

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**Projeto estrutural de pavimentos de aeroportos regionais:
uma aplicação do procedimento da *Federal Aviation
Administration (FAA)* para o cenário brasileiro**

Pedro Henrique Del Agnolo Caldana

Orientador: Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho

São Carlos, 2023

RESUMO

O dimensionamento de pavimentos aeroportuários, sejam do tipo rígido ou flexível, envolvem cálculos baseados em diversas variáveis, como o peso das aeronaves, a intensidade e frequência do tráfego, a vida útil de projeto, entre outros. Atualmente, no Brasil, é comum o uso de metodologias estrangeiras para a geração de infraestrutura de pavimentação aeroportuária. Este trabalho consiste em uma adaptação das diretrizes da *Federal Aviation Administration* (FAA) ao cenário brasileiro, por meio da determinação de variáveis de projeto condizentes com os aeroportos nacionais. Com uso do *software* FAARFIELD (*Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*) versão 2.0, desenvolvido pela agência americana, foram dimensionados pavimentos dos tipos flexível e rígido, com características e especificações variadas. Posteriormente, esses pavimentos foram analisados e comparados para avaliar a influência dessas variáveis no desempenho das estruturas. Através das simulações, foi possível compreender melhor a influência das condições de projeto e das características de materiais do pavimento no cálculo das espessuras das camadas, sobretudo o módulo de elasticidade do subleito. Ao final do dimensionamento, as estruturas calculadas tiveram suas resistências avaliadas através da aplicação do método ACR/PCR (*Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating*), realizada pelo FAARFIELD 2.0. Em seguida, os resultados do dimensionamento foram comparados a partir de um orçamento de custos de execução, gerado a partir de composições precificadas da nova base de dados fornecida pela Infraero, o SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) Aeroportuário. Ao final do trabalho, concluiu-se que o método empregado apresenta limitações relacionadas às práticas brasileiras, porém, que podem ser contornadas através de adaptações permitidas pelo próprio *software* de dimensionamento. Por fim, foi possível obter resultados que atenderam às condições do projeto de modo satisfatório, cujo processo pode ser empregado para futuras obras aeroportuárias no Brasil.

Palavras-chave: Pavimento aeroportuário; Aeroportos regionais; FAARFIELD; Pavimento rígido de concreto; Pavimento flexível; Projeto.

ABSTRACT

The design of airport pavements, whether rigid or flexible, involves calculations based on various variables such as aircraft weight, traffic intensity and frequency, design lifespan, and others. Currently, in Brazil, it is common to use foreign methodologies for the development of airport pavement infrastructure. This work consists of an adaptation of the Federal Aviation Administration (FAA) guidelines to the Brazilian context by determining design variables suitable for national airports. Using the FAARFIELD (Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design) version 2.0, developed by the American agency, pavements of both flexible and rigid types were dimensioned with various characteristics and specifications. Subsequently, these pavements were analyzed and compared to assess the influence of these variables on structural performance. Through simulations, it was possible to better understand the influence of design conditions and pavement material characteristics on layer thickness calculations, especially the subgrade's modulus of elasticity. At the end of the design process, the calculated structures had their strengths assessed using the ACR/PCR (Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating) method, performed by FAARFIELD 2.0. Subsequently, the design results were compared based on a cost estimate, generated from priced compositions in the new database provided by Infraero, the SINAPI (National System of Costs and Civil Construction Indexes). In conclusion, it was found that the method employed has limitations related to Brazilian practices, but these can be overcome through adaptations allowed by the software itself. Finally, it was possible to obtain results that met the project's conditions satisfactorily, a process that can be employed for future airport construction projects in Brazil.

Keywords: Airport pavement; Regional airports; FAARFIELD; Concrete rigid pavement; Flexible pavement; Design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal esquemática de um pavimento flexível.	9
Figura 2 – Seção transversal esquemática de um pavimento rígido.	10
Figura 3 – Distribuição de tensões em pavimentos rígidos e flexíveis.....	11
Figura 4 – Pistas do Aeroporto Internacional de Guarulhos.	13
Figura 5 – Pistas do Aeroporto Internacional Antonio Carlos Jobim, no Rio de Janeiro.	14
Figura 6 – Esforços avaliados no dimensionamento dos pavimentos.	18
Figura 7 – Visão geral do programa FAARFIELD.	19
Figura 8 – Modos funcionais do FAARFIELD 2.0.....	20
Figura 9 – Passos básicos de projeto do FAARFIELD 2.0.	20
Figura 10 – Distribuição de cargas através dos trens de pouso.	21
Figura 11 – Largura efetiva de pneu para pavimentos flexíveis sem sobreposição.	24
Figura 12 – Largura efetiva de pneu para pavimentos flexíveis com sobreposição.	25
Figura 13 – Largura efetiva de pneu para pavimentos rígidos.....	25
Figura 14 – Procedimento de cálculo do PCR com uso do FAARFIELD 2.0.	32
Figura 15 – Espessura da camada de agregado britado em função do módulo de elasticidade do subleito.....	49
Figura 16 – Espessura da placa de concreto em função do módulo de elasticidade do subleito.	50
Figura 17 – Espessura da camada de revestimento em função da resistência do concreto.....	51
Figura 18 – Informações do tráfego adotado para o cálculo do PCR.	54
Figura 19 – Custo por metro quadrado de pavimento em função do módulo de elasticidade do subleito.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características gerais dos tipos de pavimentos.....	12
Tabela 2 – Valores de módulo de elasticidade e coeficientes de Poisson permitidos no FAARFIELD para cada material.....	26
Tabela 3 – Seleção dos parâmetros para codificação do PCR.	33
Tabela 4 – Número de movimentos anuais do Aeroporto de Maringá (PR) – Silvio Name Junior, por modelo de aeronave em 2022.	36
Tabela 5 – Número de movimentos anuais do Aeródromo de São José do Rio Preto (SP) – Professor Eriberto Manoel Reino, por modelo de aeronave em 2022.	37
Tabela 6 – Número de movimentos anuais do Aeroporto de Porto Seguro (BA), por modelo de aeronave em 2022.	38
Tabela 7 – Mix de aeronaves de projeto.	39
Tabela 8 – Características das aeronaves do mix de projeto.	40
Tabela 9 – Materiais utilizados nas camadas do pavimento flexível.....	41
Tabela 10 – Materiais utilizados nas camadas do pavimento rígido.....	41
Tabela 11 – Serviços e custos para execução do pavimento flexível.....	43
Tabela 12 – Serviços e custos para execução do pavimento rígido.....	44
Tabela 13 – Características das barras de transferência (barras lisas de aço CA-25). 45	
Tabela 14 – Características das barras de ligação (barras lisas de aço CA-25).....	46
Tabela 15 – Espessuras obtidas para o pavimento flexível em função do CBR e módulo de elasticidade do subleito.	47
Tabela 16 – Espessuras obtidas para o pavimento rígido em função do k e módulo de elasticidade do subleito.....	48
Tabela 17 – Espessuras obtidas para o pavimento rígido em função da resistência do concreto.....	51
Tabela 18 – PCR do pavimento flexível em função do CBR do subleito.	53
Tabela 19 – PCR do pavimento rígido em função da resistência do concreto.....	53
Tabela 20 – Custo de execução dos pavimentos por metro quadrado em função do módulo de elasticidade do subleito.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Advisory Circular</i>
ACN	<i>Aircraft Classification Number</i>
ACR	<i>Aircraft Classification Rating</i>
AIP	<i>Aeronautical Information Publication</i>
ANAC	Agência Nacional da Aviação Civil
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CDF	<i>Cummulative Damage Factor</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DSWL	<i>Derived Single Wheel Load</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAARFIELD	<i>Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	<i>Internacional Civil Aviation Organization</i>
IS	Instrução Suplementar
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LEDFAA	<i>Linear Elastic Design Federal Aviation Administration</i>
P/C	<i>Pass-to-Coverage</i>
PCN	<i>Pavement Classification Number</i>
PCR	<i>Pavement Classification Rating</i>
RBAC	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil
SAC	Secretaria Nacional de Aviação Civil
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. JUSTIFICATIVA	3
3. OBJETIVOS	6
3.1 OBJETIVO GERAL	6
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AERÓDROMOS	7
4.2 PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS	8
4.1.1 Tipos de pavimentos aeroportuários	9
4.1.2 Escolha do tipo de pavimento	11
4.2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS.....	14
4.2.1 Os métodos de dimensionamento da FAA.....	15
4.2.2 Projeto de pavimentos utilizando o FAARFIELD	18
4.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DOS PAVIMENTOS.....	28
4.3.1 O método ACR/PCR	29
4.3.2 Cálculo do ACR	30
4.3.3 Cálculo do PCR	30
5. METODOLOGIA.....	34
5.1 AERONAVES DE PROJETO	35
5.2 MATERIAIS DOS PAVIMENTOS	40
5.3 CUSTO DE EXECUÇÃO DOS PAVIMENTOS	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
6.1 ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS	47
6.2 ANÁLISE DO PCR	52
6.3 ANÁLISE DE CUSTO.....	55
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

De acordo com as estatísticas globais anuais da *International Civil Aviation Organization* (ICAO), o número total de passageiros transportados em serviços regulares subiu para 4,3 bilhões em 2018, o que representa um aumento de 6,4% em relação ao ano anterior. Em 2019, esse número continuou crescendo para 4,5 bilhões, representando um novo aumento de 3,6% em relação a 2018. Para atender à crescente demanda por serviços aeroportuários, são cada vez mais necessárias a manutenção e ampliação dos aeroportos existentes, bem como a construção de novos aeroportos.

As pistas de pouso e decolagem de aeronaves são tópicos essenciais para a construção de um aeroporto. Segundo a *Federal Aviation Administration* (FAA), as pavimentações de aeroportos são projetadas e construídas para produzir uma superfície adequada e fornecer suporte para as cargas impostas pelos aviões (FAA, 2021). A FAA é uma agência governamental vinculada ao Departamento de Transporte dos Estados Unidos da América. Fundada em 1958 como autoridade federal, é responsável por regulamentar e supervisionar todos os aspectos relacionados à aviação civil do país. Através de suas publicações, entre outras funções, ela orienta projetistas e administradores sobre o dimensionamento de pavimentos aeroportuários.

No Brasil, devido à escassez de normas nacionais de projeto e dimensionamento de pavimentos aeroportuários, é recorrente fazer uso das normas e métodos internacionais. O Manual de Projetos Aeroportuários (2021), resultado da cooperação entre a Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC) do Ministério da Infraestrutura e o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), utiliza em suas referências de projeto de pavimentação, além dos regulamentos e orientações da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), os métodos de dimensionamento da FAA contidos nos documentos AC 150/5320-6F, AC 150/5335-5C e AC 150/5370-10F.

Para o presente trabalho, será realizado um estudo prático de dimensionamento de pavimentos com uso do programa computacional da FAA, o denominado FAARFIELD, em sua versão 2.0. O *software*, cuja sigla significa *Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*, determina as dimensões das estruturas do pavimento baseado em camadas elásticas para pavimentos flexíveis e método dos elementos finitos para pavimentos rígidos, a partir da análise de dano acumulado.

O projeto de pavimentos de aeroportos é um problema de engenharia complexo que envolve a interação de múltiplas variáveis (FAA, 2021). Ademais, o FAARFIELD é capaz de gerar resultados distintos a partir de pequenas modificações realizadas nessas

variáveis. A considerável oscilação nos resultados obtidos a partir de pequenas alterações nos dados de entrada do *software* pode ser vista como um problema, caso não se compreenda como essa variação se comporta. Deste modo, é requerida sensibilidade na escolha dos dados de entrada por parte do projetista, que deverá analisar criticamente os resultados gerados pelo programa, buscando o melhor aproveitamento do mesmo.

Neste trabalho, a determinação das variáveis de projeto fornecidas ao FAARFIELD, que serão apresentadas nos capítulos subsequentes, terá foco no cenário brasileiro. Acredita-se que a geração de infraestrutura nacional de transporte aéreo seja necessária para o acompanhamento do nível da aviação mundial e extremamente pertinente ao desenvolvimento econômico do país nas próximas décadas.

Portanto, o estudo realizado busca estimular o concebimento de novas estruturas de pavimentos aeroportuários no Brasil, através de alternativas idealizadas para o contexto nacional, com uso de métodos internacionalmente reconhecidos e adotados. O foco do trabalho será em estruturas de aeroportos de pequeno a médio porte, geralmente localizados distantes das grandes cidades, pois estes possuem maior carência em tecnologia, além de representarem avanços revolucionários ao desenvolvimento regional nas diversas áreas isoladas do país.

2. JUSTIFICATIVA

A construção de aeroportos comerciais no Brasil tem uma história longa e diversificada. Durante a década de 1930, a aviação comercial começou a se desenvolver no Brasil, com a criação de empresas aéreas e a construção de aeroportos nas capitais São Paulo e Rio de Janeiro. Em 1973, o Governo brasileiro criou a Infraero (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária), com o objetivo de gerenciar e desenvolver a infraestrutura aeroportuária do país, atuando na gestão e manutenção dos aeroportos.

Atualmente, no setor de transporte aéreo brasileiro, a regulação está dividida em três categorias: segurança, regulação econômica e regulação dos investimentos e concessões (DUTRA *et al.*, 2018). O investimento na infraestrutura era de responsabilidade da Infraero até recentemente. Em 2011, o Governo Federal iniciou um processo de concessão de aeroportos, com o objetivo de melhorar a eficiência e a qualidade dos serviços aeroportuários. A Infraero continua a ser responsável pela administração e manutenção de muitos dos principais aeroportos do país, mas outras empresas agora também realizam essas atividades, como a Aeroportos Brasil Viracopos S.A, por exemplo.

Até o ano de 2022, segundo dados da ANAC, o Brasil possuía 3291 aeródromos cadastrados, sendo eles 2794 privados e 497 públicos. Entretanto, em 2019, antes da expressiva redução das operações ocorrida em 2020 devido à pandemia de COVID 19, apenas os 20 principais aeroportos do país representaram 82,2% da quantidade de decolagens do mercado doméstico (ANAC, 2019). As rodadas recentes de concessões contemplaram 10 desses aeroportos: São Gonçalo do Amarante em 2011, seguido por Brasília, Guarulhos e Viracopos em 2012, Galeão e Confins em 2013 e, finalmente, Fortaleza, Florianópolis, Porto Alegre e Salvador em 2017.

Desta forma, é possível considerar que a maior parte dos investimentos em infraestrutura aeroportuária da última década no Brasil, proveniente das privatizações realizadas pela ANAC, foi alocada em aeroportos que recebem a maior quantidade de passageiros no país. Essa situação é alarmante pois, segundo Fernandes e Pacheco (2016), o processo de concessão adotado pelo Governo Federal resulta na elaboração de projetos aeroportuários que levam ao esgotamento da capacidade dos aeroportos concedidos. Os autores pontuaram que, como estes concentram a grande maioria do tráfego de passageiros e carga, as perspectivas para os próximos 20 anos são basicamente a manutenção e exploração da malha existente.

Apesar da escolha pela modernização dos aeroportos centrais produzir resultados positivos a curto e médio prazo em relação ao aumento do número de passageiros e operações de aeronaves, a longo prazo os efeitos limitantes ao crescimento se tornarão evidentes. A urbanização intensa ao redor desses aeroportos resultará em restrições operacionais ao crescimento do tráfego, conforme já ocorre em algumas capitais brasileiras.

A grande extensão territorial do Brasil exige uma ampliação da rede aérea, e uma das principais formas de expandir é por meio de voos para aeroportos de pequeno e médio porte, fora das grandes cidades, através da aviação regional. Para Fernandes e Pacheco (2016) as concessões deveriam ser direcionadas para construção de novos aeroportos nos grandes centros econômicos do país, não sitiados por densas malhas urbanas e em condições de abrigar os tráfegos internacional, doméstico e regional. No entanto, o que se observa é a concentração do tráfego, sem oportunidade para a expansão da aviação nas regiões interioranas do país.

Este trabalho justifica-se pela atual carência do Brasil em geração de infraestrutura aeroportuária, principalmente fora das grandes capitais, tendo como pressuposto suas características territoriais e demográficas e o potencial futuro de mercado. Um planejamento integrado para cada região, que priorize o transporte aéreo como modal, pode fomentar o desenvolvimento de ampla gama de atividades nas áreas circundantes dos complexos aeroportuários, visando atrair investimentos privados e melhorar a eficiência dos processos produtivos locais. Além disso, a ampliação do número de aeroportos também contribui para a segurança do espaço aéreo, pois aumenta as alternativas de pouso e decolagem de aeronaves em condições adversas ou até mesmo em situações emergenciais.

Foi realizado o emprego do *software* FAARFIELD para o dimensionamento de pavimentos pois o mesmo aplica os métodos de cálculo elaborados pela FAA. Atualmente, devido a inexistência de um método brasileiro para dimensionamento de pavimentos aeroportuários, os procedimentos do órgão americano têm sido os mais utilizados no Brasil nas últimas décadas (RAMOS *et al.*, 2017). Além disso, a possibilidade de uso de parâmetros de cálculo (tipos de aeronaves, volume de tráfego, vida-útil de projeto, capacidade de suporte do subleito e das outras camadas) condizentes à realidade nacional se mostrou uma vantagem pertinente à escolha da ferramenta.

Por fim, a dificuldade pela obtenção de dados nacionais sobre o tema, estatísticos e de projeto, se tornou uma motivação adicional ao presente trabalho. A

matéria de projeto de pavimentos aeroportuários ainda é pouco difundida no Brasil, se comparada nacionalmente a de projetos rodoviários, por exemplo, ou internacionalmente em países como EUA e França. Ademais, é recorrente a necessidade do projetista de informações que são custosamente obtidas, quase sempre através de órgãos governamentais, e este fato torna ainda mais custosa a produção de novas obras.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal o dimensionamento de uma estrutura de pavimento flexível e uma estrutura de pavimento rígido para a pista de pouso e decolagem de um aeroporto comercial, que atenda às demandas regionais brasileiras de tráfego aéreo. A descrição de todos os passos desse dimensionamento, realizado conforme o que preconiza a circular AC 150/5320-6G (FAA, 2021), através da ferramenta FAARFIELD, poderá servir de escopo para novas obras de pavimentos aeroportuários pelo país.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em função do objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos devem ser atendidos:

- Realizar uma revisão abrangente da literatura sobre o dimensionamento de pavimentos aeroportuários, com foco nas normas e diretrizes estabelecidas pela circular AC 150/5320-6G (FAA, 2021) e sua aplicabilidade no contexto brasileiro;
- Coletar dados e informações relevantes sobre o tráfego aéreo regional brasileiro, a fim de realizar uma análise de carga adequada para o dimensionamento dos pavimentos;
- Elaborar um documento que descreva os passos do dimensionamento dos pavimentos aeroportuários, com base nas diretrizes atuais adotadas pela *Federal Aviation Administration*, visando gerar um modelo de procedimento para futuras obras de infraestrutura aeroportuária no Brasil;
- Fazer uma análise dos custos de implementação dos dois tipos de pavimentos estudados, com uso de dados nacionais de preços e serviços, por metro quadrado de pavimento construído.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AERÓDROMOS

De acordo com o Código Brasileiro de Aeronáutica, Lei nº 7565 de 19 de dezembro de 1986, um aeródromo é definido como qualquer área destinada a atividades de pouso, decolagem e movimentação de aeronaves. Para ser considerado um aeroporto, o aeródromo deve ser de uso público e contar com infraestrutura adequada para o apoio de aeronaves, bem como para o embarque e desembarque de passageiros e carga (ANAC, 2021a).

Os aeródromos podem ser classificados como civis, quando são utilizados por aeronaves civis, ou militares, quando são destinados ao uso exclusivo de aeronaves militares. Dentro da categoria de aeródromos civis, eles podem ser ainda subdivididos em públicos e privados. Essa classificação é importante para regulamentar o funcionamento e acesso aos aeródromos, bem como para determinar as responsabilidades e regulamentos aplicáveis a cada tipo de aeródromo no contexto da aviação brasileira.

Conforme informações fornecidas pela ANAC (2021a), os aeródromos públicos são considerados patrimônios autônomos, desde que mantenham sua destinação específica estabelecida pela União. Isso significa que esses aeródromos são protegidos por regulamentos e só podem ser fechados por meio de um ato administrativo da Autoridade de Aviação Civil, que é a ANAC. Além disso, propriedades localizadas nas proximidades de aeródromos públicos estão sujeitas a restrições especiais relacionadas ao plano básico de zona de proteção de aeródromos e ao plano de zoneamento de ruídos. A abertura para operações de aeronaves em aeródromos públicos requer um processo de homologação.

Já os aeródromos privados podem ser utilizados somente com a permissão de seu proprietário, não sendo permitida a exploração comercial desses aeródromos. Deste modo, o proprietário não pode cobrar tarifas dos usuários para o uso das instalações do aeródromo. Além disso, os aeródromos privados não possuem uma zona de proteção garantida e podem estar sujeitos a restrições operacionais devido a novas construções ou instalações nas proximidades. A abertura para operações em aeródromos privados é realizada por meio de um processo de registro, e esses aeródromos podem ser fechados a qualquer momento pelo proprietário ou pela Autoridade de Aviação Civil.

É importante destacar que a classificação como "privado" ou "público" em relação aos aeródromos não se refere à natureza do explorador do aeródromo. Um aeródromo pode ser classificado como público quando sua finalidade principal é atender aeronaves civis e o público em geral, independentemente de ser operado por uma entidade privada ou pública. Da mesma forma, um aeródromo privado é aquele cujo acesso e uso são restritos e não envolve operações comerciais, mesmo que seja de propriedade pública. Portanto, a classificação do aeródromo está relacionada à finalidade e ao acesso, não à propriedade ou à gestão.

4.2 PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Bernucci *et al.* (2008) definiram pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e das condições climáticas, proporcionando aos usuários condições satisfatórias de rolamento, conforto, segurança e eficiência.

Para Balbo (2007), através dos ganhos promovidos pela função básica do pavimento de melhorar a condição de rolamento, são gerados aos usuários reduções expressivas em custos operacionais e de manutenção de veículos, gasto de combustível e tempo de viagem, bem como a preservação do próprio pavimento com a redução de acidentes. Embora essas definições remetam especialmente a pavimentos rodoviários, os princípios usados para o projeto de pavimentos de rodovias também podem ser aplicados em aeroportos e leitos de ferrovias, com algumas modificações (HUANG, 2004).

Os pavimentos aeroportuários mostram particularidades em relação aos pavimentos rodoviários, tais como espessuras maiores devido às cargas e pressões de pneus impostas pelas aeronaves, que requerem materiais superficiais de qualidade superior. Além disso, o número de repetições das cargas no pavimento aeroportuário é geralmente menor do que no pavimento rodoviário, devido aos pequenos desvios laterais das aeronaves durante as operações, o que exige que muitas passagens dos trens de pouso sejam somadas para que seja contabilizada uma repetição do carregamento (HUANG, 2004).

Medina e Motta (2015) destacaram que a intensidade das solicitações em pistas de pouso e decolagem de aeródromos varia longitudinal e transversalmente, sendo considerada no dimensionamento estrutural do pavimento por meio da definição de áreas críticas e não críticas, diferentemente do que ocorre em rodovias. Os autores

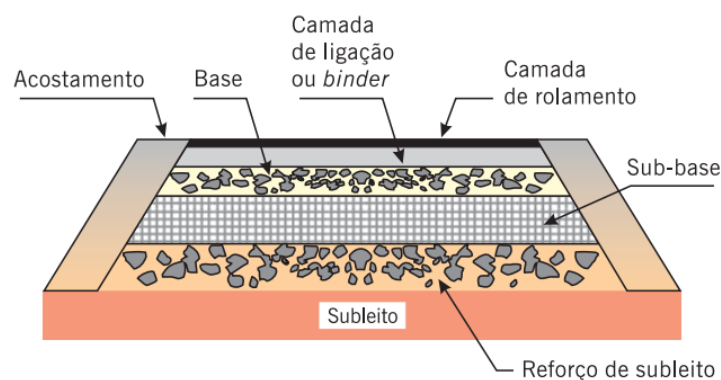
também fizeram diferenciações relevantes quanto a largura e comprimento das pistas e ações de frenagem e de carga dinâmica de veículos parados.

Apesar das particularidades de cada emprego, os pavimentos rodoviários e aeroportuários podem ser divididos em duas principais categorias: rígidos e flexíveis. Essas categorias possuem características próprias na composição e na forma como se comportam sob as cargas e pressões exercidas pelas aeronaves durante as operações de pouso e decolagem. É importante entender essas diferenças para que o dimensionamento e a manutenção adequados possam ser realizados.

4.1.1 Tipos de pavimentos aeroportuários

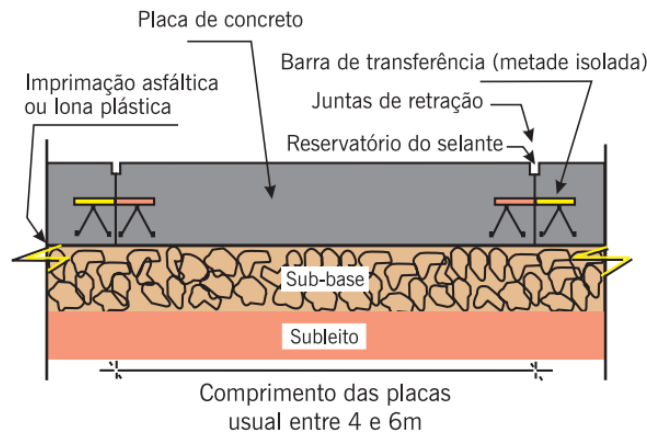
Historicamente, os pavimentos foram divididos em duas categorias amplas. As definições clássicas de pavimentos, em alguns casos, representam uma simplificação excessiva. Os pavimentos flexíveis consistem em uma superfície de revestimento asfáltico relativamente fina sobre uma camada de base e uma camada de sub-base, construídas sobre o subleito compactado, conforme a Figura 1. Os pavimentos rígidos, por sua vez, são compostos por concreto de cimento Portland e podem ou não ter uma base entre o pavimento e a sub-base (YODER; WITCZAK, 1975), como representado na Figura 2.

Figura 1 – Seção transversal esquemática de um pavimento flexível.



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008).

Figura 2 – Seção transversal esquemática de um pavimento rígido.



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008).

Mais recentemente, Bernucci *et al.* (2008) indicaram que há uma tendência de usar-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, para denominar o tipo de revestimento dos pavimentos rígidos e flexíveis, respectivamente. Senço (2007) esclareceu que a mudança de terminologia ocorre devido à liberdade de se empregar camadas flexíveis e rígidas conjuntamente em uma mesma estrutura de pavimento.

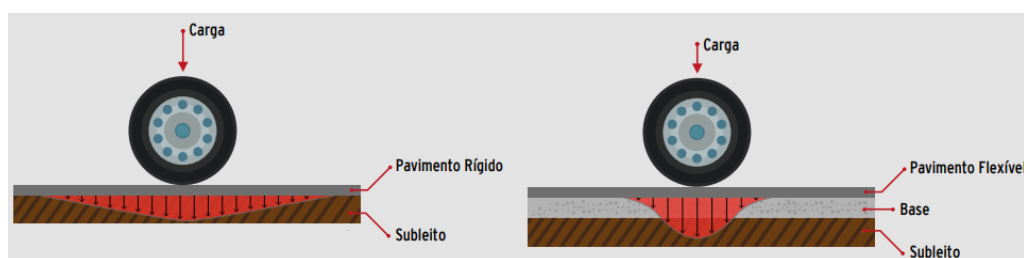
De maneira geral, a espessura dos pavimentos rígidos é determinada levando em conta a resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. Tais placas podem ser reforçadas com barras de aço e suportam a maior parte do carregamento aplicado ao pavimento (FAA, 2021).

Nos pavimentos flexíveis, a camada superior de revestimento asfáltico é destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores até o subleito, além de impermeabilizar o pavimento. As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas ao trincamento por fadiga dessa camada. Ela ainda pode desenvolver trincamento por envelhecimento do ligante asfáltico, ação climática, entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Yoder e Witczak (1975) explicaram que a principal diferença entre pavimentos rígidos e flexíveis, no entanto, reside na forma como cada um distribui a carga para o subleito. O pavimento rígido, devido à sua rigidez e módulo de elasticidade elevado, tende a possuir uma grande área de distribuição de carga. Já no pavimento flexível, a

capacidade de suporte está relacionada à capacidade de cada camada em distribuir a carga para o subleito em uma área menor, o que pode gerar tensões maiores no solo de fundação. A Figura 3 esquematiza a distribuição das tensões característica de cada tipo de pavimento.

Figura 3 – Distribuição de tensões em pavimentos rígidos e flexíveis.



Fonte: Adaptado de CNT (2017).

4.1.2 Escolha do tipo de pavimento

A escolha do tipo de pavimento aeroportuário deve considerar aspectos técnicos e econômicos. De acordo com Fonseca (1990), existe uma tendência nos projetos aeroportuários de adotar o uso de pavimentos flexíveis nas áreas de pouso e taxiamento de aeronaves (pistas de pouso e decolagem e pistas de táxi), e pavimentos rígidos em áreas de hangares e estacionamento de aeronaves, devido à resistência química superior do concreto aos combustíveis, óleos e lubrificantes que, porventura, venham a ser derramados sobre a superfície desses pavimentos. Porém, esse não é o único ou principal critério de preferência.

Balbo (2007) pontuou ainda que o objetivo imediato na escolha e seleção de tipos de pavimento a serem empregados em determinada obra e, por consequência, dos materiais a serem aplicados é a minimização de custos, mantidas as demais condições e exigências de conforto e segurança. Trata-se de um fator crucial à viabilidade do projeto, tendo em vista os custos de pavimentação para as agências e os operadores viários, com inevitáveis reflexos para os usuários. Na obra de pavimentação, é necessária a pesquisa dos materiais disponíveis nas proximidades, comercializados ou não, considerando sua dificuldade de exploração e de transporte.

Deve-se considerar esses fatores junto com outros aspectos técnicos relevantes para avaliar as alternativas de materiais de pavimentação. Essa análise requer um estudo aprofundado da disponibilidade local e das opções de materiais de construção, sem depender de soluções predefinidas, exigindo maturidade no processo de decisão.

Fonseca (1990), com fins comparativos, mostrou algumas características gerais dos dois tipos principais de pavimentos, contidas na Tabela 1, destinadas a auxiliar os tomadores de decisão no processo de conservação e restauração.

Tabela 1 – Características gerais dos tipos de pavimentos.

Propriedade	Tipo de pavimento	
	Rígido	Flexível
Custo Inicial	Elevado	Menor
Vida Útil	Maior	Menor
Custo de Manutenção	Menores	Maiores
Composição do elemento estrutural principal (revestimento)	Placas de Concreto	Asfáltico e diversas camadas de apoio

Fonte: Adaptado de Fonseca (1990).

Além das recomendações técnicas e econômicas, é importante que a escolha do tipo de pavimento esteja em concordância com as orientações das autoridades de aviação. O Manual de Projetos Aeroportuários (2021), mencionado no Capítulo 1 deste trabalho, utiliza as recomendações do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) nº 154, que trata das normas para projeto de aeródromos públicos, estabelece critérios para a escolha do tipo de pavimento a ser utilizado em cada área do aeródromo, levando em consideração o volume de tráfego, as características das aeronaves e as condições climáticas da região.

O Anexo 14 à Convenção sobre Aviação Civil Internacional (ICAO, 1944) também é utilizado como referência para a escolha do tipo de pavimento em aeródromos, e suas normas e práticas são usadas como base das especificações do RBAC nº 154. Ele define categorias de aeronaves, de acordo com o peso máximo de decolagem e o comprimento da pista necessários para a operação, e recomenda tipos de pavimento para cada uma dessas categorias.

O regulamento brasileiro também estabelece requisitos técnicos para o projeto de pavimentos de áreas críticas do aeródromo, como as áreas de toque e de parada das aeronaves. Essas áreas devem ser capazes de suportar as cargas geradas pelas

aeronaves sem sofrer danos ou deformações excessivas, garantindo a segurança das operações aéreas.

No Brasil, os pavimentos aeroportuários são principalmente do tipo flexível. A maior parte da aplicação de pavimentos flexíveis em aeroportos brasileiros é feita nas pistas de pouso e decolagem, nas pistas de taxiamento e em vias internas de serviço que se destinam à circulação de veículos e equipamentos de apoio às aeronaves em solo. Pátios de manobra e de estacionamento geralmente recebem a aplicação de pavimento rígido (OLIVEIRA, 2009). Essa configuração é seguida pelo maior aeroporto do país atualmente, o Aeroporto Internacional de Guarulhos, representado na Figura 4.

Figura 4 – Pistas do Aeroporto Internacional de Guarulhos.



Fonte: Google Earth (2023).

Apenas alguns aeroportos possuem pavimentos rígidos em suas pistas de pouso e decolagem, como é o caso de uma das pistas do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro, conforme observado na Figura 5. A maior delas, construída em pavimento de concreto, possui 4 mil metros de comprimento por 45 metros de largura e a menor tem 3.180 metros de comprimento e 47 de largura, feita em pavimento de asfalto (RIOGALEÃO, 2016).

Figura 5 – Pistas do Aeroporto Internacional Antonio Carlos Jobim, no Rio de Janeiro.



Fonte: Google Earth (2023).

Outros aeroportos como o Aeroporto de Campina Grande, Florianópolis e Pelotas, além do Aeroporto Internacional de Campo Grande também possuem pistas de pouso e decolagem executadas em pavimento de concreto (INFRAERO, 2008).

4.2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

O autor Balbo (2007) afirmou que a área de pavimentação no Brasil está significativamente atrasada em relação a países tecnologicamente mais avançados, e que é necessário realizar investimentos ordenados em diferentes setores para superar essa defasagem. São necessários investimentos em setores como o de pesquisa para o desenvolvimento de novas técnicas, de engenharia consultiva para a atualização de normas e especificações construtivas, de construção para superar a obsolescência de equipamentos e melhorar a qualificação da mão de obra, e de controle de qualidade para empregar técnicas modernas de execução de materiais.

Em consequência, nas últimas décadas, os dimensionamentos de pavimentos aeroportuários brasileiros têm sido comumente realizados através de metodologias estrangeiras. Um método historicamente utilizado no Brasil é o recomendado pela FAA. O método incipiente, descrito na circular AC150/5320-6C de 1978, passou por atualizações para se adequar às novas aeronaves em serviço. A última atualização ocorreu no ano de 2021, com a publicação da circular AC 150/5320-6G, que é atualmente utilizada.

É importante destacar que o RBAC nº 154 não faz menção a nenhum método específico de dimensionamento de pavimentos aeroportuários. A única orientação presente é para que a resistência dos pavimentos seja analisada conforme o método ACN/PCN (ANAC, 2021b). Entretanto, em vigor desde 1981, o método ACN/PCN (*Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number*) possui limitações que, com os recursos tecnológicos e com os avanços no campo da engenharia de pavimentos experimentados hoje, não mais se justificam (ANAC, 2022a).

Tais limitações levaram a ICAO a iniciar discussões em 2012 para atualizar os procedimentos de cálculo de resistência de pavimentos aeroportuários até então vigentes. Como resultado, surgiu o método ACR/PCR (*Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating*), que se tornará mandatório entre as autoridades de aviação civil a partir de novembro de 2024. A ANAC (2022) afirma que, embora ainda não haja requisitos estabelecidos no RBAC nº 154 para a metodologia ACR/PCR na regulação brasileira, é esperado que o assunto seja abordado nas próximas emendas desses regulamentos.

Em vista disso, o dimensionamento realizado neste trabalho segue o mais recente método da FAA, publicado na circular AC 150/5320-6G (FAA, 2021), por meio da utilização do programa computacional FAARFIELD.

4.2.1 Os métodos de dimensionamento da FAA

Os métodos de dimensionamento da FAA são uma fonte importante de soluções técnicas para o projeto de novos pavimentos asfálticos e de concreto, bem como procedimentos para o dimensionamento de reforços para a restauração de pavimentos já deteriorados ou com a finalidade de aumentar a capacidade de suporte de pavimentos já existentes para que possam suportar maiores solicitações de tráfego.

A primeira circular, a AC150/5320-6C foi publicada em 1978 e contém os métodos para dimensionamento de pavimentos asfálticos e de concreto para aeroportos conjugado com a notificação da resistência de pavimentos recomendada pela ICAO.

O método de dimensionamento para pavimentos asfálticos foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (*U.S. Army Corps of Engineer - USACE*) e é baseado na curva do índice de suporte Califórnia (*California Bearing Ratio - CBR*). Para os pavimentos de concreto-cimento, a espessura da placa obtida em ábacos próprios que se baseiam na teoria de Westergaard e o coeficiente de reação do subleito expresso é obtido através do módulo de reação do terreno de fundação, o denominado coeficiente de Winkler ou valor k (MEDINA E MOTTA, 2015).

Sendo o pavimento dimensionado para o conjunto de diferentes aeronaves, faz-se uma busca de qual entre elas exigiria individualmente a maior espessura, chamando-a então de “aeronave de projeto”. As decolagens previstas para as demais aeronaves são transformadas em decolagens equivalentes da aeronave de projeto, usando critério de equivalência de operações.

Os gráficos utilizados para o dimensionamento dos pavimentos foram estabelecidos a partir da transformação de gráficos empíricos com muitas simplificações. No entanto, na década de 1990, com o surgimento de aeronaves mais pesadas e com configurações de trens-de-pouso diferentes, a FAA não desenvolveu novos ábacos para essas aeronaves sob os mesmos princípios de dimensionamento.

Em 1995, a FAA então divulgou a circular AC 150/5320-6D, que introduziu um novo método de dimensionamento de pavimentos de aeroportos. A mudança foi adotada para explorar novos os avanços na tecnologia de pavimentos daquela época e, portanto, aprimorar o desempenho do pavimento e tornar os ábacos de dimensionamento mais fáceis de serem utilizados. Tais estudos resultaram no desenvolvimento do programa LEDFAA (*Linear Elastic Design Federal Aviation Administration*), que contém procedimentos para dimensionamento de reforços e novos pavimentos asfálticos e de concreto baseados no método de camadas elásticas (FAA, 1995).

Após uma nova remodelação dos procedimentos de cálculo, a FAA apresentou o novo método de dimensionamento de pavimentos aeroportuário utilizando um programa computacional denominado FAARFIELD (*Federal Aviation Administration Rigid Flexible Elastic Layered Design*), divulgados na circular AC 150/5320-6E, do ano de 2009, que aborda novas orientações ao dimensionamento e avaliação estrutural.

O FAARFIELD apresentou modificações significativas nas considerações feitas na metodologia LEDFAA. Nessa nova abordagem, considera-se a contribuição individual de cada aeronave presente no movimento operacional de projeto para o dimensionamento dos pavimentos. A FAA (2009) adotou no dimensionamento o método

de camadas elásticas para pavimentos flexíveis e análise tridimensional através de elementos finitos para pavimentos rígidos.

O método, que deixou de se basear no CBR do subleito e em ábacos de aeronaves padrão e passou a adotar a análise mecanístico-empírica, foi atualizado o em 2016 pela circular AC 150/5320-6F. A nova metodologia contida na circular adotou os parâmetros mecânicos da teoria da elasticidade como fatores principais no dimensionamento dos pavimentos, considerando também os módulos de resiliência dos materiais e novos tipos de trens de pouso. O programa computacional FAARFIELD passou a considerar as equações de fadiga das misturas asfálticas e a deformação vertical máxima admissível do subleito (ARAUJO, 2009).

Juntamente com as alterações no método, a partir da circular AC 150/5320-6F, a FAA adotou a unificação no uso do módulo de elasticidade (E) como parâmetro de resistência do subleito, tanto para o dimensionamento de pavimentos rígidos quanto para pavimentos flexíveis. A resistência do subleito, que antes era representada pelo valor do CBR para pavimentos asfálticos e pelo valor de reação k para pavimentos de concreto, passou a ser inserida diretamente no FAARFIELD em qualquer uma das formas, no entanto, o programa realiza todos os cálculos estruturais usando o módulo elástico E. Se o módulo de fundação for inserido como valor de CBR ou um valor k, o FAARFIELD o converterá automaticamente para o valor E equivalente através das Equações 1 e 2:

$$E = 1500 \cdot CBR \text{ [psi]} \quad (1)$$

$$E = 20,15 \cdot k^{1,284} \text{ [psi]} \quad (2)$$

O procedimento substituiu o conceito de aeronave de projeto pelo conceito de consumo de fadiga, expresso pelo Fator Acumulativo de Danos (*Cumulative Damage Factor* - CDF). A contribuição de todo o tráfego de projeto no dimensionamento do pavimento é levada em consideração através a Lei de Miner, baseada na hipótese da superposição de efeitos. Isso possibilitou a redução da espessura do pavimento ao considerar o somatório dos consumos de resistência à fadiga correspondente a cada aeronave.

Até o desenvolvimento deste trabalho, as últimas atualizações dos métodos da FAA constam na circular AC 150/5320-6G, publicada no ano de 2021. O documento incorpora o novo protocolo da ICAO para a o método ACR/PCR de análise de resistência

dos pavimentos, em substituição ao antigo método ACN/PCN. Além disso, a circular atual traz informações sobre novos materiais e tecnologias utilizados na construção de pavimentos, atualizações de informações técnicas e dá maior ênfase em práticas sustentáveis.

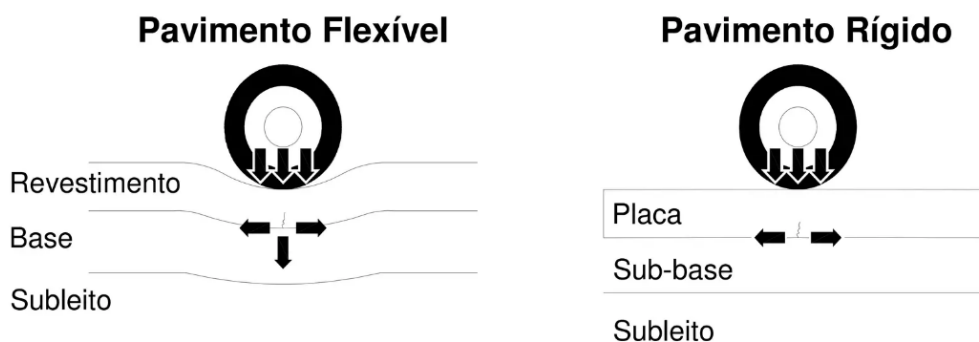
4.2.2 Projeto de pavimentos utilizando o FAARFIELD

O FAARFIELD é um programa computacional criado pela FAA e é o *software* padrão da agência governamental americana para o projeto e avaliação de espessuras de pavimentos em aeroportos, conforme a AC 150/5320-6G, *Airport Pavement Design and Evaluation*, e para a medição da resistência do pavimento usando o método ACR/PCR, segundo a AC 150/5335-6D, *Standardized Method of Reporting Pavement Strength – PCR*. A versão utilizada neste trabalho é a versão 2.0.18, disponibilizada em maio de 2022.

O *software* projeta a estrutura de pavimentos novos e dimensiona reforços de pavimentos antigos utilizando a teoria das camadas elásticas e o método 3D de elementos finitos aplicados, respectivamente, a pavimentos flexíveis e rígidos.

Para o projeto de pavimento flexível, o FAARFIELD usa a máxima deformação vertical no topo do subleito e a máxima deformação horizontal na face inferior do revestimento asfáltico para mensurar a vida estrutural do pavimento. Para o projeto de pavimento rígido, é utilizado o esforço de tração horizontal na parte inferior do painel de concreto como preditor da vida estrutural do pavimento. O esforço de tração horizontal máximo para o projeto é determinado considerando tanto as condições de carga na borda quanto no interior da área do pavimento. Ambos os esforços estão representados na Figura 6.

Figura 6 – Esforços avaliados no dimensionamento dos pavimentos.

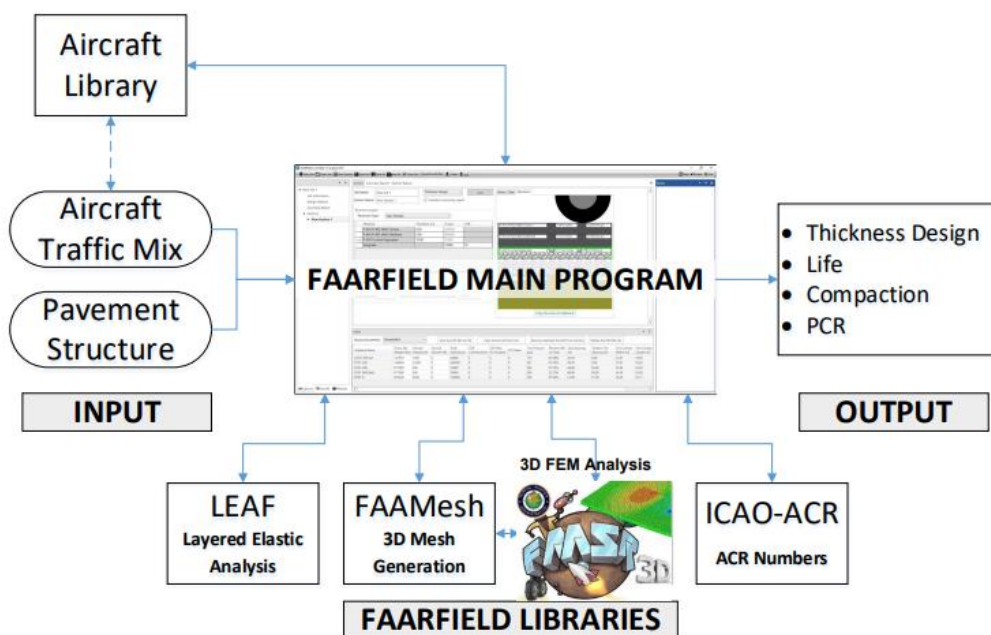


Fonte: GOLDNER (2012).

Segundo a FAA (2021), o FAARFIELD consiste em um programa principal que convoca vários subprogramas (bibliotecas), como mostrado esquematicamente na Figura 7. Os principais subprogramas são:

- LEAF (análise elástica em camadas);
- FAAMesh (geração de malha tridimensional para análise de elementos finitos);
- FAASR3D (processamento de elementos finitos); e
- ICAO-ACR (cálculo de ACR seguindo o método padrão da ICAO).

Figura 7 – Visão geral do programa FAARFIELD.



Fonte: FAA (2021).

O programa FAARFIELD opera com dimensões métricas ou de unidades de medida dos Estados Unidos e opera em quatro modos funcionais. A Figura 8 representa a seleção dos modos dentro do programa, sendo eles:

- Projeto de espessura (*Thickness Design*);
- Cálculo de vida útil (*Life*);
- Requisitos de compactação (*Life/Compactation*); e

- Cálculo de Classificação de Pavimento (*Pavement Classification Ratings* – PCR).

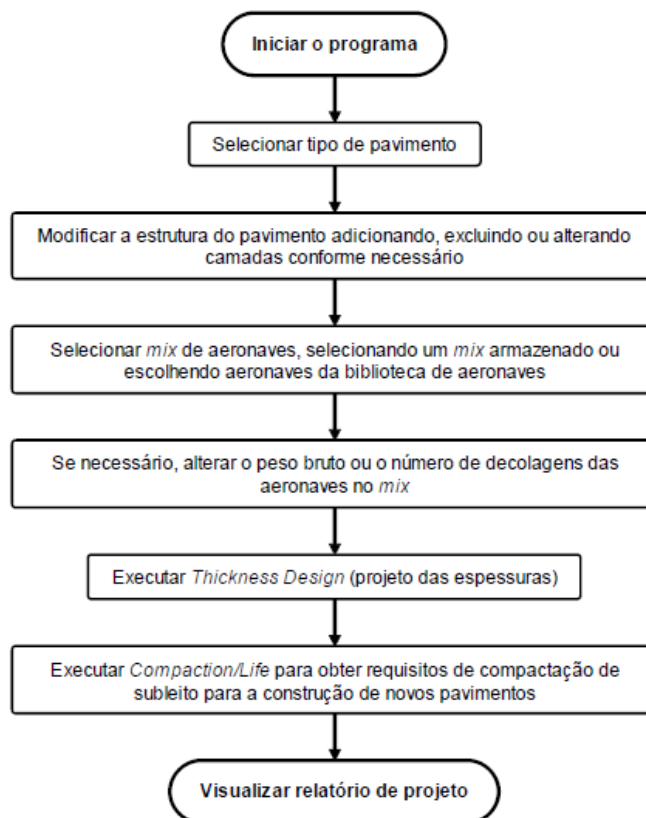
Figura 8 – Modos funcionais do FAARFIELD 2.0.

The screenshot shows the FAARFIELD 2.0 software interface. It includes input fields for 'Job Name' (New Job 1) and 'Section Name' (New Section 1). A 'Pavement Layers' section is visible with 'Pavement Type' set to 'New Flexible'. A dropdown menu is open, showing options: 'Thickness Design' (selected), 'Life', 'Life/Compaction', and 'PCR'. There are 'Run' and 'Add To Batch' buttons on the right side.

Fonte: Autor (2023).

O projeto de pavimento com a utilização do FAARFIELD é um processo iterativo tanto para projeto flexível quanto rígido. Os passos básicos de projeto estão representados no fluxograma da Figura 9.

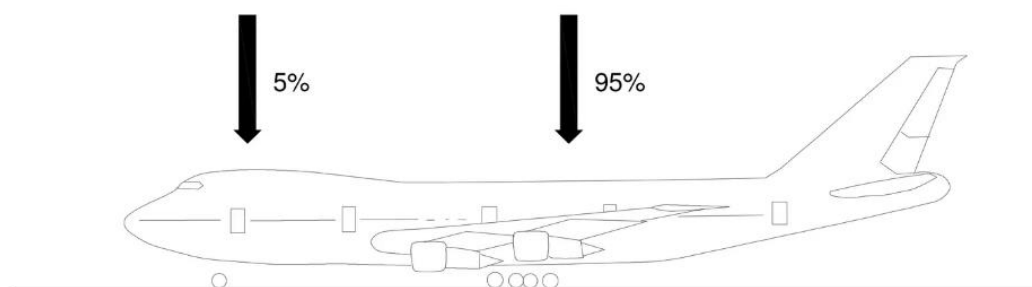
Figura 9 – Passos básicos de projeto do FAARFIELD 2.0.



Fonte: Adaptado de FAA (2021).

Para a utilização do FAARFIELD, constam na circular AC 150/5320-6G (FAA, 2021) algumas considerações que devem ser feitas em relação ao tráfego aéreo. É possível projetar pavimentos utilizando os pesos máximos de decolagem pré-estabelecidos das aeronaves que operarão regularmente sobre o pavimento. O FAARFIELD fornece pesos brutos operacionais recomendados pelos fabricantes e distribuição de carga para diferentes aeronaves civis e militares. Para aeronaves genéricas, a carga é distribuída para os trens de pouso com 95% para os principais e 5% para o nariz, conforme representado na Figura 10. O uso do peso máximo de decolagem previsto fornece um projeto conservador, permitindo mudanças no uso operacional e tráfego.

Figura 10 – Distribuição de cargas através dos trens de pouso.



Fonte: GOLDNER (2012).

O tipo e a configuração do trem de pouso de uma aeronave ditam como o peso é distribuído para um pavimento e como ele irá responder às solicitações das cargas das aeronaves. Já a pressão do pneu varia de acordo com o tipo do trem de pouso, peso bruto da aeronave e tamanho do pneu. A ação da pressão dos pneus tem uma influência mais significativa nas deformações na camada superficial dos pavimentos asfálticos e pode ser desprezada no projeto dos pavimentos rígidos.

Em relação ao volume de tráfego aéreo, deve-se utilizar previsões de partidas anuais por tipo de aeronave, incluindo todas as aeronaves que utilizarão o pavimento, pois aeronaves de uso sazonal ou não regular podem ter um impacto considerável na estrutura de pavimentação necessária.

Geralmente, os pavimentos de aeródromos são projetados considerando apenas as partidas das aeronaves. A principal razão para desconsiderar as chegadas no projeto é que, tipicamente, os pesos das chegadas são muito mais leves do que os pesos das

partidas (devido ao consumo de combustível). Se as operações do aeroporto são tais que a maioria das aeronaves chegam e partem com pesos essencialmente iguais (por exemplo, se não há reabastecimento), então é necessário dobrar o número de partidas no FAARFIELD para refletir o número de vezes que o pavimento é carregado (FAA, 2021).

O FAARFIELD também avalia o número total de partidas durante o período de vida útil do projeto. No programa, a vida útil está relacionada à vida útil estrutural do pavimento, e não à vida útil funcional. A vida útil funcional diz respeito ao período em que o pavimento mostra um nível de serviço adequado em termos de resistência à derrapagem e rugosidade, enquanto a vida útil estrutural se refere ao número total de ciclos de carregamento que o pavimento pode suportar antes de falhar. A vida útil do pavimento pode ser modificada no programa para até 50 anos, mas a FAA considera uma análise de 20 anos como referência tanto para o projeto de pavimentos novos quanto para os de reforço.

Como mencionado, o FAARFIELD baseia-se na contribuição de cada tipo de aeronave para o dimensionamento do pavimento, levando em conta as tensões aplicadas por cada tipo de trem de pouso ao solo. Caso haja diferentes opções de trem de pouso para uma aeronave, o programa considerará automaticamente todas elas. A FAA (2021) alerta que tentar dimensionar pavimentos com base em passagens equivalentes de uma "aeronave de projeto" em vez de um mix de aeronaves pode levar a resultados errôneos.

O FAARFIELD utiliza o conceito de CDF, no qual a contribuição de cada aeronave do mix é somada para obter o dano acumulado total da operação de todas as aeronaves do tráfego. O programa não estabelece uma aeronave de projeto, pois utilizar as operações de uma única aeronave para representar todo o tráfego não é equivalente a dimensionar um pavimento considerando todo o tráfego do mix no método CDF.

O CDF mede a quantidade da vida útil de fadiga da estrutura que já foi consumida. Ele é calculado como a razão entre o número de ciclos de carga que foram aplicados e o número total de ciclos que o pavimento é capaz de suportar antes de falhar. Matematicamente, o CDF é a soma de N termos, onde cada termo é a razão entre as repetições aplicadas e as repetições permitidas até a falha para uma das N aeronaves na mistura de tráfego. Para um projeto de pavimento, a espessura da estrutura do pavimento é ajustada até que o CDF seja igual a 1 para a mistura de tráfego e a vida útil estrutural de projeto. Para uma única aeronave (N igual a 1) e partidas anuais constantes, o CDF pode ser expresso da seguinte forma:

$$CDF = \frac{\text{Número de repetições de carga aplicada}}{\text{Número de repetições permitidas até a falha da estrutura}} \quad (3)$$

$$CDF = \frac{(\text{Decolagens anuais}) \cdot (\text{Vida útil em anos})}{(\text{Razão P/C}) \cdot (\text{Coberturas para a falha})} \quad (4)$$

$$CDF = \frac{\text{Passadas aplicadas}}{\text{Coberturas para a falha}} \quad (5)$$

Durante o processo de dimensionamento de pavimentos novos, o FAARFIELD ajusta as espessuras das camadas de acordo com os valores de CDF individuais de cada modelo de aeronave, de modo que o somatório dos desses valores resulte em um CDF total igual a 1 na vida útil de projeto estabelecida. O FAARFIELD calcula os efeitos danosos de cada aeronave na mistura de tráfego com base no espaçamento do trem de pouso, carga e localização do trem de pouso em relação à linha central do pavimento. Um valor de CDF maior que 1 não significa necessariamente que o pavimento não suportará mais o tráfego, mas que terá falhado de acordo com a definição de falha usada nos procedimentos de projeto e dentro das restrições das suposições de propriedade do material.

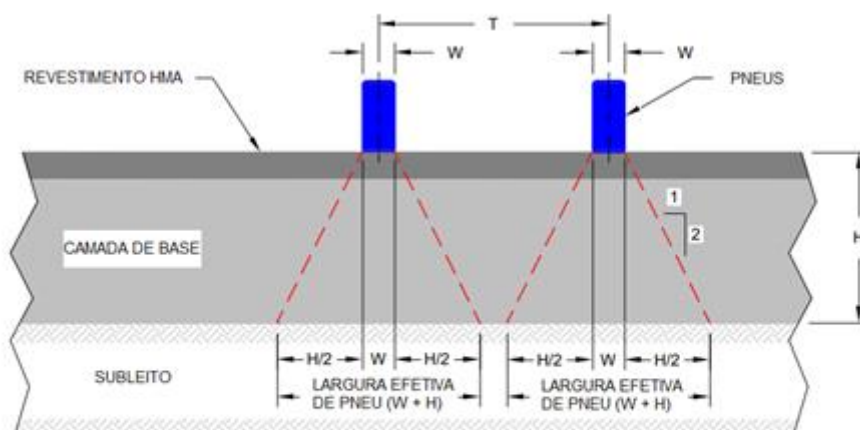
As Equações 4 e 5 introduzem o conceito de cobertura (*coverages*). Segundo FAA (2021), uma cobertura ocorre quando todos os pontos da superfície do pavimento da faixa de tráfego sofrem a solicitação de uma aplicação da tensão máxima, assumindo-se que a tensão é igual em toda a área do pneu em contato com o pavimento. Essa medida é necessária devido à variação nas trajetórias das aeronaves durante sua movimentação sobre o pavimento, o que requer várias passagens da aeronave para que um ponto do pavimento seja submetido à carga máxima que pode ser imposta pelo modelo. Deste modo, expressa-se a razão entre o número de passagens necessárias para uma aplicação de carga total para uma unidade de superfície do pavimento pelo *Pass-to-Coverage Ratio* (*P/C Ratio* ou *Razão P/C*).

As coberturas resultantes da operação de um determinado tipo de aeronave são função de seu número de passagens, do número e do espaçamento das rodas do trem de pouso principal, da largura da área de contato do pneu e da distribuição lateral das rodas em relação à linha central do pavimento ou marcas de orientação. O FAARFIELD utiliza o conceito de largura efetiva dos pneus para calcular o *P/C Ratio*, sendo que, para pavimentos rígidos, a largura efetiva é igual à largura nominal do pneu na superfície do pavimento, enquanto para pavimentos flexíveis, ela é definida na parte superior do subleito. O programa calcula automaticamente a largura efetiva.

Vale ressaltar que, entende-se por aeronave crítica aquela que impõe as maiores demandas ao pavimento, sendo caracterizada pelo maior CDF (ANAC, 2022a). É importante não confundir essa aeronave crítica com aquela usada como referência no projeto do aeroporto. Conseqüentemente, a aeronave crítica determinada para a configuração da infraestrutura pode divergir daquela utilizada na avaliação dos pavimentos.

As Figuras 11 e 12 mostram a largura efetiva dos pneus sem e com sobreposição em pavimentos flexíveis relacionando a largura entre os eixos do trem de pouso (T), a largura do pneu do trem de pouso (W) e espessura total do pavimento (H). A Figura 13 representa a largura efetiva dos pneus em pavimentos rígidos.

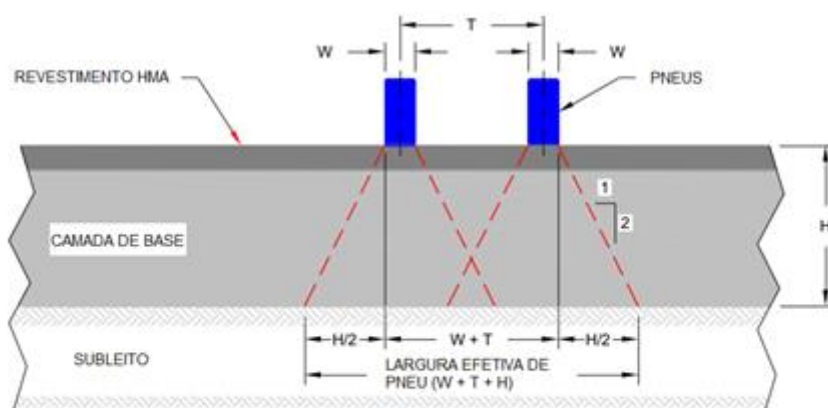
Figura 11 – Largura efetiva de pneu para pavimentos flexíveis sem sobreposição.



T = largura entre os eixos do trem de pouso
 W = largura do pneu do trem de pouso
 H = espessura total do pavimento

Fonte: Adaptado de FAA (2021).

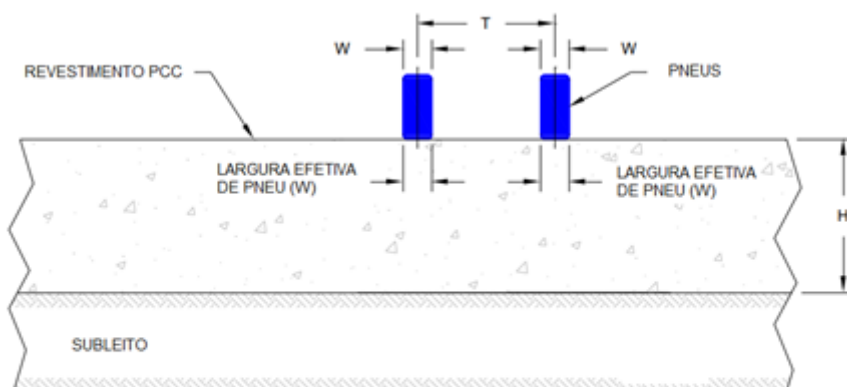
Figura 12 – Largura efetiva de pneu para pavimentos flexíveis com sobreposição.



T = largura entre os eixos do trem de pouso
W = largura do pneu do trem de pouso
H = espessura total do pavimento

Fonte: Adaptado de FAA (2021).

Figura 13 – Largura efetiva de pneu para pavimentos rígidos.



T = largura entre os eixos do trem de pouso
W = largura do pneu do trem de pouso
H = espessura total do pavimento

Fonte: Adaptado de FAA (2021).

No FAARFIELD, para cada camada do pavimento são atribuídos uma espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. As análises flexível e rígida utilizam as mesmas propriedades de camada. O programa permite que as espessuras das camadas sejam variadas, sujeitas a requisitos mínimos. O coeficiente de Poisson é fixo para todos os materiais, no entanto, os módulos de elasticidade dependem do tipo de material e são fixos ou variáveis, dentro de uma faixa permitida.

Os materiais são identificados no FAARFIELD pelas designações utilizadas na circular AC 150/5370-10H (FAA, 2018). Na lista de materiais está incluída uma camada que pode ser definida pelo usuário, assim como suas propriedades. A Tabela 2 lista os valores dos módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson empregados no FAARFIELD.

Tabela 2 – Valores de módulo de elasticidade e coeficientes de Poisson permitidos no FAARFIELD para cada material.

Tipo de Camada	Camada especificada pela FAA	Módulo de elasticidade para pavimento rígido (MPa)	Módulo de elasticidade para pavimento flexível (MPa)	Coefficiente de Poisson
Superfície	P-501 Concreto de cimento	30000	Não aplicável	0,15
	P-401/P-403 ¹ /P-404 Mistura asfáltica	Não aplicável	1380 ²	0,35
Base e Sub-base Estabilizadas	P-401/P-403 Mistura asfáltica	3000		0,35
	P-306 Concreto magro	5000		0,20
	P-304 Base de agregado tratado com cimento	3500		0,20
	Rígido Estabilizado Variável	1700 a 5000	Não aplicável	0,20
	Flexível Estabilizado Variável	Não aplicável	1000 a 3000	0,20

¹ P-403 é empregada como superfície quando todas as aeronaves pesarem menos de 27216 kg.

² Um valor de módulo fixo para a superfície de mistura quente é definido no programa em 1380 MPa. Esse valor de módulo corresponde a uma temperatura do pavimento de aproximadamente 32°C.

Base e Sub-base Granulares	P-209 Agregado Britado	Calculado pelo FAARFIELD ³	0,35
	P-208 Agregado	Calculado pelo FAARFIELD ³	0,35
	P-219 Agregado de concreto reciclado	Calculado pelo FAARFIELD ³	0,35
	P-211 Rocha calcária	Calculado pelo FAARFIELD ³	0,35
	P-207 Base de agregado asfáltico reciclado ⁴	170 a 3500	0,35
	P-154 Agregado não britado	Calculado pelo FAARFIELD ³	0,35
Subleito ⁵	Subleito	7 a 350	0,35
Definido pelo Usuário	Camada definida pelo usuário	7 a 30000	0,35

Fonte: Adaptado de FAA (2021).

Para os projetos de pavimentos rígidos, o FAARFIELD exige um mínimo de três camadas (superfície, base e subleito) e permite até um total de cinco camadas. Os projetos de pavimentos flexíveis podem ter um número ilimitado de camadas ou no mínimo duas camadas (superfície de asfalto e subleito).

Na circular AC 150/5320-6G (FAA, 2021), constam as espessuras mínimas de camada para pavimentos flexíveis e rígidos aplicáveis a diferentes classes de peso de aeronaves. O peso bruto da aeronave mais pesada no mix determina os requisitos mínimos de espessura, independentemente do nível de tráfego. O FAARFIELD verifica automaticamente os requisitos mínimos de espessura da camada para materiais padrão com base no mix de aeronaves inserido, no entanto, o usuário ainda deve verificar se todos os requisitos de espessura foram atendidos.

³ Consultar o arquivo de ajuda do FAARFIELD para obter uma discussão sobre os cálculos.

⁴ O módulo de P-207 depende da qualidade e se houver algum material estabilizante adicional incorporado, por exemplo, asfalto ou cimento. Realizar testes laboratoriais geotécnicos com materiais de campo para determinar o valor apropriado.

⁵ Valores de CBR para subleitos quimicamente modificados são menores que 50% da resistência de laboratório ou CBR 20.

O programa da FAA também considera a proteção do pavimento contra congelamento, no entanto, essa condição não é relevante para este trabalho, uma vez que o Brasil não possui esse tipo de situação em campo.

4.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DOS PAVIMENTOS

Duas formas de avaliação são utilizadas para monitorar pavimentos aeroportuários: avaliação funcional, que usa índices de serventia para medir o grau de conforto e segurança em um momento específico; e avaliação estrutural, que avalia a capacidade de suporte do pavimento às cargas de aeronaves em operação e o comportamento mecânico dos materiais constituintes, incluindo o subleito. A ANAC fornece orientações sobre a avaliação funcional no RBAC nº 153, na Instrução Suplementar (IS) nº 153.203-001A e no Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários - SGPA.

Os resultados das avaliações funcionais através dos índices de serventia possuem natureza qualitativa, ainda que a metodologia empregada vise a reduzir a subjetividade. Por outro lado, a condição estrutural de um pavimento indica sua capacidade de resistir à deterioração causada pelas cargas das aeronaves. Os dois tipos de análise de pavimentos aeroportuários se complementam e são importantes ferramentas para o gestor otimizar o uso de recursos financeiros no período de vida útil esperado para a infraestrutura avaliada (ANAC, 2022a).

Além disso, a análise estrutural de pavimentos envolve o cálculo das tensões e deformações em pontos críticos durante a passagem das cargas das aeronaves nas áreas de movimento do aeroporto, permitindo avaliar sua capacidade de resistir à deterioração causada pela ação repetida das cargas do tráfego aéreo. A elaboração de um diagnóstico sobre os problemas e desempenho do pavimento permite adotar medidas de restauração eficazes, atuando nos mecanismos que provocam sua degradação ao longo do tempo.

O dimensionamento estrutural e a estimativa de vida útil restante requerem a caracterização do pavimento através de um modelo estrutural que permita o cálculo das tensões e deformações causadas pelo tráfego. Com o objetivo de simplificar e padronizar o processo de análise estrutural, criou-se metodologia ACN/PCN, preconizada pela ICAO até então.

O método utiliza o valor do PCN para avaliar a capacidade de carga de determinado pavimento, sem especificar suas informações detalhadas ou uma

aeronave em particular. Esse valor é comparado com o ACN que representa o efeito relativo de uma aeronave com uma determinada carga.

Em uso desde 1981, a ICAO incorporou o método ACN/PCN ao Anexo 14 da Convenção de Aviação Civil Internacional no seu Volume I: Aeroportos a exigência de que cada país membro publique informações sobre a resistência dos pavimentos de todos os aeroportos públicos em suas Publicações de Informações Aeronáuticas (*Aeronautical Information Publication - AIP*) (ANAC, 2008).

O método ACN/PCN desenvolveu limitações em decorrência da evolução da mecânica dos pavimentos. A ICAO iniciou então, em 2012, discussões para a atualização dos procedimentos de cálculo de resistência de pavimentos aeroportuários até então vigentes. Assim surgiu o método ACR/PCR, efetivado em julho de 2020. Até novembro de 2024, tanto o método ACN/PCN quanto o método ACR/PCR poderão ser utilizados. Todavia, a partir dessa data, a metodologia ACR/PCR será a única aceita pelas autoridades de aviação civil.

4.3.1 O método ACR/PCR

O método ACR/PCR, assim como o método ACN/PCN, utiliza o conceito de dano acumulado para avaliação do pavimento, que é representado pela variável CDF. Como visto, essa variável indica a porção da vida útil do pavimento que foi consumida devido à fadiga provocada pelos esforços repetidos sobre a estrutura. Entretanto, o método ACR/PCR introduz abordagens modernas no dimensionamento de pavimentos aeroportuários. Nesse contexto, a adoção de modelos mecanístico-empíricos substitui os modelos puramente empíricos, favorecendo a análise elástico-linear.

É importante destacar que o método ACN/PCN emprega o CBR como parâmetro de resistência do subleito para pavimentos flexíveis, e o módulo de reação k para pavimentos rígidos. Dessa forma, a avaliação do ACR e PCR permanece semelhante à avaliação do ACN e PCN. Quando o ACR é inferior ao PCR, as operações podem prosseguir normalmente, sem impacto na vida útil do pavimento. No entanto, quando o ACR das aeronaves supera o PCR do pavimento, é necessário avaliar a situação com mais cautela.

Pode-se realizar o cálculo do PCR de pavimentos aeroportuários por meio de qualquer ferramenta que utilize a filosofia de cálculo do CDF. Existem no mercado diversos *softwares* disponíveis para avaliações estruturais utilizando esse conceito. Por calcular diretamente o valor do PCR e na ausência de programas que fazem uso de materiais e modelos de cálculo voltados para a realidade brasileira, a ANAC (2022a)

sugere o uso do FAARFIELD 2.0 para fins de projeto cálculo de PCR. A circular AC 150/5335-5D, publicada em 2022 pela FAA e utilizada na versão recente do programa, trata sobre a análise da resistência de pavimentos aeroportuários de acordo com o novo método da ICAO.

O uso de *softwares* diferentes do FAARFIELD em sua versão 2.0 pode implicar na necessidade de uso de *software* adicional, como o ICAO-ACR, da ICAO, para determinação do ACR das aeronaves avaliadas. Destaca-se que o ICAO-ACR foi desenvolvido pela FAA para a ICAO e encontra-se embutido no FAARFIELD 2.0.

4.3.2 Cálculo do ACR

O cálculo do ACR das aeronaves é realizado automaticamente pelo FAARFIELD 2.0, levando em consideração que o *software* ICAO-ACR está embutido no programa da FAA. Os dados de ACR devem constar dos manuais das aeronaves, sendo o cálculo realizado pelos fabricantes (ANAC, 2022a). Por meio do ICAO-ACR, é possível obter o valor do ACR para as aeronaves em função do peso máximo de decolagem. A massa das aeronaves pode ser alterada conforme desejado.

O cálculo do ACR, de acordo com o documento disponibilizado pela ANAC (2022a), é realizado através de três passos essenciais. Inicialmente, determinada uma aeronave, é possível dimensionar uma estrutura capaz de suportar a carga oriunda da aeronave de projeto. A partir da espessura obtida, determina-se qual a carga isolada que, com pressão de 1,50 MPa nos pneus, é capaz de demandar a espessura total do pavimento dimensionado, considerando-se 36.500 passagens da aeronave sobre o mesmo. A essa carga, dá-se o nome de *Derived Single Wheel Load* (DSWL). Por fim, o ACR se constitui em duas vezes a carga encontrada.

Para os pavimentos rígidos, uma diferença em relação ao cálculo do ACR é que se utiliza uma tensão padronizada de 2,75 MPa na fibra inferior da placa de concreto. É importante destacar que essa tensão não tem relação com a tensão padrão utilizada no procedimento de dimensionamento desses pavimentos.

4.3.3 Cálculo do PCR

O cálculo do PCR visa garantir a compatibilidade entre projeto e operação do mix de aeronaves durante a vida útil do pavimento. No método ACN/PCN, por exemplo, a FAA recomenda que o valor do CDF esteja entre 0,15 e 1,00. Um CDF menor que 0,15 indica superdimensionamento do pavimento, enquanto um CDF maior que 1,00

pode não ser uma alocação ótima de recursos financeiros. De forma geral, tais extremos não são considerados aceitáveis no método ACN/PCN.

O método ACR/PCR visa corrigir a variação do CDF permitida citada. No método, cada valor de PCR publicado está vinculado a um valor de CDF específico. Dependendo do valor do PCR, pode ocorrer afetar as operações de certas aeronaves e, conseqüentemente, causar limitações de uso em determinadas infraestruturas.

A ANAC (2022a) ressalta que o CDF está atrelado à vida útil de projeto inserida no FAARFIELD 2.0, sendo que este órgão regulador orienta que seja utilizada vida útil razoável, principalmente nos casos em que o operador de aeródromo desconhecer as informações originais do projeto do pavimento. Esse cenário é bem comum em processos que envolvem a mudança de operadores de aeródromo, como em concessões aeroportuárias.

O manual disponibilizado pela ANAC (2022a) para o cálculo do PCR mostra o processo teórico do método de duas maneiras distintas. A primeira consiste no cálculo manual utilizando qualquer *software* destinado a avaliar a resistência de pavimentos aeroportuários que trabalhe com o conceito de CDF. A segunda maneira é realizada através do FAARFIELD 2.0, cujo procedimento de cálculo é automatizado, portanto, mais simples.

Neste trabalho, será utilizado o procedimento automatizado, em razão do uso do FAARFIELD como *software* de projeto. Para calcular o PCR pelo programa, basta selecionar a função “PCR” e, após, clicar em “Run”. O resultado aparecerá no campo “Status”, à direita. A Figura 14 detalha o procedimento.

Figura 14 – Procedimento de cálculo do PCR com uso do FAARFIELD 2.0.

The screenshot displays the FAARFIELD 2.0 software interface. The top section, titled 'Section CDF Graph', contains the following elements:

- Job Name:** Exemplo 1
- Section Name:** Pavimento flexível
- Pavement Layers:**
 - Pavement Type: New Flexible
 - Material: P-401/P-403 HMA Surface (Thickness: 102 mm, E: 1378,95 MPa)
 - Material: P-401/P-403 HMA Stabilized (Thickness: 127 mm, E: 2757,90 MPa)
 - Material: P-209 Crushed Aggregate (Thickness: 325 mm, E: 351,62 MPa)
 - Material: Subgrade (E: 103,42 MPa, CBR: 10)
- Buttons:** Run (highlighted with callout 1), Add To Batch
- Output:** PCR Calculation Completed, Run Time: 8 seconds, PCR = 446/F/B/X/T (highlighted with callout 3)

The bottom section, titled 'Traffic', shows a table of aircraft data:

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear
B737-800	79242	2500	0	50000	0.43	0.43	1.36	1407	0.475
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	42400	0.79	0.79	1.36	1413	0.475
A320neo	70400	1200	0	24000	0	0	1.38	1220	0.475
A321-100 std.	83400	170	0	3400	0.02	0.04	1.36	1358	0.475
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.4	1062	0.475

Fonte: ANAC (2022a).

Nota-se que o PCR foi reportado como “X” no tocante à pressão dos pneus. De acordo com a AC 150/5335-5D (FAA, 2020), trata-se de procedimento padrão do FAARFIELD. Portanto, cabe ao responsável pelo cálculo alterar ou não essa variável do código, avaliando todas as aeronaves do mix, identificando aquela que opera com maior pressão nos pneus e, por fim, reportando esse elemento no código.

Para pequenas variações nos modelos já constantes na lista do *software*, conhecidas as configurações das rodas do trem de pouso principal, assim como os demais parâmetros (“*gross weight*”, “*percent GW*” e “*tire pressure*”), é possível obter o valor do ACR em função da categoria do subleito e, a partir disso, calcular o PCR para determinado elemento de infraestrutura (ANAC, 2022a).

O PCR é deve ser reportado como um número seguido por quatro letras e indica a capacidade de suporte do pavimento para operações irrestritas. Tais operações vinculam-se à comparação entre o PCR do pavimento e o ACR da aeronave. Em outras palavras, operações irrestritas estão relacionadas a movimentações específicas de aeronaves (atuais e futuras) e têm correlação com a vida útil da estrutura.

Operações irrestritas envolvem a capacidade de uma aeronave operar sem restrições de peso quando o ACR é menor que o PCR do pavimento. Entretanto,

operações ilimitadas não levam em consideração a vida útil do pavimento. Operar de forma ilimitada permite a operação de qualquer tipo de aeronave, sem considerar as movimentações ou a vida útil da estrutura.

O valor numérico do PCR representa sua magnitude, enquanto as letras subsequentes são determinadas pelo tipo de pavimento, categoria de resistência do subleito, pressão máxima dos pneus permitida e método de avaliação. A codificação do PCR está detalhada na Tabela 3.

Tabela 3 – Seleção dos parâmetros para codificação do PCR.

Valor numérico	Tipo de pavimento	Categoria de resistência do subleito	Máxima pressão dos pneus permitida	Método de avaliação
Variável	F – Flexível R – Rígido	A – Alta B – Média C – Baixa D – Ultrabaixa	W – Ilimitada X – Alta Y – Média Z – Baixa	U – Método da aeronave T – Técnica
Detalhes:		Alta: ≥ 150 MPa Média: $100 \leq E < 150$ MPa Baixa: $60 \leq E < 100$ MPa Ultrabaixa: $E < 60$ MPa	Ilimitada: – Alta: $P \leq 1,75$ MPa Média: $P \leq 1,25$ MPa Baixa: $P \leq 0,5$ MPa	U: Com base na experiência prévia com aeronaves. T: Quando a estrutura for confiavelmente conhecida.

Fonte: Adaptado de ANAC (2022a).

Para fins de cálculo, no caso de pavimento sobreposto com pavimento flexível, a AC 150/5335-5D (FAA, 2022) considera tal estrutura como rígida até que a espessura do pavimento flexível seja equivalente à do pavimento rígido. No caso de pavimento flexível sobre pavimento rígido, em que este exauriu sua capacidade de suporte, o responsável pelo cálculo pode considerar toda a estrutura como flexível. Em pavimentos compostos, deverá ser avaliado se a estrutura tem mais características de pavimento rígido ou de pavimento flexível.

5. METODOLOGIA

Como metodologia deste trabalho, foi conduzido um estudo prático com o objetivo de dimensionar pavimentos aeroportuários utilizando os métodos da *Federal Aviation Administration* (FAA), através do *software* FAARFIELD. Realizar o dimensionamento de um pavimento aeroportuário implica definir a espessura total, bem como a espessura individual de cada camada, além de especificar quais materiais devem ser utilizados. Para compreender e realizar o dimensionamento, a espessura do pavimento deve ser estabelecida a partir de valores condizentes das propriedades de resistência do solo, expressas pelo módulo de elasticidade do subleito, e das demandas das aeronaves de projeto.

Foram levadas em consideração as seguintes variáveis para realizar o dimensionamento do pavimento:

- Tipo de estrutura: Pavimento rígido ou flexível;
- Detalhes das camadas: é possível ajustar a espessura e o tipo de material das camadas. Dependendo do tipo de estrutura, também é possível alterar o módulo de elasticidade;
- Tráfego: é possível inserir uma série de dados a partir da biblioteca disponível no FAARFIELD, como modelo das aeronaves, quantidade de aeronaves que compõem o tráfego, taxa de crescimento anual do tráfego, número de decolagens anuais e peso máximo de decolagem.

Relembrando, o objetivo principal deste trabalho visa o dimensionamento de uma estrutura de pavimentação aeroportuária facilmente aplicável ao cenário brasileiro. Em vista disso, as características das variáveis de projeto foram definidas de acordo com o que se observa costumeiramente no Brasil. Ou seja, entende-se que os dados de projeto empregados são, de alguma maneira, comuns em diversas regiões do país.

Inicialmente, foram dimensionadas as camadas dos pavimentos do tipo rígido e flexível. Encontrado um resultado satisfatório para os requisitos impostos, foi realizada uma nova simulação empregando uma aeronave relativamente mais pesada do que as do tráfego considerado no dimensionamento. Através do cálculo do PCR, é possível avaliar a resistência do pavimento em uma possível situação de pouso emergência, por exemplo.

Por fim, a partir das espessuras obtidas, realizou-se uma análise comparativa do custo de execução dos pavimentos dimensionados, a partir de dados do SINAPI Aeroportuário (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos Aeroportuários) (INFRAERO,

2022). A ferramenta é fruto da colaboração entre a Infraero, Caixa Econômica Federal e Fundação Casimiro Montenegro Filho (FCMF), ligada ao ITA. Esse programa resultou na criação de um caderno de encargos e em composições de custos unitários cujos insumos recebem atualizações frequentes por meio de pesquisas de preços conduzidas pelo IBGE e disponibilizadas pela Caixa na página eletrônica do SINAPI, de acordo com cada Unidade Federativa.

5.1 AERONAVES DE PROJETO

Os modelos empregados no mix de aeronaves de projeto foram selecionados com base em critérios específicos. Para auxiliar na escolha dos modelos, foram utilizados dados estatísticos do ano de 2022, considerando a operação de três aeródromos brasileiros localizados em regiões distintas, sendo eles:

- Aeroporto de Maringá (PR) – Silvio Name Junior, localizado na região Sul do país;
- Aeródromo de São José do Rio Preto (SP) – Professor Eriberto Manoel Reino, na região Sudeste; e
- Aeroporto de Porto Seguro (BA); na região Nordeste.

No ano em questão, os aeródromos analisados registraram entre 18 e 21 mil movimentos de aeronaves cada, considerando a soma de pousos e decolagens. Esses aeródromos englobaram diferentes tipos de tráfego, incluindo tráfego comercial, geral e militar. Nos dados estatísticos do ano considerado não foram incluídas informações sobre aeródromos de porte semelhante localizados nas demais regiões brasileiras.

Embora não localizados em capitais estaduais, os três aeródromos em estudo figuraram entre os 40 mais movimentados do país de acordo com o Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo de 2022, elaborado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) do Ministério da Defesa. Os dados detalhados dos movimentos anuais dos modelos de aeronave mais relevantes de cada aeródromo estão representados nas Tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4 – Número de movimentos anuais do Aeroporto de Maringá (PR) – Silvio
Name Junior, por modelo de aeronave em 2022.

Aeronave	Movimentos
AT76	3.749
C152	2.085
AS50	1.374
PA34	1.062
B738	878
B38M	725
AB11	713
A320	701
BE9L	657
SR22	494
BE36	431
C150	412
BE20	404
E50P	359
PC12	334
Total de movimentos	18.617

Fonte: Adaptado de DECEA (2023).

Tabela 5 – Número de movimentos anuais do Aeródromo de São José do Rio Preto (SP) – Professor Eriberto Manoel Reino, por modelo de aeronave em 2022.

Aeronave	Movimentos
AT76	3.208
A320	2.382
AT75	1.350
C152	1.294
PA34	1.027
AS50	964
BE58	709
A20N	582
C172	567
SR22	439
C525	438
PAUL	400
A319	395
BE9L	295
PA46	279
Total de movimentos	19.143

Fonte: Adaptado de DECEA (2023).

Tabela 6 – Número de movimentos anuais do Aeroporto de Porto Seguro (BA), por modelo de aeronave em 2022.

Aeronave	Movimentos
B738	3.194
E195	2.747
A320	2.585
A20N	2.009
A321	1.718
B38M	988
R44	850
AT72	532
E295	485
C208	449
E110	411
AT75	308
PA34	304
AS50	296
BE9L	222
Total de movimentos	21.267

Fonte: Adaptado de DECEA (2023).

Foram selecionados modelos de aeronaves para compor o mix de projeto, priorizando aqueles que representavam a maioria dos movimentos nos aeródromos mais movimentados do Brasil em 2022, de acordo com o anuário do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). O número de decolagens anuais de cada modelo no mix de aeronaves foi definido com base nas informações obtidas nos três aeródromos analisados, que possuem valores semelhantes de movimentos totais entre si.

Movimento de uma aeronave é o termo genérico utilizado para caracterizar um pouso, uma decolagem ou um toque e arremetida de aeronaves civis no aeródromo, portanto, o número de decolagens anuais de cada aeronave do mix fornecido ao FAARFIELD representa metade do valor de movimentos anuais previsto. A Tabela 7 representa o mix de aeronaves de projeto utilizado no dimensionamento dos pavimentos aeroportuários deste trabalho.

Tabela 7 – Mix de aeronaves de projeto.

Aeronave	Movimentos anuais	Decolagens anuais
AT76	7.000	3.500
A320	4.000	2.000
B738	4.000	2.000
E195	2.500	1.250
C208	2.500	1.250
Total	20.000	10.000

Fonte: Autor (2023).

Os modelos escolhidos detêm pesos máximos de decolagem que variam de 3,9 até 79,2 toneladas e possuem versões tanto para transporte de passageiros quanto para transporte de cargas. O modelo AT76 não consta originalmente na biblioteca de aeronaves do FAARFIELD 2.0, sendo substituído pelo modelo Fokker 50 que está presente no *software* e possui peso e configuração de trens de pouso semelhantes. Algumas características dos modelos estão expressas na Tabela 8:

Tabela 8 – Características das aeronaves do mix de projeto.

Aeronave	Nome comercial	Comprimento de pista mínimo para decolagem (km)	Aeronave utilizada no FAARFIELD	Peso bruto da aeronave no FAARFIELD (kg)
AT76	ATR-72-600	1,16	Fokker 50	20.820
A320	A320-200	2,10	A320-200 opt	78.400
B738	B737-800	2,40	B737-800	79.242
E195	E-195	2,17	EMB-195 STD	48.950
C208	C208 Grand Caravan	0,7	Cessna 208B Grand Caravan	3.969

Fonte: Adaptado de Aviação Comercial (2023).

Durante a etapa da escolha do tráfego no *software* ainda é possível inserir uma taxa de crescimento anual do número de decolagens de cada aeronave. Foi estipulado um valor de taxa de crescimento de 3% ao ano para todas as aeronaves, a fim de representar o crescimento do setor de transporte aéreo de passageiros observado, ao longo da vida útil de projeto.

5.2 MATERIAIS DOS PAVIMENTOS

Após definir os dados de projeto, estudo do tráfego, mix de aeronaves, número de decolagens anuais e sua taxa de crescimento, é possível iniciar o dimensionamento das camadas do pavimento. Na escolha dos materiais, optou-se por adotar as estruturas padrões do FAARFIELD 2.0 para pavimentos do tipo rígido (*New Rigid*) e flexível (*New Flexible*). Para ambos, foi estabelecida uma vida útil de projeto de 20 anos.

Ao definir o tipo de pavimento da amostra, o programa carrega dados de materiais específicos para cada camadas do pavimento, denominados a partir de uma nomenclatura que consta na circular AC 150/5320-6G (FAA, 2021). As Tabelas 9 e 10 contém as os materiais utilizados pelo *software* nessas configurações.

Tabela 9 – Materiais utilizados nas camadas do pavimento flexível.

Camada	Material adotado no FAARFIELD	Módulo de Elasticidade (MPa)
Revestimento	P-401/P-403 Mistura asfáltica	1378,95
Base	P-401/P-403 Binder	2757,90
Sub-base	P-209 Agregado Britado	Variável
Subleito	-	Variável

Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 – Materiais utilizados nas camadas do pavimento rígido.

Camada	Material adotado no FAARFIELD	Módulo de Elasticidade (MPa)
Revestimento	P-501 Pavimento de concreto de cimento	27759,04
Base	P-304 Agregado tratado com cimento	3447,38
Sub-base	P-209 Agregado Britado	Variável
Subleito	-	Variável

Fonte: Autor (2023).

Com o propósito de abranger condições diversas que possam existir em projetos futuros, foram selecionados diferentes valores de módulo de elasticidade do subleito dentro dos limites permitidos pelo FAARFIELD, para o cálculo das espessuras dos pavimentos. Ao modificar o valor do CBR para os pavimentos flexíveis ou o módulo de

reação (k) para os pavimentos rígidos, o programa ajusta automaticamente o módulo de elasticidade do subleito. Para dimensionamentos dos pavimentos flexíveis, conseguiu-se obter a espessura da base em cada caso alterando o módulo de elasticidade do subleito, junto da variação do CBR.

Nos pavimentos rígidos, além da capacidade de suporte do subleito, é possível alterar ainda a resistência do concreto da placa à tração na flexão. Deste modo, inicialmente realizou-se o dimensionamento das camadas alterando o valor do módulo de elasticidade do subleito, assim como nos pavimentos flexíveis, e mantendo a resistência do concreto no valor padrão de 4,48 MPa. Posteriormente o cálculo foi realizado com alterações na resistência do concreto, agora com o módulo de elasticidade do subleito constante em 103,42 MPa, tornando possível a determinação da espessura adequada da placa para o tráfego considerado.

5.3 CUSTO DE EXECUÇÃO DOS PAVIMENTOS

Com os resultados obtidos no processo de dimensionamento, tornou-se viável a elaboração de um comparativo de custo da execução entre os pavimentos. As composições e os custos unitários de cada processo foram obtidos a partir da base de dados SINAPI Aeroportuário, disponibilizada no portal da Infraero (2022). Nas Tabelas 11 e 12, encontram-se os resumos das composições e custos unitários necessários para a execução de cada pavimento projetado.

Devido ao fato deste trabalho não possuir comprimento e largura definidos de pista, as quantidades de material utilizadas foram calculadas por metro quadrado de pavimento construído. Desta maneira, algumas quantidades são função das respectivas espessuras do serviço a ser realizado e, conseqüentemente, o volume de material adotado para o cálculo do preço final é o geométrico e não o volume real de compra.

5.3.1 Cálculo do custo de execução do pavimento flexível

Tabela 11 – Serviços e custos para execução do pavimento flexível.

Serviço	Unidade	Preço unitário
FORNECIMENTO E EXECUÇÃO DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE - CBUQ PARA CAPA DE ROLAMENTO - JORNADA DIÁRIA DE OITO HORAS SEM RESTRIÇÃO OPERACIONAL. AF_ITA_09/2014	M ³	R\$ 632,42
FORNECIMENTO E EXECUÇÃO DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE - CBUQ PARA CAMADA DE BINDER - JORNADA DIÁRIA DE OITO HORAS SEM RESTRIÇÃO OPERACIONAL. AF_ITA_09/2014	M ³	R\$ 621,23
BASE DE BRITA GRADUADA SIMPLES (NÃO INCLUI TRANSPORTE) - EXECUÇÃO EM JORNADA DIÁRIA DE OITO HORAS SEM RESTRIÇÃO OPERACIONAL. AF_ITA_09/2014	M ³	R\$ 268,17
EXECUÇÃO DE IMPRIMAÇÃO DE BASE OU SUB-BASE DE PAVIMENTAÇÃO COM ASFALTO DILUÍDO CM-30, INCLUINDO ENSAIOS DE CONTROLE TECNOLÓGICO. AF_ITA_09/2014	M ²	R\$ 0,50
EXECUÇÃO DE PINTURA DE LIGAÇÃO PARA PAVIMENTAÇÃO COM EMULSÃO RR-1C, INCLUINDO ENSAIOS DE CONTROLE TECNOLÓGICO. AF_ITA_09/2014	M ²	R\$ 0,36

Fonte: Adaptado de Infraero (2022).

O cálculo dos quantitativos para execução dos serviços foi realizado da seguinte maneira:

- Volume de CBUQ para capa de rolamento

$$V_{CBUQ} = 1 \cdot 1 \cdot e_{CBUQ} = e_{CBUQ} \text{ m}^3/\text{m}^2$$

- Volume de CBUQ para camada de *binder*

$$V_{binder} = 1 \cdot 1 \cdot e_{binder} = e_{binder} \text{ m}^3/\text{m}^2$$

- Volume de agregado britado

$$V_{BGS} = 1 \cdot 1 \cdot e_{BGS} = e_{BGS} \text{ m}^3/\text{m}^2$$

- Área de imprimação

$$A_{imprimer} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2$$

- Área de ligante: Foram consideradas duas camadas de aplicação para o ligante, sendo uma delas entre as camadas de revestimento asfáltico e binder e a outra entre a camada de binder e agregado britado.

$$A_{ligante} = 2 \text{ m}^2/\text{m}^2$$

5.3.2 Cálculo do custo de execução do pavimento rígido

Tabela 12 – Serviços e custos para execução do pavimento rígido.

Serviço	Unidade	Preço unitário
FORNECIMENTO E COLOCAÇÃO DE MANTA PLÁSTICA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO-CIMENTO. AF_ITA_09/2014	M ²	R\$ 2,97
FORNECIMENTO E EXECUÇÃO DE BARRAS DE AÇO PARA TRANSFERÊNCIA DE CARGA (PASSADORES) EM PAVIMENTOS DE CONCRETO-CIMENTO. AF_ITA_09/2014	KG	R\$ 20,95
FORNECIMENTO E EXECUÇÃO DE BARRAS DE AÇO PARA LIGAÇÃO DE PLACAS (LIGADORES) EM PAVIMENTOS DE CONCRETO-CIMENTO. AF_ITA_09/2014	KG	R\$ 13,66
EXECUÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO OU CONSTRUÇÃO COM FORNECIMENTO DE MATERIAL - ESP 06 MM. AF_ITA_09/2014	M	R\$ 2,23
FORNECIMENTO, LANÇAMENTO, ADENSAMENTO, ACABAMENTO E CURA DE CONCRETO FCK = 35 MPA E FCTK = 5,0 MPA. AF_ITA_09/2014	M ³	R\$ 615,39
EXECUÇÃO DE BASE OU SUB-BASE C/ BRITA GRADUADA TRATADA C/ CIMENTO - 3% EM PESO - INCLUSIVE FORNECIMENTO DOS MATERIAIS. AF_ITA_09/2014	M ³	R\$ 307,47
BASE DE BRITA GRADUADA SIMPLES (NÃO INCLUI TRANSPORTE) - EXECUÇÃO EM JORNADA DIÁRIA DE OITO HORAS SEM RESTRIÇÃO OPERACIONAL. AF_ITA_09/2014	M ³	R\$ 268,17

Fonte: Adaptado de Infraero (2022).

As quantidades para execução dessa estrutura foram calculadas como apresentado a seguir:

- Área de manta plástica

$$A_{manta} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2$$

- Juntas de construção e de contração: O Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005) recomenda um comprimento máximo de 4,60 m para juntas transversais de retração com barras de transferência. Para as juntas longitudinais de construção, o manual recomenda uma distância máxima de 3,75 m. Foi adotado, portanto, juntas transversais e longitudinais espaçadas em 4,40 e 3,60 m, respectivamente.

$$J_{long} = \frac{1}{3,60} \cong 0,278 \text{ juntas longitudinais de construção/m transversal}$$

$$J_{transv} = \frac{1}{4,40} \cong 0,227 \text{ juntas transversais de contração/m longitudinal}$$

$$J = (0,278 \cdot 1) + (0,227 \cdot 1) = 0,505 \text{ m/m}^2$$

- Barras de transferência: O cálculo das barras de transferência foi realizado de acordo com as informações recomendadas no manual do DNIT (2005), expressas na Tabela 13.

Tabela 13 – Características das barras de transferência (barras lisas de aço CA-25).

Espessura da placa (cm)	Diâmetro das barras (mm)	Massa nominal da barra (kg/m)	Comprimento unitário (mm)	Espaçamento (mm)
22,5 – 30	32	6,313	460	300
> 30,0	40	9,865	460	300

Fonte: Adaptado de DNIT (2005).

$$b_{transf} = \frac{3,60}{0,30} = 12 \text{ barras/placa}$$

$$\text{Número de placas} = \frac{1}{3,60 \cdot 4,40} \cong 0,063 \text{ placas/m}^2$$

$$l_{aço} = 12 \cdot 0,46 = 5,52 \text{ m de aço/placa}$$

$$l_{aço} = 5,52 \cdot 0,063 \cong 0,349 \text{ m de aço/m}^2$$

$$p_{aço} = 6,313 \cdot 0,349 \cong 2,20 \text{ kg/m}^2, \text{ para placas de concreto até 30 cm,}$$

ou

$$p_{aço} = 9,865 \cdot 0,349 \cong 3,44 \text{ kg/m}^2, \text{ para placas acima de 30 cm.}$$

- Barras de ligação: Para as barras de ligação, ainda utilizando o método do DNIT e assumindo uma espessura média de placa de concreto de 30 cm, foram adotados os parâmetros contidos na Tabela 14.

Tabela 14 – Características das barras de ligação (barras lisas de aço CA-25).

Diâmetro das barras (mm)	Massa nominal da barra (kg/m)	Comprimento unitário (mm)	Espaçamento (mm)
16	1,578	200	600

Fonte: Adaptado de DNIT (2005).

$$b_{lig} = \frac{4,40}{0,60} \cong 7,34 \text{ barras/placa}$$

$$l_{aço} = 7,34 \cdot 0,20 = 1,468 \text{ m de aço/placa}$$

$$l_{aço} = 1,468 \cdot 0,063 \cong 0,093 \text{ m de aço/m}^2$$

$$p_{aço} = 0,093 \cdot 1,578 \cong 0,15 \text{ kg/m}^2$$

- Volume de concreto

$$V_C = 1 \cdot 1 \cdot e_C = e_C \text{ m}^3/\text{m}^2$$

- Volume de agregado britado tratado com cimento

$$V_{BGT C} = 1 \cdot 1 \cdot e_{BGT C} = e_{BGT C} \text{ m}^3/\text{m}^2$$

- Volume de agregado britado

$$V_{BGS} = 1 \cdot 1 \cdot e_{BGS} = e_{BGS} \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Ao final do dimensionamento, o preço por metro quadrado foi aplicado para cada estrutura calculada. Desta forma, obteve-se o preço final da estrutura em função das espessuras de suas camadas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As seções seguintes integram a discussão dos resultados do dimensionamento de cada tipo de pavimento, bem como uma análise comparativa de seus respectivos custos de execução.

6.1 ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS

As espessuras das camadas dos pavimentos do tipo flexível em função do CBR e respectivo módulo de elasticidade (E) do subleito estão expressas nas Tabelas 15. Foram assumidos valores de CBR dentro do limite de 0,7 a 33,3 permitido pelo FAARFIELD.

Tabela 15 – Espessuras obtidas para o pavimento flexível em função do CBR e módulo de elasticidade do subleito.

		CBR						
		2,5	5	10	15	20	25	33,3
E (MPa)		25,86	51,71	103,42	155,13	206,84	258,55	344,39
Espessura (mm)	P-401/P-403 Mistura asfáltica	100	100	100	100	100	100	100
	P-401/P-403 Base estabilizada	125	125	125	125	125	125	125
	P-209 Agregado Britado	767	533	305	187	150	150	150
CDF do Subleito		1	1	1	1	1	0,58	0
CDF do revestimento asfáltico		0,02	0,09	0,27	0,22	0,09	0	0

Fonte: Autor (2023).

As espessuras das camadas do pavimento rígido em função do módulo de reação (k) e respectivo módulo de elasticidade (E) do subleito estão expressas na Tabela 16. Foram assumidos valores de k dentro do limite de 5,7 a 119,5 MPa permitido pelo FAARFIELD.

Tabela 16 – Espessuras obtidas para o pavimento rígido em função do k e módulo de elasticidade do subleito.

		k (MN/m³)						
		15,9	27,3	46,8	64,2	80,3	95,5	119,5
E (MPa)		25,86	51,71	103,42	155,13	206,84	258,55	344,39
Espessura (mm)	P-501 Pavimento de concreto de cimento	397	388	381	381	385	392	407
	P-304 Agregado tratado com cimento	125	125	125	125	125	125	125
	P-209 Agregado Britado	152	152	152	152	152	152	152
CDF da placa de concreto		1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Autor (2023).

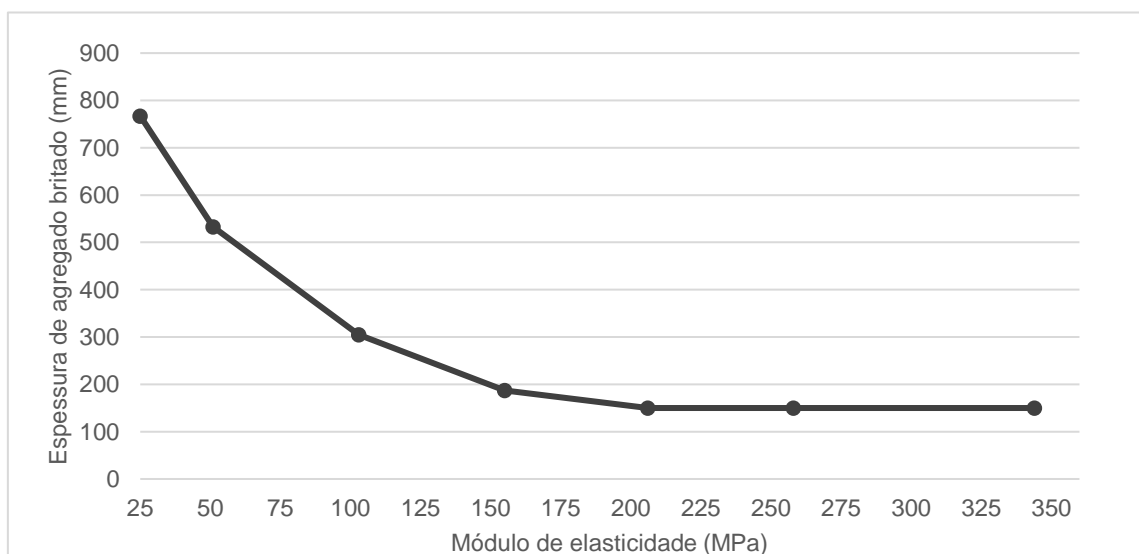
Dos resultados acima, observa-se que o programa calcula sempre a mesma espessura para a camada de base, independentemente do módulo de elasticidade do subleito. Isso ocorre porque o FAARFIELD estabelece espessuras mínimas para as camadas de acordo com o material escolhido e o peso das aeronaves. Em casos em que o peso bruto máximo das aeronaves do mix ultrapassa os 46.360 kg, as camadas de binder P-401/403 e de agregado tratado com cimento P-304 devem possuir no mínimo 125 mm. Portanto, nos resultados da sequência de cálculo do programa considerados neste trabalho, todas as espessuras de base ficaram abaixo do mínimo

requerido, sendo assumido o menor o valor permitido para a base de todas as estruturas.

Nos pavimentos flexíveis, observa-se que ao variar o módulo de elasticidade do subleito (ou o valor do CBR), o FAARFIELD resulta em modificações na espessura de agregado britado, com aumento de espessura para valores menores do módulo de elasticidade e diminuição para valores maiores, conforme a Figura 15. Através desse comparativo é possível estimar o valor da espessura mínima da base a partir do valor módulo de elasticidade, e avaliar o que seria mais vantajoso na tomada de decisão entre o aumento da espessura da base ou a compactação do subleito.

Deve-se atentar ao fato de que a camada de base chegou ao seu valor mínimo no dimensionamento para o caso onde o subleito possui módulo de elasticidade igual a 206,84 MPa (CBR = 20). Após esse valor, o CDF da estrutura assumiu um valor inferior à 1 ao final da vida útil de projeto, o que indica que a estrutura pode estar superdimensionada e poderia ser considerada não razoável do ponto de vista financeiro.

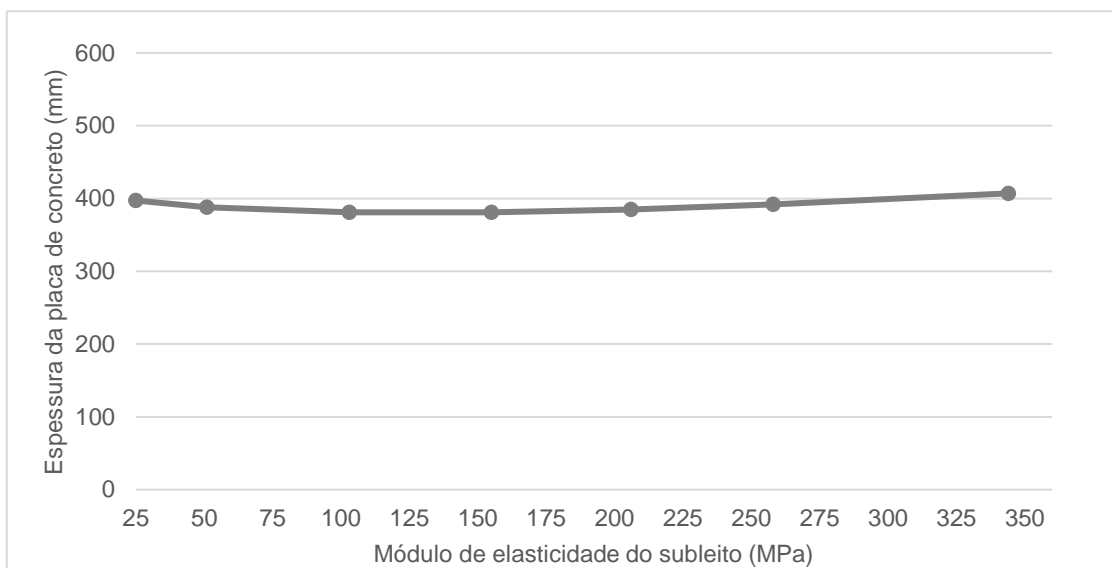
Figura 15 – Espessura da camada de agregado britado em função do módulo de elasticidade do subleito.



Fonte: Autor (2023).

Por outro lado, no caso dos pavimentos rígidos, é evidente que a mudança na capacidade de suporte do subleito causa uma alteração mínima na espessura da placa de concreto, como indicado na Figura 16. O gráfico ilustra a sensibilidade do pavimento rígido à variação do valor do módulo de elasticidade do subleito, atrelado ao módulo de reação.

Figura 16 – Espessura da placa de concreto em função do módulo de elasticidade do subleito.



Fonte: Autor (2023).

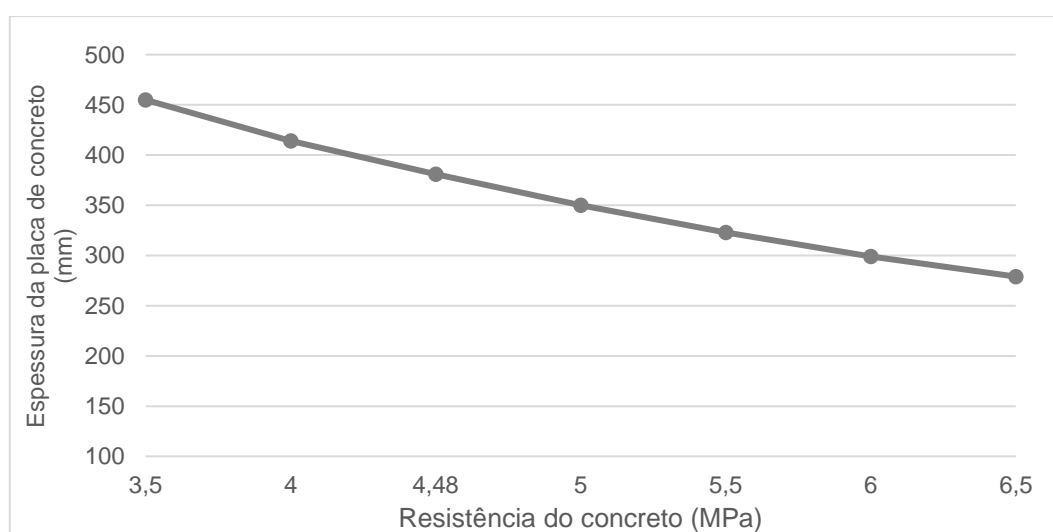
Visto a baixa mudança da espessura de concreto causada pela variação do módulo de elasticidade, foi feito um novo comparativo fixando esse parâmetro em 103,42 MPa, valor padrão do FAARFIELD, agora variando o valor da resistência do concreto à tração na flexão (R), que anteriormente foi adotado como 4,48 MPa. Os valores de resistência do concreto variam dentro da faixa permitida pelo FAARFIELD, de 3,45 a 6,9 MPa. Os resultados do dimensionamento estão expressos na Tabela 17 e representados na Figura 17.

Tabela 17 – Espessuras obtidas para o pavimento rígido em função da resistência do concreto.

		R (MPa)						
		3,5	4	4,48	5	5,5	6	6,5
Espessura (mm)	P-501 Pavimento de concreto de cimento	455	414	381	350	323	299	279
	P-304 Agregado tratado com cimento	125	125	125	125	125	125	125
	P-209 Agregado Britado	152	152	152	152	152	152	152
CDF da placa de concreto		1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Autor (2023).

Figura 17 – Espessura da camada de revestimento em função da resistência do concreto.



Fonte: Autor (2023).

A variação da resistência da camada de revestimento de concreto teve um impacto mais significativo na espessura dessa camada em comparação com a primeira análise, que envolveu a variação do módulo de elasticidade do subleito. Isso se deve ao fato de que, nos pavimentos rígidos, devido ao alto valor do módulo de elasticidade do concreto, a camada de revestimento também exerce função de base e absorve maior parte das tensões atuantes. Paralelamente, a camada subjacente desempenha um papel semelhante ao de uma camada de sub-base, que neste caso se manteve com a espessura mínima de 125 mm, assim como no cálculo anterior.

Em síntese, quanto ao subleito, é válido afirmar que qualquer modificação em sua resistência terá um efeito direto na espessura das outras camadas do pavimento flexível. No entanto, nos pavimentos rígidos, o subleito tem um impacto menos expressivo, uma vez que a sua alteração afeta principalmente a camada da placa de concreto, que é responsável por suportar a maior parte da carga proveniente do tráfego.

6.2 ANÁLISE DO PCR

Calculadas as espessuras das camadas para cada caso, foi realizada uma avaliação dos pavimentos em uma condição atípica de tráfego, através do PCR calculado pelo FAARFIELD. Em decorrência da pequena variação das espessuras do pavimento rígido com a modificação do módulo de elasticidade do subleito, optou-se por analisar o PCR de acordo com a variação da resistência do concreto, em um comparativo com os resultados obtidos para a estrutura de pavimento flexível.

Para a obtenção dos novos dados, foram fornecidas as estruturas calculadas com o mix de aeronaves inicial, porém agora submetidas à passagem de uma aeronave de maior porte, além das demais. O modelo de aeronave escolhido foi o B777-300 ER, que possui 352.441 kg de peso bruto no *software* e demanda 3,2 km de pista para decolagem (Aviação Comercial, 2023). Foram previstas 3 decolagens anuais ao longo da vida útil dos 20 anos de projeto, sem crescimento anual deste valor. As Tabelas 18 e 19 contém os valores do PCR calculados.

Tabela 18 – PCR do pavimento flexível em função do CBR do subleito.

		CBR do subleito						
		2,5	5	10	15	20	25	33,3
PCR		1204/F/D/ /X/T	522/F/D/ X/T	420/F/B/ X/T	385/F/A/ X/T	440/F/A/ X/T	1895/F/A/ /X/T	814/F/A/ X/T

Fonte: Autor (2023).

Tabela 19 – PCR do pavimento rígido em função da resistência do concreto.

		Resistência da placa de concreto (MPa)						
		3,5	4	4,48	5	5,5	6	6,5
PCR		996/R/B/ W/T	533/R/B/ W/T	534/R/B/ W/T	535/R/B/ W/T	534/R/B/ W/T	534/R/B/ W/T	538/R/B/ W/T

Fonte: Autor (2023).

Dentre os resultados obtidos nesta etapa, percebe-se o uso da letra “T” em todos os casos. Segundo o a ANAC (2022a), para seu uso, faz-se necessário o conhecimento da estrutura. A avaliação estrutural dos pavimentos com foco na determinação do PCR deve ser conduzida de modo com que haja informações sobre espessuras das camadas e materiais constituintes, módulo de elasticidade de cada camada, incluindo o módulo do subleito; e coeficiente de Poisson de cada camada. Todas essas informações estão presentes no *software* de dimensionamento, fato que explica o resultado para essa classificação.

Os códigos “F” e “R” definem a tipologia do pavimento, conforme mostrado na Tabela 3. A FAA sugere na AC 150/5335D (2022) que pavimentos flexíveis com espessura acima de 10 cm podem ser designados com os códigos “X” ou “Y”. No caso de pavimentos com espessura menor e asfalto de menor qualidade, a recomendação é que não se ultrapasse o código “Y”. Por outro lado, para os pavimentos rígidos, o FAARFIELD 2.0 atribui o código “W”, apesar do responsável pelo cálculo possui a flexibilidade de ajustar esse parâmetro caso o concreto não apresente boa qualidade.

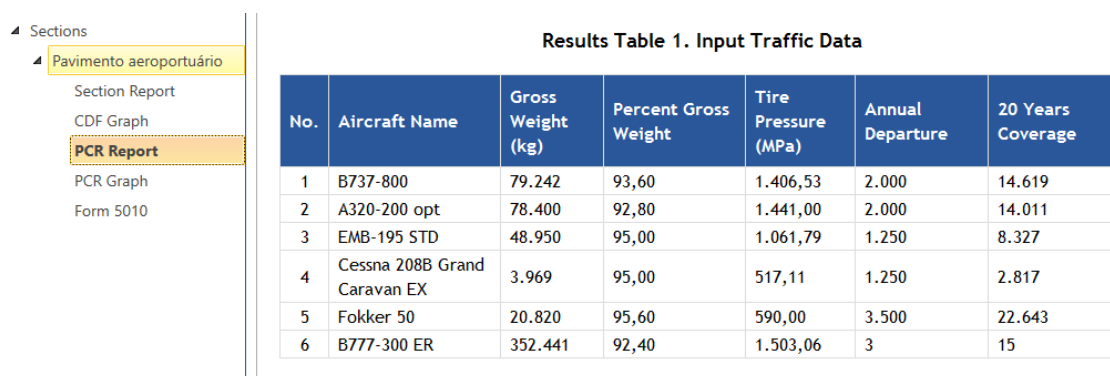
Existem cenários em que os valores de PCR podem ultrapassar, em muitas vezes, os maiores ACR do mix de aeronaves. Nessas situações em que os pavimentos apresentam CDF igual ou próximos a zero, o que resulta numa vida útil infinita, a FAA propõe pela AC 150/5335-5D que seja adotada uma alternativa conservadora, com PCR

equivalente a 1,25 vezes o maior ACR encontrado. Pode-se notar que, no dimensionamento do pavimento flexível, após aumentos subsequentes do valor do PCR juntamente com o aumento da resistência do subleito, a capacidade de carga do pavimento decai abruptamente. Neste caso, para o pavimento flexível calculado com o CBR do subleito igual a 33,3, o FAARFIELD compreende que se trata de uma estrutura superdimensionada.

A FAA estipula que o PCR a ser relatado deve considerar a operação regular da aeronave mais exigente, que serviu como base para a determinação do PCR. A agência americana considera como "aeronave de uso regular" aquela que possui mais de 1.000 passagens nos 20 anos de vida útil padrão do pavimento, indicado como "20 years coverage". Portanto, se o PCR calculado estiver relacionado a uma aeronave com menos de 1.000 passagens para o tempo de vida útil, essa aeronave não é considerada de uso regular e deve ser excluída da lista.

Por meio da opção "PCR Report" do FAARFIELD, é possível acessar informações detalhadas e resultados do cálculo do PCR. Desta forma, temos que o número de passagens anuais da aeronave B777-300 ER, mostrado na Figura 18, é muito inferior à 1000.

Figura 18 – Informações do tráfego adotado para o cálculo do PCR.



The image shows a software interface with a sidebar on the left containing a tree view of sections: 'Sections', 'Pavimento aeroportuário', 'Section Report', 'CDF Graph', 'PCR Report' (highlighted), 'PCR Graph', and 'Form 5010'. The main area displays a table titled 'Results Table 1. Input Traffic Data' with the following data:

No.	Aircraft Name	Gross Weight (kg)	Percent Gross Weight	Tire Pressure (MPa)	Annual Departure	20 Years Coverage
1	B737-800	79.242	93,60	1.406,53	2.000	14.619
2	A320-200 opt	78.400	92,80	1.441,00	2.000	14.011
3	EMB-195 STD	48.950	95,00	1.061,79	1.250	8.327
4	Cessna 208B Grand Caravan EX	3.969	95,00	517,11	1.250	2.817
5	Fokker 50	20.820	95,60	590,00	3.500	22.643
6	B777-300 ER	352.441	92,40	1.503,06	3	15

Fonte: Autor (2023).

Assim sendo, o número de passagens adotado para o modelo B777-300 ER não é suficiente para ser levado em consideração no cálculo do PCR dos pavimentos. Consequentemente, apesar das estruturas tenham sido dimensionadas para o tráfego inicial, entende-se que o baixo volume de movimentos da aeronave mais pesada não é capaz de afetar a capacidade resistiva do pavimento ao longo da vida útil de 20 anos.

Ainda assim, para operações onde a aeronave dispuser de ACR superior em mais de 10% do PCR publicado, a ANAC (2022a) recomenda que seja feita uma análise técnica de modo a avaliar o real impacto na vida útil da estrutura e, portanto, trata-se de análise caso a caso.

Segundo a ANAC, é de responsabilidade do operador de aeródromo determinar se operações com fora da tolerância podem ou não ser realizadas em uma pista de pouso e decolagem específica. Para isso, é essencial que o operador avalie os possíveis impactos da operação com sobrecarga na vida útil da estrutura e os alinhe à política de gerenciamento de pavimentos já estabelecida no aeródromo.

Além disso, é fundamental conduzir uma análise de custo-benefício da decisão, de acordo com a estratégia de negócio em vigor. Essa avaliação pode incluir considerações sobre a redução da vida útil versus o aumento potencial de receita advindo das operações de sobrecarga.

É importante destacar que somente o operador de aeródromo está habilitado a determinar se é justificável adotar operações com sobrecarga, ou seja, quando o ACR ultrapassa o PCR além do limite tolerável. A regulação da aviação civil brasileira também deve ser considerada, pois regulamentos podem proibir operações com sobrecarga. Até o momento da elaboração deste documento, não há proibição de operações com sobrecarga.

6.3 ANÁLISE DE CUSTO

A pesquisa para determinar o preço de execução por metro quadrado de cada tipo de pavimento foi efetuada a partir dos valores de espessuras obtidos na análise em função do módulo de elasticidade do subleito. Nesta análise, foram comparados os resultados dos cálculos das estruturas asfálticas e de concreto em relação ao módulo de elasticidade do subleito. A Tabela 20 contém os resultados dos cálculos realizados a partir dos dados fornecidos pelo SINAPI Aeroportuário.

Tabela 20 – Custo de execução dos pavimentos por metro quadrado em função do módulo de elasticidade do subleito.

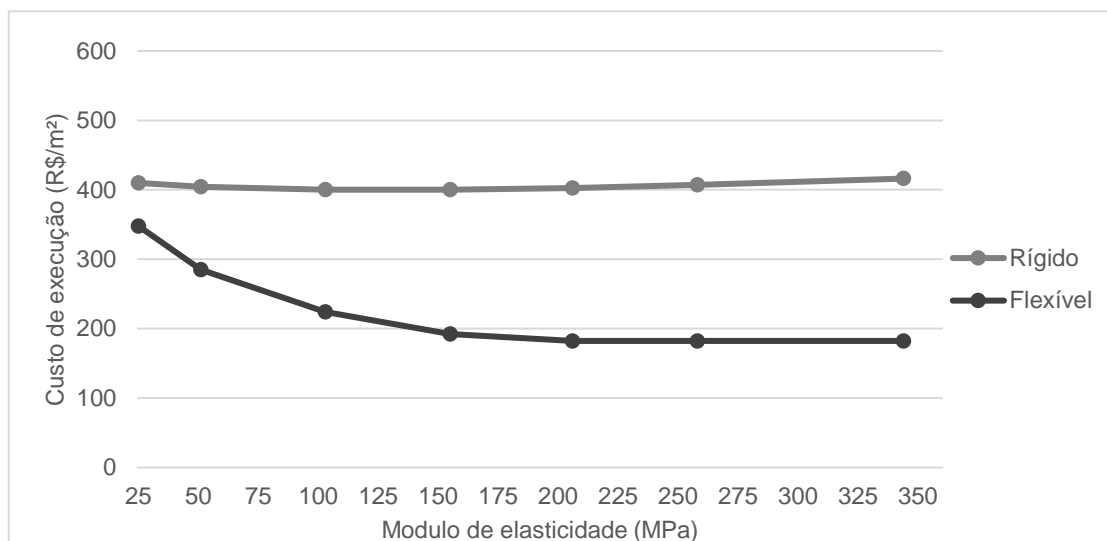
		E (MPa)						
		25,86	51,71	103,42	155,13	206,84	258,55	344,39
Pavimento Flexível	Espessura total (mm)	992	758	530	412	375	375	375
	Preço (R\$/m ²)	347,80	285,05	223,90	192,26	182,34	182,34	182,34
Pavimento Rígido	Espessura total (mm)	674	665	658	658	662	669	684
	Preço (R\$/m ²)	410,02	404,48	400,17	400,17	402,64	380,97	390,20

Fonte: Autor (2023).

Com base nos resultados acima, é possível notar proximidade entre os preços por metro quadrado nos casos de menor módulo de elasticidade do subleito e maior disparidade conforme a resistência do solo aumenta. Isso já era esperado, pois os pavimentos de concreto apresentam maior uniformidade das espessuras em relação à variação do módulo de elasticidade do subleito do que os pavimentos asfálticos.

Contudo, em todos os casos da Tabela 20, o preço de execução do pavimento rígido foi superior ao do flexível. A diferença entre os custos, representada graficamente pela Figura 19, partiu de 18% para o caso de subleito mais frágil considerado e alcançou 128% no caso do subleito mais compacto. Da variação do módulo de elasticidade do subleito, em casos onde o solo é mais compacto, a diferença do valor entre os pavimentos é maior e, portanto, existe a tendência de o pavimento flexível ser mais vantajoso do que o rígido no quesito custo de execução.

Figura 19 – Custo por metro quadrado de pavimento em função do módulo de elasticidade do subleito.



Fonte: Autor (2023).

O aumento da diferença entre os preços poderia ser maior se que a espessura de revestimento asfáltico também variasse na análise, pois é o serviço mais caro da composição adotada para o pavimento flexível. Neste caso, apenas a espessura da base de agregado britado variou, refletindo em uma menor mudança no custo de execução do pavimento asfáltico com a modificação do módulo de elasticidade do subleito.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O foco principal deste estudo foi apresentar a metodologia de dimensionamento de pavimentos aeroportuários para uma pista de pouso e decolagem de um aeródromo regional brasileiro. Para tanto, foram seguidas as diretrizes da FAA apresentadas na AC 150/5320-6G (2021), com uso do *software* FAARFIELD.

Após a escolha do tipo de pavimento, o procedimento envolve a consideração do módulo de elasticidade do subleito, a seleção de materiais para cada camada e a análise de um mix de aeronaves. Neste método, cada aeronave contribui individualmente para o desgaste do pavimento, e a soma dessas contribuições resulta no Fator de Dano Cumulativo (CDF) que, juntamente com a vida útil de projeto desejada, determinam a durabilidade da estrutura.

O FAARFIELD permite dimensionar uma variedade de pavimentos e fundamenta-se em princípios de métodos mecânicos de dimensionamento de pavimentos. Embora esse método ofereça dimensionamentos relativamente precisos e simplificados, sua aplicação eficaz requer ensaios para determinar os parâmetros elásticos dos materiais, prática que ainda é pouco comum no Brasil.

Ademais, é preciso ressaltar que os materiais disponíveis na biblioteca interna do programa não satisfazem todas as exigências dos pavimentos aeroportuários nacionais, pois não refletem plenamente as propriedades dos materiais empregados nas estruturas brasileiras. Essas limitações não invalidam a utilização do *software*, que ainda assim é muito empregado em dimensionamentos no Brasil, através de adaptações permitidas pelo FAARFIELD dos dados de projeto.

Além do dimensionamento das camadas dos pavimentos, o FAARFIELD também foi utilizado na determinação das capacidades resistivas dos pavimentos pelo método ACR/PCR. Deve-se destacar que a validade do PCR está intrinsecamente ligada à validade dos dados utilizados na análise. Conseqüentemente, à medida que os tipos e quantidade de operações das aeronaves evoluem ao longo do tempo, o PCR também se altera. Portanto, sempre que mudanças significativas no mix operacional ou na estrutura do pavimento ocorrerem, é recomendável realizar um novo cálculo do PCR.

É crucial que essas considerações sejam cuidadosamente avaliadas pelo responsável pelo aeródromo. No estudo realizado, a adição do modelo B777-300 ER não foi significativa para a resistência final do pavimento, porém, a omissão de recalcular o PCR quando ocorrem mudanças relevantes no mix operacional resulta na inadequada aplicação do método ACR/PCR e, conseqüentemente, na subutilização da infraestrutura aeroportuária.

Após dimensionar e analisar as estruturas de pavimento, realizou-se um estudo de custos de execução com dados do SINAPI Aeroportuário. Este estudo revelou uma viabilidade econômica aparentemente maior para o pavimento flexível, embora tal conclusão seja questionável sem a consideração do desempenho ao longo da vida útil, incluindo custos de operação e manutenção.

Vale ressaltar que a pesquisa se concentrou exclusivamente no estudo orçamentário dos serviços de pavimentação. A ausência da avaliação dos custos de execução das camadas de terraplenagem e dos projetos complementares (serviços preliminares, drenagem, sinalização, instalações de apoio, etc.) revela uma limitação que carece de maior atenção e aprofundamento, uma vez que a avaliação da viabilidade de uma obra aeroportuária está intrinsecamente ligada ao projeto completo.

Não obstante, do estudo de custo pôde-se obter uma melhor noção do valor financeiro da implementação de uma obra de pavimento aeroportuário. À longo prazo, apesar de envolver gastos elevados e processos atípicos, a construção de um aeroporto pode trazer ganhos muitas vezes superiores ao seu investimento inicial. Além de que, o custo de execução de seu pavimento, mesmo que compreenda boa parte do orçamento total, pode ser inferior ao valor de mercado de uma única aeronave que utilize seus serviços.

Por fim, acredita-se que o desenvolvimento da aviação regional é um tema importante ao crescimento do país. A construção de aeroportos é um trabalho minucioso e que deve atender a vários requisitos de segurança, porém, deve ser incentivado no Brasil e existem meios que tornam esse processo menos complexo. A geração de tecnologia nacional, ou até mesmo a adaptação de metodologias estrangeiras são exemplos desses caminhos.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se: (i) avaliar a reação dos pavimentos para diferentes configurações de tráfego; (ii) analisar o comportamento dos demais tipos de estrutura presentes no FAARFIELD; (iii) dimensionar uma pista de táxi e de estacionamento das aeronaves; (iv) avaliar a vida útil de uma estrutura já existente; (v) aprofundar o estudo de viabilidade dos tipos de pavimento, através dos custos de operação e manutenção; (vi) realizar um estudo comparativo entre a rentabilidade de um aeroporto regional e todos os seus custos de implementação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Anuários do Transporte Aéreo**. Dados Estatísticos e Econômicos. Brasília: Anac, 2000 a 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo/dados-do-anuario-do-transporte-aereo>>. Acesso em: 1 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Instrução Suplementar – IS nº 153.203-001 – Revisão A**. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Entenda como funciona a estrutura de um aeroporto**. Brasília. 2021a. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/08/entenda-como-funciona-a-estrutura-de-um-aeroporto>>. Acesso em 31 ago. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) 154. Emenda nº 7**. Projeto de Aeródromos. Brasília. 2021b.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Manual de Cálculo de PCR de Pavimentos Aeroportuários**. Brasília. 2022a.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Dados Abertos**. Brasília. 2022b. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/aerodromos>>. Acesso em: 1 fev. 2023.

ARAÚJO, J. L. de. **Características Funcionais e Mecânicas de Misturas Asfálticas para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários**. 2009. 147 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2009.

AVIAÇÃO COMERCIAL. **Aeronaves**. 2023. Disponível em: <<http://www.aviacaocomercial.net/aeronaves.htm>>. Acesso em: 01 ago. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE - CNT. **Transporte Rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. Brasília: CNT, 2017.

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

BERNUCCI, L. P.; MOTTA, L. M. G. da.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008.

DECEA. **Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2022**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: < <https://performance.decea.mil.br/produtos/anuario-estatistico/>>. Acesso em: 1 ago. 2023.

DUTRA, J. C.; OLIVEIRA, F. A. F. DE; FREITAS, R. M. S. **Regulação e infraestrutura: em busca de uma nova arquitetura**. Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 1 maio 2018.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation - AC No: 150/5320-6D**. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 1995.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation - AC No.150/5320-6E**. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 2009a.

FAA. **FAARFIELD – User manual**. U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 2009b.

FAA. **FAA Pavement Design: AC 150/5320-6E – FAARFIELD**. Federal Aviation Administration. In: 2009 PCC Workshop: Indiana Chapter – American Concrete Pavement Association. Indianapolis, IN, USA, 2009c.

FAA. **Standard Specifications for Construction of Airports – AC No. 150/5370-10H**. Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. Washington, DC, USA, 2018.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation – AC No.150/5320-6F**. Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. Washington, DC, USA, 2016.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation – AC No.150/5320-6G**. Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. Washington, DC, USA, 2021.

FAA. **Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR – AC No. 150/5335-5D 2022**. Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. Washington, DC, USA, 2022.

FERNANDES, E.; PACHECO, R. R. **Transporte Aéreo no Brasil: uma visão de mercado**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

FONSECA, O. A. **Manutenção de pavimentos de aeroportos**. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Divisão de Estudos e Projetos de Infraestrutura. Ministério da Aeronáutica. Brasília, 1990.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentos rígidos. 2.ed.** Rio de Janeiro, 2005.

GOLDNER, L. G. **Apostila de Aeroportos**. Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

HUANG, Yang H. **Pavement analysis and design**. 2nd ed. New Jersey: Pearson, 2004.

ICAO. **The World of Air Transport in 2018**. Disponível em: <<https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx>>. Acesso em: 20 jan. 2023.

ICAO. **The World of Air Transport in 2019**. Disponível em: <<https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/the-world-of-air-transport-in-2019.aspx>>. Acesso em: 20 jan. 2023.

ICAO. **“Airports”, Volume I do Anexo 14 da Convenção de Aviação Civil Internacional de Chicago**. Montreal, Canadá. 1944.

INFRAERO. **Relatório de Informação das Pistas**. Empresa Brasileira de InfraEstrutura Aeroportuária. Superintendência de Empreendimentos de Engenharia. Diretoria de Engenharia. Brasília, 2008.

INFRAERO. **SINAPI Aeroportuário**. 2022. Disponível em: <<https://transparencia.infraero.gov.br/sinapi-aeroportuario/>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Manual de Projetos Aeroportuários**. 1. ed. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Aviação Civil, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-aereo/copy_of_MInfraManual_AeroportuarioSAC_final.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2023.

OLIVEIRA, F.H.L. **Proposição de Estratégias de Manutenção de Pavimentos Aeroportuários Baseadas na Macrot textura e no Atrito: Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza.** 2009. 178 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

RAMOS, B. A. S. et al. **Aplicação de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA ao Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek.** Revista Transportes, v. 25, n. 4, p. 57-67, 2017.

RIOGALEÃO. **Declaração de Capacidade Operacional Galeão.** Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: <
<https://web.archive.org/web/20161006094338/http://www2.anac.gov.br/slot/novas/DeclaracoesDeCapacidade/arquivos/GIG.pdf>>. Acesso em 31 ago. 2023.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação: vol. 1.** 2ª ed. São Paulo: Pini, 2007.

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