABELA 3.2 – Categorias padrão de subleito no método ACR/PCR.

Código	Descrição	E padrão (MPa)	Faixa representada de E (MPa)
A	Alta resistência	200	$E \geq 150$
B	Média resistência	120	$100 \leq E < 150$
C	Baixa resistência	80	$60 \leq E < 100$
D	Ultra-baixa resistência	50	$E < 60$

Fonte: (ICAO, 2022b).

Um conceito central, comum aos dois tipos de pavimento, é a carga equivalente em roda simples (DSWL – *Derived Single Wheel Load*). Em vez de vincular o ACR diretamente à espessura do pavimento em serviço, o modelo matemático trabalha com uma estrutura de referência e determina qual carga em uma única roda, com pressão de inflação padronizada de 1,50 MPa, produz a mesma solicitação estrutural que o trem de pouso real, para uma dada categoria de subleito. A carga em roda simples assim obtida passa a representar o efeito global da aeronave sobre o pavimento .

A partir da DSWL, o ACR é definido numericamente. Para uma dada massa da aeronave e uma categoria de subleito, estabelece-se que o ACR é igual a duas vezes a carga equivalente em roda simples, expressa em centenas de quilogramas:

$$\text{ACR} = 2 \times \frac{\text{DSWL (kg)}}{100} \quad (3.1)$$

A pressão do pneu na roda equivalente é fixada em 1,50 MPa e a DSWL é função do módulo do subleito. O ACR é, portanto, definido apenas para as quatro categorias padrão de subleito (A, B, C e D). O fator 2 tem finalidade de ajuste de escala, permitindo que se trabalhe com valores inteiros de ACR com boa precisão, e o resultado pode ser arredondado para o múltiplo de 10 mais próximo para fins de publicação.

3.4.3.2 Padronizações para os dados entrada

Como as aeronaves operam em diferentes condições de massa e posição do centro de gravidade (CG), o documento introduz convenções específicas para garantir consistência nos valores de ACR. O ACR máximo de uma aeronave é calculado para a condição que produz a maior carga no trem de pouso principal (em geral, a massa máxima de páteo associada ao CG mais à ré), adotando-se a pressão de pneus recomendada pelo fabricante para essa condição. Gráficos e tabelas de ACR publicados pelos fabricantes costumam apresentar o ACR em função da massa bruta, mantendo o CG fixo na posição que gera o ACR máximo e a pressão de pneus correspondente à massa máxima de páteo, conforme exemplo da Figura 3.3. Quando se avaliam condições operacionais específicas (massas reduzidas, mudança de CG e/ou alteração da pressão de pneus), obtêm-se valores de ACR ajustados para essa condição particular. O Apêndice E traz uma discussão específica sobre o impacto da pressão dos pneus no cálculo do ACR, uma vez que a utilização precisa desse parâmetro ainda é, na prática, fonte recorrente de dúvidas.

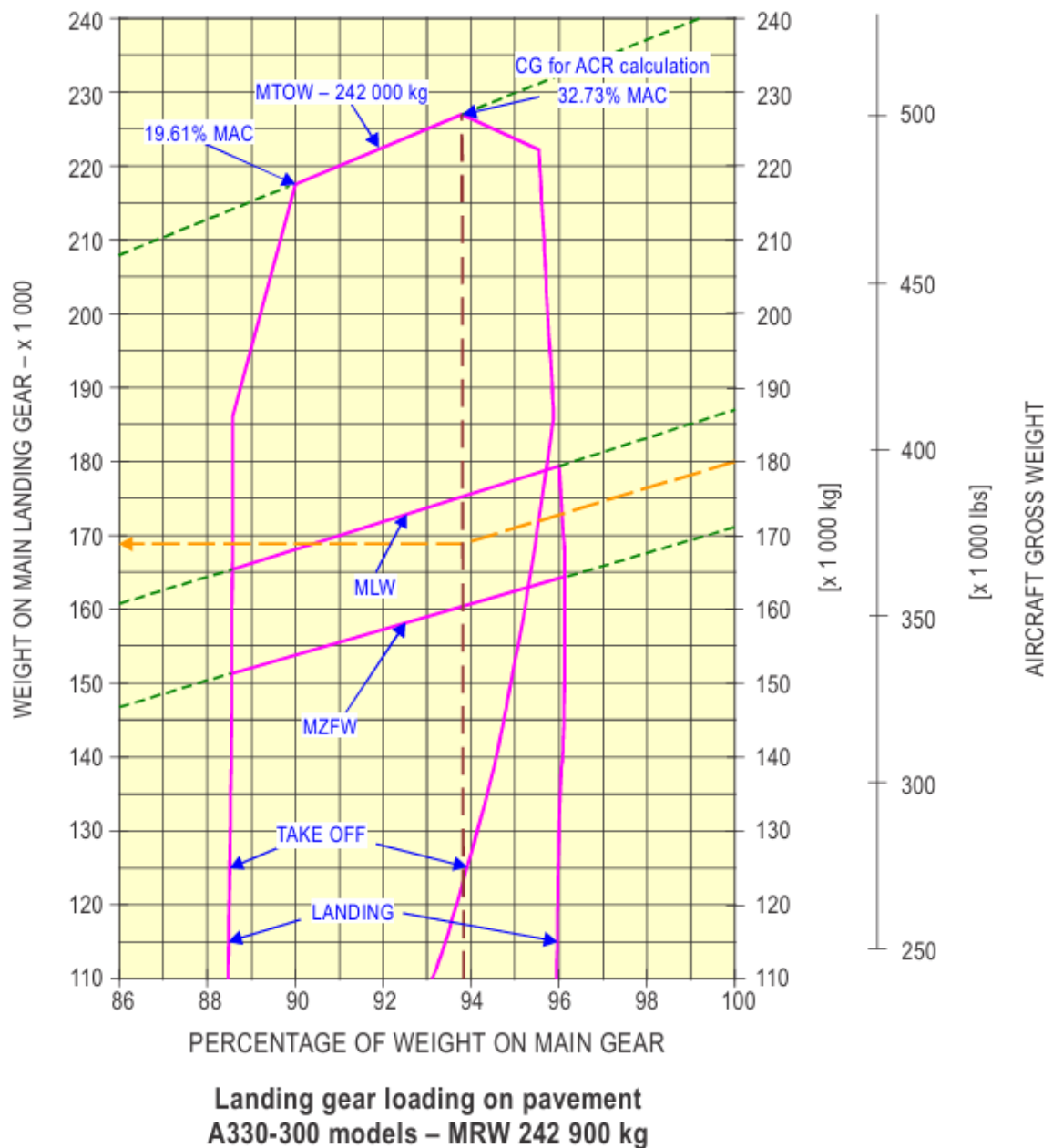


FIGURA 3.3 – Carga do trem de pouso no pavimento — Airbus A330-300.

Fonte: (ICAO, 2022b).

3.4.3.3 ACR para pavimentos flexíveis

Para pavimentos flexíveis, o cálculo do ACR é baseado na resposta deformacional do pavimento, especialmente na deformação vertical no topo do subleito. No modelo adotado, considera-se uma estrutura flexível de referência e calcula-se a resposta à passagem do trem de pouso real da aeronave, levando em conta todas as rodas do trem principal e a distribuição de cargas sobre o pavimento. Em seguida, determina-se a DSWL que, aplicada em uma única roda com pressão padronizada de 1,50 MPa, reproduz a mesma condição de solicitação no subleito

para a categoria de subleito considerada (ICAO, 2022b).

A Figura 3.4 ilustra esquematicamente a ideia da equivalência entre o trem de pouso real e a roda simples equivalente, utilizada para o cálculo do ACR em pavimentos flexíveis.

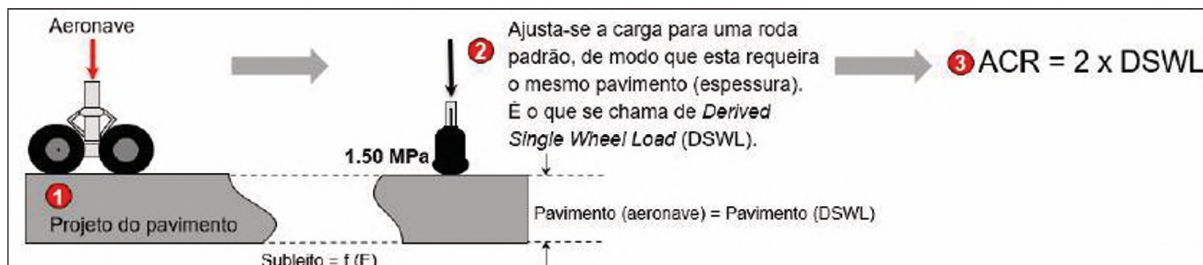


FIGURA 3.4 – Representação esquemática do cálculo do ACR para pavimentos flexíveis.

Fonte: (ANAC, 2022).

Uma vez obtida a DSWL para a condição de interesse (massa, CG e categoria de subleito), o ACR é calculado pela Expressão 3.1. Na prática, o uso do programa ICAO-ACR automatiza essa rotina, permitindo a geração de curvas e tabelas de ACR em função da massa da aeronave para cada categoria de subleito, o que facilita a comparação direta com os valores de PCR dos pavimentos.

3.4.3.4 ACR para pavimentos rígidos

Para pavimentos rígidos, o procedimento mantém a mesma lógica geral (uso de estrutura de referência, DSWL e expressão numérica do ACR), mas adota como parâmetro de equivalência estrutural a tensão na base da laje de concreto. Considera-se uma laje de concreto de cimento Portland apoiada sobre uma base granular e o subleito, com propriedades elásticas padronizadas, e utiliza-se o modelo de análise em camadas (LEA) para determinar a espessura de referência t que produz uma tensão horizontal máxima de $\sigma = 2,75$ MPa na interface inferior da laje, para a massa da aeronave, a categoria de subleito e a configuração de trem de pouso em análise (ICAO, 2022b).

Em seguida, calcula-se a carga equivalente em roda simples (DSWL) mantendo-se a mesma espessura de referência t e o mesmo modelo em camadas. Aplica-se uma única roda com pressão de pneu padronizada de 1,50 MPa, e ajusta-se iterativamente o valor da DSWL até que a tensão horizontal máxima na base da laje volte a ser exatamente 2,75 MPa. Dessa forma, estabelece-se a equivalência entre o trem de pouso real (que pode operar com pressões de pneus diferentes, conforme recomendação do fabricante) e a roda simples equivalente carregada a 1,50 MPa, em termos de solicitação de tração no concreto. A DSWL assim obtida é então convertida em ACR através da Expressão 3.1.

3.4.4 Determinação do PCR

O PCR é o índice que quantifica, na mesma escala numérica do ACR, a capacidade estrutural do pavimento. Em termos simplificados, o PCR está associado à massa que a estrutura é capaz de suportar quando solicitada por uma roda simples padrão, operando com pressão de inflação de 1,50 MPa. Assim, um valor de PCR indica que o pavimento pode receber, em operações irrestritas, aeronaves cujo ACR seja menor ou igual a esse valor, para o tipo de pavimento e subleito considerados (ICAO, 2022b).

Neste trabalho, contudo, não se pretende aprofundar a modelagem e os procedimentos de cálculo do PCR, uma vez que esse índice é tratado como um dado de entrada: parte-se do pressuposto de que o PCR já foi previamente determinado por meio de avaliações técnicas apropriadas, cabendo à aplicação computacional desenvolvida apenas utilizar esses valores para avaliar a compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos.

De modo geral, o procedimento modelo para determinação do PCR é baseado no conceito de fator de dano acumulado (CDF), abordado na Seção 3.2.3. A condição de referência adotada é, em regra, aquela em que o CDF atinge o valor unitário, isto é, o limite em que a vida estrutural prevista pelo modelo é plenamente consumida pelo tráfego considerado.

3.4.4.1 Avaliação técnica (T)

De forma conceitual, a determinação do PCR por avaliação técnica envolve, em linhas gerais:

1. A caracterização estrutural do pavimento, incluindo espessuras de camadas, propriedades mecânicas (módulos de elasticidade, coeficientes de *Poisson*) e condição estrutural observada;
2. A definição da resistência do subleito, usualmente expressa em termos de módulo elástico, que pode ser obtido por ensaios ou por relações de equivalência com parâmetros como o CBR;
3. A consideração do tráfego atual e futuro previsto, convertendo o mix de aeronaves em um “avião crítico” equivalente, cuja ação sobre o pavimento resulte em um CDF de referência ao longo da vida de projeto ou da vida remanescente adotada;
4. O cálculo do ACR desse “avião crítico”, que é então adotado como valor de PCR a ser publicado.

3.4.4.2 Experiência com aeronaves (U)

Quando não há dados suficientes ou não é viável realizar uma avaliação estrutural, a ICAO admite uma forma alternativa de determinação do PCR, baseada na experiência operacional com as aeronaves que utilizam regularmente o pavimento. Nesse método parte-se da aeronave mais crítica em operação — em geral, aquela com maior ACR ou com trem de pouso mais severo — e analisa-se o seu histórico de uso, em conjunto com inspeções de campo, para verificar se o pavimento tem se comportado de maneira satisfatória, sem manifestação de danos estruturais relevantes.

Nessa abordagem, o valor de PCR é ajustado para ser compatível com a operação desse “maior avião em serviço”, podendo ser adotado um valor igual ou ligeiramente inferior ao ACR dessa aeronave, de modo a incorporar uma margem de segurança operacional. Embora menos rigoroso do que o procedimento técnico baseado em CDF, esse método constitui uma alternativa aceitável em contextos onde há larga experiência operacional documentada e restrições à realização de estudos estruturais detalhados, e é particularmente útil como estimativa inicial de PCR para pavimentos em aeródromos já consolidados (ICAO, 2022b).

3.4.5 Reporte do PCR

O PCR é divulgado em um formato padronizado, de modo a permitir a comparação direta com o ACR das aeronaves e a interpretação operacional pelos usuários. O código de reporte é composto por cinco elementos:

PCR / Tipo / Subleito / Pressão / Método

A Tabela 3.3 apresenta um resumo dos campos do código, enquanto as Tabelas 3.4 e 3.5 detalham, respectivamente, as categorias de subleito e de pressão de pneus.

TABELA 3.3 – Campos do código de reporte do PCR.

Descrição	Campo	Conteúdo/possíveis valores
Valor numérico do PCR	PCR	Número inteiro que representa a capacidade estrutural do pavimento na mesma escala do ACR.
Tipo de pavimento	Tipo	R : pavimento rígido. F : pavimento flexível.
Categoria de subleito	Subleito	A, B, C ou D , conforme Tabela 3.4.
Categoria de pressão de pneus	Pressão	W, X, Y ou Z , conforme Tabela 3.5.
Método de avaliação	Método	T : avaliação técnica. U : método baseado em experiência com aeronaves.

Fonte: (ICAO, 2022b).

TABELA 3.4 – Categorias de subleito no método ACR/PCR.

Código	Descrição	E padrão (MPa)	Faixa típica de E (MPa)
A	Alta resistência	200	$E \geq 150$
B	Média resistência	120	$100 \leq E < 150$
C	Baixa resistência	80	$60 \leq E < 100$
D	Ultra-baixa resistência	50	$E < 60$

Fonte: (ICAO, 2022b).

TABELA 3.5 – Categorias de pressão máxima admissível de pneus.

Código	Descrição	Limite de pressão (MPa)
W	Ilimitada	Sem limite específico
X	Alta pressão	$\leq 1,75$
Y	Média pressão	$\leq 1,25$
Z	Baixa pressão	$\leq 0,50$

Fonte: (ICAO, 2022b).

Um exemplo de reporte completo é o código **750/F/A/X/T**, que indica: PCR = 750; pavimento flexível; subleito de alta resistência (A); pressão máxima de pneus limitada à categoria X (até aproximadamente 1,75 MPa); e valor obtido por avaliação técnica (T).

3.5 Suporte Computacional à Metodologia ACR/PCR

3.5.1 Softwares oficiais da FAA

A *Federal Aviation Administration* (FAA) mantém um conjunto de programas voltados ao dimensionamento, avaliação e classificação de pavimentos aeroportuários, os quais se articulam diretamente com o método ACR/PCR:

- **FAARFIELD** (*Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*) — é o principal software de projeto e avaliação de pavimentos adotado pela FAA, implementando a teoria elástica em camadas para pavimentos flexíveis e métodos de elementos finitos tridimensionais para pavimentos rígidos, conforme a AC 150/5320-6G (FAA, 2021). Esse programa é utilizado tanto para dimensionar novas estruturas quanto para avaliar pavimentos existentes, inclusive nos exemplos de determinação de PCR por avaliação técnica.
- **ICAO-ACR** — é o programa oficial, mantido pela FAA, destinado ao cálculo padronizado dos valores de ACR para pavimentos flexíveis e rígidos. Esse software incorpora o código LEAF (*Layered Elastic Computational Program for FAA Pavement Design and Evaluation Procedures*), responsável pela análise elástica em camadas, e implementa diretamente os procedimentos de cálculo do ACR descritos no *Doc 9157 Aerodrome Design Manual* (ICAO, 2022b). O ICAO-ACR funciona como aplicação autônoma que, a partir dos dados geométricos e de carga do trem de pouso, retorna os valores de ACR para as quatro categorias padrão de subleito.

Em conjunto, esses programas oferecem uma infraestrutura computacional que cobre todo o ciclo de vida do pavimento: dimensionamento, avaliação e verificação de capacidade (FAARFIELD) e cálculo padronizado de índices de aeronave (ICAO-ACR). No contexto deste trabalho, o destaque recai sobre o ICAO-ACR e, principalmente, sobre a biblioteca `ACRClassLib.dll`, que permite incorporar o cálculo do ACR diretamente em aplicações particulares.

3.5.2 Biblioteca `ACRClassLib.dll`

Trata-se de uma *dynamic-link library* (DLL) desenvolvida em *Visual Basic .NET*, alvo do *.NET Framework 4.5*, e distribuída juntamente com o programa ICAO-ACR (ICAO, 2020).

Do ponto de vista funcional, a `ACRClassLib.dll` não é um programa autônomo, mas uma biblioteca destinada a ser chamada por outras aplicações. Ela implementa os procedimentos de cálculo do ACR para pavimentos flexíveis e rígidos, incorporando o modelo LEAF para análise elástica em camadas e retornando, como saída, tanto a espessura equivalente associada ao ACR

quanto os próprios valores de ACR para as quatro categorias padrão de subleito (A, B, C e D). Para uma compreensão mais profunda da biblioteca consultar o manual do usuário no Anexo A.

O programa ICAO-ACR utiliza internamente a `ACRClassLib.dll` como motor de cálculo, adicionando interface gráfica, biblioteca de aeronaves e lógica auxiliar (como a seleção automática do trem de pouso crítico em função do tipo de pavimento). Entretanto, a própria ICAO prevê explicitamente que a DLL pode ser vinculada a programas externos para que esses com-putem ACR diretamente ou utilizem o ACR no processo de avaliação do PCR.

No contexto deste trabalho, a biblioteca `ACRClassLib.dll` é utilizada como componente central de cálculo dentro da aplicação desenvolvida, garantindo que os valores de ACR obtidos sejam rigorosamente consistentes com aqueles produzidos pelo software oficial ICAO-ACR.

4 Metodologia

4.1 Etapas Gerais do Desenvolvimento da Ferramenta

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, voltada ao desenvolvimento de uma ferramenta computacional destinada à análise automatizada da compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos aeroportuários, com base na metodologia ACR/PCR. Por conta disso, a metodologia adotada seguiu uma abordagem sequencial e incremental, típica de projetos de engenharia de software, em que as etapas foram planejadas para garantir coerência entre os requisitos operacionais, a estrutura de dados, os módulos de cálculo e a interface com o usuário. Assim, o processo de desenvolvimento compreendeu as seguintes fases principais:

1. **Levantamento de requisitos e fundamentação teórica:** esta etapa baseou-se na consolidação dos conceitos e parâmetros já discutidos na revisão bibliográfica, servindo para transformar o embasamento teórico em requisitos técnicos e funcionais para o desenvolvimento da ferramenta. Além da fundamentação normativa, foi conduzida uma análise das demandas práticas de uso, considerando o perfil dos usuários e os diferentes contextos operacionais em que a aplicação poderia ser empregada. Essa etapa permitiu identificar requisitos de desempenho, portabilidade e usabilidade, que orientaram a escolha das tecnologias e a definição da arquitetura do sistema.
2. **Definição do ambiente de desenvolvimento e tecnologias empregadas:** etapa dedicada à escolha da linguagem de programação, do ambiente de desenvolvimento e das ferramentas de suporte que melhor atendessem aos requisitos técnicos identificados. Essa seleção foi orientada pelos princípios de compatibilidade com bibliotecas externas, facilidade de manutenção e suporte multiplataforma.
3. **Modelagem e concepção da arquitetura de software:** definição da estrutura lógica e modular da aplicação, de modo a garantir a separação entre as camadas de dados, lógica de processamento e apresentação. Essa decisão metodológica buscou assegurar organização, facilidade de manutenção e possibilidade de futuras expansões do sistema, independentemente das tecnologias específicas adotadas.

4. **Estruturação dos bancos de dados:** definição do formato e da organização dos dados necessários para o funcionamento da ferramenta, contemplando informações sobre aeronaves, aeródromos e estruturas. Essa etapa teve como objetivo estabelecer uma estrutura padronizada e de fácil atualização, assegurando integridade e coerência das informações utilizadas pela aplicação.
5. **Integração com bibliotecas externas:** elaboração da estratégia de comunicação entre os componentes internos da aplicação e as bibliotecas externas.
6. **Desenvolvimento do algoritmo de otimização:** formulação dos métodos computacionais destinados ao cálculo dos parâmetros de compatibilidade entre aeronaves e pavimentos. Nessa fase, foram definidos os princípios matemáticos e as condições de convergência que orientaram a implementação do algoritmo de busca do peso máximo operacional permitido, de acordo com a relação entre os índices ACR e PCR.
7. **Desenvolvimento do algoritmo de composição de imagem:** concepção dos procedimentos computacionais destinados à geração automática das representações gráficas utilizadas na apresentação dos dados de resultado da ferramenta. Essa etapa envolveu a definição das regras de composição, organização e sobreposição de elementos visuais, de modo a sintetizar em uma única imagem os resultados da análise de compatibilidade operacional, permitindo a interpretação rápida e intuitiva das análises realizadas.
8. **Desenvolvimento da interface do usuário:** concepção dos fluxos de navegação e interação com o usuário, com base em princípios de design centrado no usuário. Essa etapa priorizou a simplicidade operacional, a clareza na apresentação das informações e a redução da necessidade de entrada manual de dados, buscando tornar o sistema intuitivo e adequado ao contexto de uso.

A Figura 4.1 ilustra de forma esquemática as principais etapas metodológicas seguidas no desenvolvimento do trabalho.

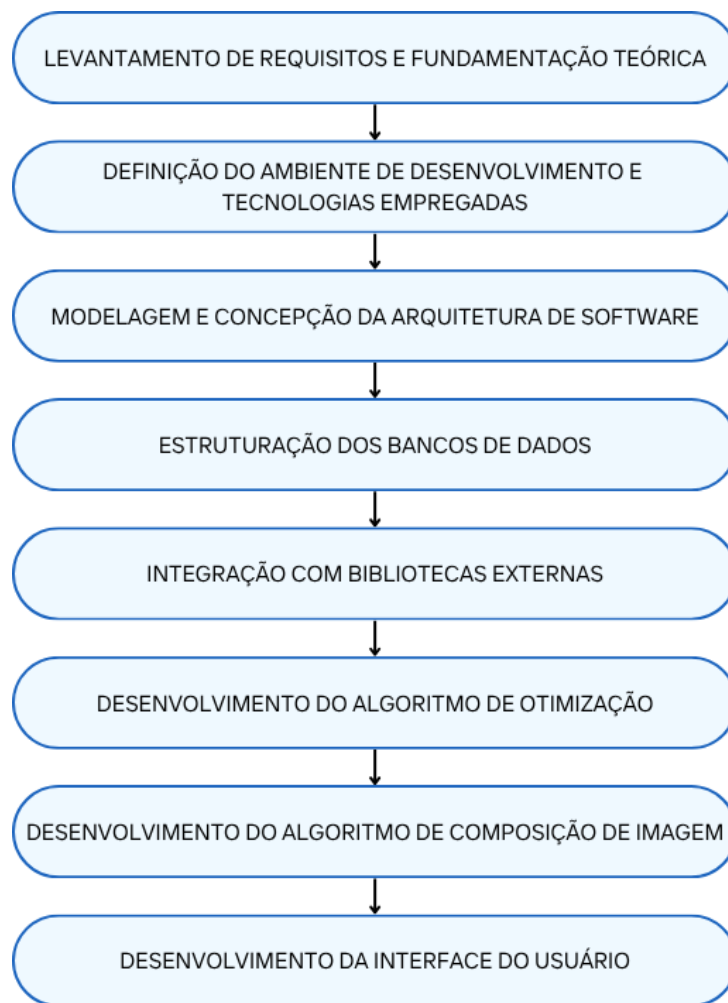


FIGURA 4.1 – Etapas metodológicas do desenvolvimento da ferramenta computacional.

Fonte: Autor (2025).

A partir dessa estrutura metodológica, as seções seguintes detalham as decisões técnicas e os fundamentos teóricos que orientaram cada fase do processo de desenvolvimento.

4.2 Requisitos da Ferramenta

A definição dos requisitos da ferramenta foi conduzida a partir de levantamentos realizados junto a aviadores e gestores de aeródromos FAB. As interações com o público-alvo permitiram compreender as demandas operacionais reais e estabelecer parâmetros que orientassem o desenvolvimento de uma aplicação funcional, acessível e alinhada às práticas correntes de utilização tecnológica no contexto militar.

Durante esse processo, verificou-se que a maioria dos aviadores e esquadrões operacionais utiliza *tablets* pessoais, predominantemente com sistemas *iOS* e *Android*, para consulta de manuais, dados técnicos e informações de missão. Por outro lado, os gestores e equipes

de engenharia responsáveis pela infraestrutura aeroportuária trabalham, em sua maioria, com computadores de mesa e notebooks com sistema *Windows*. Essa diferença de plataformas evidenciou a necessidade de que a ferramenta fosse **multiplataforma**, garantindo funcionamento nativo e desempenho consistente em diferentes sistemas operacionais.

Outro requisito identificado foi a **simplicidade de uso**, visando atender a um público com distintos níveis de familiaridade com ferramentas computacionais. As discussões com o CEPE indicaram que a **redução do número de dados de entrada** seria fundamental para evitar confusões e tornar o processo de análise mais rápido e intuitivo. Assim, optou-se por automatizar a leitura de parâmetros diretamente dos bancos de dados das aeronaves e aeródromos, minimizando a necessidade de entrada manual de informações.

4.3 Ambiente de Desenvolvimento e Ferramentas Utilizadas

4.3.1 Linguagem de Programação e Ambiente

A linguagem de programação selecionada para o desenvolvimento da ferramenta foi o C#, em conjunto com o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) *Visual Studio 2022 Community Edition*, distribuído gratuitamente pela Microsoft. A escolha dessa IDE justifica-se pelo seu amplo suporte ao ecossistema *.NET*, pela integração nativa com ferramentas de depuração, e pela capacidade de compilar aplicações multiplataforma de forma simplificada.

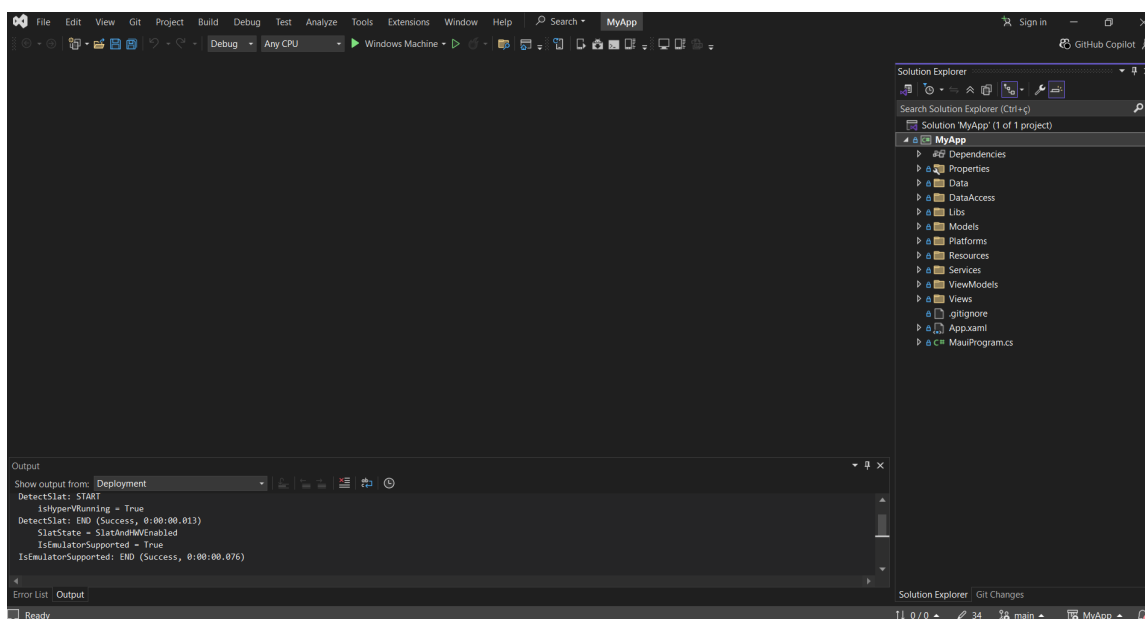


FIGURA 4.2 – Ambiente de desenvolvimento no Visual Studio 2022 Community Edition.

Fonte: Autor (2025).

A escolha do C# ocorreu após a análise dos requisitos de compatibilidade com bibliotecas

externas utilizadas no projeto, que fazem parte do ecossistema *.NET*. Verificou-se, conforme apresentado na revisão bibliográfica, que a biblioteca *ACRClassLib.dll* — responsável pelo cálculo do índice ACR — foi desenvolvida originalmente em *Visual Basic* (VB.NET) e compilada sob o *.NET Framework*.

Dessa forma, a adoção do C# mostrou-se a alternativa mais adequada por ser uma linguagem moderna, orientada a objetos e totalmente interoperável com componentes VB.NET, graças à arquitetura comum do *.NET Runtime*. Essa compatibilidade possibilita a integração entre módulos desenvolvidos em diferentes linguagens dentro do mesmo ambiente, sem necessidade de conversões manuais ou bibliotecas intermediárias, garantindo portabilidade e consistência no processamento dos cálculos.

Tanto o C# quanto o VB.NET compartilham o mesmo ambiente de execução, o *Common Language Runtime* (CLR), e são compilados para a *Common Intermediate Language* (CIL). Esse processo assegura que ambos os códigos sejam interpretados de forma uniforme, o que viabiliza a interoperabilidade total entre módulos de diferentes linguagens no mesmo projeto.

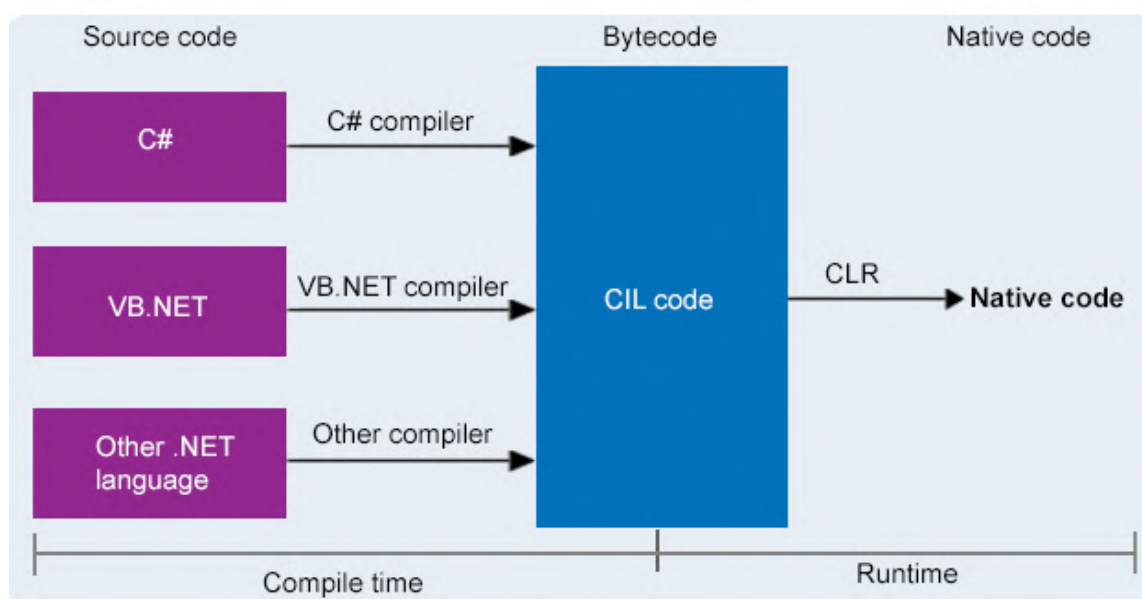


FIGURA 4.3 – Processo de compilação e execução no ambiente *.NET*, em que diferentes linguagens (C#, VB.NET, etc.) são convertidas em código intermediário comum (CIL) e executadas pelo CLR, garantindo interoperabilidade.

Fonte: Revanth (2016).

4.3.2 Bibliotecas e Frameworks

O framework principal adotado para o desenvolvimento da ferramenta foi o *.NET MAUI* (Multi-platform App UI), integrado ao *.NET 8.0*, versão de *Long-Term Support* (LTS) disponibilizada pela Microsoft. A escolha do *.NET MAUI* foi motivada pela sua total compatibilidade com o ecossistema *.NET*, o que garante integração direta com bibliotecas escritas em C# e

VB.NET, além de oferecer suporte nativo ao padrão arquitetônico MVVM e à compilação multiplataforma.

O *.NET MAUI* permite o desenvolvimento de aplicações com base de código única, capazes de operar em sistemas *Windows*, *Android* e *iOS*, assegurando desempenho consistente e interface responsiva em diferentes dispositivos. Essa característica atende ao requisito de portabilidade identificado na fase de levantamento de demandas práticas, viabilizando o uso da ferramenta tanto em ambiente de escritório quanto em campo.

Para a manipulação de dados estruturados, foi utilizada a tecnologia *Language Integrated Query* (LINQ), nativa do C#, que possibilita a execução de consultas e filtragens diretamente sobre coleções e arquivos XML. Essa escolha metodológica assegura maior legibilidade e eficiência na manipulação das informações provenientes dos bancos de dados locais da aplicação.

Além disso, para a geração e composição de elementos gráficos, empregou-se a biblioteca *SkiaSharp*, integrante do ecossistema .NET. Essa biblioteca foi utilizada na criação das imagens de resultado, permitindo a combinação de elementos visuais e textuais de forma dinâmica, o que possibilitou representar graficamente a compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos.

Em conjunto, o uso do *.NET MAUI*, do LINQ e da *SkiaSharp* resultou em uma base tecnológica coesa, moderna e interoperável, garantindo à ferramenta desempenho, flexibilidade e aderência aos requisitos funcionais estabelecidos na metodologia do trabalho.

4.3.3 Sistema Operacional Alvo

O desenvolvimento da ferramenta foi orientado pelo princípio de multiplataforma, de modo a garantir ampla acessibilidade entre os diferentes perfis de usuários envolvidos nas operações da FAB.

Essa característica foi viabilizada pelo uso do framework *.NET MAUI*, que permite a compilação cruzada e o compartilhamento de uma única base de código entre diferentes sistemas, mantendo o mesmo núcleo lógico e a mesma experiência de uso.

Essa abordagem garante que a ferramenta possa ser utilizada tanto em ambientes de campo, durante a verificação de condições de pista e planejamento de rota, quanto em ambientes administrativos, voltados à gestão de infraestrutura e planejamento operacional. Assim, a solução atende integralmente aos requisitos de portabilidade, interoperabilidade e disponibilidade definidos no escopo do projeto.

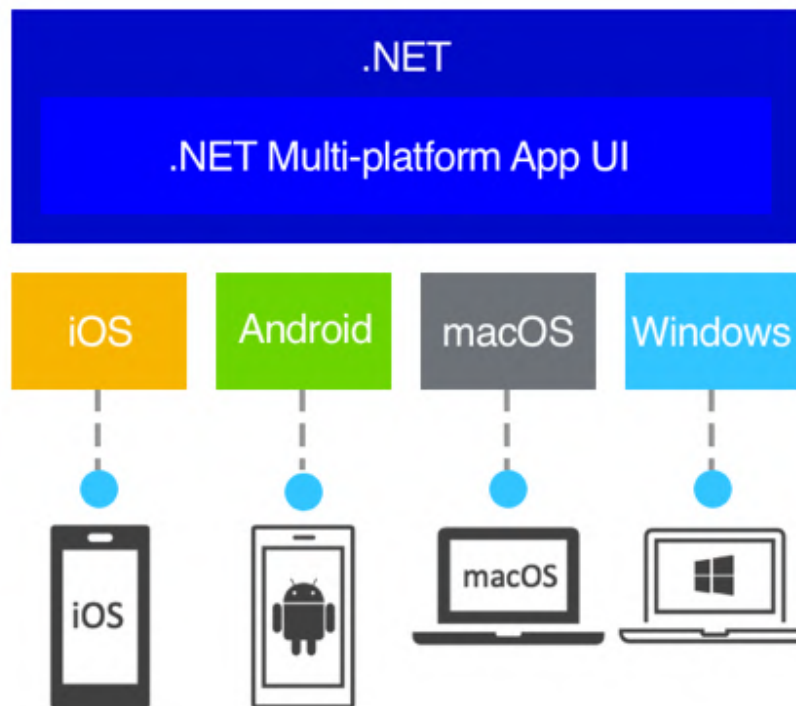


FIGURA 4.4 – Arquitetura multiplataforma do .NET MAUI, que permite compilar e executar uma mesma aplicação .NET de forma nativa em iOS, Android, macOS e Windows, garantindo portabilidade e desempenho uniforme.

Fonte: Learn (2025).

4.4 Arquitetura da Ferramenta Computacional (MVVM)

4.4.1 Visão Geral

A arquitetura da ferramenta foi concebida segundo o padrão MVVM (Model-View-View Model), amplamente adotado no desenvolvimento de aplicações com interfaces gráficas modernas no ecossistema .NET. Essa arquitetura proporciona uma separação clara entre as camadas de dados (Model), interface do usuário (View) e lógica de apresentação (ViewModel), promovendo maior modularidade, reutilização de código e facilidade de manutenção.

O padrão MVVM foi escolhido por ser nativamente suportado pelo .NET MAUI, o que possibilita o uso de recursos como *data binding*, *commands* e notificações de propriedade (INotifyPropertyChanged), essenciais para o funcionamento reativo da interface. Essa abordagem permite que a interface (View) se atualize automaticamente em resposta a alterações nos dados do ViewModel, reduzindo a necessidade de manipulação direta de elementos visuais e aumentando a confiabilidade do código.

De forma simplificada, a função de cada componente é a seguinte:

- **Model:** representa a camada de dados e a lógica de negócio do sistema. É responsável por

definir as estruturas de informação e as regras que regem seu processamento, bem como por realizar a comunicação com as fontes de dados, sejam elas arquivos, bancos de dados ou serviços externos. Essa camada é independente da interface e garante a consistência e integridade dos dados utilizados pela aplicação.

- **View:** corresponde à camada de apresentação, responsável pela exibição das informações ao usuário e pela captura de suas interações. Deve conter apenas elementos visuais e de interface, sem incorporar lógica de negócio, de forma que as alterações nos dados sejam refletidas automaticamente por meio de mecanismos de vinculação (*data binding*).
- **ViewModel:** atua como intermediário entre o *Model* e a *View*. É responsável por processar comandos e eventos de interface, converter e expor os dados do modelo em um formato adequado para a exibição e manter a sincronização entre a camada de dados e a interface.

Essa separação de responsabilidades simplifica futuras atualizações da ferramenta, permitindo modificar a interface gráfica ou os dados subjacentes sem afetar a lógica de cálculo.

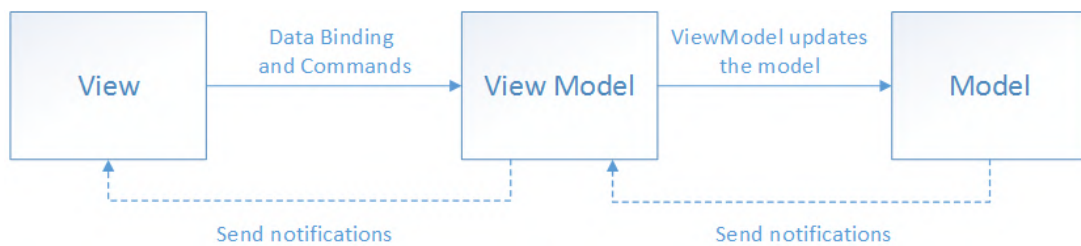


FIGURA 4.5 – Representação simplificada do padrão arquitetônico MVVM. A *View* interage com o *ViewModel* por meio de *data binding* e comandos, enquanto o *ViewModel* atualiza o *Model* e recebe notificações das mudanças de estado.

Fonte: Learn (2024).

4.4.2 Arquitetura Idealizada da Ferramenta

A arquitetura idealizada para o desenvolvimento da ferramenta foi concebida de forma modular e hierarquizada, conforme representado na Figura 4.6. Essa organização visa assegurar a separação clara entre as camadas de dados, lógica de negócio, serviços auxiliares e interface, seguindo os princípios do padrão arquitetônico Model-View-ViewModel (MVVM) e as boas práticas de desenvolvimento no ecossistema *.NET*.

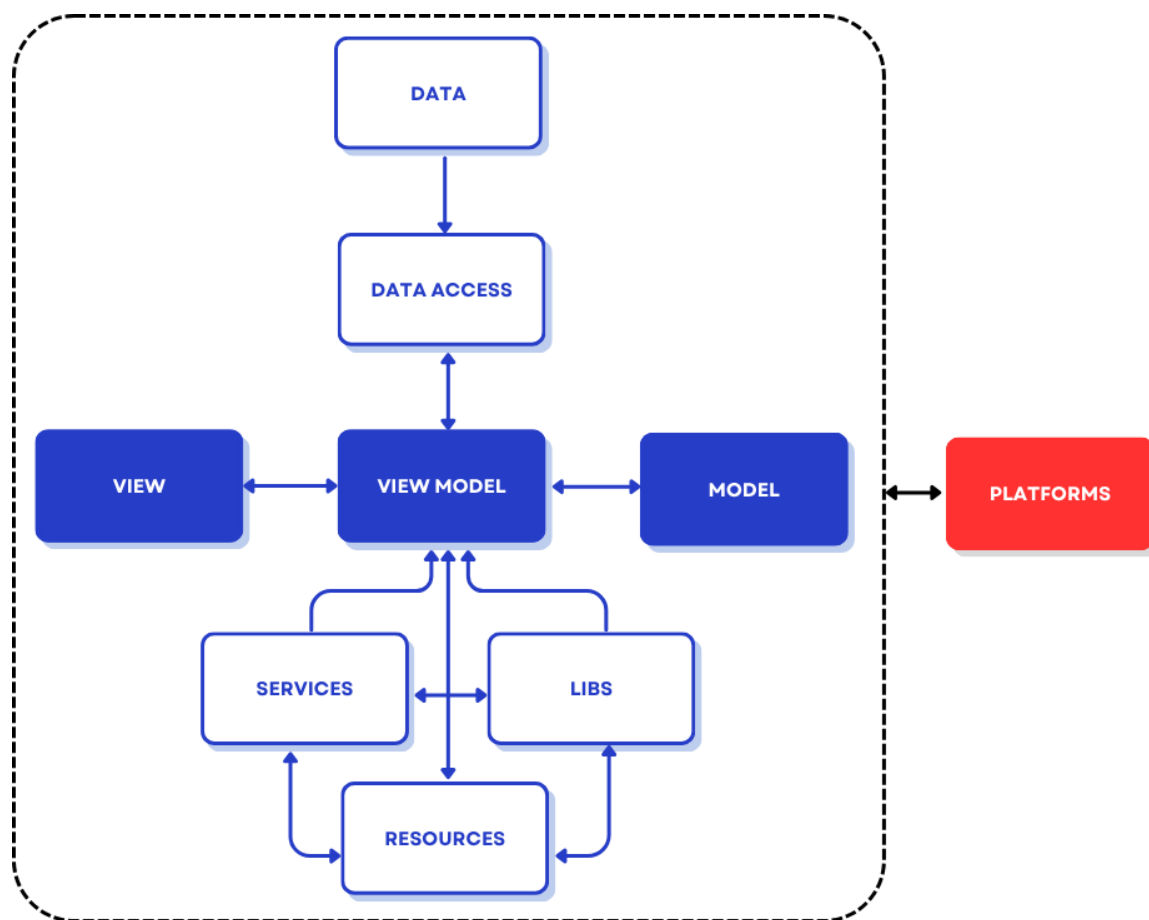


FIGURA 4.6 – Arquitetura idealizada da ferramenta computacional.

Fonte: Autor (2025).

A estrutura proposta está dividida em módulos interdependentes, organizados de modo a garantir coesão interna e baixo acoplamento entre os componentes. Cada divisão exerce uma função específica dentro do fluxo geral de processamento, conforme descrito a seguir.

Data — módulo responsável pelo armazenamento dos dados utilizados pela aplicação, compreendendo as bases de aeronaves, aeródromos e estruturas de pavimento. Esses dados são mantidos em arquivos locais em formato XML, escolhidos por sua legibilidade e compatibilidade com o padrão de bancos de dados adotados pela ICAO.

Data Access — camada intermediária dedicada ao acesso e à leitura dos bancos de dados. Implementa os mecanismos de extração, filtragem e conversão das informações do formato XML para objetos manipuláveis pela aplicação. Essa camada é responsável por garantir que os módulos superiores trabalhem com dados prontos para uso.

Model — componente que representa a lógica de negócio e as entidades centrais da aplicação. Inclui as estruturas de dados que descrevem aeronaves, pavimentos e resultados de cálculo, bem como as regras que regem a interação entre esses elementos. Essa camada define o núcleo conceitual da ferramenta e fornece as informações necessárias ao processamento realizado pelos

módulos de serviço.

ViewModel — camada de intermediação entre o modelo de dados e a interface do usuário. É responsável por processar comandos, converter dados em formatos adequados para exibição e manter a sincronização entre a lógica de negócio e a camada de apresentação. A comunicação com a interface é feita por meio de *data binding*, garantindo reatividade e atualização automática das informações.

View — camada de apresentação da aplicação. Contém os elementos visuais e a estrutura da interface com o usuário, sem incorporar lógica de negócio. Sua função é exibir os dados processados pelo *ViewModel* e capturar as interações do usuário de forma intuitiva e responsiva.

Services — módulo que concentra as funcionalidades especializadas da ferramenta, como rotinas de cálculo, tratamento de erros, e integração com bibliotecas externas. Sua função é executar tarefas específicas de forma isolada, permitindo a reutilização do código e a manutenção da clareza na lógica principal.

Libs — repositório destinado às bibliotecas externas utilizadas pela aplicação, incluindo aquelas responsáveis por cálculos estruturais ou manipulação de dados adicionais.

Resources — pasta que reúne os recursos complementares da aplicação, como ícones, estilos visuais, arquivos de configuração e imagens de apoio. Esses elementos são compartilhados por diferentes partes do sistema e contribuem para a padronização visual e funcional da ferramenta.

Platforms — componente externo que representa os sistemas operacionais e ambientes de execução suportados pelo framework *.NET MAUI*, como *Windows*, *Android* e *iOS*. Essa camada garante a compatibilidade multiplataforma, permitindo que a mesma base de código seja compilada e executada de forma nativa em diferentes dispositivos.

De forma geral, essa arquitetura foi idealizada para promover modularidade, escalabilidade e facilidade de manutenção, assegurando que futuras expansões possam ser realizadas sem alterações estruturais significativas na aplicação. A estrutura final das pastas da ferramenta encontram-se melhor detalhadas no Apêndice B.

4.5 Estruturação e Gerenciamento dos Dados

A etapa de estruturação dos dados teve como objetivo garantir integridade, padronização e facilidade de atualização das informações empregadas pela ferramenta. Para isso, optou-se por utilizar arquivos no formato XML (*Extensible Markup Language*) como bancos de dados locais da aplicação, permitindo uma representação hierárquica e legível dos dados de aeronaves e aeródromos.

A escolha pelo formato XML fundamenta-se também no fato de que a ICAO já adota esse

mesmo padrão em seu banco de dados oficial de aeronaves, o que assegura compatibilidade direta entre os arquivos utilizados pela ferramenta e as informações publicadas pela ICAO. Dessa forma, a importação e atualização dos dados podem ser realizadas de forma simples e confiável, preservando a consistência com os padrões internacionais.

Esses arquivos estão organizados na pasta Data, que reúne todos os bancos de dados utilizados pela ferramenta, centralizando as informações de entrada de modo a facilitar sua manutenção e atualização futura.

4.5.1 Banco de Dados de Aeronaves

A maior parte dos registros de aeronaves foi extraída diretamente do banco de dados XML da ICAO (ICAO, 2020), amplamente reconhecido por sua completude e pela grande variedade de modelos disponíveis. O formato adotado pela ICAO serviu como referência para a construção do banco de dados da aplicação, o que possibilitou a importação direta das informações por meio de operações simples de cópia entre arquivos XML.

Essa decisão metodológica teve como objetivo reduzir o tempo de implementação, eliminar redundâncias e assegurar que os parâmetros utilizados fossem consistentes com os padrões internacionais definidos pela metodologia ACR/PCR. Quando necessário, foram realizados apenas ajustes pontuais em parâmetros específicos, de forma a representar com maior precisão a realidade operacional da FAB.

Em especial, foram atualizados os valores de peso máximo de táxi (*ramp weight*) de determinadas aeronaves para refletir as configurações efetivamente utilizadas em operações nacionais. Além disso, dois modelos — o KC-390 e o C-105 (Amazonas) — foram construídos integralmente pelo CEPE, com base em dados técnicos coletados em campo e informações fornecidas pelos fabricantes e pelos esquadrões.

A utilização do formato XML também garante elevada compatibilidade com futuras atualizações do banco de dados da ICAO. Caso seja necessário incluir novos modelos ou atualizar parâmetros de aeronaves já existentes, basta editar ou substituir os valores diretamente no arquivo XML, preservando a estrutura padrão definida pela organização.

As informações completas referentes ao banco de dados de aeronaves estão apresentadas no Apêndice B, onde são detalhados os modelos incluídos, suas respectivas origens e os ajustes realizados nos casos em que foi necessário adaptar os parâmetros às condições operacionais da FAB.

4.5.2 Banco de Dados de Aeródromos

O banco de dados de aeródromos segue o mesmo modelo estrutural em XML adotado para as aeronaves, armazenando informações referentes às localidades sob gestão da FAB, incluindo pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátios de estacionamento. Cada estrutura contém atributos que definem sua nomenclatura, tipo de pavimento (rígido ou flexível), categoria de subleito (A–D) e o valor de PCR correspondente.

Atualmente, o banco de dados encontra-se parcialmente preenchido, uma vez que o CEPE ainda não concluiu as avaliações de campo e os cálculos de PCR em todas as 34 localidades. Assim, o arquivo XML utilizado nesta versão da ferramenta contém apenas os registros referentes aos aeródromos já avaliados e homologados, mantendo, contudo, a estrutura aberta para futuras expansões conforme novas informações forem disponibilizadas.

O Apêndice C apresenta a relação completa das 34 localidades sob responsabilidade da FAB, indicando aquelas que já possuem dados consolidados e incorporados à ferramenta, bem como as que ainda aguardam avaliação para inclusão em versões futuras do sistema.

4.5.3 Interface de Acesso aos Dados

A interface de acesso aos dados da aplicação foi implementada por meio das classes `AircraftRepository.cs` e `AirfieldRepository.cs`, ambas localizadas na pasta `DataAccess`. Essas classes são responsáveis pela leitura, interpretação e conversão dos arquivos XML que compõem os bancos de dados de aeronaves e de aeródromos em estruturas de objetos manipuláveis pela aplicação.

O projeto foi concebido para que os bancos de dados operem em modo somente leitura, assegurando a integridade e a consistência das informações originais. Dessa forma, as classes de acesso não realizam modificações, inserções ou exclusões nos arquivos XML, limitando-se à extração e transformação dos dados necessários para o funcionamento da ferramenta.

O processo de consulta e estruturação das informações é realizado por meio do recurso *Language Integrated Query* (LINQ), nativo do C#, que permite executar consultas sobre coleções e documentos XML de maneira eficiente e expressiva. A utilização do LINQ simplifica a filtragem, seleção e transformação dos registros, reduzindo a complexidade do código e aumentando sua legibilidade e confiabilidade.

A leitura dos dados é realizada sob demanda, de modo a otimizar o uso de recursos e o desempenho geral do sistema. Assim, apenas os conjuntos de dados necessários para cada operação — como a lista de aeronaves disponíveis ou as estruturas de um aeródromo selecionado — são carregados durante a execução, assegurando eficiência e economia de memória.

4.6 Integração com a Biblioteca Externa ACRCClassLib.dll

A integração da ferramenta com a biblioteca externa ACRCClassLib.dll foi realizada de forma direta, por meio de referência ao arquivo da biblioteca dentro do projeto, garantindo compatibilidade total com o ambiente de execução .NET. Essa integração permitiu incorporar ao sistema o algoritmo oficial de cálculo do índice ACR, conforme definido pela metodologia ACR/PCR.

A comunicação entre a aplicação e a biblioteca foi implementada por meio da classe ACRCalculate, localizada na pasta Services. Essa classe atua como um módulo intermediário responsável por receber os parâmetros de entrada provenientes do banco de dados de aeronaves e das seleções realizadas pelo usuário, convertê-los para o formato requerido pela biblioteca e executar a chamada à função principal de cálculo do ACR.

Após a execução, os resultados retornados pela ACRCClassLib.dll são interpretados e organizados pela classe ACRCalculate, que os repassa às demais camadas da aplicação para posterior análise e apresentação ao usuário. Esse processo ocorre de forma transparente e síncrona, assegurando desempenho adequado mesmo durante o processamento de múltiplas estruturas de pavimento.

O manual oficial da FAA, intitulado *User Information for the ICAO-ACR Computer Program*, que descreve em detalhe a estrutura e o funcionamento interno da ACRCClassLib.dll, encontra-se reproduzido integralmente no Anexo A deste trabalho, servindo como referência técnica complementar para compreensão de como se deve consumir as funcionalidades dessa biblioteca.

4.7 Desenvolvimento do Algoritmo de Determinação do Peso Máximo Operacional

O núcleo funcional da ferramenta está concentrado no algoritmo responsável por determinar o peso máximo operacional permitido para cada aeronave, em função das características estruturais do pavimento e dos valores de PCR informados. Esse módulo constitui a etapa central do processo de análise, pois traduz os resultados de cálculo obtidos pela biblioteca externa em informações operacionais diretamente aplicáveis ao contexto de uso.

4.7.1 Fundamentação Teórica

Como apresentado na Seção 3.5.2, o índice ACR é função direta do peso da aeronave. Dessa forma, para determinar o peso máximo (W_{max}) que uma aeronave pode operar em uma determi-

nada estrutura de pavimento, busca-se a condição:

$$ACR(W_{max}) \leq PCR$$

Embora o ACR também dependa de outros parâmetros, como a pressão dos pneus e a configuração do trem de pouso, assumiu-se neste trabalho que apenas o peso da aeronave varia durante o processo de cálculo. Essa simplificação reflete o comportamento típico das operações aéreas, em que as demais características geométricas e de configuração permanecem constantes, enquanto o peso é a variável operacional efetivamente controlada entre diferentes fases de missão ou perfis de carga.

Uma vez que o ACR não é obtido de forma analítica, mas calculado por meio da biblioteca `ACRClassLib.dll`, torna-se necessário o uso de um método numérico iterativo para encontrar o valor de W_{max} que satisfaz a relação acima com a precisão desejada.

4.7.2 Lógica do Algoritmo

Para cada estrutura de pavimento selecionada pelo usuário (com seu respectivo valor de PCR), o algoritmo executa a sequência de operações descrita a seguir:

1. Recebe como parâmetro o objeto da aeronave selecionada pelo usuário, previamente instanciado a partir do banco de dados, contendo todas as informações necessárias para o Cálculo do ACR.
2. Lê o valor numérico do PCR da estrutura analisada, considerando o tipo de pavimento (rígido ou flexível) e a categoria de subleito correspondente (A, B, C ou D).
3. Em seguida, o algoritmo executa duas verificações preliminares para determinar se há necessidade de aplicar o método iterativo:
 - (a) Calcula o valor de ACR correspondente ao peso máximo de rampa (MTW). Caso o resultado seja menor ou igual ao PCR da estrutura, conclui-se que a aeronave pode operar de forma irrestrita, e o peso máximo permitido (W_{max}) é definido como o próprio MTW, dispensando iterações adicionais.
 - (b) Caso contrário, calcula o ACR para 50% do MTW, valor adotado pelo CEPE como limite inferior de referência. Se o ACR nessa condição for superior ao PCR da estrutura, considera-se que a aeronave não pode operar sobre o pavimento avaliado, e o processo é encerrado.
4. Se nenhuma das condições anteriores for satisfeita, o algoritmo define o intervalo inicial de busca entre 50% e 100% do MTW e aplica o Método da Secante para estimar o valor

de W que satisfaz a condição $ACR(W) = PCR$ (ou o mais próximo possível, respeitando $ACR \leq PCR$).

5. A cada iteração do Método da Secante:

- (a) A classe `ACRCalculate`, localizada na pasta `Services`, realiza a chamada à função de cálculo da biblioteca `ACRClassLib.dll`, fornecendo os parâmetros da aeronave e o peso candidato W .
- (b) A biblioteca retorna o valor de ACR correspondente à categoria de subleito associada à estrutura em análise.
- (c) O algoritmo compara o valor obtido de $ACR(W)$ com o PCR da estrutura, ajustando o intervalo e refinando a próxima estimativa de W até atingir a convergência.

6. O processo iterativo é encerrado quando a diferença entre $ACR(W)$ e PCR torna-se inferior a uma tolerância predefinida (10^{-3}) ou quando o número máximo de iterações ($it_{max} = 100$) é atingido, prevenindo laços infinitos.

7. O valor final de W obtido após a convergência é registrado como o peso máximo operacional permitido (W_{max}) para a aeronave na estrutura analisada.

4.7.3 Método de Otimização/Busca

O método adotado para a determinação do peso máximo operacional foi o Método da Secante, um algoritmo iterativo de busca de raízes que não requer o cálculo explícito de derivadas. Essa característica o torna particularmente adequado ao problema em questão, uma vez que a função $f(W) = ACR(W) - PCR$ é não linear e depende de resultados provenientes de uma rotina externa (`ACRClassLib.dll`), não sendo possível obter de forma direta uma expressão analítica da sua derivada.

O objetivo do método é encontrar o valor de W tal que $f(W) = 0$, ou seja, o ponto em que $ACR(W)$ se iguala ao PCR da estrutura. O Apêndice D traz o pseudocódigo do Método da Secante utilizado para obtenção do peso máximo de operação para a ferramenta.

4.7.4 Fluxograma

A Figura 4.7 ilustra o funcionamento geral do algoritmo de determinação do peso máximo operacional, destacando as etapas de entrada de dados, iteração e convergência do processo.

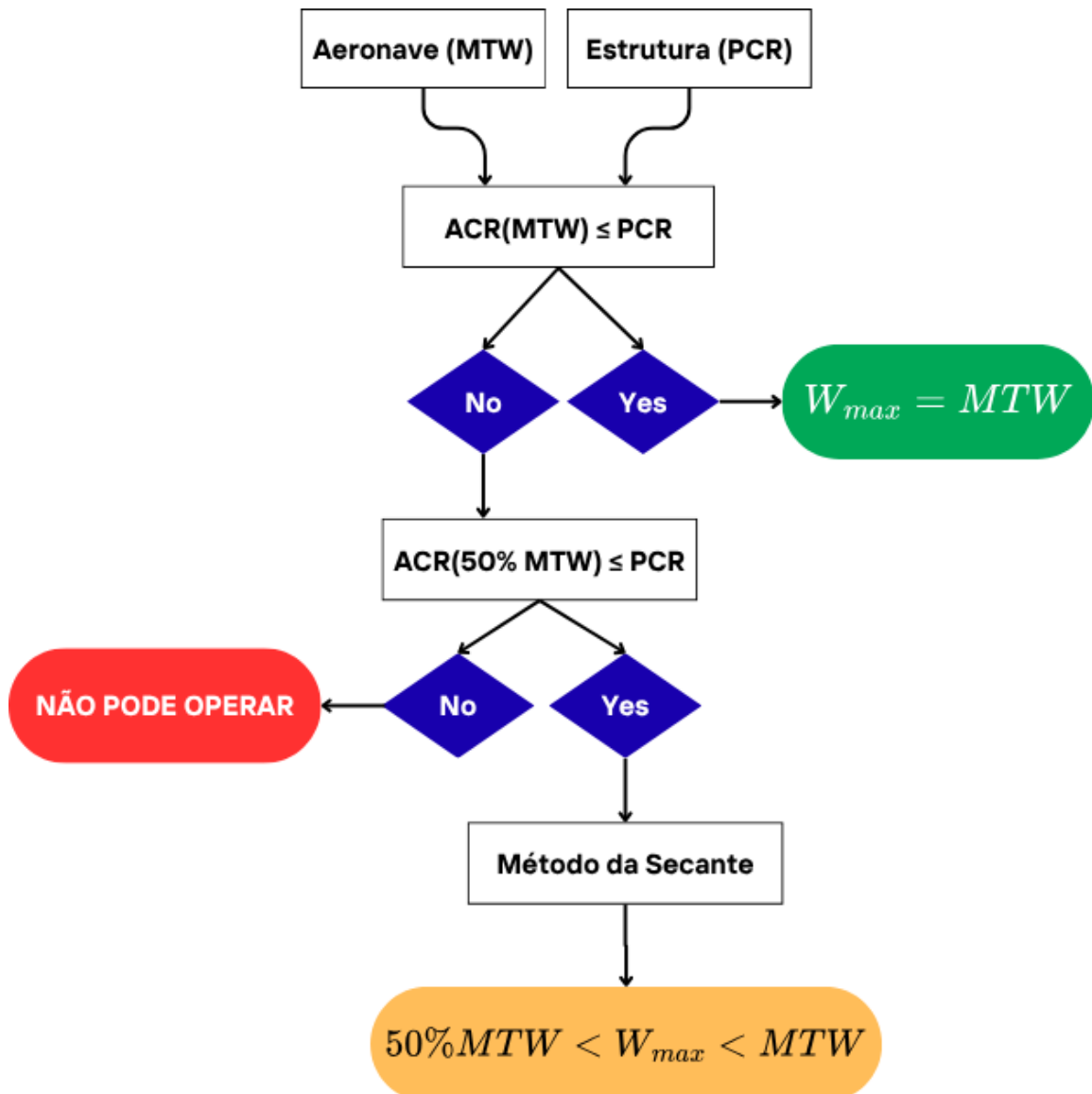


FIGURA 4.7 – Fluxograma representando a lógica do algoritmo de determinação do peso máximo operacional.

Fonte: Autor (2025).

4.8 Desenvolvimento do Algoritmo de Composição de Imagem

O algoritmo de composição de imagem foi desenvolvido com o objetivo de fornecer ao usuário uma resposta visual imediata e intuitiva acerca dos resultados da análise de compatibilidade operacional entre aeronaves e estruturas de pavimento. A metodologia adotada consiste em gerar uma imagem composta, na qual cada estrutura do aeródromo é representada por uma camada colorida sobreposta a uma imagem-base, indicando graficamente as condições de operação resultantes da análise.

Cada estrutura individual — pista, pátio ou taxiway — é representada por uma imagem com fundo transparente e contorno delimitando sua área correspondente, acompanhada de uma identificação nominal. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam exemplos dessas camadas, correspondentes aos pátios 1.a e 1.b do aeródromo de Belém (SBBE). Essas camadas são armazenadas em arquivos independentes, mantendo as mesmas dimensões e alinhamento espacial da imagem de satélite do aeródromo, de modo a possibilitar a sobreposição precisa durante a composição final.

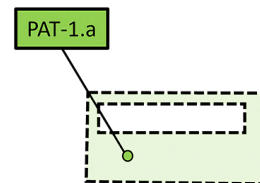


FIGURA 4.8 – Camada de referência da estrutura PAT-1.a, com fundo transparente.

Fonte: Autor (2025).

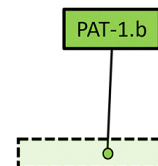


FIGURA 4.9 – Camada de referência da estrutura PAT-1.b, com fundo transparente.

Fonte: Autor (2025).

Durante a execução da ferramenta, cada estrutura selecionada pelo usuário é analisada in-

dividualmente quanto à sua condição operacional, com base no resultado do cálculo do peso máximo permitido. Em seguida, o sistema associa uma cor à camada correspondente:

- **Verde:** operação permitida, quando $ACR(MTW) \leq PCR$;
- **Amarelo:** operação com restrição de peso, quando $0.5 \times MTW < W_{max} < MTW$;
- **Vermelho:** operação não permitida, quando $ACR(0.5 \times MTW) > PCR$.

A composição final é obtida pela sobreposição das imagens coloridas das estruturas sobre a imagem-base do aeródromo. Esse processo é realizado por meio da biblioteca SkiaSharp, que possibilita a manipulação de imagens no ambiente .NET de forma eficiente.

O resultado é uma imagem única, com transparência mantida nas regiões não ocupadas, na qual todas as estruturas avaliadas são exibidas com a coloração correspondente ao seu estado operacional. Dessa forma, o usuário obtém uma representação gráfica clara e imediata da situação geral do aeródromo, complementando as informações numéricas apresentadas nas tabelas de resultados.

A Figura 4.10 apresenta um exemplo do resultado final obtido pelo algoritmo de composição de imagem, aplicado ao aeródromo de Belém (SBBE). Observa-se a sobreposição das camadas correspondentes às estruturas avaliadas sobre a imagem-base do aeródromo, resultando em uma representação visual integrada das condições operacionais de cada pavimento.



FIGURA 4.10 – Resultado final da composição visual gerada para o aeródromo de Belém (SBBE).

Fonte: Autor (2025).

Essa abordagem amplia a capacidade de interpretação dos resultados, integrando a análise numérica a uma visualização espacial intuitiva. Ao sintetizar informações complexas em uma

imagem única e interativa, o algoritmo de composição proporciona uma compreensão imediata da compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos, permitindo identificar com clareza quais estruturas estão aptas à operação, quais apresentam restrições de peso e quais não se pode operar.

4.9 Projeto e Implementação da Interface Gráfica do Usuário (GUI)

Planeja-se que a interface gráfica da ferramenta apresente simplicidade, clareza e eficiência de uso, de modo a atender ao perfil do público-alvo — composto por engenheiros, gestores e aviadores que necessitam de respostas rápidas e confiáveis durante o planejamento de operações aéreas. A concepção proposta prioriza a apresentação intuitiva das informações e a eliminação de inserções manuais de dados, utilizando recursos visuais e interativos para orientar o usuário em cada etapa do processo.

As telas apresentadas nesta seção representam a **concepção inicial da interface gráfica**, elaborada com o propósito de validar a lógica de navegação, o fluxo de interação e a organização das informações. Por se tratarem de protótipos conceituais, sua inclusão nesta etapa visa documentar as decisões metodológicas de design e demonstrar a estrutura planejada para a aplicação.

4.9.1 Requisitos de Projeto

Para o desenvolvimento da interface, definem-se os seguintes requisitos fundamentais:

1. Navegação sequencial e intuitiva entre as etapas do processo de análise;
2. Eliminação de entrada manual de dados, priorizando seleções automatizadas e orientadas;
3. Apresentação visual clara, objetiva e responsiva;
4. Integração entre informações textuais e representações gráficas.

4.9.2 Estrutura e Navegação

Prevê-se que a aplicação seja composta por quatro telas principais, organizadas de forma sequencial e conectadas por botões de navegação (“Voltar”, “Próximo” ou “Calcular”). O fluxo de uso deverá refletir a sequência lógica do processo analítico: seleção da aeronave, seleção do aeródromo, escolha das estruturas de interesse e exibição dos resultados, conforme ilustrado pela Figura Figura 4.11.



FIGURA 4.11 – Fluxograma conceitual proposto para o funcionamento da ferramenta computacional.

Fonte: Autor (2025).

4.9.3 Telas

Tela 1 – Seleção de Aeronave: Planeja-se que esta tela apresente a lista de aeronaves disponíveis no banco de dados, organizadas por fabricante. Após selecionar uma aeronave, o usuário visualizará sua imagem e principais características operacionais, como modelo e peso máximo de decolagem. A Figura 4.12 mostra a concepção inicial dessa etapa da interface.

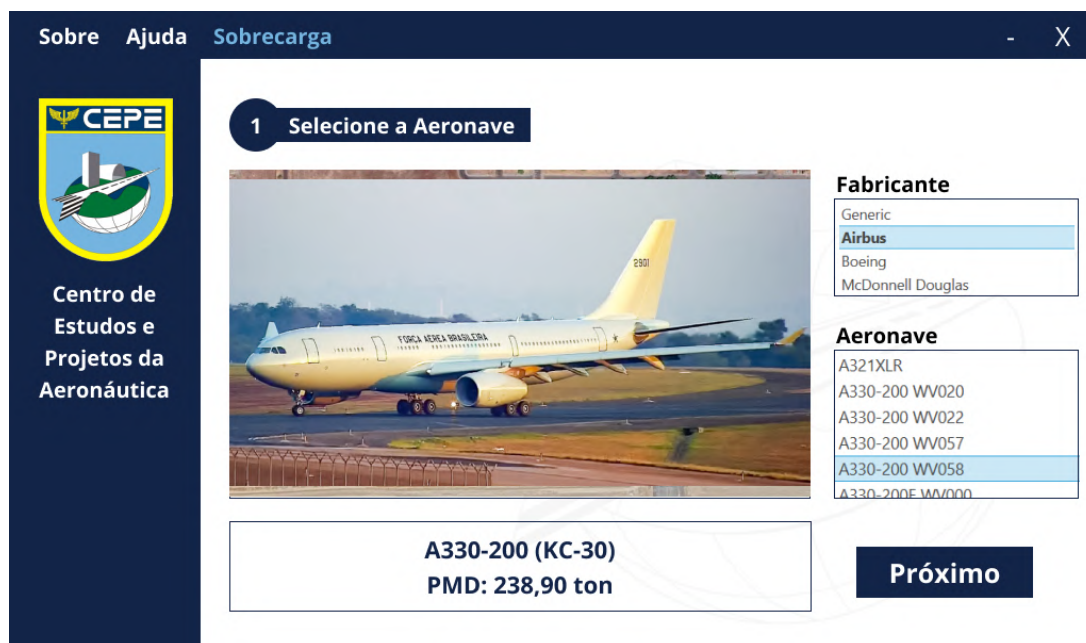


FIGURA 4.12 – Tela 1 — Concepção inicial da seleção de aeronave disponível no banco de dados.

Fonte: Autor (2025).

Tela 2 – Seleção de Aeródromo: Prevê-se que esta tela apresente a lista das 34 localidades sob gestão da FAB, disponíveis no banco de dados. Após selecionar um aeródromo, o usuário visualizará sua imagem e o seu nome. A Figura 4.13 apresenta a proposta inicial dessa tela.



FIGURA 4.13 – Tela 2 — Concepção inicial da seleção do aeródromo de operação.

Fonte: Autor (2025).

Tela 3 – Seleção das Estruturas: Após a escolha do aeródromo, planeja-se que a interface

apresente uma imagem de satélite do local com contornos coloridos representando cada estrutura (pistas, taxiways e pátios). À direita, uma lista exibirá as mesmas estruturas com suas respectivas nomenclaturas e valores de PCR, acompanhadas de caixas de seleção (*checkboxes*). O usuário poderá selecionar as estruturas que compõem sua rota de pouso, táxi e estacionamento, correlacionando visualmente as cores da imagem com as informações listadas. A Figura 4.14 ilustra a concepção inicial dessa tela.

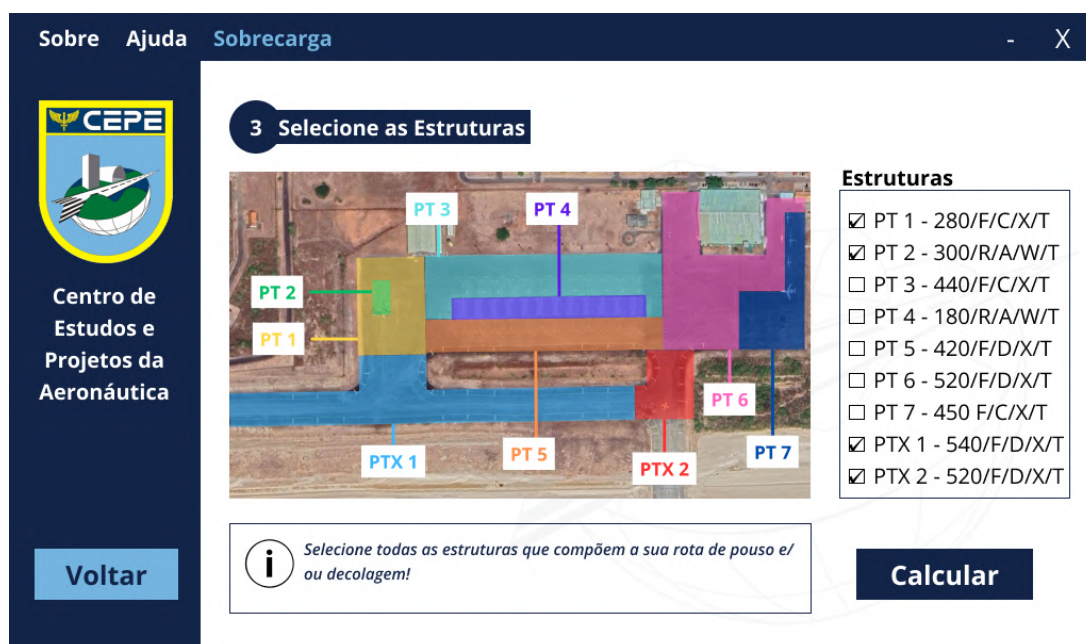


FIGURA 4.14 – Tela 3 — Concepção inicial da seleção das estruturas do aeródromo a serem avaliadas.

Fonte: Autor (2025).

Tela 4 – Resultados: Na etapa final, o sistema deverá apresentar os resultados de forma simultaneamente numérica e visual. A imagem-base do aeródromo será sobreposta pelas camadas coloridas das estruturas selecionadas, aplicando as cores verde, amarela e vermelha conforme o resultado da análise de compatibilidade.

À direita, será exibida uma tabela contendo o peso máximo operacional (W_{max}) obtido para cada estrutura, em toneladas e como percentual do peso máximo de decolagem (PMD), acompanhada de ícones coloridos que repetem a codificação visual da imagem. Essa redundância gráfica e tabular deverá reforçar a legibilidade dos resultados. A Figura 4.15 apresenta o protótipo conceitual dessa tela.



FIGURA 4.15 – Tela 4 — Concepção inicial da exibição dos resultados da análise de compatibilidade operacional.

Fonte: Autor (2025).

4.9.4 Uso de Ferramentas de Inteligência Artificial

O autor utilizou as versões 5 do ChatGPT para aprimorar a gramática e melhorar a legibilidade geral do texto. Após o uso dessas ferramentas de IA, o autor revisou e editou o conteúdo conforme necessário para manter o controle total autoral sobre a substância do trabalho.

5 Resultados e discussão

5.1 Apresentação da Ferramenta Computacional Desenvolvida

A ferramenta computacional desenvolvida, representa a consolidação prática da metodologia apresentada no Capítulo 4. Sua finalidade é avaliar a compatibilidade operacional entre aeronaves e estruturas de pavimentos aeroportuários, automatizando a comparação entre os índices ACR e PCR.

A versão apresentada nesta seção corresponde à **versão de validação funcional**, já plenamente capaz de executar todos os cálculos e gerar os resultados gráficos e numéricos da análise de compatibilidade. As telas de apoio — “Ajuda”, “Sobre” e “Sobrecarga” — ainda encontram-se em fase de desenvolvimento e serão integradas em versões futuras, sem impacto sobre as funcionalidades principais da ferramenta e a motivação proposta para o referente trabalho.

5.1.1 Visão Geral da Interface do Usuário (GUI)

A interface da ferramenta foi projetada com foco em clareza, simplicidade e eficiência operacional, priorizando a experiência do usuário e a minimização de entradas manuais de dados. Todas as interações são realizadas por meio de seleções orientadas em listas pré-carregadas e botões de navegação, guiando o usuário de forma sequencial pelas etapas do processo.

O fluxo de operação segue quatro etapas principais, correspondendo a quatro telas interativas:

1. **Tela 1 – Selecionar Aeronave:** Apresenta a lista de aeronaves cadastradas no banco de dados, totalizando 22 modelos disponíveis. A seleção de uma aeronave exibe automaticamente sua imagem, fabricante e dados básicos, como peso máximo de táxi (*Maximum Taxi Weight – MTW*).

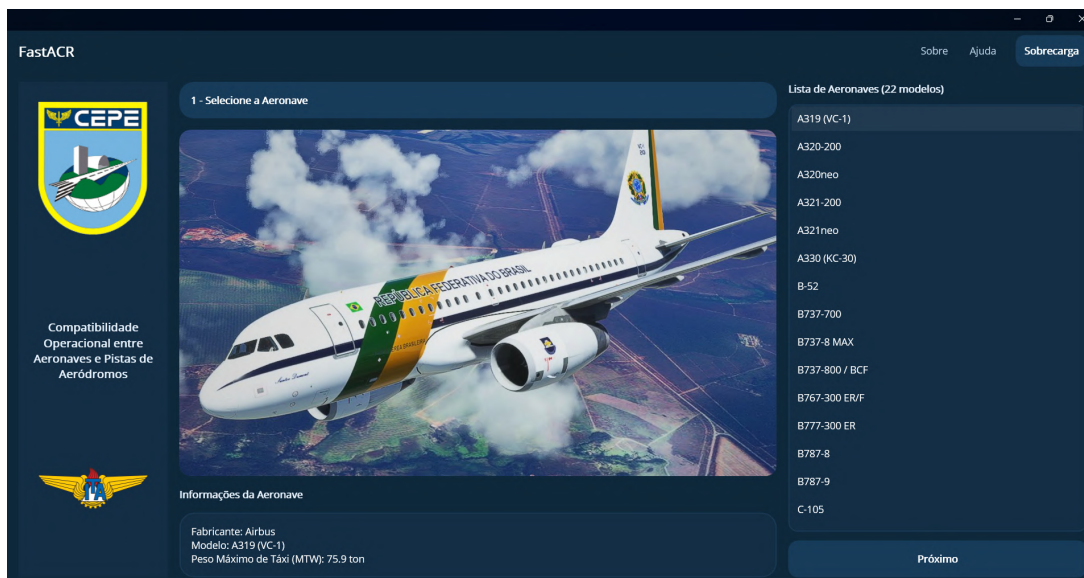


FIGURA 5.1 – Tela 1 – Seleção da aeronave.

Fonte: Autor (2025).

- Tela 2 – Selecionar Aeródromo:** Apresenta uma lista com os aeródromos sob gestão da FAB, exibindo simultaneamente uma imagem de satélite de alta resolução da localidade. Ao selecionar um aeródromo, são mostradas informações complementares, como o código ICAO e o nome completo do aeroporto em que a base aérea está localizada.

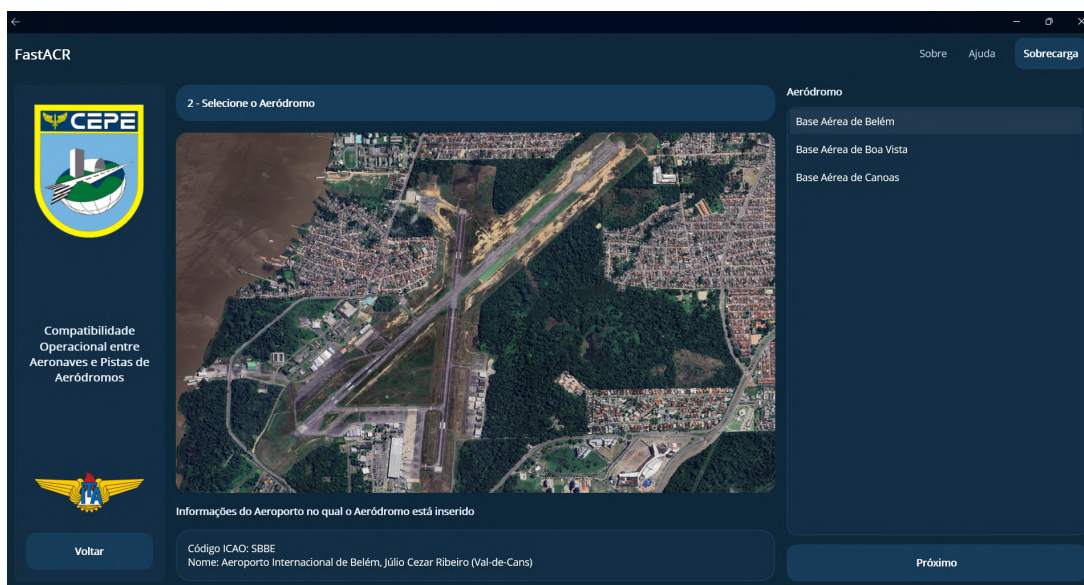


FIGURA 5.2 – Tela 2 – Seleção do aeródromo.

Fonte: Autor (2025).

- Tela 3 – Selecionar Estruturas:** Exibe a imagem do aeródromo selecionado com destaque para as estruturas disponíveis (pistas, pátios e taxiways). Cada estrutura é representada por uma área delimitada e nomeada conforme as cartas ADC, enquanto uma lista

lateral apresenta as mesmas estruturas acompanhadas de seus respectivos valores de PCR. O usuário pode selecionar múltiplas estruturas via *checkboxes* e iniciar a análise clicando em “Calcular”.

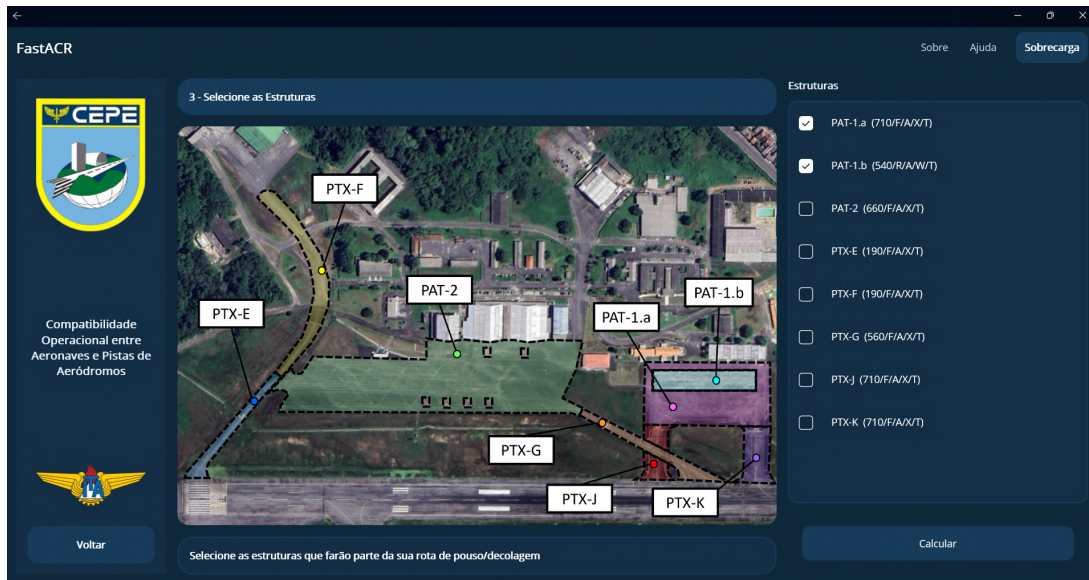


FIGURA 5.3 – Tela 3 – Seleção das estruturas de pavimento do aeródromo.

Fonte: Autor (2025).

- Tela 4 – Resultados:** Apresenta a síntese dos resultados obtidos na análise, tanto em formato tabular quanto visual. A imagem de base do aeródromo é sobreposta por camadas coloridas que indicam a condição operacional de cada estrutura, segundo a lógica definida na Seção 4.8 — verde para operação permitida, amarelo para operação restrita e vermelho para operação não permitida. À direita, uma tabela lista o valor de W_{max} calculado para cada estrutura e o respectivo status de operação.

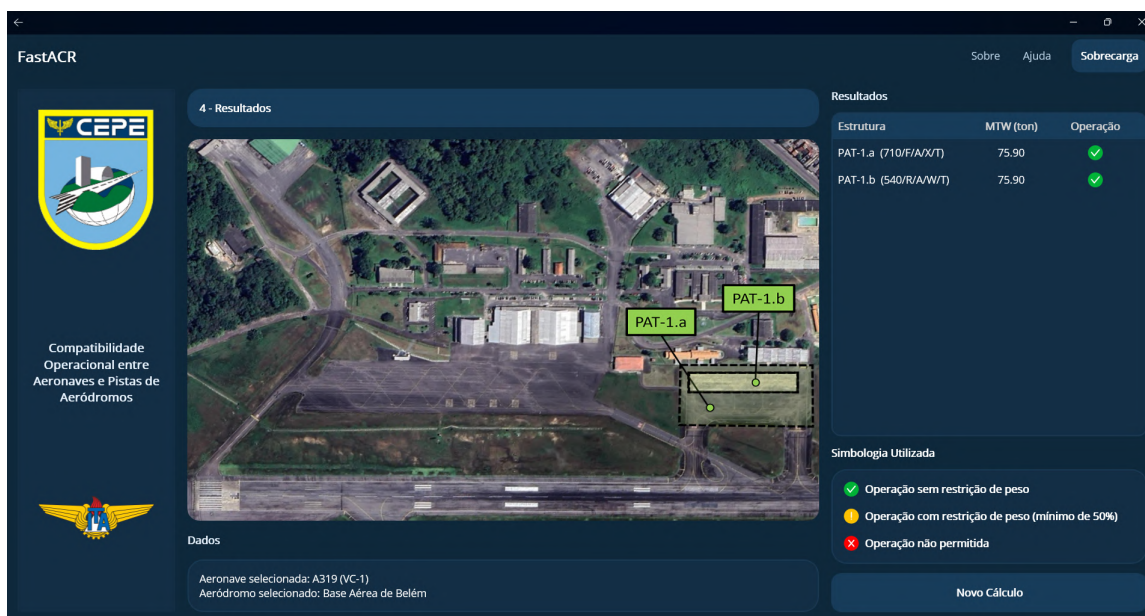


FIGURA 5.4 – Tela 4 – Exibição dos resultados de compatibilidade operacional.

Fonte: Autor (2025).

Além das telas funcionais principais, a aplicação também possui telas adicionais de apoio institucional e informativo, que serão aprimoradas nas próximas versões:

- **Tela de Ajuda:** Destinada a apresentar orientações sobre o uso da ferramenta e listas de referência de aeronaves e aeródromos. Na versão atual, a tela exibe a estrutura base para futura inserção de conteúdo textual.

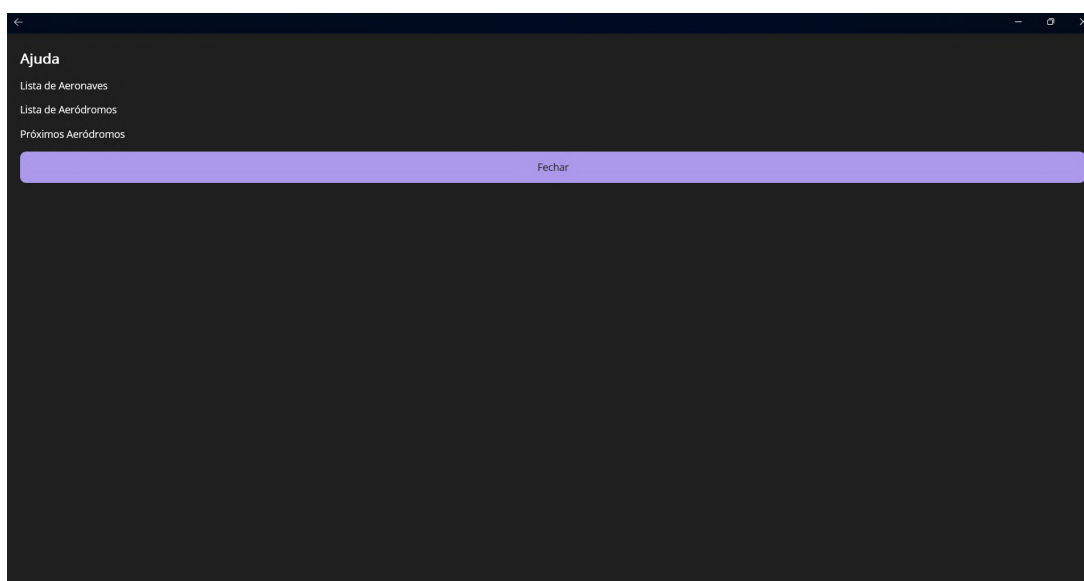


FIGURA 5.5 – Tela de Ajuda – Estrutura base para futuras instruções de uso.

Fonte: Autor (2025).

- **Tela Sobre:** Fornece informações institucionais sobre o aplicativo, como versão, autoria

e vinculação ao CEPE e ao ITA. Assim como a tela de Ajuda, sua estrutura funcional já está implementada, restando apenas a complementação do conteúdo informativo.

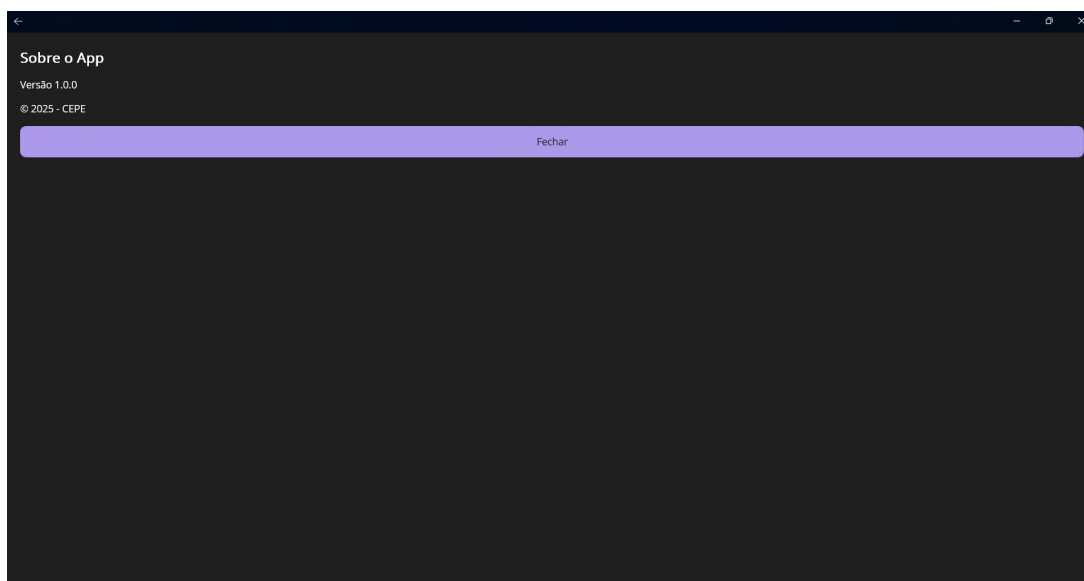


FIGURA 5.6 – Tela Sobre – Estrutura informativa da aplicação.

Fonte: Autor (2025).

5.1.2 Funcionalidades Implementadas

A versão de validação da ferramenta incorpora todas as funcionalidades essenciais definidas na metodologia, a saber:

1. Leitura automatizada dos bancos de dados XML contendo as 22 aeronaves e 34 aeródromos sob gestão da FAB;
2. Interface gráfica intuitiva desenvolvida em *.NET MAUI*, com navegação sequencial e seleção orientada por listas pré-carregadas;
3. Cálculo automatizado do peso máximo operacional (W_{max}) para cada estrutura selecionada, empregando o **Método da Secante** e a biblioteca externa *ACRClassLib.dll*;
4. Verificação automática da condição de compatibilidade $ACR(W) \leq PCR$ para cada estrutura;
5. Geração de resultados em formato tabular e visual, com composição de imagem utilizando a biblioteca *SkiaSharp*;
6. Apresentação final integrada dos resultados, incluindo identificação das estruturas mais restritivas e a rota operacional da aeronave.

A Figura 4.11 sintetiza o fluxo operacional implementado, confirmando a plena aderência entre o funcionamento real da aplicação e a metodologia proposta.

5.2 Validação da Ferramenta

A etapa de validação teve como objetivo comprovar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos pela ferramenta, assegurando que os cálculos de compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos reproduzem, de forma automatizada, os valores gerados pelo programa oficial *ICAO-ACR*, desenvolvido pela FAA.

O procedimento consistiu na comparação direta entre os valores de peso máximo operacional (W_{max}) calculados pelo algoritmo da ferramenta e os resultados obtidos pelo *ICAO-ACR*, considerado a principal referência internacional para o cálculo do ACR. Essa validação tem como finalidade confirmar a aderência da ferramenta à metodologia oficial da **ICAO**, tanto em relação à implementação numérica quanto à correta integração com a biblioteca de cálculo `ACRClassLib.dll`.

5.2.1 Cenários de Teste Selecionados

Foram definidos dois cenários de validação representativos de situações reais de operação da frota e de aeronaves empregadas pela FAB e por parceiros civis em ações de apoio logístico. Ambos os casos envolvem missões de relevância nacional, nas quais a compatibilidade entre aeronave e pavimento é fator determinante para o planejamento operacional.

- **Cenário 1 – A330 (KC-30) na Base Aérea de Boa Vista (SBBV):** Este cenário simula as missões de transporte da *Operação Acolhida*, conduzida pela FAB em apoio humanitário à fronteira norte do país.
- **Cenário 2 – Boeing 777-300ER na Base Aérea de Canoas (SBCO):** O segundo cenário reflete as operações realizadas durante a *Operação Todos pelo Sul*, em resposta às enchentes que afetaram o estado do Rio Grande do Sul em 2024. Nesse contexto, a companhia aérea *LATAM Airlines* operou aeronaves Boeing 777-300ER em missões de transporte humanitário, trazendo doações internacionais de Lisboa (Portugal) ao Brasil em cooperação com o Governo Federal e a FAB (PANROTAS, 2024).

As Figuras 5.7 e 5.8 ilustram os cenários de validação adotados para a ferramenta, representando rotas operacionais plausíveis para as aeronaves A330 (KC-30) e Boeing 777-300ER nos cenários reais apresentados.

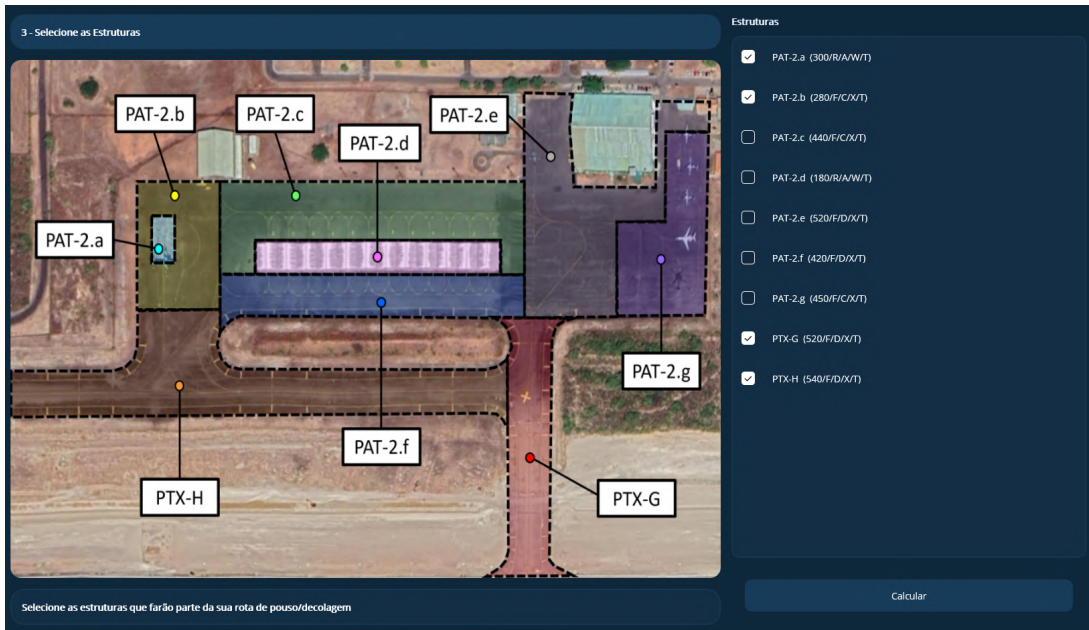


FIGURA 5.7 – Rota operacional selecionada para o A330 (KC-30) na Base Aérea de Boa Vista (SBBV) — Cenário 1.

Fonte: Autor (2025).

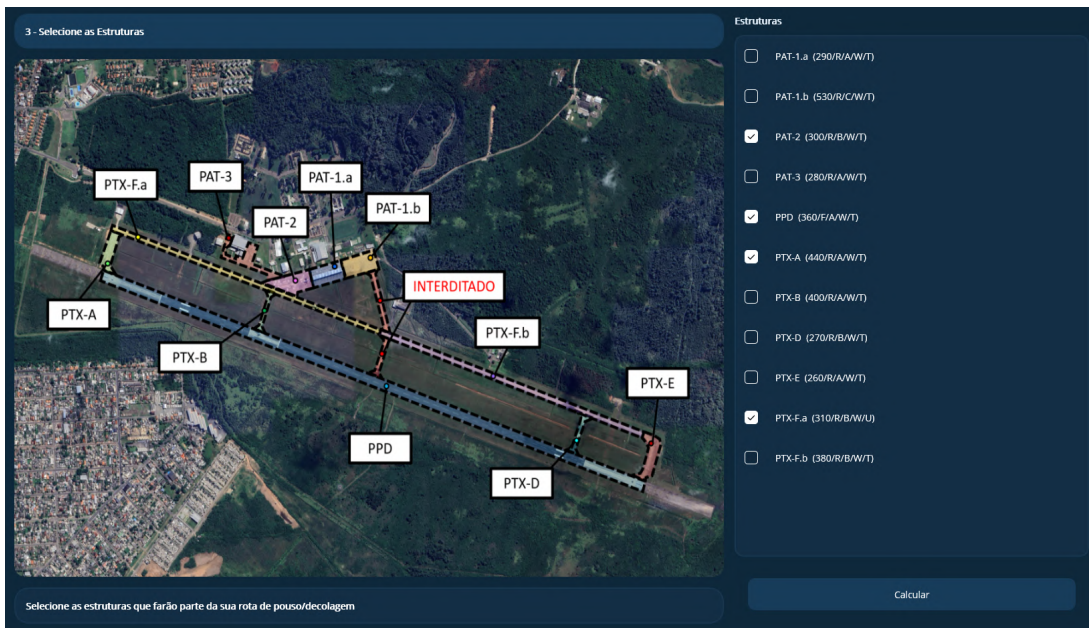


FIGURA 5.8 – Rota operacional selecionada para o Boeing 777-300ER na Base Aérea de Canoas (SBCO) — Cenário 2.

Fonte: Autor (2025).

A Tabela 5.1 resume os cenários de validação utilizados, com os principais parâmetros de cada caso.

TABELA 5.1 – Resumo dos Cenários de Validação Utilizados.

Cenário	Aeronave	Aeródromo	Estruturas Avaliadas
1	A330 (KC-30)	SBBV	PTX-G / PTX-H / PAT-2.a / PAT-2.b
2	Boeing 777-300ER	SBCO	PPD / PTX-A / PTX-F.a / PAT-2

Fonte: Autor (2025).

Ambos os cenários foram definidos de forma a representar situações reais de operação, permitindo avaliar a capacidade da ferramenta de reproduzir os resultados do *ICAO-ACR* em contextos práticos e de relevância operacional para a FAB.

5.2.2 Comparação e Análise de Precisão dos Resultados

A etapa de validação teve como objetivo verificar a precisão do algoritmo implementado na ferramenta em relação ao programa oficial *ICAO-ACR*, desenvolvido pela FAA e amplamente reconhecido como referência internacional para o cálculo do índice *ACR*.

Diferentemente de uma simples comparação direta entre os valores de W_{max} calculados por cada ferramenta, o procedimento adotado consistiu em utilizar o peso máximo operacional determinado pela ferramenta como dado de entrada no *ICAO-ACR*. A partir desse valor de peso, foi obtido o correspondente índice $ACR(W_{max})$ fornecido pelo *ICAO-ACR*. Esse valor foi então comparado com o *PCR* da estrutura analisada, permitindo avaliar o erro relativo entre ambos e, conseqüentemente, a fidelidade da solução iterativa empregada pela ferramenta desenvolvida.

As Figuras 5.9 e 5.10 ilustram os resultados obtidos pela ferramenta para os dois cenários de validação — A330 (KC-30) em Boa Vista (SBBV) e Boeing 777-300ER em Canoas (SBCO).

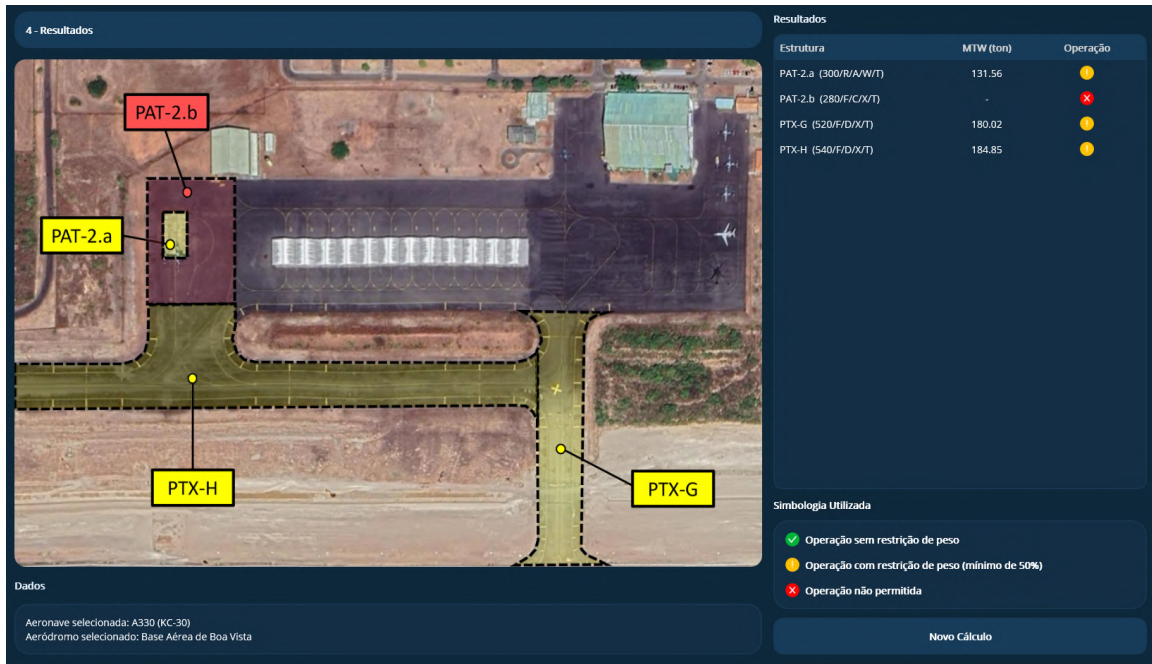


FIGURA 5.9 – Resultado do FastACR para o Cenário 1 — A330 (KC-30) na Base Aérea de Boa Vista (SBBV).

Fonte: Autor (2025).



FIGURA 5.10 – Resultado do FastACR para o Cenário 2 — Boeing 777-300ER na Base Aérea de Canoas (SBCO).

Fonte: Autor (2025).

A precisão da ferramenta foi avaliada por meio do **erro relativo percentual** entre o índice *ACR* obtido no *ICAO-ACR* e o *PCR* da estrutura, conforme a Equação 5.1.

$$E_{rel} = \frac{|ACR(W_{max, ferram.}) - PCR|}{PCR} \times 100 \tag{5.1}$$

A Tabela 5.2 apresenta o modelo de comparação adotado, no qual o peso máximo calculado pela ferramenta é utilizado como entrada no *ICAO-ACR* para obtenção do valor correspondente de *ACR*.

TABELA 5.2 – Comparação entre o *ACR* obtido no *ICAO-ACR* e o *PCR* da estrutura para o peso calculado pela Ferramenta.

Cenário	Estrutura	Ferramenta W_{max} (ton)	<i>ICAO-ACR</i> $ACR(W_{max})$	$E_{rel}(\%)$
1	PAT-2.a (300/R/A/W/T)	131.56	300.01	3.33×10^{-3}
1	PTX-G (520/F/D/X/T)	180.02	519.99	1.92×10^{-3}
1	PTX-H (540/F/D/X/T)	184.85	539.99	1.85×10^{-3}
2	PPD (360/F/A/W/T)	223.49	360.00	0
2	PTX-A (440/R/A/W/T)	247.19	439.99	2.27×10^{-3}

Fonte: Autor (2025), com base nos resultados do software *ICAO-ACR* (FAA, 2024).

Os resultados apresentados na Tabela 5.2 evidenciam a excelente concordância entre os valores de $ACR(W_{max})$ obtidos no *ICAO-ACR* e os valores de *PCR* correspondentes. Em todos os casos analisados, o erro relativo permaneceu abaixo de $3.5 \times 10^{-3}\%$, indicando precisão praticamente absoluta do algoritmo iterativo implementado no ferramenta. Essa consistência comprova a correta integração com a biblioteca *ACRClassLib.dll* e a fidelidade numérica do método da Secante, assegurando que o peso máximo calculado pela ferramenta reproduz rigorosamente a condição $ACR(W_{max}) \approx PCR$ conforme a metodologia oficial da ICAO.

5.3 Limitações da Ferramenta

Apesar dos resultados consistentes obtidos na etapa de validação funcional, a ferramenta ainda apresenta limitações inerentes à sua versão atual de desenvolvimento. Essas restrições não comprometem o desempenho nem a confiabilidade da aplicação em seu propósito principal, mas representam pontos relevantes para aprimoramento em versões futuras.

5.3.1 Dependência dos Dados de Entrada

A precisão dos resultados fornecidos pela ferramenta depende diretamente da qualidade e da atualização dos dados armazenados nos bancos XML. Inconsistências nos valores de *PCR*, erros de transcrição ou parâmetros incorretos das aeronaves podem comprometer a exatidão dos cálculos, ainda que o algoritmo esteja operando corretamente.

Os bancos de dados utilizados nesta versão foram construídos a partir das informações do **E-book de Compatibilidade Operacional ACR/PCR** elaborado pelo CEPE. Dessa forma, a

manutenção e atualização contínua desses arquivos são essenciais para garantir a confiabilidade da ferramenta. Recomenda-se que futuras versões incorporem rotinas automáticas de verificação e validação de integridade dos arquivos XML, além de mecanismos que permitam atualização controlada dos dados sem necessidade de recompilação do sistema.

5.3.2 Dependência da Biblioteca Externa

O cálculo do índice ACR é realizado por meio da biblioteca externa `ACRClassLib.dll`, desenvolvida pela ICAO e utilizada oficialmente como referência na metodologia ACR/PCR. Embora essa dependência garanta total conformidade com o padrão internacional, ela também impõe restrições quanto à portabilidade e manutenção do código. Alterações futuras na biblioteca ou na própria metodologia poderão demandar ajustes no ferramenta.

5.4 Implicações e Aplicações Práticas para a FAB

A ferramenta representa um avanço significativo para a Força Aérea Brasileira, ao automatizar a conversão dos resultados técnicos de avaliação estrutural de pavimentos (PCR) em informações operacionais de uso direto. Sua implementação elimina a necessidade de consultas manuais e reduz a possibilidade de erro humano, fornecendo respostas rápidas e padronizadas sobre a compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos. A aplicação consolida-se como um instrumento de apoio à decisão para órgãos como a DIRINFRA e o SCOAM, permitindo determinar com precisão o peso máximo permitido em cada estrutura e identificar elementos mais restritivos. Além disso, reforça a integração entre engenharia e operação, tornando o processo de planejamento de missões aéreas mais ágil, transparente e tecnicamente fundamentado. A arquitetura modular e multiplataforma do sistema garante sua escalabilidade, possibilitando futuras expansões — como a análise de sobrecarga, integração com sistemas corporativos e incorporação de novas aeronaves e localidades —, assegurando sua relevância e longevidade como ferramenta institucional de gestão e planejamento aeroportuário.

6 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional capaz de automatizar a análise de compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos aeroportuários, com base na metodologia ACR/PCR recentemente adotada pela ICAO. A aplicação foi desenvolvida em linguagem C#, utilizando o framework *.NET MAUI* e arquitetura MVVM, integrando-se à biblioteca oficial da FAA (*ACRClassLib.dll*) para o cálculo do índice ACR e implementando um algoritmo iterativo baseado no Método da Secante para determinar o peso máximo operacional compatível com cada estrutura de pavimento. A interface gráfica foi projetada de forma simples, objetiva e intuitiva, permitindo ao usuário realizar análises completas sem necessidade de inserção manual de dados, com resultados apresentados em formato numérico e visual. A validação frente ao software *ICAO-ACR* demonstrou altíssimo grau de precisão, com erros relativos da ordem de $10^{-3}\%$, confirmando a exatidão do algoritmo, a correta integração com a biblioteca de cálculo e a plena conformidade com os padrões estabelecidos pela ICAO. Assim, a ferramenta consolida-se como uma ferramenta robusta e eficiente de apoio à decisão para o planejamento e execução de missões aéreas, reduzindo significativamente o tempo de análise, eliminando falhas humanas e fortalecendo a integração entre a engenharia de pavimentos e a operação aérea.

Referências

ALVES, R. M. **Comparação entre o método de classificação de resistência de pavimentos aeroportuários ACN/PCN e ACR/PCR**. 149 p. Thesis (Tese de Mestrado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022. Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica

ANAC. **Manual para o cálculo de PCN de pavimentos aeroportuários usando o COMFAA 3.0**. June 2020. Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária - SIA. Available at: <https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/aeroportos-e-aerodromos/manuais-e-cartilhas/manual-de-calculo-de-pcn-de-pavimentos-aeroportuarios-usando-o-comfaa-3.0/view>. Accessed: 27 may. 2025.

ANAC. **Manual para o cálculo de PCR de pavimentos aeroportuários**. February 2022. Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária - SIA. Available at: <https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/aeroportos-e-aerodromos/manuais-e-cartilhas/manual-de-calculo-de-pcr-de-pavimentos-aeroportuarios/view>. Accessed: 27 may. 2025.

FAA. **Advisory Circular No: 150/5320-6G - Airport Pavement Design and Evaluation**. June 2021. This AC cancels AC 150/5320-6F, Airport Pavement Design and Evaluation, dated November 10, 2016. Available at: https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentnumber/150_5320-6. Accessed: 27 may. 2025.

FAA. **Advisory Circular No: 150/5335-5D - Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCR**. April 2022. This AC cancels AC 150/5335-5C, Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN, dated August 14, 2014. Available at: https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentnumber/150_5335-5. Accessed: 27 may. 2025.

FOLHAPRESS. **Companhias aéreas desativam aviões após pandemia de coronavírus paralisar setor**. 2020. Acesso em: 25 out. 2025. Available at: <https://fotografia.folha.uol.com.br/galerias/1664266714337146-companhias-aereas-desativam-avioes-apos-pandemia-de-coronavirus-paralisar-setor>

ICAO. **ICAO-ACR 1.4**. 2020. Acesso em: 25 out. 2025. Available at: <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/ICAO-ACR-14>

ICAO. **Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation - Aerodromes - Volume I, Ninth Edition - Aerodrome Design and Operations**. July 2022. This edition supersedes, on 3 November 2022, all previous editions of Annex 14, Volume I. Available at: <https://store.icao.int/en/annex-14-aerodromes>. Accessed: 27 may. 2025.

ICAO. **Doc 9157 - Aerodrome Design Manual - Part 3, Third Edition — Pavements**. 2022. Approved by and published under the authority of the Secretary General. Available at: <https://store.icao.int/en/aerodrome-design-manual-part-3-pavements-doc-9157-part-3>. Accessed: 27 may. 2025.

LEARN, M. **Model-View-ViewModel (MVVM)**. 2024. Acesso em: 25 out. 2025. Available at: <https://learn.microsoft.com/pt-br/dotnet/architecture/maui/mvvm>

LEARN, M. **O que é MAUI do .NET?** 2025. Acesso em: 25 out. 2025. Available at: <https://learn.microsoft.com/pt-br/dotnet/maui/what-is-maui?view=net-maui-9.0>

PANROTAS. **Em operação conjunta, LATAM traz doação internacional de Lisboa ao RS**. 2024. Acesso em: 25 out. 2025. Available at: https://www.panrotas.com.br/aviacao/empresas/2024/05/em-operacao-conjunta-latam-traz-doacao-internacional-de-lisboa-ao-rs_205648.html

REVANTH. **CLR Common Language Runtime**. 2016. Acesso em: 25 out. 2025. Available at: <https://dotnet-revanth.blogspot.com/2016/03 clr-common-language-runtime.html>

WIKIPEDIA. **Falling weight deflectometer**. 2025. Acesso em: 25 out. 2025. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Falling_weight_deflectometer

Apêndice A - Estrutura do Projeto no Visual Studio

Este apêndice apresenta a estrutura real do projeto desenvolvida no ambiente *Visual Studio 2022 Community Edition*, evidenciando a organização das pastas e arquivos conforme o padrão arquitetônico *Model–View–ViewModel* (MVVM) descrito na Seção 4.4.

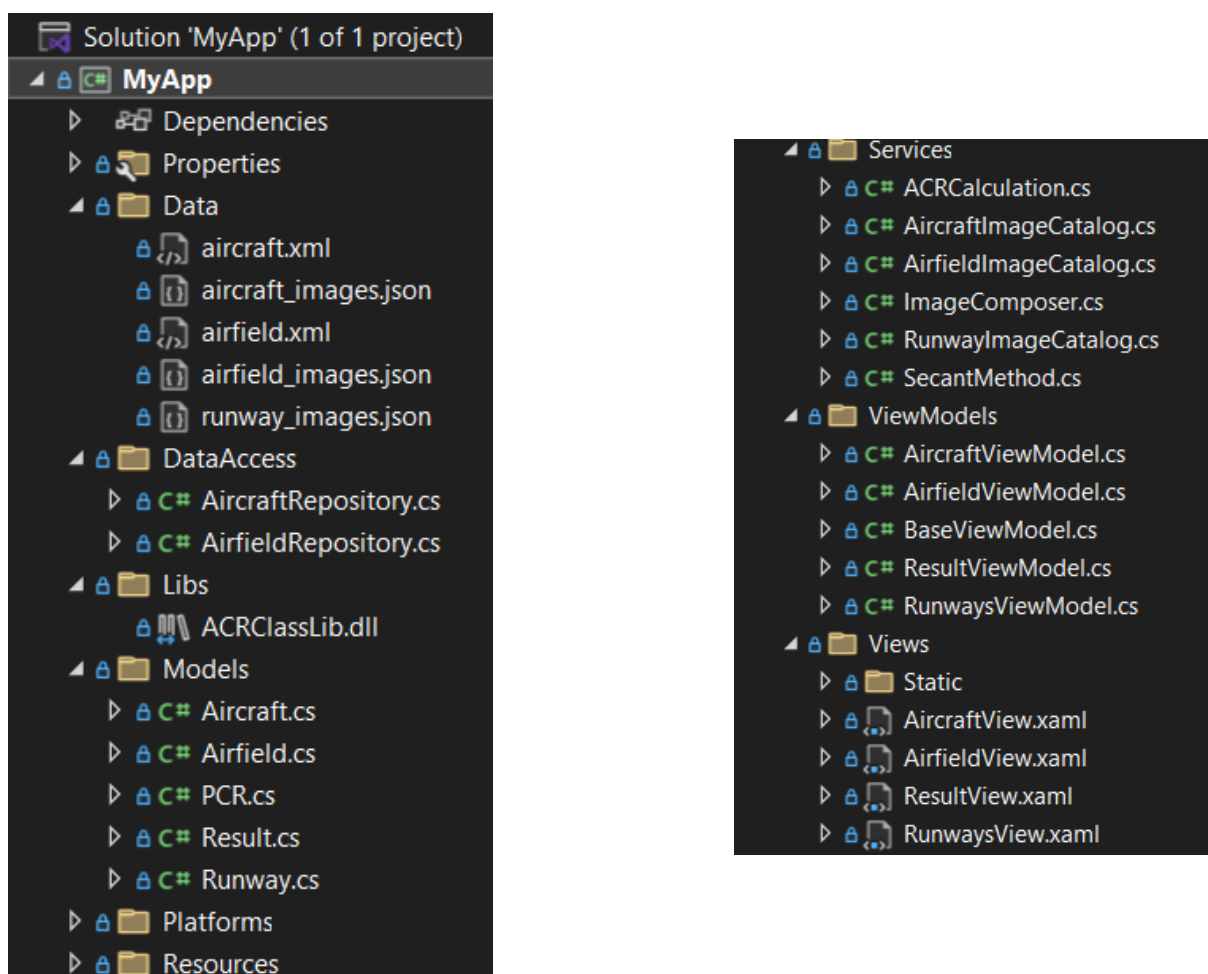


FIGURA A.1 – Estrutura completa de pastas e arquivos do projeto no *Visual Studio 2022 Community Edition*. As imagens mostram a hierarquia do código-fonte e a disposição dos diretórios conforme o padrão MVVM e os módulos auxiliares implementados.

Fonte: Autor (2025).

A Figura A.1 apresenta a organização hierárquica dos diretórios e arquivos que compõem a ferramenta desenvolvida. A seguir, descrevem-se as principais pastas e seus respectivos papéis:

- 1.Data:** contém os bancos de dados da aplicação, estruturados em formato XML e JSON. Os arquivos `aircraft.xml` e `airfield.xml` armazenam os dados das aeronaves e dos aeródromos, respectivamente, enquanto os arquivos JSON (`aircraft_images.json`, `airfield_images.json`, `runway_images.json`) mapeiam as imagens ilustrativas exibidas na interface.
- 2.DataAccess:** abriga as classes responsáveis pelo acesso e consulta aos bancos de dados, utilizando expressões LINQ para filtragem e estruturação dos dados. As classes `AircraftRepository.cs` e `AirfieldRepository.cs` implementam métodos de leitura, mantendo o banco de dados em modo somente leitura.
- 3.Libs:** diretório destinado a bibliotecas externas utilizadas pela aplicação. Contém o arquivo `ACRClassLib.dll`, biblioteca externa desenvolvida para execução dos cálculos de compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos segundo o método ACR/PCR.
- 4.Models:** reúne as classes que representam as entidades principais do domínio da aplicação, incluindo `Aircraft.cs`, `Airfield.cs`, `Runway.cs`, `PCR.cs` e `Result.cs`. Essas classes estruturam os dados extraídos dos arquivos XML e fornecem suporte às operações de cálculo e exibição dos resultados.
- 5.Services:** concentra os módulos de serviço e processamento, como `ACRCalculation.cs`, responsável pela integração com a biblioteca externa, e `ImageComposer.cs`, que implementa o algoritmo de composição gráfica dos resultados. As demais classes (`AircraftImageCatalog.cs`, `AirfieldImageCatalog.cs`, `RunwayImageCatalog.cs` e `SecantMethod.cs`) dão suporte à busca de imagens, organização visual e método numérico de otimização.
- 6.ViewModels:** contém as classes que realizam a mediação entre o modelo de dados e a interface gráfica. Cada tela possui um *ViewModel* específico (`AircraftViewModel.cs`, `AirfieldViewModel.cs`, `RunwaysViewModel.cs`, `ResultViewModel.cs`), herdando propriedades e métodos comuns definidos em `BaseViewModel.cs`. Essas classes tratam os comandos do usuário, realizam validações e comunicam-se com os serviços e modelos.
- 7.Views:** implementa as interfaces gráficas em arquivos `.xaml`, representando as principais etapas da aplicação: seleção de aeronave, aeródromo, estrutura de pavimento e exibição dos resultados (`AircraftView.xaml`, `AirfieldView.xaml`, `RunwaysView.xaml`, `ResultView.xaml`). O subdiretório **Static** contém telas estáticas de apoio, como instruções e informações institucionais.

A Figura A.2 ilustra a implementação do padrão arquitetural *Model–View–ViewModel* (MVVM) adotado no desenvolvimento da aplicação. Essa organização assegura modularidade, reutilização de código e uma comunicação eficiente entre os componentes da aplicação.

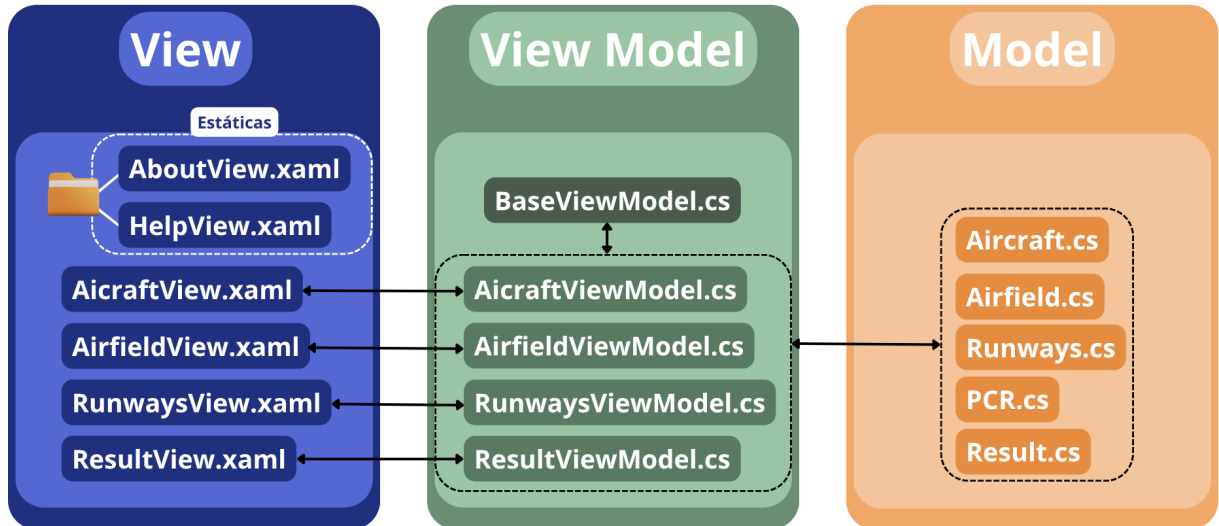


FIGURA A.2 – Diagrama representativo da arquitetura MVVM implementada. A figura ilustra a relação entre as três camadas principais — Model, ViewModel e View —, destacando a correspondência entre as classes de lógica (*.cs) e as interfaces gráficas (*.xaml), conforme o padrão de separação de responsabilidades característico dessa arquitetura.

Fonte: Autor (2025).

Apêndice B - Banco de Dados de Aeronaves

TABELA B.1 – Resumo das aeronaves cadastradas no banco de dados da aplicação.

Aeronave	Modelo ICAO	MTW ICAO (ton)	MTW Adotado (ton)
A319 (VC-1)	A319neo	75,897	75,900
A320-200	A320-200 std	73,902	73,900
A320neo	A320neo	70,398	70,400
A321-200	A321-200 opt	93,905	93,900
A321neo	A321neo	97,398	97,400
A330 (KC-30)	A330-200 WV058	238,896	238,900
B-52	B-52	221,353	221,353
B737-700	B737-700	70,307	70,307
B737-8 MAX	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82,871	82,871
B737-800 / BCF	B737-800	79,243	79,242
B767-300 ER/F	B767-300 ER/Freighter	187,334	187,334
B777-300 ER	B777-300 ER	352,441	352,441
B787-8	B787-8	228,384	228,383
B787-9	B787-9	255,373	255,372
C-105	Criado pelo CEPE	-	23,200
C-130	C-130	70,307	70,307
C-17	C-17A	265,352	265,352
C-5	C-5	348,813	348,813
EMB-190 (VC-2)	EMB-190 STD	47,950	51,960
EMB-195	EMB-195 STD	48,950	50,950
KC-390	Criado pelo CEPE	-	87,000
P-3AM Orion	P-3C	64,410	61,200

Apêndice C - Banco de Dados de Aeródromos

TABELA C.1 – Resumo dos aeródromos analisados.

Base Aérea	Código ICAO	Análise
Base Aérea de Anápolis	SBAN	Analisado
Base Aérea de Belém	SBBE	Analisado
Base Aérea de Boa Vista	SBBV	Analisado
Base Aérea de Campo Grande	SBCG	Analisado
Base Aérea de Canoas	SBCO	Analisado
Base Aérea de Manaus	SBMN	Analisado
Base Aérea de Natal	SBNT	Analisado
Base Aérea de Porto Velho	SBPV	Analisado
Base Aérea de Santa Cruz	SBSC	Analisado
Base Aérea de Santa Maria	SBSM	Analisado
Base Aérea do Galeão	SBGL	Analisado
Campo de Provas Brigadeiro Velloso	SBCC	Analisado
Centro de Lançamento de Alcântara	SNCW	Analisado
São Gabriel da Cachoeira	SBUA	Analisado
Base Aérea dos Afonsos	SBAF	Analisado
Aeroporto Santos Dumont	SBRJ	Analisado
Base Aérea de São Paulo	SBGR	Analisado
Base Aérea de Recife	SBRF	Analisado
Estande de Tiro Aeronáutico de Maxaranguape	SNXX	Analisado
Base Aérea de Florianópolis	SBFL	Analisado
Base Aérea de Brasília	SBBR	Analisado
Base Aérea Campo de Marte	SBMT	Analisado
Base Aérea de São José dos Campos	SJK	Prevista para 2026
Base Aérea de Guaratinguetá	SBGW	Prevista para 2026

Base Aérea	Código ICAO	Análise
Base Aérea de Pirassununga	SBYS	Prevista para 2026
Base Aérea de Lagoa Santa	SBLS	Prevista para 2026
Base Aérea de Barbacena	SBBQ	Prevista para 2026
Base Aérea de Salvador	SBSV	Prevista para 2026
Base Aérea de Santos	SBST	Prevista para 2026
Base Aérea de Curitiba	SBCT	Prevista para 2027
Base Aérea de Óbidos	SBTS	Prevista para 2027
Base Aérea de Caracáí	SBQI	Prevista para 2027
Base Aérea de Barcelos (Moura)	SBQI	Prevista para 2027
Base Aérea de Cacequi (Saicã)	SSCQ	Prevista para 2027

Apêndice D - Pseudocódigo do Método de Otimização

O algoritmo utiliza duas estimativas iniciais de peso (W_0 e W_1) e, a partir delas, produz sucessivas aproximações até atender ao critério de convergência. A atualização é feita por aproximação secante da inclinação local, o que, em geral, resulta em convergência rápida para funções monotônicas, como é o caso da relação entre ACR e peso.

O funcionamento do método pode ser descrito pelo seguinte pseudocódigo:

Entrada: Dados Aeronave (MTW), PCR da estrutura

Saída: W_{max}

1. Definir $W_0 = 0.5 \times MTW$
2. Definir $W_1 = MTW$
3. Calcular $f(W_0) = ACR(W_0) - PCR$
4. Calcular $f(W_1) = ACR(W_1) - PCR$
5. Definir parâmetros internos: tolerância $tol = 10^{-3}$, máximo de iterações $it_{max} = 100$
6. Para $i = 1$ até it_{max} fazer:
 - 6.1 Se $|f(W_1)| < tol$, encerrar (convergência atingida).
 - 6.2 Calcular nova estimativa:
$$W_{new} = W_1 - f(W_1) \times \frac{(W_1 - W_0)}{f(W_1) - f(W_0)}$$
 - 6.3 Atualizar:
$$W_0 \leftarrow W_1, \quad f(W_0) \leftarrow f(W_1)$$
$$W_1 \leftarrow W_{new}, \quad f(W_1) \leftarrow ACR(W_1) - PCR$$
 - 6.4 Se $|W_1 - W_0| < tol$, encerrar (convergência atingida).
7. Retornar $W_{max} = W_1$

A iteração prossegue até que a diferença entre o valor calculado de $ACR(W)$ e o PCR seja inferior à tolerância numérica especificada ou até que o número máximo de iterações seja atingido. Esse procedimento fornece o valor estimado de W_{max} , que é então registrado como o peso máximo operacional permitido para a aeronave na estrutura avaliada.

Apêndice E - Influência da Pressão dos Pneus no Cálculo do ACR

A determinação do índice ACR depende, entre outros parâmetros, da pressão de inflação dos pneus da aeronave. Apesar de aparentemente simples, este parâmetro apresenta um tratamento distinto nos principais documentos normativos e ferramentas de cálculo, o que pode gerar dúvidas na aplicação prática da metodologia ACR/PCR.

No contexto do dimensionamento de pavimentos pelo FAARFIELD, a Circular da FAA AC 150/5320-6G: *Airport Pavement Design and Evaluation* (FAA, 2021) estabelece que, no programa, o peso bruto da aeronave e a pressão dos pneus são vinculados de modo a manter constante a área de contato pneu-pavimento. Em termos práticos, isso significa que, ao se reduzir o peso bruto em relação ao valor de referência, o software reduz proporcionalmente a pressão de inflação, preservando a mesma deformação do pneu (*rated tire deflection*) ao longo da análise. Essa filosofia de modelagem é explicitamente incorporada nas recomendações do Manual da ANAC para cálculo do PCR (ANAC, 2022), o qual, ao apresentar a tela do ICAO-ACR reproduzida na Figura E.1, orienta que a pressão dos pneus seja ajustada proporcionalmente à variação do peso bruto da aeronave, de modo a seguir o procedimento adotado pelo FAARFIELD. A figura, extraída diretamente desse manual, ilustra esse procedimento, destacando os campos de peso bruto, fração do peso de rampa e pressão dos pneus.

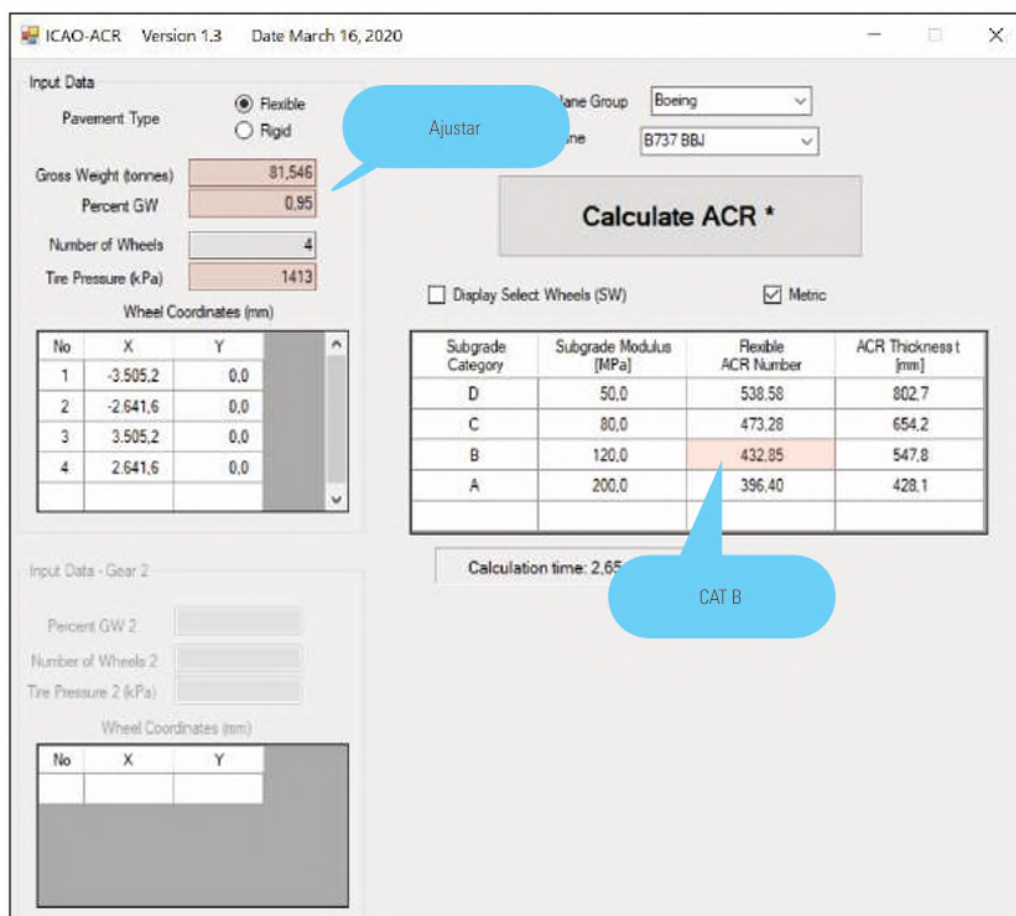


FIGURA E.1 – Tela do ICAO-ACR reproduzida do Manual da ANAC para cálculo do PCR, destacando os campos de peso bruto, percentagem do peso de rampa e pressão dos pneus, os quais devem ser ajustados proporcionalmente ao peso para seguir o procedimento do FAARFIELD.

Fonte: (ANAC, 2022).

Por outro lado, a Circular AC 150/5335-5D: *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR* descreve o comportamento operacional usual das aeronaves de forma distinta. De acordo com esse documento, os pneus são normalmente inflados à pressão correspondente à massa bruta máxima (peso de rampa) e essa pressão é mantida constante, independentemente das variações na massa de decolagem. Apenas em situações específicas — como operações com massas reduzidas, alterações no centro de gravidade ou ajustes deliberados de pressão — é que se recomendam cálculos de ACR com pressões inferiores à nominal. Assim, a filosofia adotada pelo método ACR/PCR, do ponto de vista operacional, é a de pressão constante.

Essa aparente discrepância conduz à seguinte questão: *no cálculo do ACR a ser utilizado na avaliação de compatibilidade ACR/PCR, deve-se alterar a pressão dos pneus de forma linear com o peso (como no FAARFIELD para dimensionamento) ou mantê-la constante, como ocorre na operação real das aeronaves e nos ábacos fornecidos pelos fabricantes?*

Para avaliar o impacto prático dessas duas abordagens, foi realizado um estudo numérico

com o software ICAO-ACR para a aeronave B737-300, considerando pavimentos flexíveis com subleito nas categorias A, B, C e D. Para cada categoria de subleito, foram calculados valores de ACR em função do peso bruto da aeronave adotando-se dois cenários:

1. **Pressão variável:** a pressão dos pneus é ajustada linearmente com o peso, em consonância com o procedimento adotado no FAARFIELD, mantendo constante a área de contato;
2. **Pressão fixa:** a pressão é mantida constante, igual ao valor correspondente ao peso de rampa máximo recomendado para a aeronave.

Os resultados, apresentados na Figura E.2, mostram que, para valores elevados de ACR (próximos ao ACR associado ao peso de rampa máximo), as curvas obtidas com pressão variável e com pressão fixa praticamente coincidem, uma vez que ambas convergem para a combinação de peso e pressão de referência. À medida que o ACR diminui, contudo, a diferença entre as curvas passa a ser significativa. No caso do subleito categoria A, observa-se, para um mesmo valor de ACR, discrepâncias da ordem de 10 t no peso bruto admissível.

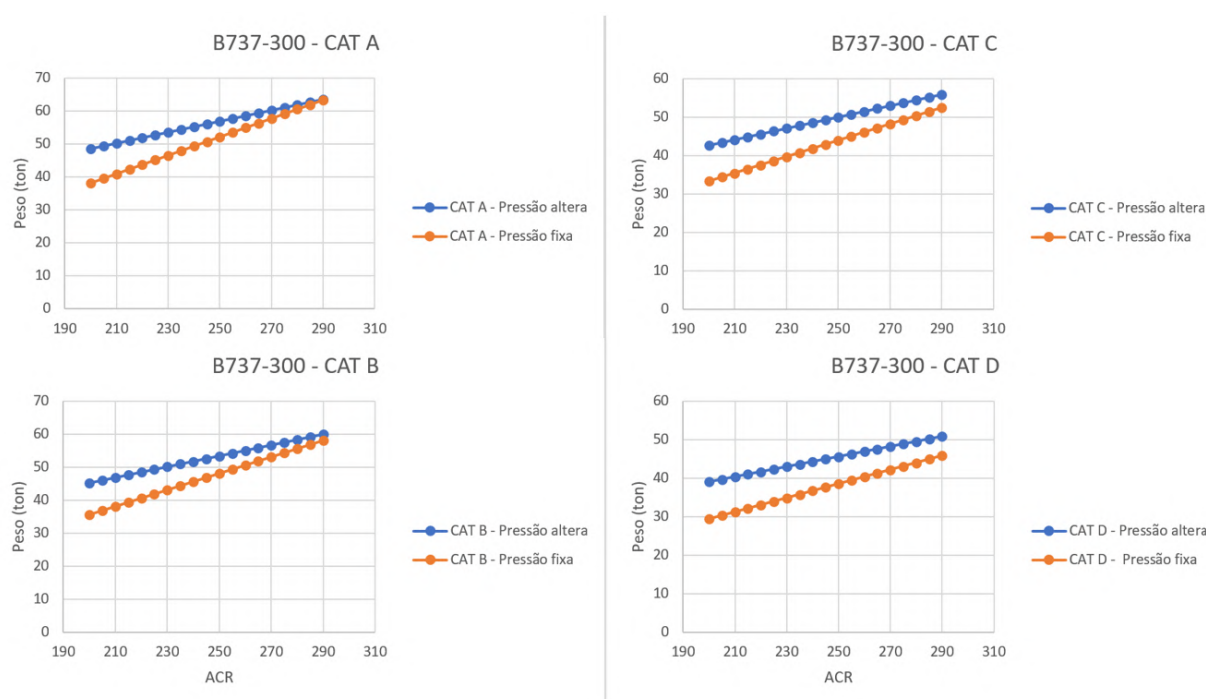


FIGURA E.2 – Relação entre ACR e peso bruto para o B737-300 em pavimento flexível, considerando pressão variável e pressão fixa para as categorias de subleito A, B, C e D.

Fonte: Autor (2025).

A versão inicial do *e-book* do CEPE, elaborada para auxiliar na transição ao método ACR/PCR, adotou a abordagem de pressão variável, em alinhamento direto com o comportamento padrão do FAARFIELD. Como consequência, os valores de ACR obtidos para uma mesma aeronave e peso operacional não coincidiam com aqueles apresentados nos ábacos dos fabricantes, que

são construídos assumindo pressão de pneus constante igual à pressão máxima de operação. A Figura E.3 apresenta um exemplo de gráfico ACR–peso bruto fornecido por fabricante, no qual se destaca explicitamente a manutenção da pressão constante ao longo de toda a faixa de pesos considerados.

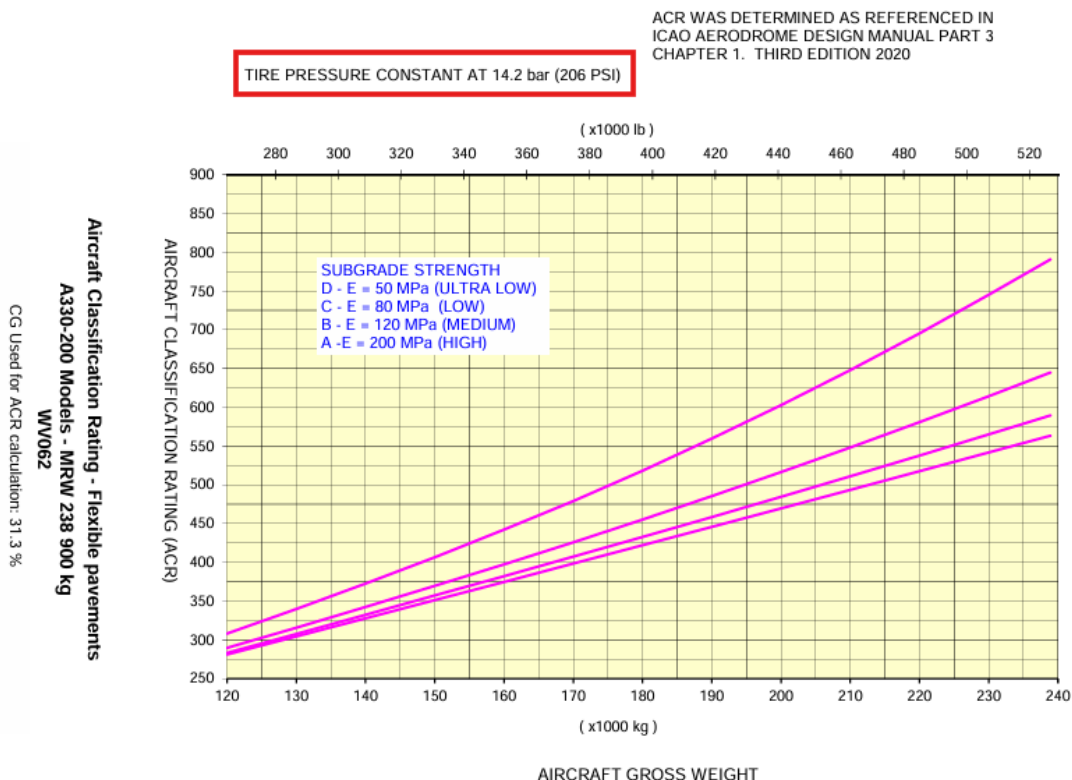


FIGURA E.3 – Exemplo de gráfico ACR–peso bruto fornecido por fabricante, com indicação de pressão de pneus constante em todo o intervalo de pesos.

Fonte: Acervo CEPE, retirado do manual da aeronave.

Essa diferença de filosofia entre o modelo de dimensionamento (pressão variável com peso) e o modelo de operação real (pressão constante) gerava dúvidas frequentes entre operadores de aeronaves, especialmente quando os resultados do *e-book* eram confrontados com os ábacos dos fabricantes. Buscando esclarecer a questão, a orientadora deste trabalho manteve contato com o Dr. David R. Brill, um dos responsáveis pelo desenvolvimento do FAARFIELD, por meio de comunicação eletrônica, cuja íntegra se encontra reproduzida no Anexo B para fins de consulta e aprofundamento.

Na resposta, Brill esclareceu que o modelo de “área de contato constante” foi adotado em FAARFIELD para fins de *dimensionamento de espessuras*, em grande parte com base em recomendações de especialistas. Nesse contexto, ao variar o peso bruto, o programa ajusta automaticamente a pressão de forma proporcional, mantendo a mesma deformação de projeto do pneu e simplificando o tratamento numérico, sobretudo em carregamentos de borda em pavimentos rígidos. Contudo, o próprio autor reconhece que, do ponto de vista do método ACR/PCR, a

hipótese mais coerente é a de **pressão constante**, uma vez que os índices de classificação são definidos para uma condição operacional típica de inflação dos pneus.

Brill ressalta ainda que, na implementação atual, o sistema é “misto”: adota-se área de contato constante para o projeto de pavimentos, mas considera-se pressão constante na etapa de cálculo do PCR pelo método técnico, quando FAARFIELD ajusta iterativamente o peso da aeronave crítica até que o fator de dano acumulado atinja o valor unitário. Do ponto de vista do usuário, entretanto, permanece a vinculação entre peso e pressão na tela de edição do tráfego; assim, para representar uma aeronave operando com uma pressão fixa específica (por exemplo, mantendo a pressão de rampa máxima em pesos menores), recomenda-se utilizar a função de aeronave definida pelo usuário (*user-defined aircraft*), atribuindo manualmente a combinação desejada de peso e pressão.

À luz dessa discussão, e considerando tanto a prática operacional quanto a necessidade de coerência com os ábacos fornecidos pelos fabricantes, este trabalho adota, para o cálculo do ACR e para as análises de compatibilidade ACR/PCR:

- a hipótese de **pressão de pneus constante**, igual à pressão recomendada para o peso de rampa máximo da aeronave, salvo quando explicitamente se pretenda estudar configurações com pressão reduzida; e
- a utilização de funções de aeronave definidas pelo usuário sempre que necessário para garantir que o valor de pressão permaneça fixo durante as variações de peso consideradas na análise.

Essa escolha alinha os resultados da ferramenta desenvolvida e dos materiais de apoio do CEPE com o comportamento real das operações de aeronaves, reduz as discrepâncias em relação aos ábacos dos fabricantes e elimina uma importante fonte de ambiguidade na interpretação dos valores de ACR e, por consequência, dos índices PCR calculados pelo método técnico.

Anexo A - Manual do Usuário

ICAO-ACR/ACRClassLib.dll

O presente anexo contém o documento original *User Information for the ICAO-ACR Computer Program*, publicado pela FAA. Esse manual apresenta as informações técnicas e operacionais da biblioteca `ACRClassLib.dll`, utilizada neste trabalho para o cálculo do ACR. O conteúdo abrange a descrição geral do programa ICAO-ACR, detalhes sobre a compilação e o ambiente de execução da DLL, estrutura de entrada e saída de dados, exemplos de código em VB .NET, bem como instruções para integração da biblioteca a outros programas compatíveis com o ambiente *.NET*.

A reprodução integral deste documento tem como objetivo fornecer uma referência técnica oficial, garantindo que todas as informações necessárias para a utilização das funções da biblioteca estejam disponíveis, o que não seria possível no corpo do texto desse trabalho.

APPENDIX 2

USER INFORMATION FOR THE ICAO-ACR COMPUTER PROGRAM

1.0 General Information. The ICAO-ACR computer program is maintained by the US Federal Aviation Administration (FAA), William J. Hughes Technical Center (WJHTC). The program implements the ACR computational procedures for rigid and flexible pavements. ICAO-ACR incorporates LEAF (Layered Elastic Analysis – FAA), a computer program that computes the structural responses of a layered pavement system according to Burmister’s theory (layered elastic model). ICAO-ACR is distributed in compiled form as a Visual Basic.NET dynamic-link library (DLL). Program files may be downloaded from the FAA WJHTC web site:

<http://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Pavement-Software-Programs>

The following files are available for download from the above web site:

- a) ICAO-ACR is an executable (stand-alone) computer program that executes the DLL *ACRClassLib.dll*, and returns standard ACR values.
- b) *ACRClassLib.dll* is a Visual Basic.NET DLL that can be linked directly to other programmes that either compute ACR directly, or that use the ACR computation to evaluate PCR. *ACRClassLib.dll* is not a stand-alone computer program. Rather, it is intended to be run from within a separate calling program such as ICAO-ACR. Information on linking the library to a calling program is given below.

ICAO-ACR is an open-source program. The source codes for ICAO-ACR, *ACRClassLib.dll* and LEAF may be obtained from:

Federal Aviation Administration
William H. Hughes Technical Center
Airport Technology R&D Branch., ANG-E26
Atlantic City International Airport, NJ 08405
USA

2.0 Dynamic-Link Library (DLL) Technical Information.

The DLL *ACRClassLib.dll* was compiled using Microsoft Visual Basic 2013 in the Microsoft Visual Studio programming environment. Its target framework is Microsoft .NET Framework 4.5.

2.1 Input Data. The *ACRClassLib.dll* class library accepts the following data inputs:

- 2.1.1 Aircraft gross weight (in tonnes or pounds).
- 2.1.2 Percent of aircraft gross weight acting on the main gear, expressed as a decimal value.
- 2.1.3 Number of wheels in the aircraft gear to be analysed.
- 2.1.4 Tire pressure (in MPa or pounds per square inch).

- 2.1.5 Horizontal coordinates (x, y) of each wheel (in mm or inches).
- 2.1.6 For each wheel, a value 0 or 1, indicating whether the wheel is within the limits of the evaluation point grid. (The value 1 indicates that it is included.)
- 2.1.7 Pavement type. This value can only be “Flexible” or “Rigid.”
- 2.1.8 System of Units (Metric or US).

2.2 Output data. The *ACRClassLib.dll* class library returns the following data outputs, given the above inputs:

- 2.2.1 ACR thickness t corresponding to four standard subgrade categories (in inches).
- 2.2.2 ACR number corresponding to four standard subgrade categories.

2.3 Procedure for linking to DLL. *ACRClassLib.dll* is a .NET DLL. For projects compiled in the Microsoft Visual Studio.NET programming environment, the procedure for linking to the DLL is as follows:

- 2.3.1 In the project properties, add *ACRClassLib.dll* to References.
- 2.3.2 Declare all variables that will be passed between the calling program and *ACRClassLib.dll*. The following input variables are declared as Single type: aircraft gross weight, percent gross weight, tire pressure, x-coordinate (array), y-coordinate (array). The following input variables are declared as Integer type: number of wheels, wheel selection variable (array) (see 2.1.6).

Certain variables have special definitions. The pavement type is specified as an enumerate variable type:

```
Public Enum PavementType
    Flexible = 1
    Rigid = 2
End Enum
```

ACR data are stored in a Visual Basic data structure *ACRdata*:

```
Public Structure ACRdata
    Dim libACR() As Single
    Dim libACRthick() As Single
    Dim libSubCat() As String
    Dim libSubCatMPa() As String
End Structure
```

The four elements in data structure *ACRdata* are:

1. *ACRdata.libACR()* stores ACR numerical values following execution.
2. *ACRdata.libACRthick()* stores ACR thickness values following execution.
3. *ACRdata.libSubCat()* stores subgrade category letter designations.
4. *ACRdata.libSubCatMPa()* stores subgrade category standard modulus values in MPa.

Each of the elements 1-4 above is an array of length 5, of declared data type as indicated above. Within each array, the first element in the array `ACRData.array(0)` is not used, while the last four elements `ACRData.array(1)` through `ACRData.array(4)` correspond to standard subgrade categories “D” through “A” respectively. For reference, the following snippets of Visual Basic code are examples of function signatures used in the DLL. Executing the function `CalculateACR` from the calling program returns ACR values in the array `ACRdata.libACR()`. The first function signature applies for the majority of gear types where all wheels in the main gear have equal tire pressure and load. The second function signature is used specifically to compute the flexible ACR for certain gear configurations (e.g., the Airbus A340 series) where the center landing gear has a different tire pressure/wheel load combination than the wing landing gear.

```
Public Overloads Function CalculateACR(ByVal PavementType As clsACR.PavementType, _
    ByVal gross_weight As Single, _
    ByVal percent_gw As Single, _
    ByVal wheels_number As Integer, _
    ByVal tire_pressure As Single, _
    ByVal CoordX() As Single, _
    ByVal CoordY() As Single, _
    ByVal SW() As Integer, _
    ByVal Metric As Boolean) As ACRdata
```

```
Public Overloads Function CalculateACR(ByVal PavementType As clsACR.PavementType, _
    ByVal gross_weight As Single, _
    ByVal percent_gw As Single, _
    ByVal wheels_number As Integer, _
    ByVal tire_pressure As Single, _
    ByVal CoordX() As Single, _
    ByVal CoordY() As Single, _
    ByVal percent_gw2 As Single, _
    ByVal wheels_number2 As Integer, _
    ByVal tire_pressure2 As Single, _
    ByVal CoordX2() As Single, _
    ByVal CoordY2() As Single, _
    ByVal Metric As Boolean) As ACRdata 'ACR for two gears
```

The following is sample Visual Basic code for declaring variables in the calling program:

```
Dim ACRData As ACRCClassLib.clsACR.ACRdata
Dim PavementType As ACRCClassLib.clsACR.PavementType
Dim Gross_Wt, Percent_GW, Tire_Pressure As Single
Dim No_Wheels As Integer
Dim X1(), Y1() As Single
Dim SW() As Integer
Dim Metric As Boolean
```

2.3.3 Assign numerical values to declared input variables. The Boolean variable `Metric` is `True` for metric units, `False` for US units. Figure D-1 explains how to use variable `SW()`, which tells the program whether to include a given

wheel in the limits of the evaluation point grid (see Appendix C, 1.1.3.7 (d)). In ICAO-ACR, a value of 1 assigned to SW means the wheel is included in the strain evaluation point grid area; any value other than 1 is treated as 0. Note that *ACRClassLib.dll* does not determine the correct number of wheels to include in the strain evaluation point grid. This determination should be made by the calling program with reference to the guidance in Appendix C, 1.1.3.7 (d). Also note that variable SW only controls which sub-group of wheels in the main gear assembly defines the strain evaluation point grid, not the number of wheels used to determine ACR. *ACRClassLib.dll* determines the ACR value for all wheels passed to it (No_wheels). (In Figure D-1, if all wheels 1-8 were assigned SW = 1, the difference in computed ACR values would be insignificant. However, the computation would take much longer.)

2.3.4 Call Function CalculateACR. The following snippet of Visual Basic code calls the function CalculateACR.

```
Dim RunACR As ACRCClassLib.clsACR
    RunACR = New ACRCClassLib.clsACR()

    ACRData = RunACR.CalculateACR(PavementType, Gross_Wt, Percent_GW, No_Wheels,
Tire_Pressure, X1, Y1, SW, Metric)
```

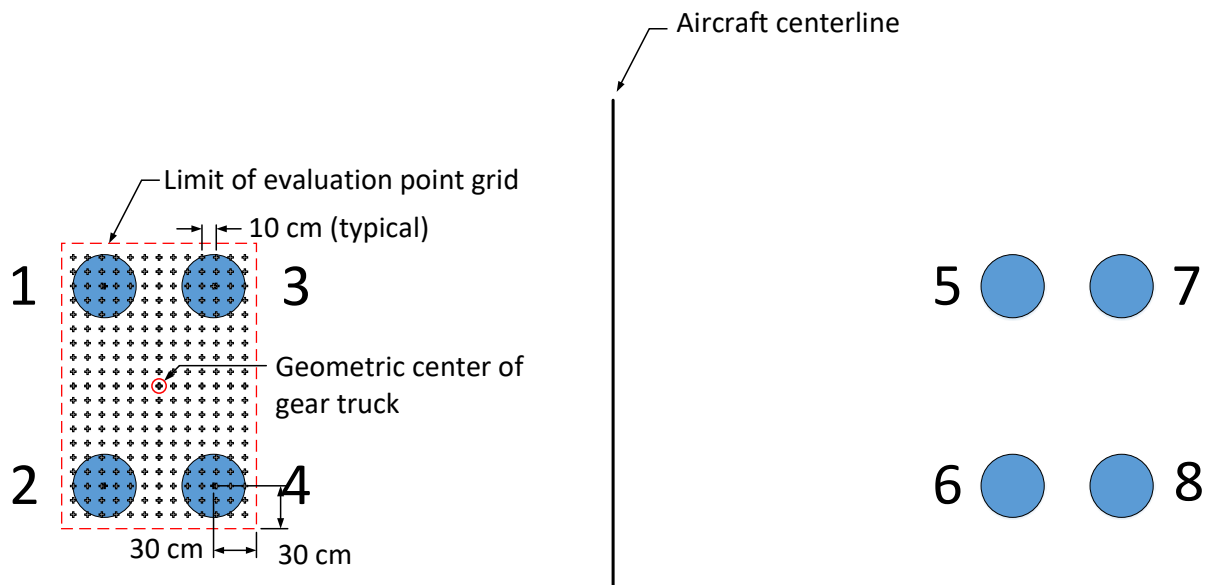


Figure D-1. Explanation of Variable SW for 2D Aircraft Gear.

$$SW = \begin{cases} 1 & (\text{wheels } 1 - 4) \\ 0 & (\text{wheels } 5 - 8) \end{cases}$$

2.4 Example of Code. The following Visual Basic source code provides an example of how to call *ACRClassLib.dll* to calculate rigid ACR values for a generic dual-tandem (2D) aircraft gear. Note that for rigid ACR only the four wheels of one truck are used.

Also note that the index values for the tire geometric coordinates $x()$ and $y()$ are 1 through 4.

```
'Example 1 in VB.NET
'Calculation of ACR values for 2D-400 on rigid pavements
'US units
'File ACRCClassLib.dll needs to be included in Project References

Dim PavementType As ACRCClassLib.clsACR.PavementType
Dim gross_weight As Single
Dim percent_gw As Single
Dim wheels_number As Integer
Dim tire_pressure As Single
Dim X1(4), Y1(4) As Single
Dim metric As Boolean

Dim ACRCdata As ACRCClassLib.clsACR.ACRCdata

gross_weight = 400000 'lbs
percent_gw = 0.475
wheels_number = 4
tire_pressure = 200 'psi

X1(1) = -15 : Y1(1) = 0.0 'inches
X1(2) = 15 : Y1(2) = 0.0
X1(3) = -15 : Y1(3) = 55.0
X1(4) = 15 : Y1(4) = 55.0

PavementType = ACRCClassLib.clsACR.PavementType.Rigid
metric = False

Dim RunACR As ACRCClassLib.clsACR
RunACR = New ACRCClassLib.clsACR()

ACRCdata = RunACR.CalculateACR(PavementType, gross_weight,
    percent_gw, wheels_number, tire_pressure, X1, Y1, metric)

RunACR = Nothing

'Output ACR results
'ACRCdata.libACR(1) = 894.672058
'ACRCdata.libACR(2) = 817.8752
'ACRCdata.libACR(3) = 744.0264
'ACRCdata.libACR(4) = 641.6398
```

3.0 Program ICAO-ACR.

Program ICAO-ACR functions as a stand-alone program that computes flexible and rigid ACR values for arbitrary aircraft gear configurations, using the *ACRCClassLib.dll* DLL. For convenience, the program includes a library of aircraft types commonly in use. For library aircraft, program ICAO-ACR automatically selects the correct number of wheels for ACR evaluation, i.e., all wheels in the main landing assembly for flexible ACR and all wheels in the most demanding single truck for rigid ACR.

Anexo B - Comunicação com a FAA sobre o tratamento da pressão dos pneus no FAARFIELD e no método ACR/PCR

Este anexo apresenta, na íntegra, a troca de e-mails estabelecida entre a orientadora deste trabalho e o Dr. David R. Brill (FAA), na qual são esclarecidos aspectos específicos sobre o tratamento da pressão dos pneus no FAARFIELD e sua relação com o método ACR/PCR.



Guilherme Ernando Simoes de Oliveira <guilherme.simoes@ga.ita.br>

Fwd: RE: Some questions about FAARFIELD

1 mensagem

claudia.azevedo@ita.br <claudia.azevedo@ita.br>

13 de maio de 2025 às 08:29

Para: Guilherme Ernando Simoes de Oliveira <guilherme.simoes@ga.ita.br>

Good afternoon Claudia,

These are really good questions. Please see my answers in red below.

Regards,

David R. Brill, P.E., Ph.D.

Subject: Some questions about FAARFIELD

CAUTION: This email originated from outside of the Federal Aviation Administration (FAA). Do not click on links or open attachments unless you recognize the sender and know the content is safe.

Dear David

I have a student doing an ACR-PCR project and studying the FAA material, and he has some doubts. Could you clarify them? The questions are: According to the FAA circular "AC 150/5335-5D: Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCR", item "3.5.3 - ACR Calculation" :

"Aircraft normally have their tires inflated to the pressure corresponding to the maximum gross mass without engine thrust, and maintain this pressure regardless of the variation in take-off masses. There are times, however, when operations at reduced masses, modified center of gravity, and/or reduced tire pressures are productive, and reduced ACRs need to be calculated. [...]" (pg. 3-10)

This is consistent with what happens during real aircraft operation, where tire inflation pressures are kept constant despite the Gross Taxi Weight. However, the FAA circular "AC 150/5320-6G: Airport Pavement Design and Evaluation", item "3.12.6.3 - Tire Pressure" shows that:

"Tire pressure varies depending on gear configuration, gross weight, and tire size. Tire pressures and gross weight are linked in FAARFIELD. FAARFIELD maintains a constant contact area, therefore an increase in gross weight causes a proportional increase in tire pressure. [...]" (pág. 3-12)

This leads to an inconsistency regarding the behavior of Tire Pressure about changes in an aircraft's Gross Taxi Weight. This is because, when using FAARFIELD 2.0 to calculate the PCR, it can be seen that the ACR values are influenced by this proportional relationship between Gross

Taxi Weight and Tire Pressure, since in the PCR calculation methodology there are changes to the Gross Taxi Weight (and consequently the Tire Pressure) of the critical aircraft so that the CDF = 1 is achieved.

In this context, the following questions come to mind:

1) What is the motivation for keeping the tire contact area constant?

This was largely at the recommendation of Ed Gervais from Boeing Co. He said that when adjusting the aircraft weight up or down from the maximum gross weight, the correct maintenance procedure is to maintain the rated tire deflection. In practice, this means holding the tire contact area constant, and the only way to do this is to allow the program to adjust the tire pressure. In FAARFIELD there is also a practical modeling consideration for rigid pavements - that is, for edge loading the gear is positioned such that the tire contact edge always coincides with the slab edge, and if you adjust the contact area you need to recompute the FE solution.

At the time, Ed Gervais was the expert for Boeing, so we took his position as authoritative and held the tire contact area (i.e., rated tire deflection) constant for design. However, I am aware that Cyril from Airbus disagrees with this and feels that the tire pressure should always be maintained constant. Furthermore, constant tire pressure is a natural fit for ACR/PCR, which assumes fixed tire pressure when computing DSWL. For now, we have a mixed system, where we assume constant area for thickness design, but constant pressure for PCR computation. It is unnecessarily confusing, but it would take a lot of work to change.

And what impact does this have on the PCR calculation? As indicated above, we follow the constant tire pressure rule when adjusting aircraft weight during ACR/PCR computations. However, when you first enter the aircraft in the traffic list, any change in gross weight results in a proportionate change in tire pressure, as you have noticed.

2) What should be done when an aircraft does not operate at the gross taxi weight standardized in FAARFIELD 2.0?

- Just change the weight and allow this proportional change in tire pressure? Or

- Export the aircraft to an external library, adjusting only the gross taxi weight and keeping the tire pressure unchanged and corresponding to the maximum gross taxi weight?

If you want a specific tire pressure corresponding to a gross weight, or you want to keep the same tire pressure at a reduced gross weight, it is better to use the user-defined aircraft function.

Glossário

Document: A file created using LaTeX for presentation purposes.

Glossary: A list of terms and their definitions.

LaTeX: A document preparation system used for high-quality typesetting.

Package: An add-on feature in LaTeX to enhance its functionality.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">04 de novembro de 2025</p>	3. DOCUMENTO Nº <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-013/2025</p>	4. Nº DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">108</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Desenvolvimento de ferramenta computacional para avaliação da compatibilidade operacional entre aeronaves e pistas de aeródromos baseada nos índices PCR e ACR			
6. AUTOR(ES): Guilherme Ernando Simoes de Oliveira			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: ACR/PCR; Avaliação Estrutural; Compatibilidade Operacional; Pavimentos Aeroportuários			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Aeroportos; Pavimentos; Pistas (de pouso e decolagem); Análise estrutural; Engenharia civil; Engenharia estrutural			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Prof ^a . Dr ^a . Cláudia Azevedo Pereira; coorientador: Cap. Eng. Edmir José dos Santos Júnior. Publicado em 2025.			
11. RESUMO: <p>O presente trabalho desenvolve uma ferramenta computacional para a avaliação automatizada da compatibilidade operacional entre aeronaves e pavimentos aeroportuários, com base na metodologia ACR/PCR (<i>Aircraft Classification Rating / Pavement Classification Rating</i>), recentemente adotada pela <i>International Civil Aviation Organization</i> (ICAO) em substituição ao sistema ACN/PCN. A ferramenta, foi implementada em C#, utilizando o framework .NET MAUI e a arquitetura MVVM, integrando a biblioteca oficial ACRCClassLib.dll para o cálculo do índice ACR e um algoritmo iterativo baseado no Método da Secante para determinar o peso máximo operacional compatível com cada estrutura de pavimento. A aplicação opera a partir de bancos de dados XML que reúnem as principais estruturas de pavimento sob responsabilidade da Força Aérea Brasileira (FAB) e as aeronaves militares e civis que operam nesses aeródromos, permitindo análises automáticas e padronizadas. A validação frente ao software ICAO-ACR demonstrou elevada precisão, com erro inferior a 0,1%, confirmando a confiabilidade do sistema. A ferramenta representa um avanço significativo para a gestão da infraestrutura aeroportuária da FAB, alinhando-se às diretrizes da ICAO e contribuindo para a eficiência e segurança das operações aéreas.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO</p>			