



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

MATEUS DO NASCIMENTO LIRA

**ANÁLISE DE RESULTADOS DO SOFTWARE FAARFIELD NA VIDA ÚTIL DE
PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS**

FORTALEZA
2019

MATEUS DO NASCIMENTO LIRA

ANÁLISE DE RESULTADOS DO SOFTWARE FAARFIELD NA VIDA ÚTIL DE
PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Projeto de Graduação apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda
de Oliveira.

FORTALEZA

2019

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

- L745a Lira, Mateus do Nascimento.
Análise de resultados do software FAARFIELD na vida útil de pavimentos aeroportuários / Mateus do Nascimento Lira. – 2019.
87 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.
1. FAARFIELD. 2. Pavimento aeroportuário. 3. Vida útil. 4. Sensibilidade. I. Título.

CDD 620

MATEUS DO NASCIMENTO LIRA

ANÁLISE DE RESULTADOS DO SOFTWARE FAARFIELD NA VIDA ÚTIL DE
PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Projeto de Graduação apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovada em: 05 / 12 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. MSc. Antônia Fabiana Marques Almeida
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

À minha amada mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira, pela excelente orientação, pela confiança, pelos puxões de orelha, pela parceria e pela paciência, muito antes do início do processo de desenvolvimento do Projeto de Graduação.

À Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso, pela atenção que empenhou enquanto trabalhamos juntos e pela imensa compreensão no momento em que precisei tomar decisões difíceis. Obrigado também por ter aceitado participar da banca examinadora, continuando ao meu lado nesse fechamento de ciclo apesar dos caminhos que o PG me fez tomar.

À Profa. MSc. Antônia Fabiana Marques Almeida, por ter aceitado participar da banca examinadora e pelas valiosas sugestões e colaborações.

À minha mãe, a quem dedico este trabalho, não como conteúdo, mas como símbolo da maior conquista da minha vida até o momento. A mulher mais importante da minha vida sempre receberá todos os louros que possam ser postos na minha cabeça, já que a ela devo todas as minhas vitórias.

À minha irmã, Lia, por ser a companheira inseparável de sempre. Obrigado por ter sido minha força nos momentos difíceis, principalmente nos mais recentes, mesmo que sem saber.

A todos os meus familiares, por terem me apoiado sempre e da forma necessária. Sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu namorado, Matheus Bastos, por todo o amor, companheirismo e apoio que me deu desde que me conheceu. Chegou na minha vida em uma das fases mais conturbadas e mesmo assim me estendeu a mão e o coração, e a partir de então tudo tem sido mais leve. Muito obrigado, meu amor.

Às minhas amigas maravilhosas Ana Cristina Silveira e Andrezza Almeida, por terem sido pessoas fundamentais para a conclusão deste curso. Um imenso obrigado também à Dona Marluce Almeida, que me abriu as portas quando precisei, se tornando a amiga mais inesperada, porém nem um pouco menos querida. Nessa vida onde já tenho pra lá de sete mães, ganhei mais uma.

Aos amigos que a UFC me trouxe, e que tratou de condensar num grupo chamado Panelinha. A Universidade, todos dizem, é um período que deixa saudades, e vocês me fizeram compreender bem o que essa máxima significa. Uma parte da minha formação também devo a vocês, pela ajuda e companheirismo que sempre me puseram disponíveis.

À Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), por ter cedido os dados utilizados neste trabalho.

RESUMO

O FAARFIELD, *software* de projeto de pavimentos aeroportuários desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA), é a ferramenta utilizada no Brasil para projeto e análise de pavimentos aeroportuários. Análises de pavimentos no FAARFIELD resultaram em vidas úteis superiores a um milhão de anos, com variabilidade alta, da ordem de centenas de milhares de anos para pequenas alterações nas espessuras das camadas de base e sub-base. Essa variabilidade pode levar os tomadores de decisão a adotarem soluções pouco eficientes, o que, somado ao fato de o FAARFIELD ser uma ferramenta de uso difundido em análises de pavimentos aeroportuários, cria a necessidade de se compreender a variabilidade desses dados. Assim, esta pesquisa tem como objetivo principal estudar a sensibilidade dos dados que o *software* FAARFIELD gera quando utilizado na realização de análises de vida útil de pavimentos aeroportuários. Para tanto, séries de valores de vida útil foram gerados, com variações no volume de tráfego e na espessura das camadas de base e sub-base. Para a variação do tráfego, utilizaram-se os *mixes* de quatro aeroportos: Aeroporto Regional do Cariri, Aeroporto Internacional de Fortaleza, Aeroporto Internacional de São Paulo e Aeroporto Internacional de Atlanta. Para as espessuras estudadas, inicialmente os valores de vida útil aumentaram para reduções na espessura da estrutura, além de o FAARFIELD ter calculado valores de vida útil repetidos para pavimentos que tivessem a mesma espessura total, independente da combinação de espessuras entre base e sub-base. Para as análises realizadas, inicialmente a sensibilidade para a alteração na espessura da base foi pequena, aumentando para dimensões inferiores a 215 mm e continuando alta para qualquer espessura menor que esse valor. Conforme se aumentava o volume de tráfego, menor era a variabilidade verificada para as alterações na espessura da base (menor variância amostral dos dados gerados) e menores os valores de sensibilidade. As mesmas análises realizadas para a camada de base foram repetidas para a camada de sub-base, no entanto sem apresentar resultados que permitissem identificação de padrões de influência. Concluiu-se, assim, que a vida útil do *software* FAARFIELD é sensível às mudanças na camada de base, sendo a variabilidade dos dados menor quanto maior o volume de tráfego. Para a análise da influência da sub-base, o conjunto de dados utilizado não foi de tamanho suficiente para que se pudesse concluir como se comporta a vida útil para alterações nessa camada. Contudo, os resultados mostraram que existe influência da alteração dessa camada na sensibilidade da vida útil.

Palavras-chave: FAARFIELD. Pavimento aeroportuário. Vida útil. Sensibilidade.

ABSTRACT

The FAARFIELD, an airport pavement project software developed by Federal Aviation Administration (FAA), is the tool used in Brazil for design and analysis of airport pavements. Pavement analyzes using FAARFIELD resulted in pavement lives longer than a million years and with high variability, on the order of hundreds of thousands of years to small changes in base and subbase layer thicknesses. This high variability can lead decision makers to adopt inefficient solutions, what creates, in addition to the fact that FAARFIELD is a tool widely used in airport pavement analysis, the need to understand the variability of these data. Thus, this research has as its main objective to study the sensitivity of the data that FAARFIELD software generates when used in the analysis of airport pavement life. For this, series of pavement useful life were generated with variations in traffic volume and base and subbase layer thicknesses. To the traffic volume variation were used four mixes of four airports: Cariri Regional Airport, Fortaleza International Airport, São Paulo International Airport and Atlanta International Airport. For the studied thicknesses, the pavement life initially increased for reductions in the structure thickness, and FAARFIELD calculated repeated pavement life values to pavements with same total thickness, regardless of the combination among base and subbase layer thicknesses. For the performed analyzes, the sensitivity for the change in the base layer thickness was initially small, increasing sharply from dimensions less than 215 mm and remaining high for any thickness less than this value. As the traffic volume was increased, smaller was the data variation for changes in base layer thickness (lower sample variance of the generated data) and smaller was the sensitivity values. The same analyzes performed to the base layer were repeated for the subbase layer, however they did not present results that allowed the identification of influence patterns of the changes in subbase layer to pavement life results. It leads to the conclusions that the pavement life calculated by FAARFIELD software is sensitive to changes in base layer, being the data variability smaller to the higher the traffic volume is. For the subbase layer influence the used data amount was not enough to conclude how the pavement life behaves for changes in this layer. However, the results showed that there is influence of the changes in the subbase layer to the sensitive of pavement life.

Keywords: FAARFIELD. Airport pavement. Pavement life. Sensitivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de CDF do FAARFIELD	23
Figura 2 – Largura efetiva dos pneus	24
Figura 3 – Aeroporto Regional do Cariri	35
Figura 4 – Aeroporto Internacional de Fortaleza	36
Figura 5 – Aeroporto Internacional de São Paulo	37
Figura 6 – Aeroporto Internacional de Atlanta	38
Figura 7 – Esquema da estrutura projetada no FAARFIELD	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores de vida útil em função da espessura da base; Aeroporto Regional do Cariri	49
Gráfico 2 – Sensibilidade dos resultados de vida útil à variação da espessura da base para o Aeroporto Regional do Cariri	53
Gráfico 3 – Sensibilidade dos resultados de vida útil à variação da espessura da base para os quatro aeroportos	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espessuras mínimas para camadas de pavimentos flexíveis no FAARFIELD	25
Tabela 2 – Código de referência de aeródromos ICAO, primeiro dígito	31
Tabela 3 – Código de referência de aeródromos ICAO, segundo dígito	32
Tabela 4 – Classes de aeródromos	32
Tabela 5 – Classes de aeródromos	33
Tabela 6 – <i>Mix</i> do Aeroporto Regional do Cariri em 2018	40
Tabela 7 – <i>Mix</i> do Aeroporto Internacional de Fortaleza em 2016	40
Tabela 8 – <i>Mix</i> do Aeroporto Internacional de São Paulo em 2011	40
Tabela 9 – <i>Mix</i> do Aeroporto Internacional de Atlanta em 2011	41
Tabela 10 – Espessuras das camadas calculadas pelo FAARFIELD	44
Tabela 11 – Intervalos de valores de espessura de base e sub-base utilizados nos cálculos de tempo de vida útil	45
Tabela 12 – Valores de vida útil de projeto para o Aeroporto Regional do Cariri (em anos)	46
Tabela 13 – Sensibilidade dos dados de vida útil à variação da espessura da base para o Aeroporto Regional do Cariri	51
Tabela 14 – Mudança dos valores de vida útil entre células vizinhas para variação na espessura da base para o Aeroporto Regional do Cariri (em %)	52
Tabela 15 – Sensibilidade dos dados de vida útil à variação da espessura da sub-base para o Aeroporto Regional do Cariri	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional da Aviação Civil
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CDF	<i>Cummulative Demage Factor</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAARFIELD	<i>Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design</i>
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
ICAO	<i>Internacional Civil Aviation Organization</i>
LEDFAA	<i>Linear Elastic Design Federal Aviation Administration</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problema da pesquisa	15
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	16
1.4	Estrutura do trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Tipos de pavimentos	19
2.2	O método de análise do FAARFIELD	21
2.3	Estudos de sensibilidade de dados	28
2.4	Classificação de aeroportos	31
3	MÉTODO DE PESQUISA	34
3.1	Aeroportos de estudo	34
<i>3.1.1</i>	<i>Aeroporto Regional do Cariri</i>	34
<i>3.1.2</i>	<i>Aeroporto Internacional de Fortaleza</i>	35
<i>3.1.3</i>	<i>Aeroporto Internacional de São Paulo</i>	36
<i>3.1.4</i>	<i>Aeroporto Internacional de Atlanta</i>	37
3.2	Método de pesquisa	38
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	44
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	59
5.1	Principal conclusão	59
5.2	Principais constatações quanto às mudanças na camada de base	59
5.3	Principais constatações quanto às mudanças no volume de tráfego	59
5.4	Principais constatações quanto às mudanças na camada de sub-base	60
5.5	Limitações da pesquisa	60
5.6	Recomendações para trabalhos futuros	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS DE VIDA ÚTIL, EM ANOS	66
	APÊNDICE B – TABELAS DE RESULTADOS DE SENSIBILIDADE PARA A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA BASE	69

APÊNDICE C – TABELAS DE MUDANÇA DOS VALORES DE VIDA ÚTIL ENTRE CÉLULAS VIZINHAS PARA A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA BASE, EM %	72
APÊNDICE D – GRÁFICOS DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS DE VIDA ÚTIL PARA A VARIAÇÃO DA ESPESSURA BASE	75
APÊNDICE E – TABELAS DE SENSIBILIDADE DOS VALORES DE VIDA ÚTIL PARA A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA SUB-BASE	75
ANEXO A – MIX UTILIZADO PARA O DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS	78
ANEXO B – SEÇÕES TRANSVERSAIS DIMENSIONADAS NO LEDFAA PARA AS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	81
ANEXO C – RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	82
ANEXO D – CARTAS DE AERÓDROMO.....	84

1 INTRODUÇÃO

O Brasil passa, desde 2011, por fase de intensa mudança em seu cenário de infraestrutura aeroportuária, promovida pelas concessões de aeroportos à iniciativa privada. Essa mudança acontece não apenas no modelo do sistema de gestão, mas também nas características físicas dos sítios aeroportuários, uma vez que o Estado, para realizar a concessão, exige planos de manutenção, readequação ou expansão das estruturas existentes.

Entre as modificações da parte física dos sítios, podem ser citadas as atividades de reforço ou construção/reconstrução de pistas de pouso e decolagem e de *taxiways*. Segundo Taffe Júnior (2002), projetos de pavimentos novos ou restauração de pavimentos deteriorados, no Brasil, se fundamentam principalmente no método proposto pela *Federal Aviation Administration* (FAA).

Essa metodologia era, inicialmente, empírica, e consistia em ábacos que se fundamentavam no Método *California Bearing Ratio* (CBR) de dimensionamento e na consideração de uma aeronave de projeto. Em 2009, porém, a FAA remodelou completamente o método, passando a utilizar um *software* baseado em camadas elásticas (para pavimentos flexíveis), método dos elementos finitos (para pavimentos rígidos) e análise de dano acumulado para determinar as dimensões das estruturas de pavimentos aeroportuários. O *software* da FAA, denominado FAARFIELD (*Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*), vem sendo usado desde então, como uma das principais ferramentas para projeto de pavimentos aeroportuários (RAMOS, 2016).

A utilização do FAARFIELD resulta em dados que requerem senso crítico do projetista para decidir entre aceitá-los ou realizar uma nova simulação, resultados esses que apresentam, muitas vezes, grandes diferenças a partir de pequenas modificações dos dados de entrada, tais como espessura das camadas de base e sub-base. Essa sensibilidade dos *outputs* foi o foco do presente trabalho, dada a relevância da compreensão do comportamento dos resultados do *software* para uma correta análise dos dados e seu adequado emprego na concepção de projetos de pavimentos aeroportuários.

O estudo, para abordar diferentes condições de tráfego e pavimento, utilizou informações de quatro aeroportos: (i) Aeroporto Regional do Cariri, (ii) Aeroporto Internacional de Fortaleza, (iii) Aeroporto Internacional de São Paulo e (iv) Aeroporto Internacional de Atlanta. Além de estudar diferentes condições de tráfego (através do uso de quatro aeroportos de tamanhos diferentes), este trabalho também abordará diferentes espessuras de camadas dos pavimentos.

1.1 Problema da pesquisa

A execução de análises de vida útil com a estrutura de uma pista de pouso e decolagem real, com suas reais espessuras de camadas, utilizando o *software* FAARFIELD resultou em vida útil de valor superior a um milhão de anos. Essas mesmas simulações, quando repetidas com pequena alteração nas espessuras das camadas, geraram resultados com grande variabilidade, apresentando diferenças da ordem de centenas de milhares de anos.

Tal variabilidade de resultados a partir de mudanças pequenas nos dados de entrada de um *software* pode ser assumido como um problema caso não haja a compreensão de como se comporta essa variabilidade. Estudo anterior (GARG; GUO; MCQUEEN, 2004), realizado dentro da FAA, própria desenvolvedora do FAARFIELD, apresenta alguns parâmetros que influenciam nos dados de vida útil calculados pelo *software* LEDFAA (*Linear Elastic Design Federal Aviation Administration*), precursor do FAARFIELD. No entanto, até o momento da conclusão deste trabalho, nenhum estudo encontrado pelo autor avaliou a forma como diferentes parâmetros influenciam na variabilidade de resultados de vida útil do FAARFIELD, caracterizando o problema para cuja resolução este trabalho se propõe a contribuir.

1.2 Justificativa

No Brasil, o projeto de pavimentos aeroportuários é feito com o uso do *software* FAARFIELD, desenvolvido pela FAA (TAFJE JÚNIOR, 2002). Além do dimensionamento de pavimentos novos, o *software* possibilita a execução de análises estruturais de pavimentos já construídos, permitindo simulações com alteração na espessura de todas as camadas existentes, bem como inserção de novas (FAA, 2009). Essas análises podem ser utilizadas, por exemplo, como ferramenta de tomada de decisão no desenvolvimento de projetos de reforço em estruturas de pavimentos pré-existent.

Enquanto o resultado dos dimensionamentos do FAARFIELD é dado em espessuras de camadas, para a análise de um pavimento aeroportuário com características quaisquer, os resultados são valores de vida útil da estrutura do pavimento. Esses valores de vida útil são importantes pois consistem no principal parâmetro do *software* a ser utilizado na tomada de decisão. Busca-se fazer com que a estrutura analisada possua vida útil igual ou superior ao horizonte de projeto estabelecido. Logo, o tomador de decisão deve, analisando os resultados obtidos, decidir quais características da estrutura alterar para, então, executar

nova análise no FAARFIELD, repetindo o processo até obter uma estrutura que atenda aos quesitos de técnica e segurança ao mesmo tempo e tanto quanto possível que atenda aos de durabilidade e custo.

Essa forma de processamento dos dados, na qual o projetista consegue simular cenários variados e visualizar o impacto de cada mudança nos resultados, é um benefício promovido pela evolução dos métodos de análise. Os novos métodos possibilitam, aos tomadores de decisão, um entendimento mais amplo do comportamento que será apresentado pelas estruturas projetadas após sua construção, fazendo com que as escolhas sejam mais racionais. Contudo, o emprego de tais ferramentas requer, antes, o conhecimento do seu próprio comportamento, refletido nos dados que elas processam.

No caso do FAARFIELD, a sua grande variabilidade nos resultados de vida útil dificulta o processo de simulação de cenários diferentes, o que pode levar os tomadores de decisão a adotarem soluções pouco eficientes. Considerando que o *software* é ferramenta de uso difundido na análise de pavimentos aeroportuários, torna-se fundamental a compreensão do comportamento dos seus resultados.

1.3 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar a sensibilidade dos dados que o *software* FAARFIELD gera quando utilizado na realização de análises de vida útil de pavimentos aeroportuários.

Para que se alcance o objetivo principal da pesquisa, os seguintes objetivos específicos devem ser também alcançados:

- a) verificar a influência do volume de tráfego na sensibilidade dos dados a partir do uso de quatro tipos distintos de aeroportos, que possuam diferenças de tamanho tais que possibilitem a análise dessa influência;
- b) verificar a interferência das espessuras de camadas da estrutura do pavimento na sensibilidade dos dados;
- c) explicar a variabilidade do conjunto de resultados de acordo com as mudanças nos *inputs*.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco seções, sendo a seção 1 (Introdução) o que contextualiza a sensibilidade de dados, descrevendo o problema relacionado aos pavimentos aeroportuários e apresentando a justificativa da pesquisa. Traz também, os objetivos principal e específicos da pesquisa.

A seção 2 traz uma revisão bibliográfica que aborda os principais pontos necessários à compreensão do trabalho, começando por pavimentos em geral, reduzindo a abrangência aos pavimentos aeroportuários e depois abordando a sensibilidade de dados.

Os métodos utilizados para a obtenção dos dados e para a sua análise estão apresentados na seção 3.

A seção 4 traz os resultados obtidos, fazendo a análise e a discussão dos mesmos.

A seção 5, por fim, condensa as principais conclusões feitas a partir dos resultados obtidos após a realização da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A melhoria dos caminhos ou rotas de passagem é o princípio fundamental do transporte. Foi nesse sentido que a humanidade seguiu, desde a pré-história até hoje, sempre buscando facilitar os movimentos de uma parte a outra. Também foi nessa lógica, numa tentativa de tornar as estradas transitáveis em todas as épocas do ano, que se desenvolveram as primeiras técnicas de pavimentação. Define-se pavimento como a estrutura construída sobre a terraplanagem (ou subleito) que se destina a resistir e distribuir esforços verticais impostos pelo tráfego, melhorar as condições de rolamento (quanto ao conforto e à segurança) e tornar mais durável a superfície do rolamento (SENÇO, 2007).

Balbo (2007) vai além e define pavimento como uma estrutura não perene, formada por camadas sobrepostas compostas por diferentes materiais compactados a partir do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego. Deve fazer isso de maneira durável e com o mínimo custo possível, sempre considerando a execução de manutenções preventivas, corretivas e de reabilitação, obrigatoriamente. O termo “não perene”, juntamente da característica de durabilidade citada e da obrigatoriedade das manutenções, levam a entender que o pavimento, não sendo eterno, é concebido visando seu bom desempenho ao longo de uma vida útil pré-determinada.

As definições apresentadas no parágrafo anterior, voltadas principalmente para os pavimentos rodoviários, podem ser aplicadas também aos pavimentos aeroportuários. Esses, no entanto, apresentam algumas particularidades. A principal delas é que os pavimentos aeroportuários geralmente apresentam espessuras maiores do que as observadas para pavimentos rodoviários, uma vez que as cargas e as pressões de pneus impostas pelas aeronaves são muito maiores do que aquelas aplicadas pelo tráfego rodoviário. Por esse mesmo motivo, pavimentos aeroportuários requerem materiais superficiais de qualidade superior à daqueles aplicados em rodovias (HUANG, 2004).

Outra particularidade do pavimento aeroportuário, quando comparado ao rodoviário, diz respeito ao número de repetições das cargas. No pavimento aeroportuário, esse número é comumente menor que o adotado no rodoviário. O fato de as aeronaves apresentarem pequenos desvios laterais durante as operações, levando os três de pouso a não percorrerem sempre o mesmo caminho na aplicação de cargas, faz com que tenham de ser somadas muitas passagens dos trens de pouso sobre o pavimento para que seja contabilizada uma repetição do carregamento, ao passo que cada passagem do eixo padrão rodoviário é contabilizada como uma repetição da carga (HUANG, 2004).

Diferenças também são identificadas quando se comparam as funções esperadas para esses dois tipos de pavimento. Balbo (2007) ressalta como principal função do pavimento rodoviário a garantia do conforto no deslocamento do veículo, através da criação de uma superfície mais regular, mais aderente e menos ruidosa diante da ação dos pneus. Enquanto isso, a FAA afirma que os pavimentos aeroportuários são construídos para resistir adequadamente às cargas impostas pelas aeronaves e para fornecer uma superfície firme, estável e livre de objetos que ofereçam perigo às aeronaves a qualquer tempo e sob quaisquer condições climáticas (FAA, 2009).

Pavimentos rodoviários e aeroportuários, como já exposto, possuem semelhanças e particularidades. A seção de Revisão Bibliográfica abordará apenas os pavimentos aeroportuários, focando nos principais pontos que relacionam esse tipo de pavimento aos temas abordados neste trabalho.

2.1 Tipos de pavimento

Os pavimentos são geralmente divididos em dois tipos: flexíveis e rígidos. Pavimentos flexíveis são compostos por uma camada consideravelmente fina de revestimento construída sobre camadas de base e sub-base, essas se assentando sobre o subleito. Por sua vez, pavimentos rígidos consistem de placas de concreto de cimento Portland e podem ou não ter camadas de base e sub-base entre a placa e o subleito (YODER; WITCZAK, 1975). Huang (2004) reforça a definição de pavimento flexível convencional como aquele formado por camadas, com a qualidade dos materiais dessas camadas aumentando conforme há a aproximação da superfície, devido ao aumento dos esforços.

Para Yoder e Witczak (1975), a principal diferença entre esses dois tipos de pavimento está na forma como os esforços são distribuídos. Balbo (2007) aprofunda essa afirmação dos autores e explica esse argumento através dos conceitos de campo de tensões. A carga atuante em pavimentos rígidos é distribuída de maneira mais uniforme e em uma área maior do solo, isso devido à sua alta rigidez e alto módulo de elasticidade. Nos pavimentos flexíveis, a carga aplicada gera um campo de tensões muito concentrado em torno do ponto de aplicação, fazendo com que os esforços se distribuam menos e a intensidade dos mesmos ao chegarem ao subleito sejam maiores em comparação à transmissão de esforços em um pavimento rígido (YODER; WITCZAK, 1975; BALBO, 2007).

Uma outra abordagem da definição de pavimentos rígidos e flexíveis é feita por Senço (2007), que utiliza a deformabilidade das estruturas para definir um pavimento.

Segundo o autor, um pavimento rígido é aquele pouco deformável, que rompe por tração na flexão quando sujeito às deformações. Já os pavimentos flexíveis são aqueles mais deformáveis. Nesse tipo de pavimento, há a formação de bacias de deformação, que podem levar a estrutura ao rompimento por fadiga ou à deformação permanente.

Para FAA (2016), pavimentos flexíveis são aqueles formados por camadas, sendo o esforço de uma camada suportado pela camada inferior e finalmente distribuído no subleito, enquanto pavimentos rígidos têm a maior parte do carregamento absorvido pela placa de concreto de cimento Portland que se encontra na superfície da estrutura.

Há consenso entre os autores de que a tarefa de classificar os pavimentos como rígidos ou flexíveis é difícil e complexa. Os problemas em utilizar essas classificações se encontram no fato de, em os pavimentos sendo constituídos de camadas, haver a liberdade do uso de materiais rígidos ou flexíveis como componentes das camadas de um mesmo pavimento. Assim, a classificação “flexível ou rígido” é arbitrária e foi estabelecida numa tentativa de criar distinção entre pavimentos asfálticos e pavimentos em placas de concreto de cimento Portland (YODER; WITCZAK, 1975; BALBO, 2007; SENÇO, 2007, FAA, 2016).

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).

O concreto asfáltico utilizado na pavimentação de pistas aeroportuárias deverá ser escolhido considerando as condições climáticas e geográficas do local e as exigências de projeto. A depender da necessidade, pode haver o emprego de cimentos asfálticos de petróleo com as mesmas especificações dos empregados na pavimentação rodoviária (DIRENG, 2002).

A vida útil de pavimentos flexíveis é geralmente menor que a de pavimentos rígidos. Enquanto a vida útil de pavimentos rígidos vai de 20 a 40 anos, para os pavimentos rígidos esse tempo vai de 15 a 20 anos (WELLS; YOUNG, 2004).

Shahin (2005) destaca o trincamento couro de jacaré e o afundamento de trilha de roda como os dois defeitos que o dano imposto à estrutura pelo peso da aeronave acarreta aos pavimentos aeroportuários revestidos com concreto asfáltico. O autor define o trincamento couro de jacaré como trincas interconectadas causadas pela fratura por fadiga da superfície asfáltica, ocorrendo em áreas sujeitas a carregamentos repetidos, tal como ocorre nas trilhas de roda. Define, também, o afundamento de trilha de roda como sendo a depressão existente no pavimento que ocorre nas trilhas de roda devido à deformação permanente de qualquer das

camadas do pavimento ou do subleito (consolidação ou movimentação lateral devido às solicitações do tráfego). Tais defeitos podem, inclusive, originar objetos que ofereçam perigo às operações das aeronaves (*Foreign Object Debris – FOD*).

2.2 O método de análise do FAARFIELD

O FAARFIELD é um *software* desenvolvido pela FAA, utilizado como ferramenta mecanístico-empírica de projeto e análise de pavimentos aeroportuários. 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. O uso do FAARFIELD é orientado pela FAA por meio de FAA (2016).

A vida útil, no FAARFIELD, se refere à vida útil estrutural do pavimento, e não à vida útil funcional. Enquanto a vida útil funcional diz respeito ao período de tempo no qual o pavimento possui um nível de serviço aceitável em relação a fatores como resistência à derrapagem e rugosidade, a vida útil estrutural se refere ao número total de ciclos de carregamento que o pavimento suportará antes de falhar (FAA, 2016).

O padrão projetado para a vida útil de um pavimento pelo FAARFIELD é de 20 anos, podendo o usuário optar pelo projeto de uma estrutura com até 50 anos de vida útil. Para atingir a vida útil esperada, todos os pavimentos requerem a combinação de bons materiais e métodos construtivos com manutenção preventiva. A vida útil estrutural de um pavimento flexível pode ser maximizada através de selagem de trincas, aplicação de capas selantes e, ocasionalmente, execução de remendos. A vida útil funcional pode ser maior ou menor que a vida útil estrutural, sendo geralmente maior se devidamente mantido (FAA, 2016).

Para projetar pavimentos flexíveis, o FAARFIELD verifica a máxima tensão vertical no topo do subleito e o esforço máximo de tração na face inferior do revestimento, utilizando esses dois parâmetros para prever a vida útil da estrutura. Para um determinado subleito, o FAARFIELD calcula a espessura individual de cada uma das camadas do pavimento de modo a garantir que a estrutura suportará o tráfego de um conjunto de modelos de aeronaves (*mix* de aeronaves) no tempo de vida útil de projeto estabelecido para o pavimento. A ruptura nesse tipo de pavimento é caracterizada pelo afundamento permanente no subleito e pelo trincamento do revestimento (FAA, 2016).

As análises e dimensionamentos realizados pelo FAARFIELD se baseiam no Fator de Dano Cumulativo (*Cumulative Damage Factor – CDF*), conceito no qual a

contribuição de cada aeronave componente do *mix* é somada para que se obtenha o dano acumulado total da operação de todas as aeronaves do tráfego. O FAARFIELD não estabelece uma aeronave de projeto, pois utilizar as operações de uma única aeronave de projeto para representar todo o tráfego não é equivalente a dimensionar um pavimento considerando todo o tráfego do *mix* no método CDF. O primeiro geralmente resulta em estruturas mais robustas que o necessário (FAA, 2016).

O CDF representa o quanto da vida de fadiga da estrutura já foi utilizada e consiste de uma razão entre o número de repetições de carga que já foram aplicadas e o total de repetições de carga que o pavimento consegue suportar antes que falhe, conforme Equações 1, 2 e 3.

$$CDF = \frac{\text{Número de repetições de carga aplicadas}}{\text{Número de repetições de carga para a falha}} \quad (1)$$

$$CDF = \frac{(\text{Decolagens anuais}) * (\text{Vida útil em anos})}{\left(\text{razão} \frac{P}{C}\right) * (\text{coberturas para a falha})} \quad (2)$$

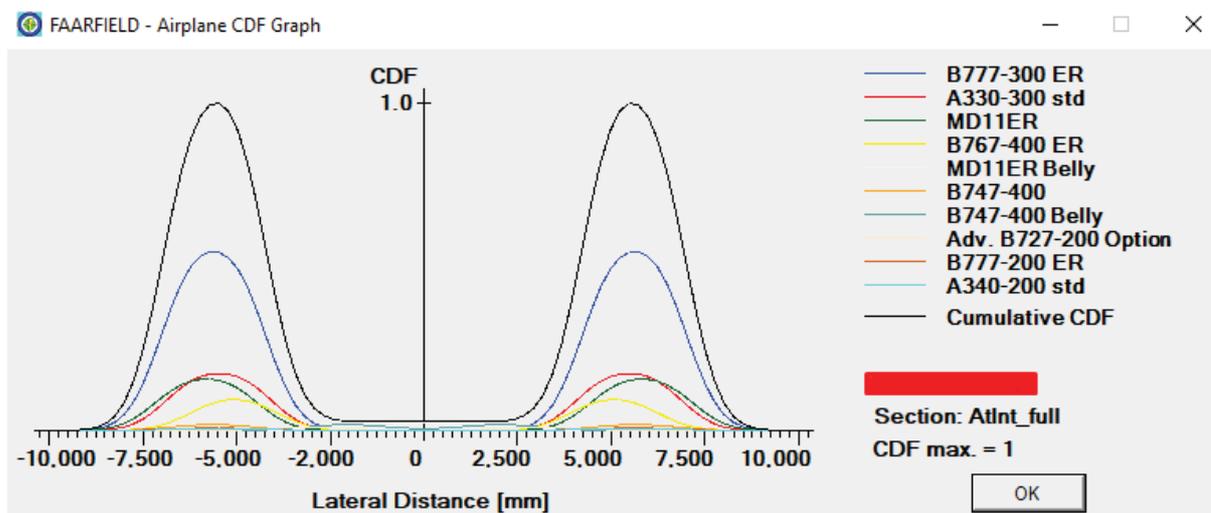
$$CDF = \frac{\text{Passadas aplicadas}}{\text{Coberturas para a falha}} \quad (3)$$

O FAARFIELD analisa individualmente o dano que cada modelo de aeronave impõe ao pavimento e dimensiona uma espessura final para a estrutura considerando o somatório dos danos. A análise de contribuição individual das aeronaves feita pelo *software* leva em conta o número de passagens da aeronave, o número e o espaçamento das rodas no trem de pouso principal, o seu posicionamento em relação ao eixo da pista, a largura da área de contato dos pneus e a carga aplicada pelos mesmos. Para aplicação da carga, o FAARFIELD considera que 95% do peso da aeronave está concentrada no trem de pouso principal e 5% está aplicada no trem de pouso de nariz (FAA, 2016).

No processo de dimensionamento de pavimentos novos, o FAARFIELD calcula a espessura das camadas de modo que o somatório dos CDF individuais de cada modelo de aeronave resulte em um CDF total igual a 1 ao final da vida útil de projeto estabelecida. Enquanto não é atingido esse valor para o CDF, o *software* continua fazendo ajustes nas espessuras até que um CDF total igual a 1 seja obtido. A Figura 1 apresenta esse processo de soma dos CDF individuais resultando em um CDF total. Para o FAARFIELD, um CDF total

de 1 em um pavimento flexível indica o início da ruptura do revestimento por fadiga, com as trincas se iniciando na face inferior do revestimento e se refletindo até a superfície (FAA, 2016).

Figura 1 – Gráfico de CDF do FAARFIELD.

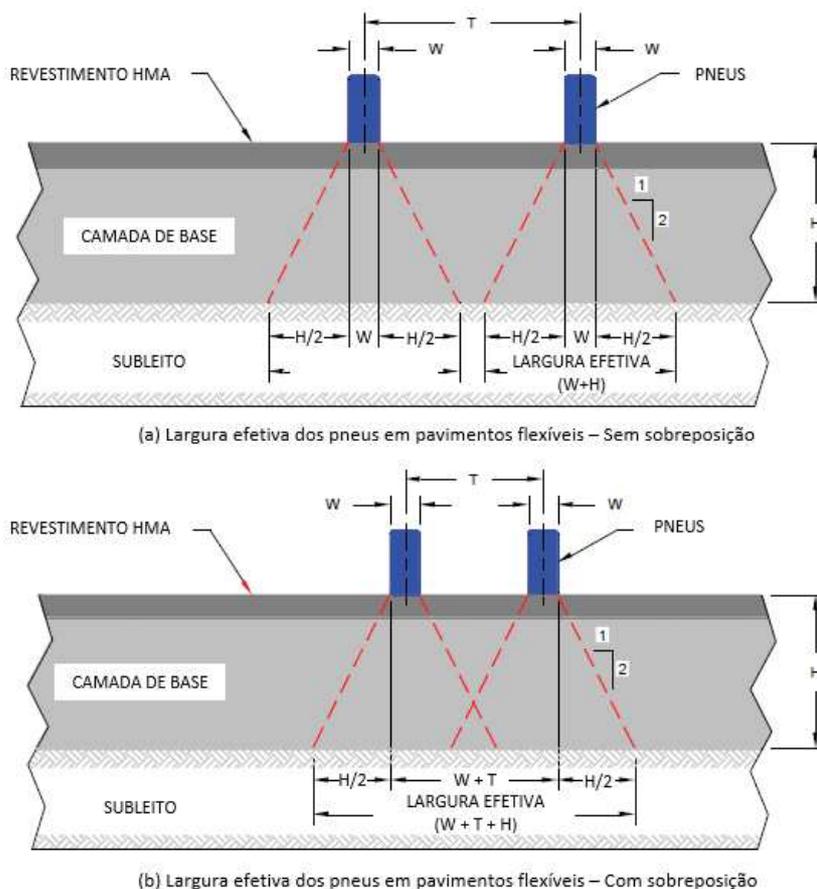


Fonte: FAARFIELD – Adaptado pelo autor.

As Equações 2 e 3 trazem um conceito novo: o de cobertura. Segundo FAA (2016), uma cobertura acontece quando uma unidade de área do pavimento recebe o carregamento máximo induzido por uma determinada aeronave. Para pavimentos flexíveis, cobertura é a medida do número de repetições da máxima tensão imposta pela aeronave no topo do subleito. Essa medida é necessária devido à inconstância nas trajetórias seguidas pelas aeronaves na sua movimentação sobre o pavimento, que raramente é feita sobre uma reta perfeita ou sobre um mesmo caminho em todas as operações, fazendo com que sejam necessárias diversas passagens de determinada aeronave para que um ponto do pavimento seja submetido à máxima carga que pode ser imposta pelo modelo (FAA, 2016).

A razão P/C (passagem para cobertura), presente na Equação 2, indica o número de passagens necessárias para essa aplicação do esforço máximo em uma unidade de área do pavimento. Para o cálculo da razão P/C o FAARFIELD usa o conceito de largura efetiva de pneu. Em pavimentos flexíveis essa largura é definida no topo do subleito. Linhas de resposta são desenhadas numa inclinação 1:2 a partir dos limites laterais dos pneus até o topo do subleito, como ilustrado na Figura 2. Os pneus são considerados separados ou juntos a depender se as linhas de resposta se sobrepõem ou não no topo do subleito. (FAA, 2016).

Figura 2 – Largura efetiva dos pneus.



Fonte: FAA (2016) – Adaptado pelo autor.

O FAARFIELD contém uma biblioteca interna de materiais que podem ser aplicados nos pavimentos projetados ou analisados. Os materiais possuem módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson próprios, que não podem ser alterados pelo usuário. Entre os materiais disponíveis que podem ser aplicados aos pavimentos flexíveis, há opções de bases e sub-bases granulares e estabilizadas e apenas uma opção de revestimento. De acordo com o tráfego previsto para operação no pavimento projetado, o FAARFIELD fixa espessuras mínimas de camada para cada material. A Tabela 1 apresenta as opções de materiais com suas respectivas espessuras mínimas.

Tabela 1 – Espessuras mínimas para camadas de pavimentos flexíveis no FAARFIELD.

Tipo da camada	Especificação da FAA	Peso máximo das aeronaves que operam no pavimento (kg)		
		<5.670	<45.360	≥45.360
Revestimento Asfáltico	P-401, Hot Mix, Asphalt (HMA) Pavements	75 mm	100 mm	100 mm
Base estabilizada	P-401 ou P-403; P-304; P-306	Não é necessário	Não é necessário	127 mm
Base de agregado britado	P-209, Crushed Aggregate Base Course	75 mm	150 mm	150 mm
Base de agregado não-britado	P-208, Aggregate Base Course	75 mm	Não usado	Não usado
Sub-base	P-154, Subbase Course	100 mm	100 mm (se necessário sub-base)	100 mm (se necessário sub-base)

Fonte: FAA (2016) – Adaptado pelo autor.

Na Tabela 1, o valor de 127 mm está de acordo com a circular AC 150/5320-6E (FAA, 2009), documento cancelado pela AC 150/5320-6F (FAA, 2016) (fonte da Tabela 1 e válido atualmente). No documento atualmente em vigência, o valor mínimo para a base estabilizada na presença de aeronaves com peso máximo superior a 45.360 kg é de 125 mm, equivalente ao valor arredondado da medida em polegadas (para as duas circulares, o valor em polegadas é o mesmo para esse peso de aeronave, igual a 4”). Manteve-se o valor da circular antiga devido a ser esse o resultado retornado como camada mínima pela versão do FAARFIELD utilizada neste trabalho. Os dados apresentados que não contêm observação e cuja fonte é a circular atual possuem os mesmos valores nas duas circulares, optando-se por ser utilizado como fonte o documento mais atual.

Os pavimentos flexíveis no FAARFIELD consistem de um revestimento em mistura asfáltica (*Hot Mix Asphalt* – HMA) aplicado sobre uma camada de base e, quando necessário, sobre uma camada de sub-base, com a finalidade de proteger o subleito. Para o revestimento, o material P-401 simula uma mistura asfáltica de graduação densa, capaz de produzir uma superfície com boa resistência à derrapagem, livre de partículas que venham a oferecer dano às aeronaves e resistente aos esforços de cisalhamento impostos pelos trens de pouso das aeronaves (FAA, 2016).

A camada de base é o componente estrutural mais importante dos pavimentos

flexíveis, tendo como principal função distribuir, à camada de sub-base ou ao subleito, as pressões impostas pelos pneus. A base deve ter uma qualidade e uma espessura tais que sejam capazes, além de impedir sua própria ruptura, resistindo aos esforços desenvolvidos em seu próprio interior, de impedir a ruptura/falha do subleito e de resistir às pressões verticais que tendem a causar a sua consolidação, resultando em irregularidades na camada de revestimento (FAA, 2009).

Os materiais que podem ser aplicados na camada de base são divididos em estabilizados (P-401, P-403, P-306 e P-304, sem indicação do material estabilizante) e não-estabilizados (P-209, P-208, P-219 e P-211). O material padrão para uma base de agregados no FAARFIELD é o P-209 (base de agregado britado). O material P-208 (base de agregado não-britado) pode ser utilizado na camada de base, porém apenas em casos onde as aeronaves não ultrapassem os 27.200 kg de peso. Camadas de agregado podem ser posicionadas em qualquer parte do pavimento, com exceção do revestimento e do subleito, desde que obedeçam a um limite máximo de duas camadas e que a camada de agregado britado esteja sobre a de agregado não-britado. Quando há a presença de aeronaves com peso igual ou superior a 45.360 kg, passa a ser necessária uma base estabilizada com, no mínimo, 127 mm de espessura (FAA, 2016).

A camada de sub-base é necessária em casos onde o subleito possui CBR inferior a 20%, de modo a proporcionar uma camada que possua essa capacidade de suporte. Para o subleito, as tensões diminuem com a profundidade, sendo o controle das tensões no subleito realizados no seu topo. O solo do subleito deve ser previamente compactado, de modo a garantir que o tráfego previsto não cause consolidações adicionais ao material. O FAARFIELD assume o subleito como tendo espessura infinita e podendo ser caracterizado pelo CBR ou pelo módulo de elasticidade (E). A Equação 4 é a relação usada pelo FAARFIELD para obter o módulo de elasticidade a partir do valor do CBR do subleito, e retorna E em psi (FAA, 2016).

$$E = 1500 * CBR \quad (4)$$

Ramos (2016) realizou estudo comparativo que utilizou o FAARFIELD, método de 2009 da FAA, como método de dimensionamento. No estudo, o autor comparou as espessuras dimensionadas pelo *software*, que considera o *mix* de aeronaves dos aeroportos, com os métodos de dimensionamento da FAA de 1978 e de 1995, ambos baseados no

estabelecimento de uma aeronave de projeto e do uso de ábacos, sendo o dimensionamento influenciado pelo tipo de revestimento e pela vida útil de projeto estabelecida.

O primeiro aeroporto utilizado por Ramos (2016) foi o Aeroporto Internacional de Brasília. O projeto original da pista desse aeroporto foi feito utilizando o método de 1995 da FAA, que resultou em uma espessura total do pavimento de 82 cm. Na época, a aeronave de projeto estabelecida foi o modelo MD-11. O estudo do Aeroporto Internacional de Brasília envolveu dois cenários: (i) o dimensionamento no FAARFIELD utilizando o *mix* de aeronaves empregado no dimensionamento original da pista estudada e (ii) o dimensionamento pelos dois métodos empregando a movimentação do ano de 2013.

Para o primeiro cenário, o FAARFIELD calculou uma espessura de 70 cm para o pavimento da pista. Essa espessura é 12 cm menor que a obtida a partir do emprego do ábaco de dimensionamento e do uso da aeronave de projeto no método de 1995 da FAA. Verificando no FAARFIELD qual aeronave do *mix* utilizado para o projeto original mais contribuía para o dano do pavimento, constatou-se que essa não era a aeronave de projeto. O modelo que contribuiu com aproximadamente 3/4 do dano ao pavimento foi o B-777-400, com apenas 203 operações, enquanto o MD-11, aeronave de projeto, apresentava 900 operações no *mix* (RAMOS, 2016).

O segundo cenário envolveu o dimensionamento do pavimento pelos métodos de 1995 e de 2009 com uso do *mix* de 2013 do Aeroporto Internacional de Brasília. O método de 1995 exige a definição de uma aeronave de projeto, sendo estabelecido o modelo A330-200. Enquanto o método de 1995 dimensionou um pavimento de 84,5 cm, o FAARFIELD, método de 2009, calculou uma espessura de 63 cm para a estrutura, 21,5 cm menor (RAMOS, 2016).

Os resultados apresentados anteriormente para os dois cenários a partir do uso do FAARFIELD foram obtidos para uma vida útil de 20 anos. Além dessa vida útil, Ramos (2016) promoveu ainda o dimensionamento no *software* com o *mix* de 2013 para 5, 10 e 15 anos de vida útil, de modo a verificar como esse parâmetro influenciava na espessura do pavimento dimensionado. Como resultado, para as vidas úteis de 5, 10, 15 e 20 anos, as espessuras calculadas pelo FAARFIELD para o pavimento foram, respectivamente e em cm, 58, 61, 62 e 63 (RAMOS, 2016).

O segundo aeroporto estudado pelo autor foi o Aeroporto Internacional de Belo Horizonte. Ao contrário do que ocorreu com o Aeroporto Internacional de Brasília, o autor não conseguiu informações suficientes do aeroporto de Belo Horizonte para empregar o método de 1995, tendo que realizar seu estudo apenas baseado na informação das espessuras originais do pavimento, dimensionado a partir do método de 1978 da FAA (RAMOS, 2016).

Para dimensionar a estrutura com o FAARFIELD, também por não conseguir acesso às informações de *mix* do projeto original, o autor empregou o tráfego de 2012. A estrutura original do pavimento possui uma espessura total de 90 cm, enquanto a dimensionada pelo FAARFIELD foi de 70 cm. O FAARFIELD proporciona uma estrutura 20 cm menor em relação ao método de 1978, mesmo empregando volume de tráfego muito superior ao utilizado nos cálculos originais para construção da pista, com aeronaves maiores e mais pesadas (RAMOS, 2016).

Para o Aeroporto Internacional de Belo Horizonte, também foi realizada a análise de influência da vida útil de projeto na espessura final calculada pelo FAARFIELD. Para o tráfego de 2012 e para as vidas úteis de 5, 10, 15 e 20 anos, as espessuras dimensionadas foram, respectivamente e em cm, 62, 67, 69 e 70 (RAMOS, 2016).

2.3 Estudos de sensibilidade de dados

Um estudo de sensibilidade é uma ferramenta poderosa para verificar, compreender e comparar especificações de projeto de pavimentos existentes. O dimensionamento das camadas de um pavimento necessita de uma série de *inputs* diferentes, que influenciam a vida útil de um pavimento de forma diferente. A vida útil de um pavimento é sensível a um *input* quando pequenas mudanças em seu valor acarretam em mudanças consideráveis no valor de vida útil. Da mesma forma, a vida útil de um pavimento não é sensível a um *input* quando são observadas pequenas alterações em seus valores para pequenas mudanças no valor do *input* considerado (GARG, GUO; MCQUEEN, 2004).

A sensibilidade de programas computacionais foi testada por Purvis (2013) em aplicação de dados de vias pavimentadas do estado americano de Iowa em diferentes *softwares* de dimensionamento de pavimentos rodoviários. No estudo, realizado com pavimentos rígidos e flexíveis, foi constatada maior sensibilidade das espessuras de camada calculadas pelos programas às variações de tráfego do que às mudanças de capacidade resistente do subleito. A pesquisa constatou, ainda, que em alguns casos as espessuras das camadas de pavimentos flexíveis são mais sensíveis às mudanças em tráfegos leves do que àquelas promovidas em tráfegos pesados.

No âmbito de pavimentos aeroportuários, a sensibilidade de dados a partir do uso de *softwares* também foi estudada. Garg, Guo e McQueen (2004) desenvolveram estudo sobre a sensibilidade da vida útil de pavimentos aeroportuários flexíveis através de dados obtidos com o *software* LEDFAA, com o objetivo de analisar a influência dos *inputs* módulo de

elasticidade do revestimento, espessura do revestimento, espessura da camada de base e peso de aeronaves nos resultados de vida útil de pavimentos aeroportuários retornados pelo programa.

O estudo foi feito adotando-se três capacidades de suporte de subleito diferentes, sendo um subleito considerado de capacidade baixa (3% de CBR), um de capacidade mediana (8% de CBR) e um de alta capacidade (15% de CBR). Para cada resistência de subleito foi dimensionada, no LEDFAA, uma estrutura para o pavimento. A equação utilizada na mensuração da sensibilidade está apresentada na Equação 5; o *mix* de aeronaves considerado nos dimensionamentos está apresentado no Anexo A e os resultados obtidos estão apresentados nos Anexos B e C.

$$S_{x,L} \cong \frac{L[x+\Delta x]-L[x-\Delta x]}{2*\Delta x} * \frac{x}{L[x]} \quad (5)$$

Na Equação 5, $S_{x,L}$ é o valor calculado para a sensibilidade, x é o valor da variável, Δx é a variação no valor da variável e $L(x+\Delta x)$, $L(x)$ e $L(x-\Delta x)$ são os valores de vida útil de projeto calculados para os respectivos valores de x com suas variações. Valores positivos de $S_{x,L}$ indicam o aumento da vida útil com o aumento de x , enquanto valores negativos significam o decréscimo da vida útil com o crescimento do valor de x . A sensibilidade calculada pela Equação 5 resulta em valores adimensionais, não importando as unidades de medida utilizadas nos dados de entrada (desde que seja mantida a equivalência entre as mesmas na aplicação), o que permite a comparação de variáveis diferentes. Quanto maior o módulo do valor de $S_{x,L}$, mais sensível é a vida útil à variável x considerada (GARG; GUO; MCQUEEN, 2004).

O estudo da influência do módulo de elasticidade do revestimento foi feito considerando o material HMA (*Hot Mix Asphalt*), com um módulo de aproximadamente 1.380 MPa, variando 10% para mais e para menos em cada uma das três resistências de subleito consideradas. Entre os *inputs* estudados, o módulo de elasticidade do material do revestimento foi o que apresentou a menor influência na vida útil do pavimento, sendo a sensibilidade crescente com o crescimento dos valores de CBR do subleito (GARG; GUO; MCQUEEN, 2004).

A espessura da camada de revestimento, que foi mantida fixa em 5” nos dimensionamentos realizados no LEDFAA, sofreu variação de 10% para mais e para menos nas três resistências de subleito consideradas. A sensibilidade da vida útil do pavimento à

espessura do revestimento, apesar de ter sido maior do que a verificada para o módulo de elasticidade do HMA, foi muito mais baixa do que a de outras variáveis estudadas (GARG; GUO; MCQUEEN, 2004).

O estudo verificou que a vida útil do pavimento é mais sensível à espessura da camada de base quando em comparação com as duas variáveis anteriormente apresentadas. A conclusão é de que a sensibilidade da vida útil à espessura da base diminui conforme o subleito se torna mais resistente. Nos dados do Anexo C, no entanto, para o subleito com 15% de CBR a sensibilidade é maior do que a obtida para o de 8%. Segundo o relatório, a sensibilidade aumentou nesse caso por influência da camada de sub-base, que ficou menos espessa devido às considerações de dimensionamento feitas pelo LEDFAA (GARG; GUO; MCQUEEN, 2004).

Entre as quatro variáveis estudadas, a que apresentou maior influência na vida útil do pavimento foi o peso das aeronaves. Para a análise do peso, foram considerados dois modelos de aeronave, um pesado e um leve. Como modelo pesado foi considerado o A380, pesando aproximadamente 590 toneladas, enquanto que o modelo adotado como leve foi o B737, com aproximadamente 78,5 toneladas (GARG; GUO; MCQUEEN, 2004).

Na análise da influência do peso das aeronaves, a sensibilidade da vida útil diminuiu conforme o subleito se tornou mais resistente e conforme se aumentou o peso da aeronave. Essa análise foi a única que apresentou valores de sensibilidade negativa, o que significa que a vida útil do pavimento diminui conforme se aumenta o peso das aeronaves que utilizam a estrutura (GARG; GUO; MCQUEEN, 2004).

Lira e Oliveira (2019) analisaram a influência de mudanças na espessura da base, da sub-base e no volume de tráfego sobre a sensibilidade os dados de vida útil gerados pelo FAARFIELD. Para as mudanças nas espessuras de base e sub-base os autores identificaram duas áreas: uma com sensibilidade baixa e outra onde os dados são muito sensíveis a qualquer alteração nas espessuras das camadas (LIRA; OLIVEIRA, 2019).

Quanto ao volume de tráfego, estudado a partir do uso do *mix* de quatro aeroportos de tamanhos distintos, Lira e Oliveira (2019) concluíram que a sensibilidade dos dados depende diretamente do porte do aeroporto, bem como do tamanho do *mix*, e do porte e número de operações das aeronaves, sendo menor a variabilidade dos dados quanto mais leve é o *mix*. Outra constatação feita pelos autores foi a de que quanto maior é o aeroporto, menores os valores de vida útil calculados pelo FAARFIELD para a estrutura dos pavimentos (LIRA; OLIVEIRA, 2019).

2.4 Classificação de aeroportos

Situações que envolvem informações de mais de um aeroporto, principalmente se é preciso comparar essas informações, podem requerer a execução da distinção desses aeroportos a partir de classificações que sigam critérios aplicáveis a todos. Duas formas de classificação úteis são o uso das características físicas do aeroporto e da sua quantidade de passageiros processada anualmente. Para a primeira, a Organização Internacional da Aviação Civil (*International Civil Aviation Organization* – ICAO) propõe uma metodologia de classificação através de códigos de referência. Para a segunda, existem diferentes classificações, que se baseiam em diferentes intervalos. Aqui serão apresentadas dois desses métodos, um nacional e um internacional.

Numa tentativa de correlacionar as muitas especificações referentes às características de aeródromos, a ICAO propôs um sistema de classificação baseado em um código de dois dígitos. Esse código é definido com base no maior tipo de aeronave que pode operar no aeródromo, e seus dígitos guardam relação com as dimensões dessa aeronave. O primeiro dígito é um número que varia de 1 a 4, referente ao comprimento mínimo de pista requerido pela aeronave (estando ligado à extensão da pista do aeroporto). A Tabela 2 mostra limites para definição do primeiro dígito do código (ICAO, 2006).

Tabela 2 – Código de referência de aeródromos ICAO, primeiro dígito.

Código	Comprimento de pista de referência da aeronave
1	< 800 m
2	≥ 800 m e < 1.200 m
3	≥ 1.200 m e < 1.800 m
4	≥ 1.800 m

Fonte: ICAO (2006) – Adaptado pelo autor.

O segundo dígito do código é uma letra que varia de A a F e diz respeito à envergadura e à distância entre as faces externas do trem de pouso principal da aeronave (fazendo referência à largura da pista do aeroporto). Devem-se comparar essas duas características para determinação do segundo dígito do código, prevalecendo a letra referente à maior dessas duas dimensões. A Tabela 3 deve ser consultada para a definição do segundo dígito do código de referência (ICAO, 2006).

A partir dessas informações, pode-se concluir que o método proposto pela ICAO classifica os aeroportos utilizando indiretamente suas características de extensão e largura de pista, associando-as às dimensões da maior aeronave que pode ser atendida com segurança pelo aeroporto.

Tabela 3 – Código de referência de aeródromos ICAO, segundo dígito.

Código	Envergadura da aeronave	Distância entre as faces externas do trem de pouso principal
A	< 15 m	< 4,5 m
B	≥ 15 m e < 24 m	≥ 4,5 m e < 6,0 m
C	≥ 24 m e < 36 m	≥ 24 m e < 36 m
D	≥ 36 m e < 52 m	≥ 6,0 m e < 9,0 m
E	≥ 52 m e < 65 m	≥ 9,0 m e < 14,0 m
F	≥ 65 m e < 80 m	≥ 14,0 m e < 16,0 m

Fonte: ICAO (2006) – Adaptado pelo autor.

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), através de ANAC (2019b), classifica os aeródromos com base no número de passageiros processados. Segundo o documento, o número de passageiros processados é a soma de passageiros embarcados e desembarcados no aeródromo. A classificação dos aeródromos é feita pela média aritmética do total anual de passageiros processados no período de referência, que corresponde aos três anos anteriores ao ano corrente. A partir desse número médio de passageiros processados são estabelecidas quatro classes, conforme apresentado na Tabela 4. (ANAC, 2019b).

Tabela 4 – Classes de aeródromos.

Classe	Nº de passageiros processados
I	< 200 mil
II	≥ 200 mil e < 1 milhão
III	≥ 1 milhão e < 5 milhões
IV	≥ 5 milhões

Fonte: ANAC (2019b) – Adaptado pelo autor.

Outro método que também utiliza a quantidade de passageiros processada para classificar um aeroporto foi proposta por OAG *Aviation Worldwide Limited* (2018). Nesse

método, ao contrário da média dos três anos anteriores ao ano corrente utilizados pelo método da ANAC, utiliza-se apenas o total de passageiros embarcados e desembarcados em um ano para definir em qual classe o aeroporto se encaixa. O método é voltado à classificação de aeroportos que operem voos internacionais, estabelecendo cinco classes, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Classes de aeródromos.

Classe	Nº de passageiros processados (em milhões)
Pequeno	$2,5 \leq x < 5$
Médio	$5 \leq x < 10$
Grande	$10 \leq x < 20$
Muito grande	$20 \leq x < 40$
Mega	≥ 40

Fonte: OAG Aviation Worldwide Limited (2018) – Adaptado pelo autor.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Essa seção apresentará os aeroportos cujas informações foram utilizadas nas análises desta pesquisa, bem como fará a descrição dos métodos a serem seguidos para a execução dessas análises.

3.1 Aeroportos de estudo

A realização deste trabalho envolveu o uso de informações de aeroportos de características diferentes, dentro e fora do Brasil. Essa seção contém uma breve descrição dos aeroportos utilizados, focando em algumas de suas características, como comprimento de pista, número de terminais de passageiros e quantidade de passageiros movimentada. Os aeroportos brasileiros selecionados foram: (i) Aeroporto Regional do Cariri (siglas IATA - *International Air Transport Association*: JDO e ICAO: SBJU) , em Juazeiro do Norte-CE, (ii) Aeroporto Internacional de Fortaleza (siglas IATA: FOR e ICAO: SBFZ), localizado em Fortaleza-CE, e (iii) Aeroporto Internacional de São Paulo (siglas IATA: GRU e ICAO: SBGR), situado em Guarulhos-SP. Fora do Brasil, utilizou-se o Aeroporto Internacional de Atlanta (siglas IATA: ATL e ICAO: KATL), que se localiza na cidade de Atlanta, estado da Geórgia, Estados Unidos.

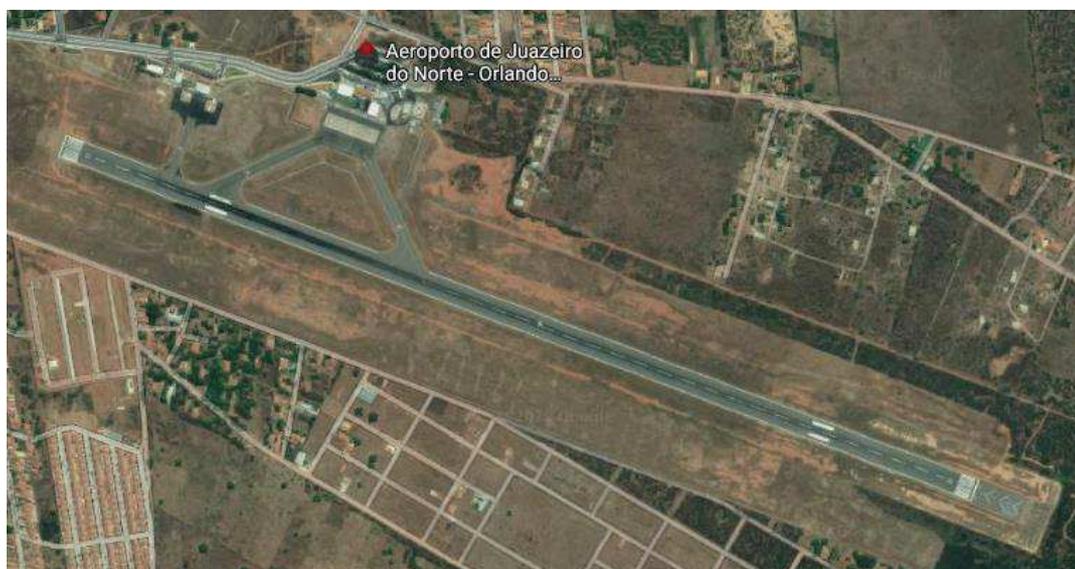
3.1.1 *Aeroporto Regional do Cariri*

O Aeroporto Orlando Bezerra de Menezes, mais conhecido como Aeroporto Regional do Cariri, é um aeroporto situado na cidade de Juazeiro do Norte-CE. De abrangência regional, o aeroporto conta com um terminal de passageiros de 900 m², dois pátios de aeronaves, três posições para atendimento de aviação comercial e uma pista de pouso e decolagem de 1.940 m de comprimento por 45 m de largura. Atualmente, a operação comercial do aeroporto é feita por duas linhas aéreas nacionais: Gol e Azul (CEARÁ, 2000, INFRAERO, 2019a).

Em 2018, o Aeroporto Regional do Cariri processou aproximadamente 564 mil passageiros, o equivalente a 0,67% do total de passageiros processados em toda a rede da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero), o colocando como 22º dos 53 aeroportos sob responsabilidade da empresa. A Figura 3 mostra o Aeroporto Regional do Cariri em vista de satélite. Mais detalhes sobre o aeroporto podem ser encontrados no Anexo

D, que contém a carta de aeródromo disponibilizada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) (INFRAERO, 2019b).

Figura 3 – Aeroporto Regional do Cariri.



Fonte: Google (2019).

3.1.2 Aeroporto Internacional de Fortaleza

O Aeroporto Internacional de Fortaleza tem sua construção remontando ao período da segunda guerra mundial, quando sua pista foi construída, em 1943. À época, seu uso era militar, anexo à Base Aérea de Fortaleza e servindo de base para as forças armadas dos Estados Unidos. Após sua desativação como base americana, em 1945, o aeroporto começou a passar por modificações (ROBERTS, 2000; SIXTANT, 2019). Seu nome foi alterado em 1952 para Aeroporto Pinto Martins e não sofreu alterações em 1953, quando foi modificada a regra de denominação dos aeroportos e aeródromos nacionais (BRASIL, 1952; BRASIL, 1953).

Hoje, o Aeroporto Internacional de Fortaleza – Pinto Martins, conta com uma pista de pouso e decolagem de 2.545 m de comprimento por 45 m de largura, com capacidade para 28 operações por hora, além de 14 *taxiways*. O terminal de passageiros, com área declarada de 35.000 m², movimentou aproximadamente 6,17 milhões de passageiros em 2018 (ANAC, 2018a; ANAC, 2018b; FRAPORT, 2018). A Figura 4 apresenta a vista de satélite do Aeroporto Internacional de Fortaleza. O Anexo D contém a carta de aeródromo do aeroporto,

disponibilizada pelo DECEA. Nela, podem ser encontrados mais detalhes acerca do sítio aeroportuário.

Figura 4 – Aeroporto Internacional de Fortaleza.



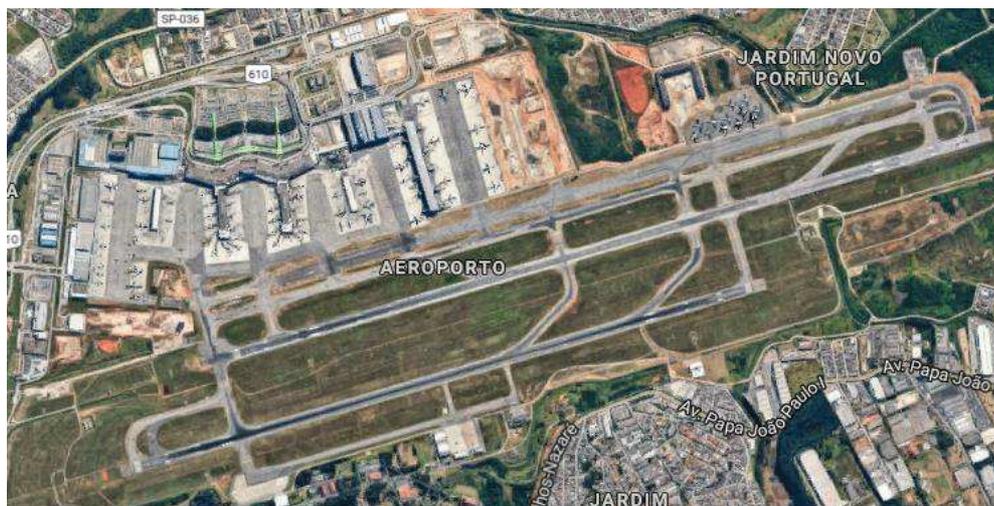
Fonte: Google (2019).

3.1.3 Aeroporto Internacional de São Paulo

O Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos – Governador André Franco Montoro, ou apenas Aeroporto Internacional de São Paulo, maior aeroporto do Brasil, se localiza na cidade de Guarulhos-SP. O aeroporto possui três terminais de passageiros, sendo um para voos internacionais e dois para voos domésticos. Os três terminais somados têm a capacidade de processar, por hora, 10.104 passageiros em embarque e 10.626 passageiros em desembarque. Em 2018, o Aeroporto Internacional de São Paulo movimentou aproximadamente 42,23 milhões de passageiros (BRASIL, 2001; GRU AIRPORTS, 2019; ANAC, 2019a).

A imagem de satélite da Figura 5 mostra o Aeroporto Internacional de São Paulo. O complexo conta com duas pistas de pouso e decolagem paralelas, sendo a do centro da imagem a maior, com 3.700 m de comprimento e 45 m de largura. A pista da parte de baixo na Figura 3 possui 3.000 m de comprimento por 45 m de largura. O sistema de pistas possui capacidade de processamento de 57 operações de pouso e decolagem por hora, de acordo com a seguinte divisão: se uma pista recebe 32 pousos, a outra realizará 25 decolagens, e se uma receber 25 pousos, a outra realizará 32 decolagens (ANAC, 2019a).

Figura 5 – Aeroporto Internacional de São Paulo.



Fonte: Google (2019) – Adaptado pelo autor.

3.1.4 Aeroporto Internacional de Atlanta

Considerado o aeroporto mais movimentado do mundo, o Aeroporto Internacional de Atlanta, localizado no estado americano da Geórgia, tem uma área total de 19,22 km², o equivalente a quase 1.800 campos de futebol. O complexo conta com dois terminais de passageiros e seis plataformas de embarque. A parte responsável por voos domésticos engloba um dos terminais de passageiros e quatro das plataformas de embarque, sendo o segundo terminal de passageiros e as outras duas plataformas voltadas para atendimento de passageiros em voos internacionais. Somando os terminais e as plataformas de embarque, o complexo de passageiros cobre quase 650 mil metros quadrados de área e possui 152 portões de embarque domésticos e 41 internacionais, responsáveis pela movimentação dos 107,4 milhões de passageiros que passaram pelo Aeroporto Internacional de Atlanta em 2018 (ATLANTA, 2018; ATLANTA, 2019).

A Figura 6 mostra uma imagem de satélite do Aeroporto Internacional de Atlanta. Nela estão destacadas em vermelho as cinco pistas de pouso e decolagem do aeroporto. As pistas possuem aproximadamente a mesma orientação, sendo as duas superiores na Figura 6 paralelas, as duas centrais também paralelas, mas com diferença de um grau nas cabeceiras em relação às superiores, e a da parte inferior da imagem com diferença de um grau nas cabeceiras quando em comparação com as duas pistas do centro (ATLANTA, 2019).

Na ordem de cima para baixo da Figura 6, o comprimento das pistas são: 2.743 m, 3.048 m, 3.777 m, 2.743 m e 2.743 m. Todas as pistas possuem 45 m de largura. O Anexo

D contém a carta de aeródromo disponibilizada pela FAA, onde podem ser obtidos mais detalhes sobre o complexo do aeroporto, como a orientação exata das pistas de pouso e decolagem, quantidade e posições de *taxiways* e a especificação de todos os prédios pertencentes ao complexo, como terminais de passageiros e plataformas de embarque (ATLANTA, 2019).

Figura 6 – Aeroporto Internacional de Atlanta.



Fonte: Google (2019).

3.2 Método de pesquisa

O método proposto para análise da sensibilidade do FAARFIELD é a geração de resultados de vida útil, a partir do uso do programa, para condições distintas de *mixes* de aeronaves, portes de aeroporto e espessuras de camadas de base e sub-base.

Os aeroportos cujos *mixes* são utilizados nas análises deste trabalho foram escolhidos de modo a se abrangerem equipamentos de diferentes portes: (i) Aeroporto Regional do Cariri, em Juazeiro do Norte/CE (dados do ano de 2018), aeroporto de pequeno porte; (ii) Aeroporto Internacional de Fortaleza/CE (dados do ano de 2016) como aeroporto internacional de médio porte; (iii) Aeroporto Internacional de São Paulo/SP (dados do ano de

2011) como aeroporto internacional de porte muito grande; (iv) Aeroporto de Atlanta/EUA (dados do ano de 2011) como mega aeroporto.

A definição do porte de cada aeroporto usado foi realizada com base na classificação proposta por OAG *Aviation Worldwide Limited* (2018) para aeroportos internacionais. Apesar de haver, entre os aeroportos estudados, um aeroporto que não é internacional, a classificação acima foi aplicada aos quatro aeroportos por considerar-se que o uso não acarretaria em prejuízos ao método da pesquisa. Optou-se por esse método de classificação por esse promover uma maior distinção entre os portes dos aeroportos.

Duas considerações foram feitas a partir do método utilizado. A primeira foi a adoção da classificação de aeroporto pequeno para todo aquele que tivesse até 5 milhões de passageiros movimentados, de modo a abranger o Aeroporto Regional do Cariri. A segunda foi a classificação do Aeroporto Internacional de São Paulo como muito grande mesmo esse tendo mais de 40 milhões de passageiros. Isso foi feito para que houvesse distinção entre o aeroporto de São Paulo e o Aeroporto Internacional de Atlanta, uma vez que ambos seriam classificados como mega aeroportos. Como o Aeroporto Internacional de São Paulo tem um número de passageiros processados próximo de 40 milhões, a sua classificação na classe inferior não acarreta descaracterização do seu porte.

Os modelos de aeronaves considerados para compor cada um dos *mixes* foram definidos como aqueles que tivessem mais de 13.608 kg de peso e que perfizessem mais de 0,1% do somatório total de operações de decolagem dos respectivos aeroportos nos respectivos anos de referência dos dados. Não foram considerados modelos monomotores, pequenos bimotores ou jatos, por entender-se que o seu pequeno peso não proporcionaria diferenças consideráveis nos resultados de vida útil, uma vez que causam pouco dano à estrutura das pistas. Os *mixes* utilizados estão apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.

Tabela 6 – *Mix do Aeroporto Regional do Cariri em 2018.*

Aeronave	Decol. anuais
A319-100	89
E190-100	103
B737-800	179
B737-700	220
E190-200	271
A320-200	920

Fonte: INFRAERO (2019c) – Adaptado pelo autor.

Tabela 7 – *Mix do Aeroporto Internacional de Fortaleza em 2016.*

Aeronave	Decol. anuais	Aeronave	Decol. anuais
B757-200	54	B737-700	504
E190-100	70	ATR-72-212	1.187
B767-300	205	E190-200	2.091
A319-100	247	A321-200	4.297
A330-200	306	A320-200	4.769
B737-400	370	B737-800	6.099

Fonte: INFRAERO (2017) – Adaptado pelo autor.

Tabela 8 – *Mix do Aeroporto Internacional de São Paulo em 2011.*

Aeronave	Decol. anuais	Aeronave	Decol. anuais
B747-300	144	B747-500	1.584
MD-11	144	B777-300	1.680
A330-300	336	B767-300	3.936
B767-400	336	A321-100	4.032
B767-200	672	B777-200	4.416
A319-100	720	A330-200	5.472
B737-600	1.021	B737-700	6.336
B747-400	1.098	B737-300	7.536
B747-400	1.104	B737-800	19.248
B727-200	1.200	A320-200	27.360
A340-300	1.584		

Fonte: INFRAERO (2011) – Adaptado pelo autor.

Tabela 9 – *Mix* do Aeroporto Internacional de Atlanta em 2011.

Aeronave	Decol. anuais	Aeronave	Decol. anuais
B757-200	365	MD-82	2.191
DC-10-30	365	B767-400	2.192
DC-8	365	B777-200	2.192
A340-200	365	B757-300	2.920
B747-200	730	E190-200	4.380
A300-B4	730	A319-100	9.490
B727-200	730	B767-300	11.317
MD-11	730	A320-200	12.412
DC-10-10	1.095	DC-9	13.139
B737-500	1.095	B737-800	20.805
B747-400	1.460	B737-700	28.470
Saab 340A	1.460	Bombardier CRJ-900-ER	51.098
MD-90	1.461	B757-200	59.494
A330-300	2.191	MD-83	79.932

Fonte: KB ENVIRONMENTAL SCIENCES (2014).

Devido a limitações da biblioteca de modelos de aeronaves do FAARFIELD, o modelo ATR-72-212, presente no *mix* do aeroporto de Fortaleza, foi substituído pelo modelo EMB-170, e o modelo Bombardier CRJ-900-ER, presente no *mix* do aeroporto de Atlanta, foi substituído pelo modelo Bombardier CS-100.

Mixes de portes diferentes, aplicados sobre uma mesma estrutura no FAARFIELD, gerariam valores de vida útil de grandezas tais que tornariam inviável a comparação dos dados. Assim, de modo a obterem-se valores de vida útil que pudessem tornar comparáveis os efeitos de tráfegos diferentes atuantes nas estruturas, foi realizado dimensionamento das espessuras das camadas do pavimento para cada um dos quatro aeroportos com o FAARFIELD.

A versão do *software* utilizada neste trabalho foi a FAARFIELD v 1.42. Para fazer o dimensionamento de uma estrutura, o programa necessita como *inputs*: *mix*, espessura do revestimento, CBR do subleito e quantidade e materiais das camadas. Optou-se por adotarem-se os materiais de uma estrutura padrão do FAARFIELD, conforme ilustrado na Figura 7, que esquematiza as camadas das estruturas com os materiais utilizados. A primeira camada consiste em um revestimento asfáltico, a segunda, uma base estabilizada e a terceira, uma sub-base de brita graduada simples. O programa permite que o usuário forneça as espessuras das

camadas de base e sub-base como *input*, sendo 125 mm e 150 mm seus valores mínimos (para os materiais padrão utilizados), respectivamente.

Figura 7 – Esquema da estrutura projetada no FAARFIELD.

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
P-401/P-403 HMA Surface	130.0	1,378.95
P-401/P-403 St (flex)	127.0	2,757.90
P-209 Cr Ag	274.1	381.76
Subgrade	CBR = 12.0	124.11

N = 2; Subgrade CDF = 1.00; t = 531.1 mm

Fonte: FAARFIELD – Adaptado pelo autor.

Uma vez que o *software* calcula automaticamente as espessuras das camadas de base e sub-base para atender a vida de projeto, definida pelo autor como sendo de 20 anos, e de modo a evitar a influência de diferentes condições de revestimento e de capacidade de suporte de subleito, estas foram mantidas constantes. Optou-se por adotarem-se os mesmos valores para a espessura do revestimento e para o CBR do subleito das estruturas dos quatro aeroportos, iguais a 130 mm e 12%, respectivamente.

Depois de inseridos os quatro *mixes*, o programa realizou o dimensionamento da estrutura referente ao pavimento de cada um dos aeroportos, gerando valores para as camadas de base e sub-base. A partir desses resultados, estabeleceram-se as espessuras que seriam utilizadas nas análises de tempo de vida útil. Tais análises consistem em comparar valores de vida útil fornecidos pelo FAARFIELD a partir de variadas combinações de espessuras de base e sub-base, sempre mantendo constantes os materiais das camadas e os valores de espessura de revestimento e de CBR do subleito.

Nas combinações, determinou-se que a base assumiria valores entre 125 mm e 280 mm, variando em acréscimos de 5 mm. Para a sub-base, o valor calculado pelo FAARFIELD foi aproximado para o múltiplo de 5 mais próximo. Os valores assumidos pela

sub-base nas combinações variaram 20 mm para mais e 20 mm para menos do valor corrigido, também variando em intervalos de 5 mm.

Os resultados calculados pelo *software* para a vida útil foram organizados em tabelas e analisados quanto à sensibilidade deles em relação à proporção da mudança nos dados de entrada. Essa sensibilidade foi obtida a partir do uso da metodologia proposta por Garg, Guo e McQueen (2004).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente, o FAARFIELD foi utilizado para que fossem calculadas as espessuras das camadas do pavimento, para cada aeroporto, para uma vida útil de 20 anos. Os resultados fornecidos pelo *software* para cada um dos aeroportos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Espessuras das camadas calculadas pelo FAARFIELD.

Aeroporto	Revestimento (mm)	Base (mm)	Sub-base (mm)
Regional do Cariri	130	127	162,6
Internacional de Fortaleza	130	127	274,2
Internacional de São Paulo	130	127	349,1
Internacional de Atlanta	130	127	333,3

Fonte: O Autor.

Da Tabela 10, podem-se observar dois aspectos relevantes. O primeiro é o fato de o programa calcular sempre a mesma espessura para a camada de base, independente do porte do aeroporto. Isso se observa porque todos os *mixes* possuem aeronaves que ultrapassam os 45.360 kg de peso, ocasião em que passa a ser de 127 mm a espessura mínima da camada de base. Na comparação entre os resultados da sequência de cálculo do FAARFIELD, para os *mixes* considerados neste trabalho, todas as espessuras de base ficaram abaixo de 127 mm, sendo assumido o valor mínimo para a base de todos os aeroportos.

O segundo aspecto relevante é que a espessura da camada de sub-base é maior para o Aeroporto Internacional de São Paulo do que para o de Atlanta. Mesmo o Aeroporto Internacional de Atlanta tendo quase 224 mil operações a mais consideradas no *mix* utilizado no dimensionamento em comparação ao utilizado para o Aeroporto Internacional de São Paulo, e apesar de as aeronaves presentes em ambos os *mixes* serem, em sua maioria, as mesmas, o FAARFIELD considera o pavimento desse último como sendo o mais solicitado estruturalmente.

A existência de muitas operações de aeronaves com menor peso ou que aplicassem menores pressões por pneu no *mix* de Atlanta, ou, ainda, a presença de aeronaves de maior porte, que possuíssem maior afastamento entre pneus do trem de pouso principal, diminuindo, assim, o tamanho da zona de interferência dos bulbos de tensões criados pela pressão dos pneus, poderiam explicar a menor dimensão sugerida pelo FAARFIELD para a espessura da

sub-base do Aeroporto Internacional de Atlanta. No entanto, sendo a maioria dos modelos de aeronaves iguais, e existindo muito mais operações no Aeroporto de Internacional Atlanta, o autor não identifica nenhum outro fator contribuinte que possa ter causado essa divergência nos resultados do programa.

Após arredondamento dos valores de espessura de sub-base fornecidos pelo *software* para o múltiplo de 5 mais próximo, obtêm-se as seguintes espessuras, conforme ordem dos aeroportos listados na Tabela 10: 170 mm, 270 mm, 350 mm e 330 mm de espessura de sub-base. Essas espessuras foram utilizadas para estabelecer, pela variação de 20 mm para a mais e para menos a partir do valor arredondado, os intervalos de valores a serem empregados nos cálculos de vida útil para cada aeroporto. Adotou-se o valor de 170 mm para o Aeroporto Regional do Cariri porque, caso se adotassem os valores 160 mm ou 165 mm, a variação de 20 mm para menos ficaria abaixo do valor mínimo permitido pelo FAARFIELD para o material empregado na camada de sub-base, que é de 150 mm. Os intervalos de espessuras de base e sub-base utilizados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Intervalos de valores de espessura de base e sub-base utilizados nos cálculos de tempo de vida útil.

Aeroporto	Base (mm)	Sub-base (mm)
Regional do Cariri		150 a 190
Internacional de Fortaleza	125	255 a 295
Internacional de São Paulo	a	330 a 370
Internacional de Atlanta	280	310 a 350

Fonte: O Autor.

A Tabela 12 mostra os resultados de vida útil de projeto, em anos, obtidos a partir das simulações com as diferentes combinações de espessuras de camadas para o Aeroporto Regional do Cariri. Foram geradas tabelas similares para os demais aeroportos, apresentadas no Apêndice A.

Tabela 12 – Valores de vida útil de projeto para o Aeroporto Regional do Cariri (em anos).

Base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	190	185	180	175	170	165	160	155	150
280	14724930	14782920	14841440	14900530	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110
275	14782920	14841440	14900530	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060
270	14841440	14900530	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380
265	14900530	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030
260	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000
255	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570
250	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200
245	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200	15795910
240	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200	15795910	15885710
235	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200	15795910	15885710	15976640
230	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200	15795910	15885710	15976640	16068700
225	15452030	15533000	15619570	15707200	15795910	15885710	15976640	16068700	16161920
220	15533000	15619570	15707200	15795910	15885710	15976640	16068700	16161920	15859640
215	15619570	15707200	15795910	15885710	15976640	16068700	15366200	12538550	8984069
210	15707200	15795910	15885710	15976640	14925550	11854670	8216068	5104375	2669659
205	15795910	15885710	14575700	11311270	7657401	4630883	2385914	1206713	608070
200	14338040	10995430	7280745	4312609	2203593	1107571	572271,7	296467	158924,9
195	7063209	4119122	2097216	1047399	538162,4	285883,1	152442,3	84569,8	48847,7
190	2048885	1017918	519781,4	274499,1	149723,4	82317,3	47151,1	27931,7	17100,8
185	514536	269939,7	146685,7	81836,6	46464,3	27308,5	16590,9	10413,9	6735
180	146441,2	81834,6	46666	27203	16394	10213,4	6559,1	4330,6	2932,8
175	47485,3	27571,6	16475,1	10183,5	6492,3	4257,4	2864,7	1973,5	1389,3
170	16820	10310,6	6523,1	4247,4	2839	1943,7	1360,3	971,4	706,7
165	6646,7	4295,7	2851,6	1939,8	1349,4	958,1	693,3	510,4	381,9
160	2900,4	1959,8	1354,8	956,3	688,2	504	375,2	283,6	217,4
155	1375,8	965,3	690,6	503,1	372,7	280,3	213,9	165,4	129,4
150	700,3	507,4	373,9	279,8	212,5	163,5	127,5	100,5	80,1
145	378,6	281,9	213,1	163,3	126,7	99,5	79	63,4	51,3
140	215,5	164,4	127	99,3	78,5	62,7	50,6	41,3	33,9
135	128,3	99,9	78,7	62,6	50,4	40,9	33,5	27,6	23
130	79,4	63	50,4	40,8	33,3	27,4	22,7	19	16
125	50,9	41	33,3	27,3	22,6	18,8	15,8	13,4	11,4

Fonte: O Autor.

Uma análise inicial feita a partir da observação dos dados da Tabela 12 ressalta a amplitude dos valores: as vidas úteis variam de dezenas de milhões de anos na parte superior a pouco mais de 10 anos na parte inferior da tabela. O Aeroporto Regional do Cariri apresenta, entre os quatro estudados, os maiores valores de vida útil, uma vez que ele apresenta o *mix* mais leve e com menor número de operações (as suas operações correspondem a 8,6%, 1,9% e 0,6% das operações dos *mixes* considerados para os aeroportos de Fortaleza, São Paulo e Atlanta, respectivamente). Se calculada a diferença entre o maior e o menor valor de vida útil gerados pelo FAARFIELD para cada um dos aeroportos, encontram-se acréscimos de 141.770.000%, 17.550.000%, 4.650.000% e 1.685.000% para os aeroportos do Cariri, de Fortaleza, de São Paulo e de Atlanta, respectivamente.

Esses números confirmam que, conforme o *mix* possua aeronaves mais pesadas e com maior número de operações, a amplitude dos dados diminui. Isso se deve à queda de vida útil apresentada pela estrutura quando ela recebe a ação de um tráfego mais pesado e intenso. Quanto maior o volume de tráfego atuante na estrutura, maior o dano sofrido pela mesma, o que a leva a apresentar valores de vida útil menores.

Uma análise dos dados na Tabela 12 mostra que alguns valores se repetem na sua diagonal (os valores a partir da linha de espessura de base igual a 205 mm foram destacados para evidenciar esse fato). Todos os valores acima da linha diagonal destacada também se repetem nas diagonais, assim como alguns dados abaixo. Esses valores de vida útil iguais correspondem a iguais espessuras totais da estrutura do pavimento. Por exemplo, em todas as células da linha de dados destacada, a espessura total do pavimento é igual a 525 mm. O mesmo padrão é observado nas análises dos demais aeroportos.

Para todos eles, existe uma espessura mínima do pavimento simulado no FAARFIELD a partir da qual os dados começam a se repetir. No caso do Aeroporto Regional do Cariri, a repetição se inicia para a espessura total de 500 mm (130 mm de revestimento, 150 mm de base e 220 mm de sub-base), começando em uma célula e se encerrando na célula seguinte. Na linha diagonal acima, espessura total de 510 mm, são 4 células de repetição. Na seguinte, (515 mm de espessura total) 6 células de repetição, e assim, sucessivamente, com aumento gradativo.

Esse comportamento indica possível existência de análise linear pelo FAARFIELD a partir de determinadas condições de solicitação do tráfego e de espessura total da estrutura, deixando de serem consideradas as respostas individuais das camadas de base e sub-base (com suas particulares contribuições de espessura e de material componente à resposta do pavimento ao tráfego) e considerando apenas a espessura total do pavimento.

Enquanto essa análise linear, para um aeroporto de pequeno porte como o do Cariri, se inicia a partir de uma espessura mínima do pavimento de 500 mm, para portes maiores, como os aeroportos de Fortaleza, São Paulo e Atlanta, essas espessuras mínimas são de, respectivamente, 505 mm, 610 mm e 610 mm.

Vale destaque para o fato de que o FAARFIELD faz uma análise similar de vida útil para aeroportos com movimentações consideravelmente diferentes. O Aeroporto Regional do Cariri, que teve *mix* considerado com 91,4% a menos de operações que o de Fortaleza, teve uma espessura mínima a partir da qual os dados começam a se repetir 5 mm inferior à apresentada por este último, enquanto que para Atlanta o programa adotou a mesma espessura mínima que para São Paulo, mesmo o primeiro tendo 224.000 operações a mais, um movimento 71,3% maior.

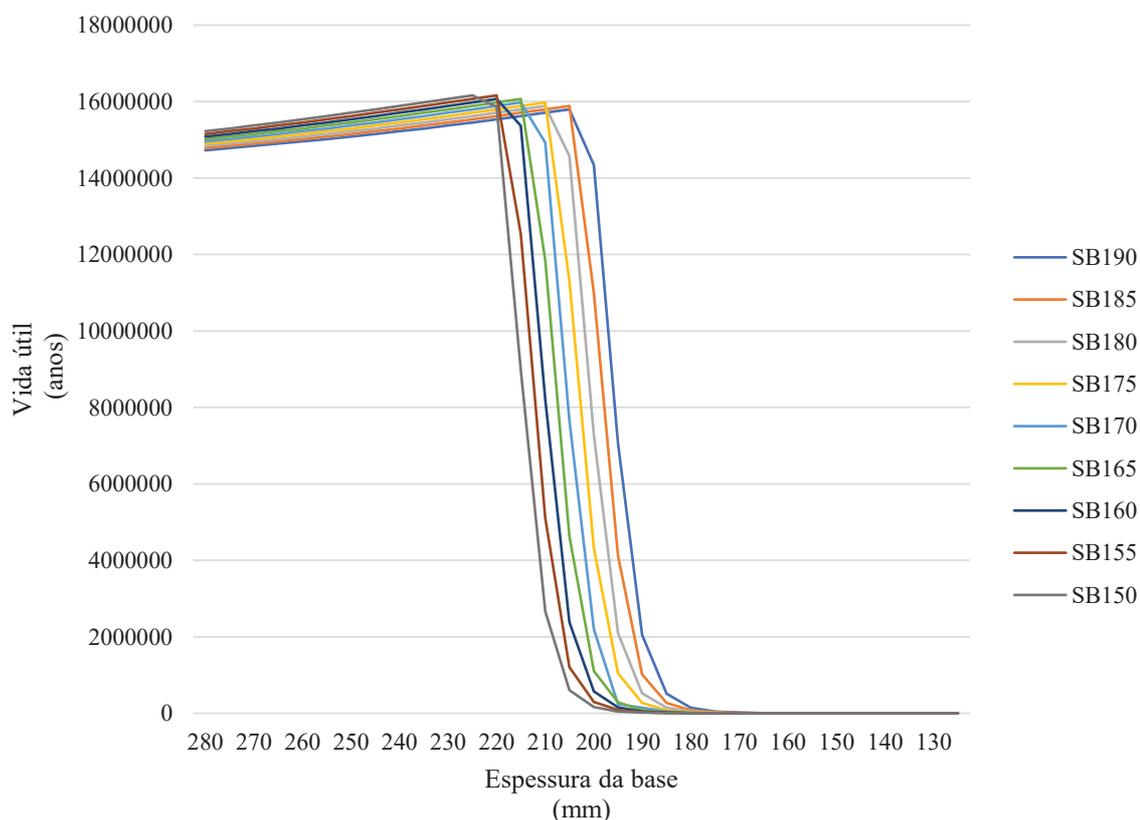
Os dados apresentados na Tabela 12 mostram, ainda, outro comportamento diverso. Conforme se diminui a espessura total do pavimento dentro da área onde há a repetição dos valores de vida útil, o valor calculado pelo FAARFIELD para a vida útil aumenta, seja em se mantendo fixa a espessura da base e se diminuindo a dimensão da sub-base e vice-versa ou diminuindo-se a espessura das duas camadas ao mesmo tempo. Essa tendência dos dados é contrária à lógica observada em campo que mostra que, em se mantendo fixo o volume do tráfego, o pavimento tende a sofrer mais danos conforme se diminui sua espessura, o que o leva a ter uma vida útil menor.

Esse aumento no valor da vida útil reflete a análise linear anteriormente comentada. Se o pavimento diminuir 5 mm no total, seja pela redução da base ou da sub-base, independente do material das camadas, o acréscimo na vida útil terá o mesmo valor. Por exemplo, se um pavimento que possua no total 600 mm de espessura (base de 280 mm e sub-base de 190 mm) passar a ter 595 mm, segundo a Tabela 12, terá um acréscimo de 57.900 anos na sua vida útil, seja pela redução da base para 275 mm ou da sub-base para 185 mm.

Ainda na Tabela 12, esse aumento na vida útil cessa tão logo seja cruzada a última célula com valor repetido das linhas diagonais de repetição, pontos a partir dos quais começa a se observar o comportamento esperado para a vida útil do pavimento, de ser diminuída à medida que se diminui a espessura total do pavimento. Esse padrão dos dados se repete para todos os quatro *mixes* estudados, e se mantém igual mesmo quando se modificam os materiais das camadas de base e sub-base, o que descarta a hipótese de que esse aumento inicial da vida útil com o decréscimo da espessura do pavimento seja atribuído a propriedades particulares de algum dos materiais da biblioteca interna do FAARFIELD.

O Gráfico 1 apresenta esses comportamentos. Nele foram representados os dados da Tabela 12, cada linha fazendo referência uma espessura de sub-base. O Gráfico 1 permite, ainda, se ter uma primeira percepção acerca da sensibilidade dos dados. A leve inclinação do trecho superior do gráfico mostra que os dados não são muito sensíveis às mudanças nas espessuras de base e sub-base enquanto os dados estão contidos na área onde há a repetição dos valores de vida útil. Da mesma forma, a inclinação quase vertical do restante do gráfico representa mudança abrupta dos valores e indica existência de alta sensibilidade dos dados de vida útil para a parte de baixo da Tabela 12, onde não há a repetição de valores.

Gráfico 1 – Valores de vida útil em função da espessura da base; Aeroporto Regional do Cariri.



Fonte: O Autor.

O estudo da sensibilidade dos dados foi feito com o uso do método aplicado por Garg, Guo e McQueen (2004) para pavimentos aeroportuários. O método utiliza a Equação 5, onde, no presente estudo, x é a espessura da camada de base, Δx é a variação dessa espessura, igual a 5 mm para mais ou para menos, e $L(x)$ e $L(x \pm \Delta x)$ são os valores de vida útil correspondentes às espessuras de base x mais ou menos suas variações. Nesse primeiro

momento, x assumindo os valores da camada de base indica o estudo da sensibilidade dos dados às mudanças na espessura dessa camada.

$$S_{x,L} \cong \frac{L[x+\Delta x]-L[x-\Delta x]}{2*\Delta x} * \frac{x}{L[x]} \quad (5)$$

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos com a aplicação da Equação 5 para a estrutura do Aeroporto Regional do Cariri. Nela, as linhas referentes às espessuras de 280 mm e de 125 mm não aparecem, uma vez que para gerar valores para essas linhas seriam necessários dados que não estão disponíveis (não há dados referentes a $L_{(x+\Delta x)}$ para a $x=280$ mm e nem $L_{(x-\Delta x)}$ para a $x=125$ mm). Para cada um dos demais aeroportos foram construídas tabelas similares, apresentadas no Apêndice B.

Os dados da Tabela 13 representam novamente a tendência já comentada anteriormente de crescimento da vida útil com o decréscimo da espessura total do pavimento, aqui indicadas pelos valores negativos da parte de cima da tabela. Para a Equação 5, resultados negativos indicam o aumento de $L(x)$ para o decréscimo de (x) (e vice-versa).

Sendo a magnitude dos valores da Tabela 13, em módulo, a indicação de o quanto $L(x)$ é sensível às alterações de x , constata-se que nessa parte da tabela os resultados de vida útil não são sensíveis, já que os valores de sensibilidade são próximos de zero. O contrário acontece na parte inferior da tabela, onde os altos valores de sensibilidade, que chegam a ser superiores a 80, indicam grandes mudanças nos resultados de vida útil para mudanças de apenas 5 mm na espessura da base.

Uma forma de compreender melhor o tamanho da mudança que os valores de sensibilidade da Tabela 13 representam é comparar esses valores com valores de mudança percentual entre os resultados de vida útil. A Tabela 14, também construída com os resultados de vida útil apresentados na Tabela 12, mostram as mudanças percentuais entre células vizinhas. O cálculo das porcentagens foi feito de cima para baixo, conforme a Equação 2, onde x_n é uma célula qualquer e x_{n+1} é a célula imediatamente abaixo de x_n . Na Tabela 14 não está representada a linha referente à base de 280 mm, uma vez que não há valor de vida útil anterior que desse origem a uma variação percentual.

$$M\% \cong \frac{x_n - x_{n+1}}{x_n} * 100 \quad (2)$$

Tabela 13 – Sensibilidade dos dados de vida útil à variação da espessura da base para o Aeroporto Regional do Cariri.

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	190	185	180	175	170	165	160	155	150
275	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,24	-0,25	-0,26	-0,27
270	-0,21	-0,22	-0,22	-0,22	-0,24	-0,25	-0,25	-0,26	-0,28
265	-0,21	-0,21	-0,22	-0,23	-0,25	-0,25	-0,26	-0,27	-0,28
260	-0,21	-0,21	-0,23	-0,24	-0,24	-0,25	-0,27	-0,27	-0,28
255	-0,21	-0,22	-0,24	-0,24	-0,25	-0,26	-0,27	-0,28	-0,28
250	-0,22	-0,23	-0,24	-0,24	-0,26	-0,26	-0,27	-0,28	-0,28
245	-0,23	-0,23	-0,24	-0,25	-0,25	-0,26	-0,27	-0,28	-0,28
240	-0,23	-0,23	-0,25	-0,25	-0,26	-0,27	-0,27	-0,27	-0,27
235	-0,23	-0,24	-0,24	-0,25	-0,26	-0,26	-0,27	-0,27	-0,27
230	-0,23	-0,24	-0,25	-0,26	-0,26	-0,26	-0,26	-0,26	-0,27
225	-0,23	-0,24	-0,25	-0,25	-0,25	-0,26	-0,26	-0,26	0,29
220	-0,24	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	0,84	4,81	9,96
215	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24	1,29	5,52	10,99	18,96	31,57
210	-0,24	-0,24	1,61	6,01	11,71	20,26	33,18	46,62	65,89
205	1,78	6,19	12,10	21,14	34,06	47,58	65,68	81,68	84,64
200	12,18	21,40	34,28	47,60	64,61	78,46	78,06	75,70	70,38
195	33,93	47,23	62,86	75,18	74,42	69,93	67,17	61,92	56,62
190	60,73	71,85	71,30	66,83	62,40	59,68	54,74	50,44	46,79
185	68,40	64,15	59,67	55,90	53,09	48,85	45,26	41,93	38,92
180	57,41	53,31	50,22	47,41	43,89	40,63	37,67	35,08	32,81
175	47,77	45,40	42,64	39,45	36,54	33,99	31,76	29,79	28,04
170	41,28	38,38	35,50	32,99	30,80	28,86	27,14	25,61	24,23
165	34,55	32,08	29,90	27,99	26,30	24,79	23,44	22,23	21,14
160	29,08	27,19	25,52	24,04	22,71	21,52	20,44	19,46	18,58
155	24,79	23,32	22,02	20,84	19,78	18,83	17,95	17,16	16,45
150	21,36	20,20	19,16	18,22	17,36	16,59	15,87	15,22	14,63
145	18,57	17,64	16,80	16,03	15,34	14,69	14,11	13,54	13,06
140	16,26	15,50	14,82	14,20	13,61	13,08	12,59	12,14	11,69
135	14,32	13,70	13,14	12,62	12,11	11,65	11,24	10,91	10,51
130	12,67	12,15	11,71	11,25	10,85	10,49	10,14	9,72	9,43

Fonte: O Autor.

Tabela 14 – Mudança dos valores de vida útil entre células vizinhas para variação na espessura da base para o Aeroporto Regional do Cariri (em %).

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	190	185	180	175	170	165	160	155	150
275	-0,39	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,42	-0,46	-0,47	-0,47
270	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,42	-0,46	-0,47	-0,47	-0,51
265	-0,40	-0,40	-0,40	-0,42	-0,46	-0,47	-0,47	-0,51	-0,52
260	-0,40	-0,40	-0,42	-0,46	-0,47	-0,47	-0,51	-0,52	-0,52
255	-0,40	-0,42	-0,46	-0,47	-0,47	-0,51	-0,52	-0,52	-0,56
250	-0,42	-0,46	-0,47	-0,47	-0,51	-0,52	-0,52	-0,56	-0,56
245	-0,46	-0,47	-0,47	-0,51	-0,52	-0,52	-0,56	-0,56	-0,56
240	-0,47	-0,47	-0,51	-0,52	-0,52	-0,56	-0,56	-0,56	-0,57
235	-0,47	-0,51	-0,52	-0,52	-0,56	-0,56	-0,56	-0,57	-0,57
230	-0,51	-0,52	-0,52	-0,56	-0,56	-0,56	-0,57	-0,57	-0,58
225	-0,52	-0,52	-0,56	-0,56	-0,56	-0,57	-0,57	-0,58	-0,58
220	-0,52	-0,56	-0,56	-0,56	-0,57	-0,57	-0,58	-0,58	1,87
215	-0,56	-0,56	-0,56	-0,57	-0,57	-0,58	4,37	22,42	43,35
210	-0,56	-0,56	-0,57	-0,57	6,58	26,23	46,53	59,29	70,28
205	-0,56	-0,57	8,25	29,20	48,70	60,94	70,96	76,36	77,22
200	9,23	30,78	50,05	61,87	71,22	76,08	76,01	75,43	73,86
195	50,74	62,54	71,20	75,71	75,58	74,19	73,36	71,47	69,26
190	70,99	75,29	75,22	73,79	72,18	71,21	69,07	66,97	64,99
185	74,89	73,48	71,78	70,19	68,97	66,83	64,81	62,72	60,62
180	71,54	69,68	68,19	66,76	64,72	62,60	60,47	58,42	56,45
175	67,57	66,31	64,70	62,56	60,40	58,32	56,32	54,43	52,63
170	64,58	62,60	60,41	58,29	56,27	54,35	52,52	50,78	49,13
165	60,48	58,34	56,28	54,33	52,47	50,71	49,03	47,46	45,96
160	56,36	54,38	52,49	50,70	49,00	47,40	45,88	44,44	43,07
155	52,57	50,74	49,03	47,39	45,84	44,38	42,99	41,68	40,48
150	49,10	47,44	45,86	44,38	42,98	41,67	40,39	39,24	38,10
145	45,94	44,44	43,01	41,64	40,38	39,14	38,04	36,92	35,96
140	43,08	41,68	40,40	39,19	38,04	36,98	35,95	34,86	33,92
135	40,46	39,23	38,03	36,96	35,80	34,77	33,79	33,17	32,15
130	38,11	36,94	35,96	34,82	33,93	33,01	32,24	31,16	30,43
125	35,89	34,92	33,93	33,09	32,13	31,39	30,40	29,47	28,75

Fonte: O Autor.

A constatação feita a partir da Tabela 13, de que os dados da parte superior da tabela têm baixa sensibilidade a alterações na base, é confirmada pelos dados da Tabela 14. A mudança percentual dos dados na parte de cima da Tabela 14 ficou entre 0,39% e 0,58% (valores em módulo), equivalentes à variação da sensibilidade na Tabela 13, que foi de 0,22 a 0,29 (valores em módulo). Assim, conclui-se que, para maiores espessuras do pavimento, a sensibilidade às mudanças na camada de base é baixa. Já na parte inferior da Tabela 14 as

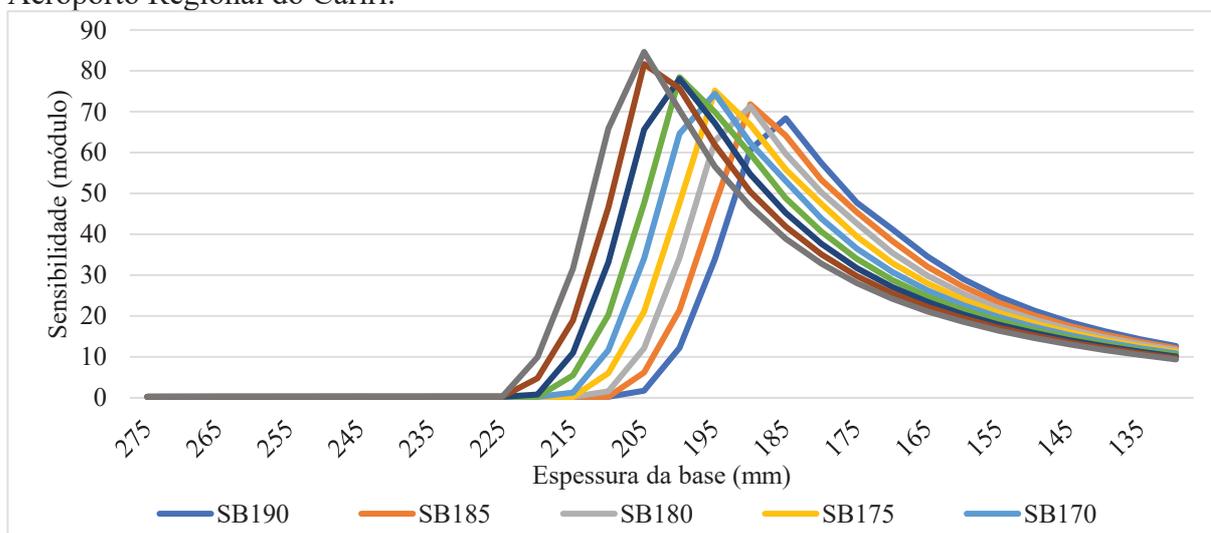
porcentagens são altas (verificam-se mudanças de quase 80% para a redução de apenas 5 mm na espessura da base), o que indica que a sensibilidade é maior para menores espessuras totais do pavimento.

Nas Tabelas 13 e 14 foram destacadas as células que correspondem ao último valor de cada coluna que faz parte de uma linha diagonal de repetição de valores de vida útil. Como comentado quando se apresentaram a Tabela 12 e o Gráfico 1, os valores de vida útil começam a cair a partir do momento em que os dados param de se repetir nas linhas diagonais. Esse fato está diretamente ligado ao aumento da sensibilidade na parte inferior da Tabela 13 e ao grande aumento das mudanças percentuais na Tabela 14. É a partir das células destacadas, que correspondem ao fim da área onde os valores se repetem, que a sensibilidade começa a aumentar.

Os comportamentos comentados anteriormente, da baixa sensibilidade a alterações na base para maiores espessuras do pavimento (parte de cima das tabelas), alta sensibilidade para espessuras menores (parte de baixo das tabelas) e aumento da sensibilidade a partir da saída da zona de repetição de valores de vida útil, se repetem para os demais aeroportos estudados, conforme pode ser verificado nas tabelas dos Apêndices B e C e nos gráficos do Apêndice D.

Os dados da Tabela 13 foram transformados em gráfico para possibilitar a visualização da mudança da sensibilidade de acordo com a espessura do pavimento. O Gráfico 2 mostra essa distribuição das sensibilidades. Nele, cada linha representa uma espessura de sub-base.

Gráfico 2 – Sensibilidade dos resultados de vida útil à variação da espessura da base para o Aeroporto Regional do Cariri.



Fonte: O Autor.

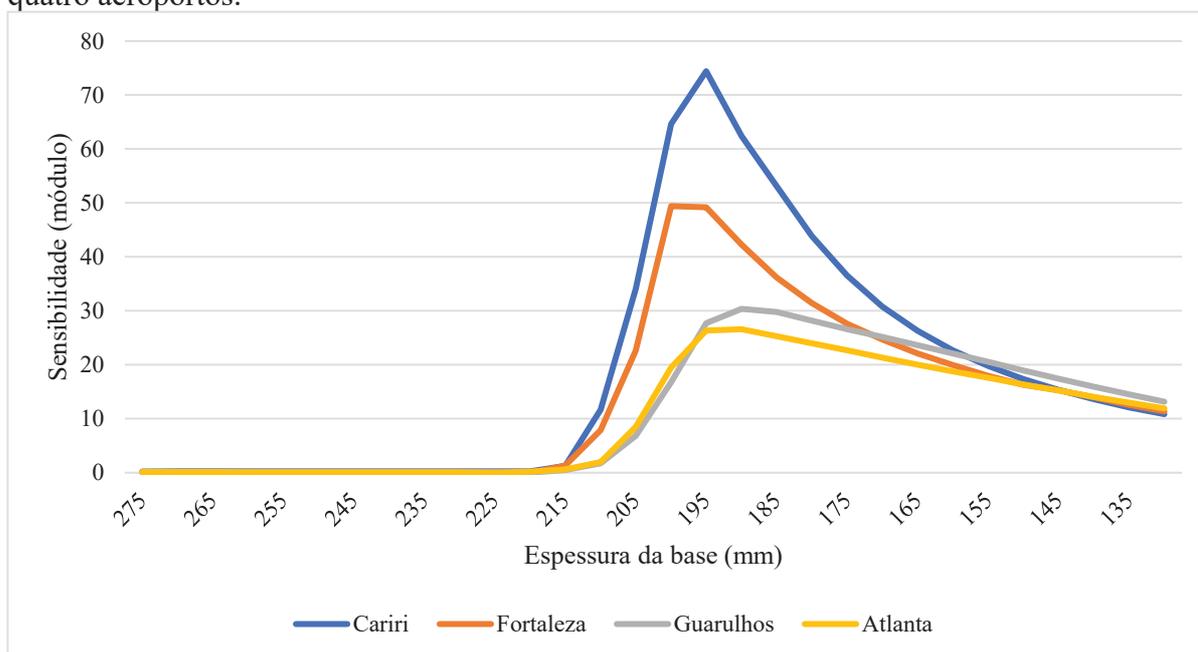
O Gráfico 2 mostra que a sensibilidade tem a mesma tendência de distribuição para todas as espessuras de sub-base, começando próximo de zero, aumentando a partir de determinado ponto até atingir um pico e então começando a cair. No gráfico, fica clara a tendência de a sensibilidade ser maior para estruturas mais delgadas, no entanto, também se verifica a existência de um pico que não coincide com as menores espessuras estudadas, impedindo a afirmação de que a sensibilidade será maior quanto menor a espessura total do pavimento.

No Gráfico 2, as curvas são aproximadamente iguais entre si, o que mostra que os dados seguem o mesmo comportamento, independente da espessura assumida pela sub-base, havendo apenas o deslocamento da curva pela influência da redução na espessura total do pavimento. Os gráficos gerados para os aeroportos de Fortaleza, São Paulo e Atlanta, apresentados no Anexo D, seguem o mesmo padrão, havendo picos menos expressivos nas curvas dos aeroportos de grande porte, o que pode ser um indicativo de que a sensibilidade é menor para maiores volumes de tráfego.

O Gráfico 3 apresenta a comparação entre os dados de sensibilidade da vida útil às mudanças na espessura da base para os quatro aeroportos. Para a obtenção desse gráfico foram utilizados os dados da coluna central da tabela de sensibilidade de cada um dos aeroportos. Não se optou pelo uso da média dos resultados de cada espessura de sub-base devido à distribuição escalonada dos valores ao longo das tabelas, o que levaria a médias que não caracterizariam bem o comportamento dos dados.

Como apresentado no Gráfico 2, todas as linhas seguem a mesma distribuição dos dados, havendo apenas o escalonamento conforme se diminui a espessura da camada de sub-base. Dessa forma, a curva central representa satisfatoriamente o média do comportamento dos dados, motivo pelo qual esta foi a linha selecionada para a realização das comparações do Gráfico 3.

Gráfico 3: Sensibilidade dos resultados de vida útil à variação da espessura da base para os quatro aeroportos.



Fonte: O Autor.

O Gráfico 3 evidencia a influência do volume de tráfego sobre a sensibilidade dos dados. Conforme o *mix* de aeronaves é mais pesado, os dados se tornam menos sensíveis. Para os aeroportos do Cariri, Fortaleza, São Paulo e Atlanta, os máximos valores de sensibilidade observados nas tabelas de sensibilidade são, respectivamente, 84, 53, 31 e 28 (valores com frações decimais suprimidas). Junto com a sensibilidade, também cai a variância dos dados (variância amostral), mostrando que quanto mais pesado o *mix*, menos dispersos são os valores de vida útil calculados pelo FAARFIELD. Para a ordem dos aeroportos apresentada acima, a variância dos dados de sensibilidade que estão fora das zonas de repetição de valores são, respectivamente, 427, 164, 63 e 42 (valores com frações decimais suprimidas).

O estudo de sensibilidade feito anteriormente utilizando a espessura da base foi também feito para a sub-base. Nessa segunda análise, o método de Garg, Guo e McQueen (2004) foi aplicado a todos os aeroportos com x assumindo, na Equação 5, os valores das espessuras da sub-base de cada aeroporto. Assim como feito na primeira análise, os dados de vida útil aplicados na fórmula são os presentes nas tabelas de resultados de vida útil de cada aeroporto.

$$S_{x,L} \cong \frac{L[x+\Delta x]-L[x-\Delta x]}{2*\Delta x} * \frac{x}{L[x]} \quad (5)$$

Para o Aeroporto Regional do Cariri, a análise foi executada utilizando os dados de vida útil da Tabela 12. Os resultados da segunda análise para o aeroporto do Cariri estão apresentados na Tabela 15. Para os demais aeroportos, os resultados da segunda análise estão apresentados no Apêndice E.

Tabela 15 – Sensibilidade dos dados de vida útil à variação da espessura da sub-base para o Aeroporto Regional do Cariri.

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)						
	185	180	175	170	165	160	155
280	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,13	-0,14	-0,14
275	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,15	-0,15
270	-0,15	-0,14	-0,14	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15
265	-0,15	-0,15	-0,15	-0,16	-0,16	-0,16	-0,16
260	-0,15	-0,16	-0,16	-0,16	-0,16	-0,16	-0,16
255	-0,16	-0,17	-0,16	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17
250	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17
245	-0,17	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,17
240	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18
235	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,18	-0,18
230	-0,19	-0,19	-0,20	-0,19	-0,19	-0,18	-0,18
225	-0,20	-0,20	-0,20	-0,19	-0,19	-0,18	-0,18
220	-0,21	-0,20	-0,20	-0,19	-0,19	-0,18	0,20
215	-0,21	-0,20	-0,20	-0,19	0,63	3,68	7,89
210	-0,21	-0,20	1,05	4,69	9,34	13,15	16,84
205	1,42	5,65	10,70	14,83	18,78	22,96	22,84
200	11,87	16,52	20,60	24,73	24,30	22,68	21,61
195	22,30	26,36	26,05	24,06	22,26	21,13	18,99
190	27,79	25,74	23,59	21,82	20,56	18,45	16,68
185	25,21	23,08	21,43	19,95	18,05	16,29	14,67
180	22,56	21,07	19,47	17,62	15,89	14,35	12,98
175	20,81	19,00	17,16	15,52	14,06	12,76	11,59
170	18,48	16,73	15,18	13,79	12,55	11,44	10,43
165	16,34	14,87	13,55	12,37	11,30	10,33	9,46
160	14,59	13,33	12,20	11,17	10,25	9,40	8,62
155	13,13	12,05	11,06	10,16	9,35	8,59	7,92
150	11,90	10,96	10,09	9,30	8,58	7,91	7,31
145	10,86	10,02	9,26	8,56	7,91	7,31	6,77
140	9,96	9,23	8,55	7,93	7,34	6,77	6,27
135	9,19	8,53	7,91	7,32	6,82	6,35	5,90
130	8,52	7,93	7,33	6,84	6,38	5,92	5,47
125	7,94	7,41	6,86	6,39	5,97	5,47	5,09

Fonte: O Autor.

Atenção deve ser dada à leitura das tabelas de resultados da segunda análise. Na Tabela 13, que apresenta os resultados da primeira análise para o Aeroporto Regional do Cariri, a variação dos dados é lida de cima para baixo nas colunas, direção em que ocorre a variação dos valores de x (já que na primeira análise foi estudada a mudança da espessura da base, que varia na vertical). Para a Tabela 15, que apresenta os resultados da segunda análise para o aeroporto do Cariri, a leitura deve ser feita na horizontal, da direita para a esquerda nas linhas, uma vez que essa é a direção em que ocorre a variação dos valores de x (a segunda análise estuda a mudança nos valores de sub-base, que variam na horizontal)

Entre as constatações feitas a partir da análise da influência da espessura da camada de base na sensibilidade dos dados, as únicas que foram também constatadas para o estudo da influência da sub-base na sensibilidade dos dados de vida útil foram a de que a sensibilidade é baixa para pavimentos mais espessos e alta para pavimentos com espessuras menores.

Enquanto a primeira análise mostrou, através do Gráfico 2, o mesmo comportamento para todas as curvas, a segunda análise não possibilitou a construção de um gráfico a partir da Tabela 15 devido a todas as curvas terem comportamentos diferentes. Sendo cada espessura de base uma curva do gráfico, as primeiras curvas apresentaram queda com posterior aumento dos valores da vida útil, passando, a partir de determinado ponto, a ter perfil apenas descendente.

Enquanto para o Gráfico 2 as linhas eram aproximadamente iguais, com o mesmo comportamento e espaçadas apenas devido à redução da espessura total do revestimento, os dados da Tabela 15 deram origem a curvas sem nenhuma similaridade. Esse fato pode ter sido observado devido à pequena faixa de variação dos valores de sub-base. Enquanto os valores de base variaram 30 vezes na Tabela 13 (que deu origem ao Gráfico 2), os de sub-base só variaram 7 vezes na Tabela 15.

A primeira análise, feita com a variação da espessura da base, permitiu concluir-se que a sensibilidade era menor quanto mais pesado fosse o tráfego do aeroporto. Já a análise feita com a variação da espessura da sub-base não permitiu essa conclusão. Para os aeroportos do Cariri, de Fortaleza, de São Paulo e de Atlanta, os maiores valores de sensibilidade observados foram 27, 36, 32 e 26 (valores com fração decimal suprimida), respectivamente. Se observados apenas os três últimos valores da sequência, a conclusão feita na primeira análise valeria também para a segunda. No entanto, o valor referente ao Aeroporto do Cariri é praticamente o mesmo do Aeroporto de Atlanta, que possui um tráfego muito mais pesado, (311 mil operações a mais) e com aeronaves de porte muito superior ao das que operam no

Aeroporto do Cariri, o que mostra que para a variação da sub-base a conclusão de que a sensibilidade diminui com o volume do tráfego não pode ser feita a partir da quantidade de dados analisada.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo principal estudar a sensibilidade dos dados que o *software* FAARFIELD gera quando utilizado na realização de análises de vida útil de pavimentos aeroportuários de quatro aeroportos distintos, a fim de verificar quais *inputs* influenciam nos dados e como acontece essa variabilidade dos mesmos. Para tanto, séries de valores de vida útil foram gerados e comparados entre si. Essa seção apresenta as principais conclusões feitas a partir dessas comparações, além de expor as limitações desta pesquisa e de deixar algumas recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Principal conclusão

Considerando as análises realizadas neste trabalho, conclui-se que o FAARFIELD não é completamente adequado à realidade brasileira de pavimentação aeroportuária. A variabilidade dos dados gerados pelo *software* foi muito alta e os materiais aplicáveis às camadas do pavimento presentes na biblioteca interna do programa não atendem completamente às necessidades dos pavimentos aeroportuários nacionais, pois não representam bem as características dos materiais utilizados nas estruturas brasileiras.

5.2 Principais constatações quanto às mudanças na camada de base

A vida útil não é sensível para espessuras de base maiores que 215 mm. Abaixo desse valor, as mudanças na espessura da base fazem os dados de vida útil se alterarem consideravelmente. Mesmo com o perfil decrescente apresentado pelas curvas de sensibilidade conforme a espessura da base se aproxima da mínima para o *software*, a sensibilidade continua alta. Isso leva à conclusão de que a vida útil do FAARFIELD é sensível à mudança na espessura da camada de base.

5.3 Principais constatações quanto às mudanças no volume de tráfego

A influência que o volume de tráfego apresentou nas análises realizadas se reflete no grau de sensibilidade da vida útil às mudanças das espessuras das camadas. Pode-se concluir que a sensibilidade da vida útil de um pavimento a alterações na camada de base será menor quanto maior for o volume de tráfego. A variabilidade dos dados gerados pelo

FAARFIELD também é menor para volumes de tráfego maiores (variância amostral dos dados é menor para tráfegos maiores). Para alterações na espessura da camada de sub-base não se identificou padrão que possibilitasse concluir a maneira como o volume de tráfego influencia na sensibilidade da vida útil quando são promovidas alterações na espessura dessa camada.

5.4 Principais constatações quanto às mudanças na camada de sub-base

Para a análise da influência da camada da sub-base, o conjunto de dados utilizado não foi de tamanho suficiente para que se pudesse concluir como se comporta a vida útil do FAARFIELD para alterações nessa camada. Contudo, sabe-se que a mesma apresenta influência nos resultados, conforme mostram os resultados.

5.5 Limitações da pesquisa

A execução desta pesquisa apresentou algumas limitações, principalmente no que se refere aos dados. A principal delas diz respeito justamente à obtenção destes. Após o processamento das informações, o FAARFIELD retorna a vida útil como um valor numérico na tela do programa. Esse valor não pode ser copiado e o *software* não conta com a alternativa de exportar o resultado para um formato que possa ser implementado em outros programas de computador, o que pode ser visto como uma primeira limitação.

A segunda e principal limitação é uma implicação do que foi comentado no parágrafo anterior. A análise consistiu, no seu primeiro passo, em montar tabelas com resultados de vida útil para todas as combinações de espessura de base e de sub-base, uma para cada aeroporto. Cada tabela possui 30 linhas e 9 colunas, totalizando 270 células. Como o FAARFIELD não permite que o usuário copie o valor de vida útil gerado para que possa ser colado em uma planilha, um total de 1.080 valores de vida útil (somando o total de cada aeroporto) teve que ser manualmente digitado. Uma vez que aproximadamente metade dos resultados de vida útil chega a conter sete dígitos, a susceptibilidade de erro no momento da digitação dos valores é grande.

A terceira limitação se refere à quantidade de dados utilizados nas análises da camada de sub-base. Apesar de os mesmos resultados de vida útil terem sido empregados tanto nas análises da base quanto nas da sub-base, a primeira possui curvas com quantidades de pontos mais de três vezes maior em relação à segunda. Para a análise da base, os valores variaram de 125 mm a 280 mm, gerando 30 pontos para cada curva. Já para a sub-base, os

valores variaram apenas dentro do intervalo estabelecido, de ± 20 mm em relação ao valor arredondado da espessura dimensionada pelo FAARFIELD. Isso fez com que as curvas para a sub-base tivessem apenas 7 pontos, quantidade insuficiente (neste caso) para a construção de gráficos que possibilitassem conclusões acerca da influência da sub-base na sensibilidade dos dados.

5.6 Recomendações para trabalhos futuros

Os seguintes pontos são recomendados para futura exploração em pesquisas, levando em consideração as variáveis abordadas por esta pesquisa, pelos resultados obtidos e pelas limitações apresentadas pela mesma:

- a) utilizar um conjunto de dados maior para as análises envolvendo a sub-base;
- b) estudo da influência do subleito na sensibilidade dos dados de vida útil;
- c) estudo da influência do tipo e da espessura do revestimento na sensibilidade dos dados de vida útil;
- d) estudo que envolva o código-fonte do *software*, de forma a se compreender as considerações feitas pelo mesmo nos seus processos de cálculo.

REFERÊNCIAS

- ANAC. **Declaração de capacidade S18 – Aeroporto Internacional Pinto Martins**. Agência Nacional da Aviação Civil, 2018a. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/>>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- _____. **Declaração de capacidade W18 – Aeroporto Internacional Pinto Martins**. Agência Nacional da Aviação Civil, 2018b. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/>>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- _____. **Declaração de capacidade W19 – Aeroporto Internacional de São Paulo**. Agência Nacional da Aviação Civil, 2019a. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/>>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- _____. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil: RBAC nº 153, emenda nº 4**. Agência Nacional da Aviação Civil, 2019b.
- ATLANTA. **Comprehensive Annual Financial Report: For the fiscal years ended June 30, 2018 and 2017**. Department of Aviation, City of Atlanta, 2018. Disponível em: <<http://www.atl.com/business-information/reports/>>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- _____. **Operating statistics 2018: Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport**. City of Atlanta, 2019. Disponível em: <<http://www.atl.com/business-information/statistics/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BRASIL. **Lei nº 1.602**, de 13 de maio de 1952. Denomina “Aeroporto Pinto Martins” o aeroporto do Cocorote em Fortaleza. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1950-1959/lei-1602-13-maio-1952-361351-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- _____. **Lei nº 1.909**, de 21 de julho de 1953. Dispõe sobre a denominação dos aeroportos e aeródromos nacionais. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1950-1959/lei-1909-21-julho-1953-367042-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- _____. **Lei nº 10.134**, de 28 de novembro de 2001. Denomina “Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos – Governador André Franco Montoro” o aeroporto internacional da cidade de Guarulhos, Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/L10314.htm>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- CEARÁ. **Lei nº 13.088**, de 20 de dezembro de 2000. Denomina Orlando Bezerra de Menezes o Aeroporto Regional do Cariri, na cidade de Juazeiro do Norte – Ceará. Fortaleza: Palácio do Governo do Estado do Ceará, 2000. Disponível em: <<https://belt.al.ce.gov.br/index.php/legislacao-do-ceara/denominacao-de-equipamentos-publicos/item/2891-lei-n-13-088-de-20-12-00-do-30-12-00>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

DECEA. **Carta de aeródromo (ADC) – Fortaleza/Pinto Martins, INTL (SBFZ).**

Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2019a. Disponível em:

<<https://www.aisweb.aer.mil.br/?i=aerodromos&codigo=SBGR>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

_____. **Carta de aeródromo (ADC) – Juazeiro do Norte/Orlando Bezerra de Menezes.**

Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2019b. Disponível em: <

<https://www.aisweb.aer.mil.br/?i=aerodromos&codigo=SBJU>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

_____. **Carta de aeródromo (ADC) – São Paulo/Guarulhos-Gov. André Franco**

Montoro, INTL (SBGR). Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2019c. Disponível

em: <<https://www.aisweb.aer.mil.br/?i=aerodromos&codigo=SBFZ>>. Acesso em: 11 nov.

2019.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation – AC 150/6320-6E.** Federal Aviation Administration. United States Department of Transportation. Washington, DC, 2009.

_____. **Airport Pavement Design and Evaluation – AC 150/6320-6F.** Federal Aviation Administration. United States Department of Transportation. Washington, DC, 2016.

_____. **Airport Diagram – Hartsfield-Jackson Atlanta INTL (ATL).** Federal Aviation Administration. United States Department of Transportation. Washington, DC, 2019.

Disponível em: <https://www.faa.gov/airports/runway_safety/diagrams/>. Acesso em: 11 nov. 2019.

DIRENG. **Especificações gerais para obras de infra-estrutura aeroportuária: 04.05.610 – Concreto Betuminoso Usinado a Quente.** Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Rio de Janeiro, 2002.

FRAPORT. **Movimentação aeroportuária 2018: Aeroporto Internacional de Fortaleza.**

Disponível em: <<https://fortaleza-airport.com.br/pt/informacoes-operacionais/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

GARG, Navneet; GUO, Edward; MCQUEEN, Roy. **Operational life of airports pavements.** Report DOT/FAA/AR-04/46, Federal Aviation Administration, Washington, DC. 2004.

GOOGLE. **Google Maps – Imagens de satélite 2019.** Disponível em:

<<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em 13 nov. 2019.

GRU AIRPORTS. **Movimentação aeroportuária 2018: Aeroporto Internacional de São**

Paulo, 2019. Disponível em: <<https://www.gru.com.br/pt/institucional/informacoes-operacionais/movimentacao-aeroportoaria>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

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

ICAO. **Aerodrome Design Manual: Part 1 – Runways.** 3rd. ed. International Civil Aviation Organization, 2006.

INFRAERO. **Aeroporto de Juazeiro do Norte – Características**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, 2019a. Disponível em: <<https://www4.infraero.gov.br/aeroportos/aeroporto-de-juazeiro-do-norte-orlando-bezerra-de-menezes/sobre-o-aeroporto/caracteristicas/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

_____. **Anuário Estatístico Operacional 2018**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Brasília, 2019b. Disponível em: <<https://transparencia.infraero.gov.br/estatisticas/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

_____. **Memorial de Cálculo para Implantação de Saída Rápida para a Pista 27L do Aeroporto Internacional de São Paulo (GRU/SBGR)**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Brasília, 2011.

_____. **Movimento operacional: Aeroporto Internacional de Fortaleza/CE**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Fortaleza, 2017.

_____. **Movimento operacional: Aeroporto Regional de Juazeiro do Norte/CE**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Juazeiro do Norte, 2019c.

KB ENVIRONMENTAL SCIENCES. **Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport - Documentation for the CY 2011 Criteria Air Pollutant Emission Inventory**. City of Atlanta/Department of Aviation, Atlanta, EUA, 2014.

LIRA, Mateus do Nascimento; OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de. Análise de sensibilidade do *software* FAARFIELD nos resultados de vida útil de pavimentos aeroportuários. In: Simpósio de Transporte Aéreo, 18., 2019, Brasília. **Anais do XVIII SITRAER**. Brasília: Unb, 2019.

OAG AVIATION WORLDWIDE LIMITED. **On-time performance for airlines and airports and TOP 20 busiest routes**. 2018. Disponível em: <https://www.oag.com/hubfs/Free_Reports/Punctuality_LeagLe/2018/PunctualityReport2018.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2019.

OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de. **Proposição de estratégias de manutenção de pavimentos aeroportuários baseadas na macrotextura e no atrito: estudo de caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PURVIS, J. **Sensitivity Analysis of Pavement Thickness Design Software for Local Roads in Iowa**. Dissertação (Mestrado) - University of Iowa, Iowa, EUA, 2013.

RAMOS, Bernardo Antônio Silva. **Estudo de casos com o emprego de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da Federal Aviation Administration (FAA)**. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

ROBERTS, Michael D. **Dictionary of American Naval Aviation Squadrons: The History of VP, VPB, VP(HL) and VP(AM) Squadrons**. Naval Historical Center, Department of the Navy, Washington, D.C., 2000.

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

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

SIXTANT. **U.S. Navy Bases in Brazil – USN NAF Fortaleza**. Disponível em: <<http://www.sixtant.net/2011/>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

TAFFE JÚNIOR, Elemar, J. Uma alternativa econômica quanto ao dimensionamento de pistas de aeródromos. In: Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA, 2002, São José dos Campos. **Anais do VIII ENCITA**, São Paulo: 2002. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/viiiencita/>>. Acesso em: 05 ago. 2019.

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

WELLS, Alexander T.; YOUNG, Seth B. **Airport Planning & Management**. 5th. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS DE VIDA ÚTIL, EM ANOS

A.1 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE FORTALEZA

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	295	290	285	280	275	270	265	260	255
280	1289234	1291575	1293932	1296304	1298691	1301095	1303514	1305949	1308400
275	1291575	1293932	1296304	1298691	1301095	1303514	1305949	1308400	1310867
270	1293932	1296304	1298691	1301095	1303514	1305949	1308400	1310867	1313350
265	1296304	1298961	1301095	1303514	1305949	1308400	1310867	1313350	1315850
260	1298691	1301095	1303514	1305949	1308400	1310867	1313350	1315850	1318366
255	1301095	1303514	1305949	1308400	1310867	1313350	1315850	1318366	1320899
250	1303514	1305949	1308400	1310867	1313350	1315850	1318366	1320899	1323448
245	1305949	1308400	1310867	1313350	1315850	1318366	1320899	1323448	1326015
240	1308400	1310867	1313350	1315850	1318366	1320899	1323448	1326015	1328599
235	1310867	1313350	1315850	1318366	1320899	1323448	1326015	1328599	1331239
230	1313350	1315850	1318366	1320899	1323448	1326015	1328599	1331239	1333908
225	1315850	1318366	1320899	1323448	1326015	1328599	1331239	1333908	1326954
220	1318366	1320899	1323448	1326015	1328599	1331239	1326630	1298954	1226408
215	1320899	1323448	1326015	1328599	1326181	1303888	1237066	1085460	749496,4
210	1323448	1326015	1325587	1308461	1248320	1113189	801397,7	465767,6	258224
205	1324859	1311586	1259104	1142135	856282	504772,1	279254,6	157013,9	90301,6
200	1269240	1171115	912127,1	550278,1	304103,7	169847,3	96965,7	57172,7	34799,7
195	970873,9	603308,9	333451,6	185028,2	104847	61316,6	37044,4	23041,2	14663,6
190	368160,8	202944,2	114160,2	66199,6	39686,7	24522,2	15512,7	10049,8	6656,5
185	125180,8	71951,4	42790,1	26248,1	16513,1	10633	7003,4	4709,2	3222,8
180	46435,4	28269,3	17685,7	11318,2	7411,6	4957,3	3380,7	2330	1632,3
175	19057,5	12119,3	7890,1	5248,3	3561	2447,5	1706,8	1209,2	869,5
170	8448,5	5588,6	3771,2	2586,1	1795,1	1266,1	906,5	654,4	477,8
165	4018,3	2748,3	1898,8	1333,3	950,6	685,1	498,1	366,9	273,8
160	2020,1	1412,1	1002,3	721,5	522,4	383,3	284,8	214,2	161,8
155	1062,8	762,2	551,1	402,7	298	223,3	169,2	127,1	96,4
150	584,8	425,6	313,7	234,1	176,7	133,4	100,8	77	59,4
145	332	246,8	185,6	140,7	105,9	80,6	61,9	48,1	37,7
140	196	148,5	111,8	84,8	64,9	50,2	39,2	30,9	24,5
135	118,7	89,7	68,4	52,8	41,1	32,3	25,5	20,3	16,3
130	72,5	55,7	43,2	33,8	26,7	21,2	16,9	13,6	11
125	45,6	35,6	28	22,2	17,7	14,2	11,5	9,3	7,6

A.2 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	370	365	360	355	350	345	340	335	330
280	302303,1	302890,5	303481,5	304075,9	304674	305275,6	305882,1	306494,4	307110,5
275	302890,5	303481,5	304075,9	304674	305275,6	305882,1	306494,4	307110,5	307730,3
270	303481,5	304075,9	304674	305275,6	305882,1	306494,4	307110,5	307730,3	308353,8
265	304075,9	304674	305275,6	305882,1	306494,4	307110,5	307730,3	308353,8	308981,2
260	304674	305275,6	305882,1	306494,4	307110,5	307730,3	308353,8	308981,2	309612,4
255	305275,6	305882,1	306494,4	307110,5	307730,3	308353,8	308981,2	309612,4	310247,4
250	305882,1	306494,4	307110,5	307730,3	308353,8	308981,2	309612,4	310247,4	310886,3
245	306494,4	307110,5	307730,3	308353,8	308981,2	309612,4	310247,4	310886,3	311529,1
240	307110,5	307730,3	308353,8	308981,2	309612,4	310247,4	310886,3	311529,1	312176
235	307730,3	308353,8	308981,2	309612,4	310247,4	310886,3	311529,1	312176	312826,8
230	308353,8	308981,2	309612,4	310247,4	310886,3	311529,1	312176	312826,8	313481,6
225	308981,2	309612,4	310247,4	310886,3	311529,1	312176	312826,8	312929,1	311546,3
220	309612,4	310247,4	310886,3	311529,1	312176	312558,8	311722,3	308487,5	302394,4
215	310247,4	310886,3	311529,1	312150,5	311722,3	309123,5	303903	294792,9	273484,9
210	310886,3	311529,1	311561	309601,3	305185,8	297236,3	280379,6	239667,1	177031,5
205	311145,6	309930,8	306250,4	299391,5	286041,8	252799,8	192702,7	133807,3	89933,4
200	307107	301261,4	291136,5	264479,9	209716,5	147456,5	99425,1	65917,2	43275,6
195	294060,6	274248,4	225805,9	162775,4	110175,9	73035	47831,3	31476,6	20875,7
190	241971,2	178934,7	122099,3	81111,4	53076,2	34764,2	22944,2	15269,6	10245,5
185	135635,1	90330,4	59137	38549,9	25319,1	16768,5	11198,6	7541,1	5115,2
180	66162,7	42928,8	28057	18489,7	12289	8237	5565,7	3781,8	2589,3
175	31227,6	20475,2	13541,9	9033,7	6078,4	4113,4	2804,8	1927,4	1335
170	14988,1	9949,9	6663,4	4492,3	3050,3	2087,6	1440,1	1001,6	702,3
165	7336,7	4927	3331	2270,2	1559,8	1080,5	754,7	531,6	377,7
160	3653,6	2479,5	1696,6	1170,5	814,4	571,5	404,5	288,8	208,1
155	1853,5	1273,6	882,5	616,9	434,9	309,4	222,1	160,9	117,7
150	960,7	668,8	469,7	332,8	238	171,8	125,2	92,1	68,3
145	509,5	359,6	256,2	184,2	133,7	98	72,5	54,1	40,8
140	277	198,4	143,5	104,7	77,2	57,4	43,1	32,7	25
135	154,7	112,5	82,6	61,2	45,8	34,6	26,3	20,2	15,7
130	88,7	65,5	48,8	36,7	27,9	21,4	16,5	12,9	10,1
125	52,3	39,2	29,7	22,7	17,5	13,6	10,6	8,4	6,7

A.3 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE ATLANTA

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	350	345	340	335	330	325	320	315	310
280	95941,7	96144,7	96349,3	96555,8	96763,6	96972,6	97182,9	97394,5	97607,5
275	96144,7	96349,3	96555,8	96763,6	96972,6	97182,9	97394,5	97607,5	97281,7
270	96349,3	96555,8	96763,6	96972,6	97182,9	97394,5	97607,5	97821,7	98037,3
265	96555,8	96763,6	96972,6	97182,9	97394,5	97607,5	97821,7	98037,3	98254,3
260	96736,6	96972,6	97182,9	97394,5	97607,5	97821,7	98037,3	98254,3	98472,6
255	96972,6	97182,9	97394,5	97607,5	97821,7	98037,3	98254,3	98472,6	98692,2
250	97182,9	97394,5	97607,5	97821,7	98037,3	98254,3	98472,6	98962,2	98913,3
245	97394,5	97607,5	97821,7	98037,3	98254,3	98472,6	98692,2	98913,3	99135,7
240	97607,5	97821,7	98037,3	98254,3	98472,6	98692,2	98913,3	99135,7	99346,4
235	97821,7	98037,3	98254,3	98472,6	98692,2	98913,3	99131	99314,3	99458,8
230	98037,3	98254,3	98472,6	98692,2	98913,3	99104,1	99263,5	99291,1	99148,8
225	98254,3	98472,6	98692,2	98893,5	99061,1	99135,9	99038	98720,7	98067,1
220	98472,6	98682,6	98857,5	98974,4	98917,1	98663	98102,6	97086,8	95425,3
215	98652,7	98800,6	98786,6	98590,8	98117,9	97227	95734,8	92672,4	83826,7
210	98647,1	98504,6	98113,2	97340,5	96011	93615,6	86850,1	69786,9	50700,2
205	98089,1	97427,4	96253,3	94357,5	89162,5	74200,4	54819	38563,1	26783
200	96941,5	94763,9	90892,2	78825,7	59075,1	41790,7	29032,8	20118	14016,3
195	92017,8	82805,5	63720,6	45401,7	31568,1	21801,6	15133,7	10573,1	7439,6
190	68807,4	49445,5	34432,3	23701,7	16392,4	11408,9	7997,1	5641,2	3996,2
185	37599	25852,2	17814,5	12351	8623,8	6063,5	4281,2	3044,7	2180,3
180	19426,6	13416,4	9330,8	6537,4	4601,2	3260,6	2327,1	1672,1	1209,3
175	10131	7071	4961,5	3503,1	2491,5	1784,4	1286,5	933,3	681,3
170	5370,5	3776,4	2676,4	1910,3	1372,9	992,9	722,7	529,4	390,2
165	2884,9	2052,1	1469,9	1059,9	769,1	561,7	412,8	305,4	227,4
160	1579,2	1135,1	821,1	597,9	438,2	323,2	240	179,4	134,9
155	879,8	638,6	466,6	343,2	254,1	189,4	142,1	107,2	81,5
150	498,7	365,7	270	200,7	150,1	113	85,6	65,4	50,2
145	287,9	213,4	159,2	119,5	90,3	68,7	52,7	40,6	31,5
140	169,4	126,8	95,6	72,5	55,4	42,6	33	25,7	20,2
135	101,5	76,8	58,5	44,9	34,7	27	21,1	16,6	13,2
130	62,1	47,5	36,6	28,3	22,1	17,4	13,8	11	8,8
125	38,7	29,9	23,3	18,3	14,4	11,4	9,1	7,4	5,9

**APÊNDICE B – TABELAS DE RESULTADOS DE SENSIBILIDADE PARA
VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA BASE**

B.1 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE FORTALEZA

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	295	290	285	280	275	270	265	260	255
275	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
270	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
265	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
260	-0,10	-0,09	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
255	-0,09	-0,09	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
250	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
245	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,10
240	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09
235	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09
230	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	0,07
225	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	0,03	0,54	1,82
220	-0,08	-0,08	-0,09	-0,09	0,00	0,41	1,56	4,21	10,36
215	-0,08	-0,08	-0,03	0,28	1,30	3,60	9,13	16,50	27,77
210	-0,06	0,19	1,06	2,99	7,90	15,08	25,10	41,86	53,61
205	0,84	2,42	6,73	13,61	22,61	38,31	51,71	53,35	50,72
200	5,58	12,10	20,30	34,79	49,42	52,22	49,96	46,87	43,47
195	18,10	31,29	46,66	51,02	49,18	46,22	42,88	39,88	37,43
190	43,64	49,75	48,38	45,57	42,29	39,27	36,79	34,66	32,66
185	47,55	44,91	41,71	38,68	36,16	34,04	32,05	30,33	28,84
180	41,14	38,10	35,52	33,40	31,46	29,72	28,20	27,04	25,95
175	34,88	32,75	30,86	29,12	27,60	26,39	25,37	24,25	23,24
170	30,26	28,51	27,01	25,74	24,72	23,66	22,67	21,88	21,19
165	26,40	25,07	24,06	23,08	22,09	21,26	20,59	19,80	19,04
160	23,41	22,50	21,51	20,64	19,99	19,28	18,48	17,91	17,54
155	20,93	20,06	19,37	18,76	17,98	17,35	16,86	16,73	16,46
150	18,74	18,16	17,48	16,79	16,31	16,05	15,97	15,39	14,82
145	16,98	16,28	15,77	15,39	15,31	14,97	14,43	13,90	13,42
140	15,24	14,81	14,68	14,51	13,98	13,47	13,00	12,60	12,23
135	14,05	13,97	13,54	13,04	12,55	12,12	11,81	11,50	11,18
130	13,11	12,63	12,16	11,77	11,39	11,10	10,77	10,51	10,28

B.2 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	370	365	360	355	350	345	340	335	330
275	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11
270	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11
265	-0,10	-0,10	-0,10	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11
260	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11
255	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
250	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
245	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
240	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
235	-0,09	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
230	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,10	-0,10	-0,06	0,09
225	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,07	0,03	0,31	0,80
220	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,01	0,21	0,63	1,29	2,77
215	-0,09	-0,09	-0,05	0,13	0,48	1,07	2,22	5,02	9,86
210	-0,06	0,06	0,36	0,87	1,77	3,98	8,33	14,11	21,77
205	0,25	0,68	1,37	3,09	6,84	12,15	19,25	26,62	30,49
200	1,11	2,37	5,53	10,33	16,77	24,38	29,14	31,05	31,92
195	4,32	8,70	14,60	21,97	27,72	30,09	31,18	31,38	30,85
190	12,44	19,53	25,94	29,10	30,38	30,75	30,34	29,78	29,23
185	23,98	27,85	29,42	30,05	29,80	29,27	28,71	28,18	27,69
180	28,40	29,29	29,25	28,73	28,18	27,65	27,15	26,72	26,28
175	28,68	28,19	27,65	27,12	26,60	26,16	25,74	25,24	24,74
170	27,10	26,57	26,05	25,59	25,18	24,70	24,20	23,69	23,17
165	25,49	25,02	24,60	24,14	23,65	23,15	22,64	22,12	21,59
160	24,01	23,58	23,09	22,60	22,10	21,59	21,07	20,54	19,99
155	22,52	22,04	21,55	21,05	20,54	20,02	19,49	18,95	18,41
150	20,98	20,50	20,00	19,50	18,98	18,46	17,92	17,39	16,89
145	19,46	18,97	18,46	17,96	17,44	16,93	16,42	15,92	15,39
140	17,93	17,44	16,94	16,45	15,94	15,46	15,01	14,51	14,06
135	16,43	15,95	15,48	15,00	14,53	14,05	13,65	13,23	12,81
130	15,01	14,55	14,09	13,64	13,19	12,76	12,37	11,89	11,58

B.3 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE ATLANTA

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	350	345	340	335	330	325	320	315	310
275	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12
270	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,27
265	-0,11	-0,11	-0,11	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12
260	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,12	-0,12
255	-0,12	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,18	-0,11
250	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11
245	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,04	-0,11
240	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,08
235	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,08	-0,04	0,05
230	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,09	-0,05	0,02	0,14	0,32
225	-0,10	-0,10	-0,09	-0,06	0,00	0,10	0,26	0,50	0,85
220	-0,09	-0,07	-0,02	0,07	0,21	0,43	0,74	1,37	3,28
215	-0,04	0,04	0,16	0,36	0,64	1,12	2,53	6,33	11,47
210	0,12	0,29	0,54	0,91	1,96	5,17	9,89	16,28	23,63
205	0,36	0,79	1,54	4,02	8,49	14,32	21,62	26,40	28,08
200	1,25	3,09	7,16	12,42	19,50	25,08	27,34	27,83	27,60
195	5,96	10,67	17,28	23,68	26,37	27,17	27,10	26,70	26,26
190	15,03	21,88	25,33	26,49	26,59	26,21	25,78	25,36	25,01
185	24,30	25,78	26,07	25,71	25,29	24,86	24,50	24,12	23,65
180	25,45	25,20	24,79	24,36	23,99	23,62	23,16	22,73	22,31
175	24,28	23,86	23,47	23,12	22,68	22,24	21,82	21,43	21,04
170	22,94	22,59	22,18	21,74	21,33	20,93	20,55	20,16	19,78
165	21,68	21,24	20,83	20,43	20,05	19,67	19,29	18,91	18,52
160	20,32	19,92	19,55	19,18	18,80	18,43	18,05	17,68	17,30
155	19,04	18,67	18,31	17,94	17,57	17,20	16,84	16,48	16,11
150	17,80	17,44	17,08	16,72	16,37	16,02	15,67	15,28	14,94
145	16,59	16,23	15,88	15,56	15,21	14,86	14,47	14,18	13,81
140	15,40	15,08	14,75	14,41	14,05	13,70	13,41	13,07	12,68
135	14,27	13,94	13,62	13,29	12,96	12,60	12,28	11,95	11,66
130	13,15	12,84	12,50	12,22	11,94	11,66	11,30	10,87	10,78

**APÊNDICE C – TABELAS DE MUDANÇA DOS VALORES DE VIDA ÚTIL ENTRE
CÉLULAS VIZINHAS PARA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA BASE, EM %**

C.1 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE FORTALEZA

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	295	290	285	280	275	270	265	260	255
275	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
270	-0,18	-0,18	-0,18	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
265	-0,18	-0,20	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
260	-0,18	-0,16	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
255	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
250	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
245	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
240	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
235	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20
230	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20	-0,20
225	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20	-0,20	0,52
220	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20	0,35	2,62	7,58
215	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	0,18	2,05	6,75	16,44	38,89
210	-0,19	-0,19	0,03	1,52	5,87	14,63	35,22	57,09	65,55
205	-0,11	1,09	5,02	12,71	31,41	54,66	65,15	66,29	65,03
200	4,20	10,71	27,56	51,82	64,49	66,35	65,28	63,59	61,46
195	23,51	48,48	63,44	66,38	65,52	63,90	61,80	59,70	57,86
190	62,08	66,36	65,76	64,22	62,15	60,01	58,12	56,38	54,61
185	66,00	64,55	62,52	60,35	58,39	56,64	54,85	53,14	51,58
180	62,91	60,71	58,67	56,88	55,12	53,38	51,73	50,52	49,35
175	58,96	57,13	55,39	53,63	51,95	50,63	49,51	48,10	46,73
170	55,67	53,89	52,20	50,72	49,59	48,27	46,89	45,88	45,05
165	52,44	50,82	49,65	48,44	47,04	45,89	45,05	43,93	42,70
160	49,73	48,62	47,21	45,89	45,05	44,05	42,82	41,62	40,91
155	47,39	46,02	45,02	44,19	42,96	41,74	40,59	40,66	40,42
150	44,98	44,16	43,08	41,87	40,70	40,26	40,43	39,42	38,38
145	43,23	42,01	40,84	39,90	40,07	39,58	38,59	37,53	36,53
140	40,96	39,83	39,76	39,73	38,72	37,72	36,67	35,76	35,01
135	39,44	39,60	38,82	37,74	36,67	35,66	34,95	34,30	33,47
130	38,92	37,90	36,84	35,98	35,04	34,37	33,73	33,00	32,52
125	37,10	36,09	35,19	34,32	33,71	33,02	31,95	31,62	30,91

C.2 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

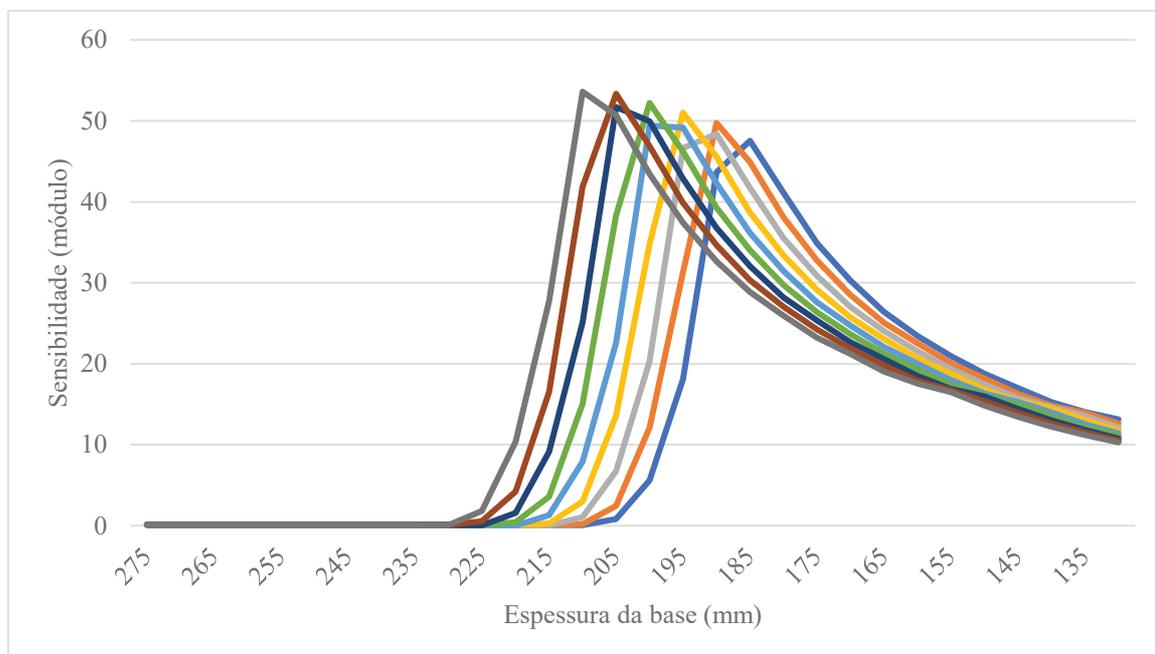
Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	370	365	360	355	350	345	340	335	330
275	-0,19	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20
270	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20
265	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20
260	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20
255	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,21
250	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,21	-0,21
245	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,21	-0,21	-0,21
240	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21
235	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21
230	-0,20	-0,20	-0,20	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21
225	-0,20	-0,20	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,03	0,62
220	-0,20	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,12	0,35	1,42	2,94
215	-0,21	-0,21	-0,21	-0,20	0,15	1,10	2,51	4,44	9,56
210	-0,21	-0,21	-0,01	0,82	2,10	3,85	7,74	18,70	35,27
205	-0,08	0,51	1,70	3,30	6,27	14,95	31,27	44,17	49,20
200	1,30	2,80	4,94	11,66	26,68	41,67	48,40	50,74	51,88
195	4,25	8,97	22,44	38,45	47,46	50,47	51,89	52,25	51,76
190	17,71	34,75	45,93	50,17	51,83	52,40	52,03	51,49	50,92
185	43,95	49,52	51,57	52,47	52,30	51,77	51,19	50,61	50,07
180	51,22	52,48	52,56	52,04	51,46	50,88	50,30	49,85	49,38
175	52,80	52,30	51,73	51,14	50,54	50,06	49,61	49,03	48,44
170	52,00	51,41	50,79	50,27	49,82	49,25	48,66	48,03	47,39
165	51,05	50,48	50,01	49,46	48,86	48,24	47,59	46,92	46,22
160	50,20	49,68	49,07	48,44	47,79	47,11	46,40	45,67	44,90
155	49,27	48,63	47,98	47,30	46,60	45,86	45,09	44,29	43,44
150	48,17	47,49	46,78	46,05	45,27	44,47	43,63	42,76	41,97
145	46,97	46,23	45,45	44,65	43,82	42,96	42,09	41,26	40,26
140	45,63	44,83	43,99	43,16	42,26	41,43	40,55	39,56	38,73
135	44,15	43,30	42,44	41,55	40,67	39,72	38,98	38,23	37,20
130	42,66	41,78	40,92	40,03	39,08	38,15	37,26	36,14	35,67
125	41,04	40,15	39,14	38,15	37,28	36,45	35,76	34,88	33,66

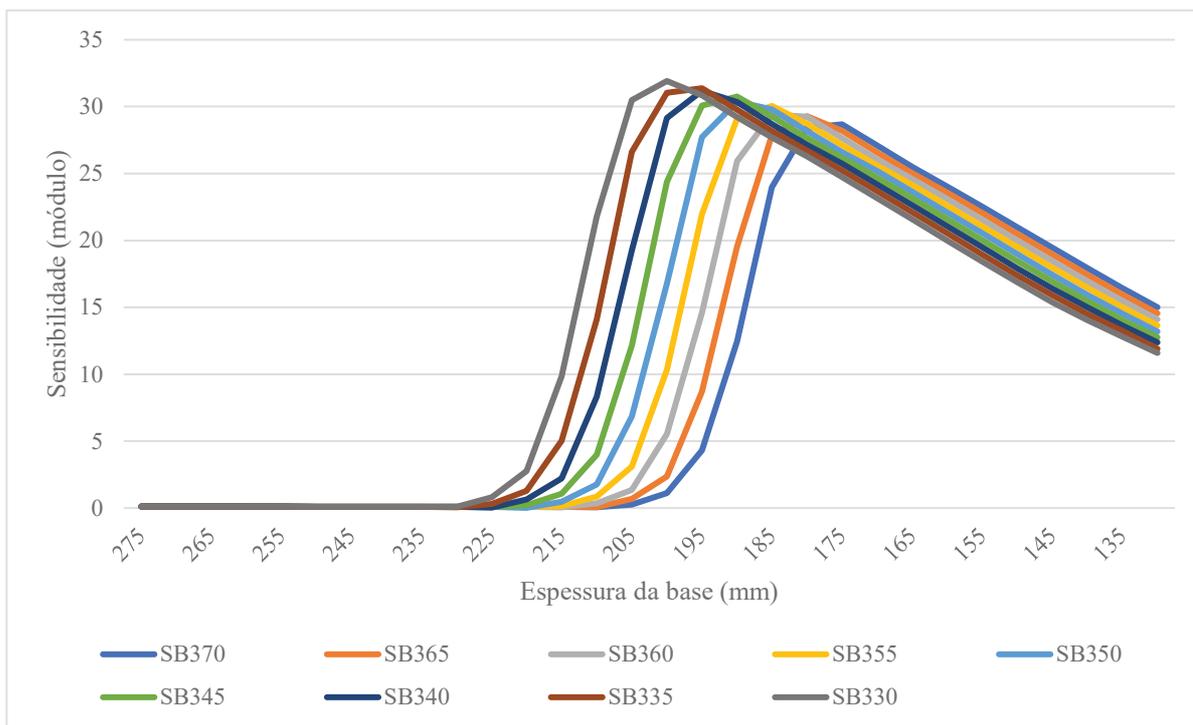
C.3 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE ATLANTA

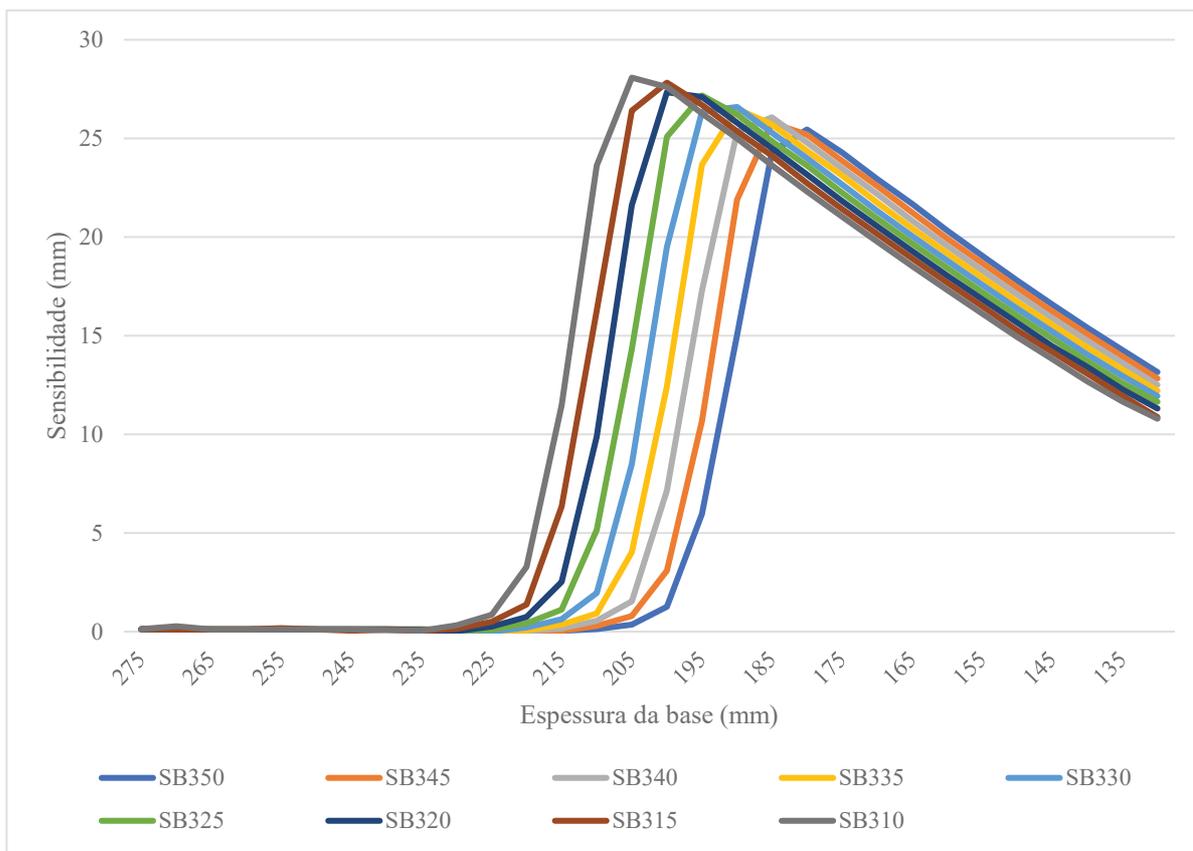
Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)								
	350	345	340	335	330	325	320	315	310
275	-0,21	-0,21	-0,21	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	0,33
270	-0,21	-0,21	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,78
265	-0,21	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22
260	-0,19	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22
255	-0,24	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22
250	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,50	-0,22
245	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	0,05	-0,22
240	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,21
235	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,18	-0,11
230	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,19	-0,13	0,02	0,31
225	-0,22	-0,22	-0,22	-0,20	-0,15	-0,03	0,23	0,57	1,09
220	-0,22	-0,21	-0,17	-0,08	0,15	0,48	0,94	1,66	2,69
215	-0,18	-0,12	0,07	0,39	0,81	1,46	2,41	4,55	12,15
210	0,01	0,30	0,68	1,27	2,15	3,71	9,28	24,70	39,52
205	0,57	1,09	1,90	3,06	7,13	20,74	36,88	44,74	47,17
200	1,17	2,73	5,57	16,46	33,74	43,68	47,04	47,83	47,67
195	5,08	12,62	29,89	42,40	46,56	47,83	47,87	47,44	46,92
190	25,22	40,29	45,96	47,80	48,07	47,67	47,16	46,65	46,28
185	45,36	47,72	48,26	47,89	47,39	46,85	46,47	46,03	45,44
180	48,33	48,10	47,62	47,07	46,65	46,23	45,64	45,08	44,54
175	47,85	47,30	46,83	46,41	45,85	45,27	44,72	44,18	43,66
170	46,99	46,59	46,06	45,47	44,90	44,36	43,82	43,28	42,73
165	46,28	45,66	45,08	44,52	43,98	43,43	42,88	42,31	41,72
160	45,26	44,69	44,14	43,59	43,02	42,46	41,86	41,26	40,68
155	44,29	43,74	43,17	42,60	42,01	41,40	40,79	40,25	39,58
150	43,32	42,73	42,13	41,52	40,93	40,34	39,76	38,99	38,40
145	42,27	41,65	41,04	40,46	39,84	39,20	38,43	37,92	37,25
140	41,16	40,58	39,95	39,33	38,65	37,99	37,38	36,70	35,87
135	40,08	39,43	38,81	38,07	37,36	36,62	36,06	35,41	34,65
130	38,82	38,15	37,44	36,97	36,31	35,56	34,60	33,73	33,33
125	37,68	37,05	36,34	35,34	34,84	34,48	34,06	32,73	32,95

APÊNDICE D – GRÁFICOS DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS DE VIDA ÚTIL PARA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA BASE

D.1 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE FORTALEZA



D.2 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

D.3 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE ATLANTA

**APÊNDICE E – TABELAS DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS DE VIDA
ÚTIL PARA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA SUB-BASE**

E.1 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE AFORTALEZA

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)						
	290	285	280	275	270	265	260
280	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,14	-0,10	-0,06
275	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
270	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
265	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
260	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
255	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
250	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
245	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
240	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10
235	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10
230	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10
225	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	0,08
220	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	0,04	0,64	2,01
215	-0,11	-0,11	0,00	0,51	1,85	4,68	11,68
210	-0,05	0,38	1,65	4,30	10,84	21,41	30,32
205	1,45	3,84	9,88	20,47	30,86	33,00	31,29
200	8,84	19,40	30,94	34,40	32,93	30,79	28,27
195	30,64	35,75	34,59	32,45	29,86	27,38	25,25
190	36,30	34,14	31,50	28,88	26,62	24,72	22,91
185	33,21	30,44	28,03	26,00	24,15	22,41	20,87
180	29,49	27,32	25,42	23,60	21,95	20,59	19,51
175	26,72	24,82	23,10	21,63	20,45	19,23	18,00
170	24,27	22,69	21,40	20,22	18,95	17,88	17,03
165	22,36	21,24	19,91	18,75	17,83	16,93	15,89
160	20,90	19,64	18,62	17,80	16,74	15,73	14,93
155	19,47	18,59	17,60	16,56	15,57	15,07	14,89
150	18,47	17,40	16,39	15,67	15,36	14,83	13,98
145	17,20	16,29	15,86	15,61	14,74	13,91	13,08
140	16,44	16,24	15,49	14,66	13,82	13,05	12,37
135	16,26	15,38	14,48	13,72	13,04	12,47	11,78
130	15,25	14,45	13,67	12,98	12,48	11,92	11,28
125	14,34	13,64	12,99	12,43	11,79	11,29	10,90

E.2 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)						
	365	360	355	350	345	340	335
280	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,13
275	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,13
270	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
265	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
260	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
255	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
250	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
245	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
240	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
235	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
230	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
225	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,08	0,14
220	-0,15	-0,15	-0,15	-0,12	0,05	0,44	1,01
215	-0,15	-0,15	-0,02	0,34	0,87	1,60	3,46
210	-0,08	0,22	0,73	1,42	2,88	6,98	14,45
205	0,58	1,24	2,40	5,70	12,74	20,99	25,73
200	1,93	4,55	10,93	19,53	25,80	27,88	28,54
195	9,08	17,77	25,22	28,51	29,45	29,54	28,69
190	24,45	28,84	30,21	30,56	29,90	28,89	27,86
185	30,91	31,52	31,14	30,11	29,05	28,02	27,02
180	32,40	31,36	30,27	29,20	28,16	27,22	26,37
175	31,53	30,42	29,33	28,33	27,46	26,50	25,55
170	30,54	29,49	28,55	27,59	26,61	25,64	24,68
165	29,67	28,71	27,70	26,70	25,71	24,73	23,76
160	28,81	27,78	26,76	25,74	24,74	23,76	22,78
155	27,83	26,79	25,76	24,75	23,73	22,73	21,74
150	26,80	25,75	24,72	23,68	22,65	21,64	20,70
145	25,71	24,65	23,61	22,57	21,54	20,59	19,63
140	24,56	23,51	22,48	21,44	20,50	19,48	18,54
135	23,39	22,36	21,35	20,33	19,44	18,62	17,58
130	22,23	21,25	20,22	19,19	18,38	17,52	16,62
125	21,04	20,00	19,08	18,20	17,50	16,68	15,55

E.3 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE ATLANTA

Esp. base (mm)	Espessura da sub-base (mm)						
	345	340	335	330	325	320	315
280	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
275	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	0,04
270	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
265	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
260	-0,16	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
255	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,14
250	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,23	-0,14
245	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14
240	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14
235	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,13	-0,10
230	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14	-0,11	-0,06	0,04
225	-0,15	-0,15	-0,12	-0,08	0,01	0,13	0,31
220	-0,13	-0,10	-0,02	0,10	0,27	0,51	0,87
215	-0,05	0,07	0,23	0,46	0,80	1,52	4,05
210	0,19	0,40	0,72	1,28	3,18	8,78	16,32
205	0,65	1,08	2,52	7,46	15,04	20,80	22,90
200	2,20	5,96	13,52	20,69	23,36	23,89	23,51
195	11,79	19,96	23,72	24,67	24,50	23,74	22,92
190	23,98	25,42	25,50	24,75	23,92	23,08	22,34
185	26,40	25,77	24,93	24,06	23,28	22,56	21,74
180	25,96	25,07	24,24	23,50	22,67	21,84	21,06
175	25,22	24,45	23,62	22,76	21,95	21,17	20,43
170	24,61	23,71	22,86	22,05	21,28	20,52	19,78
165	23,79	22,95	22,15	21,38	20,62	19,87	19,12
160	23,04	22,24	21,45	20,69	19,93	19,17	18,45
155	22,32	21,53	20,74	19,97	19,22	18,51	17,81
150	21,58	20,78	20,01	19,28	18,55	17,79	17,05
145	20,81	20,05	19,32	18,56	17,79	17,06	16,45
140	20,08	19,31	18,58	17,81	17,09	16,39	15,69
135	19,32	18,54	17,76	17,02	16,37	15,77	14,99
130	18,52	17,84	17,16	16,28	15,50	14,84	14,32
125	17,77	16,93	16,29	15,81	15,11	14,07	13,62

ANEXO A – MIX UTILIZADO PARA O DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS

Nº.	Modelo	Peso (kg)	Decolagens anuais	Crescimento anual (%)
1	A300-600	170.505	3.838	0
2	A320	73.482	15.101	0
3	A330	229.971	1.015	0
4	B-757	122.470	7.544	0
5	B-737-800	79.016	1.561	0
6	B-747-200	377.842	2.207	0
7	B-747-400	395.896	8.519	0
8	B-767-200	151.953	6.178	0
9	B-767-300R	185.519	9.635	0
10	B-777-200	286.897	3.111	0
11	Concorde	185.973	406	0
12	Fokker F100	45.359	12.117	0
13	DC-9-32	54.885	569	0
14	DC-9-51	54.885	488	0
15	A340-500/600	340.194	2.441	0
16	A-340-500/600 Belly	340.194	2.441	0
17	A380-800	607.814	5.475	0
18	B-747-SP	315.700	3	0
19	DC-8	162.386	504	0
20	MD-11	281.681	3.315	0
21	MD-11 Belly	281.681	3.315	0

Fonte: FAA, 2004, pg. 66 – Adaptado pelo autor.

ANEXO B – SEÇÕES TRANSVERSAIS DIMENSIONADAS NO LEDFAA PARA AS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

DesignLife CBR-3 Des. Life = 20		
Layer Material	Thickness (in)	Modulus or R (psi)
P-401 AC Surface	5.00	200,000
P-401 St (flex)	12.00	400,000
P-209 Cr Ag	63.53	76,694
Subgrade	CBR = 3.0	4,500

DesignLife CBR-8 Des. Life = 20		
Layer Material	Thickness (in)	Modulus or R (psi)
P-401 AC Surface	5.00	200,000
P-401 St (flex)	12.00	400,000
P-209 Cr Ag	17.47	50,134
Subgrade	CBR = 8.0	12,000

DesignLife CBR-15 Des. Life = 20		
Layer Material	Thickness (in)	Modulus or R (psi)
P-401 AC Surface	5.00	200,000
P-401 St (flex)	6.00	400,000
P-209 Cr Ag	13.32	61,693
Subgrade	CBR = 15.0	22,500

Fonte: FAA, 2004, pg. 66.

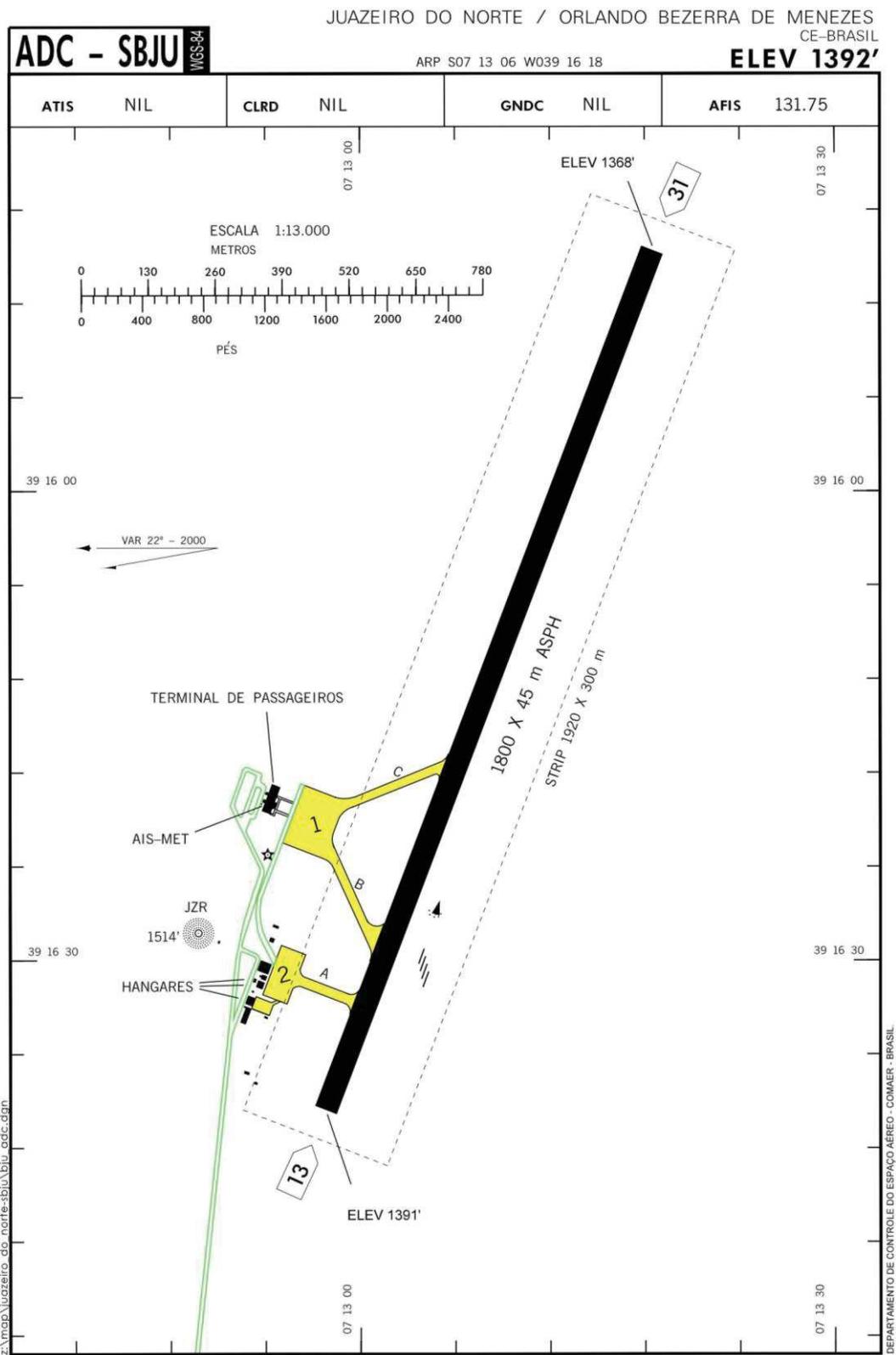
ANEXO C – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

CBR (%)	x	Δx	$x-\Delta x$	$x+\Delta x$	L(x) (anos)	L(x+ Δx) (anos)	L(x- Δx) (anos)	$S_{x,L}$
Sensibilidade ao módulo de elasticidade do revestimento (MPa)								
3	1378,95	137,90	1241,06	1516,85	20	20,9	19,1	0,4500
8	1378,95	137,90	1241,06	1516,85	20	22,3	17,8	1,1250
15	1378,95	137,90	1241,06	1516,85	20	24,1	16,3	1,9500
Sensibilidade à espessura do revestimento (cm)								
3	12,7	1,27	11,43	13,97	20	22,0	18,2	0,9500
8	12,7	1,27	11,43	13,97	20	25,2	15,9	2,3250
15	12,7	1,27	11,43	13,97	20	21,7	12,4	4,8250
Sensibilidade à espessura da base (cm)								
3	170,18	3,20	156,82	163,22	17,9	23,2	13,9	12,9888
8	43,18	0,86	42,32	44,04	17,3	19,2	15,6	5,2023
15	33,02	0,66	32,36	33,68	16,1	19,2	13,5	8,8509
Sensibilidade ao peso da aeronave leve B-737(kg)								
3	439.420	43.942	395.478	483.362	20	7,5	88	-20,1250
8	439.420	43.942	395.478	483.362	20	8,1	83,5	-18,8500
15	439.420	43.942	395.478	483.362	20	9,0	74,9	-16,4750
Sensibilidade ao peso da aeronave pesada A380								
3	3,302,000	330,200	2,971,800	3,632,200	30	8,4	124,4	-19,3333
8	3,302,000	330,200	2,971,800	3,632,200	30,2	8,3	127,9	-19,8013
15	3,302,000	330,200	2,971,800	3,632,200	28,9	9,1	105,7	-16,7128

Fonte: FAA, 2004, pg. 67 – Adaptado pelo autor.

ANEXO D – CARTAS DE AERÓDROMO

D.1 – AEROPORTO REGIONAL DO CARIRI



D.2 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE FORTALEZA

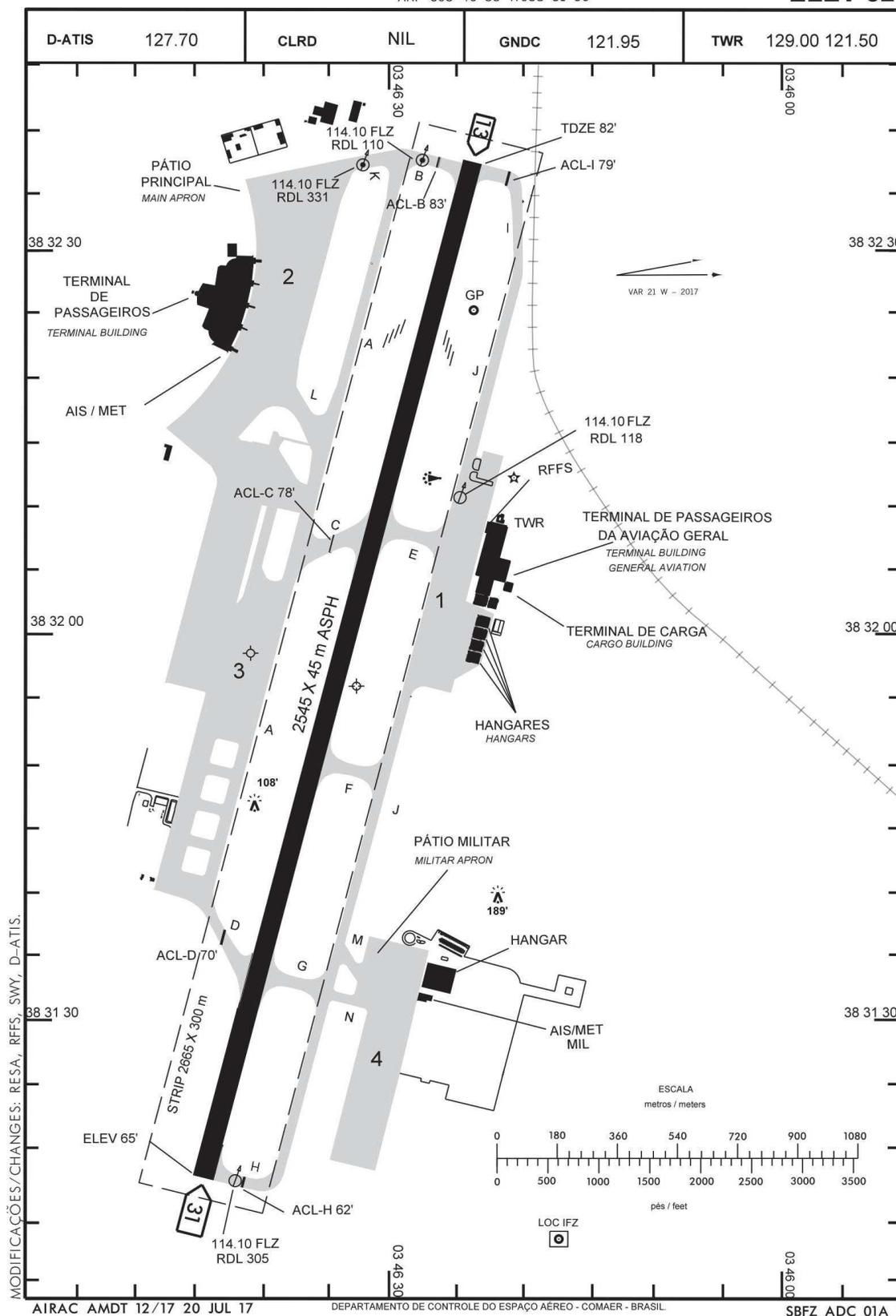
CARTA DE AERÓDROMO (ADC)
AERODROME CHART (ADC)

FORTALEZA / Pinto Martins, INTL (SBFZ)

CE-BRASIL

ARP S03 46 33 W038 31 56

ELEV 82'



Fonte: DECEA, 2019a

D.3 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

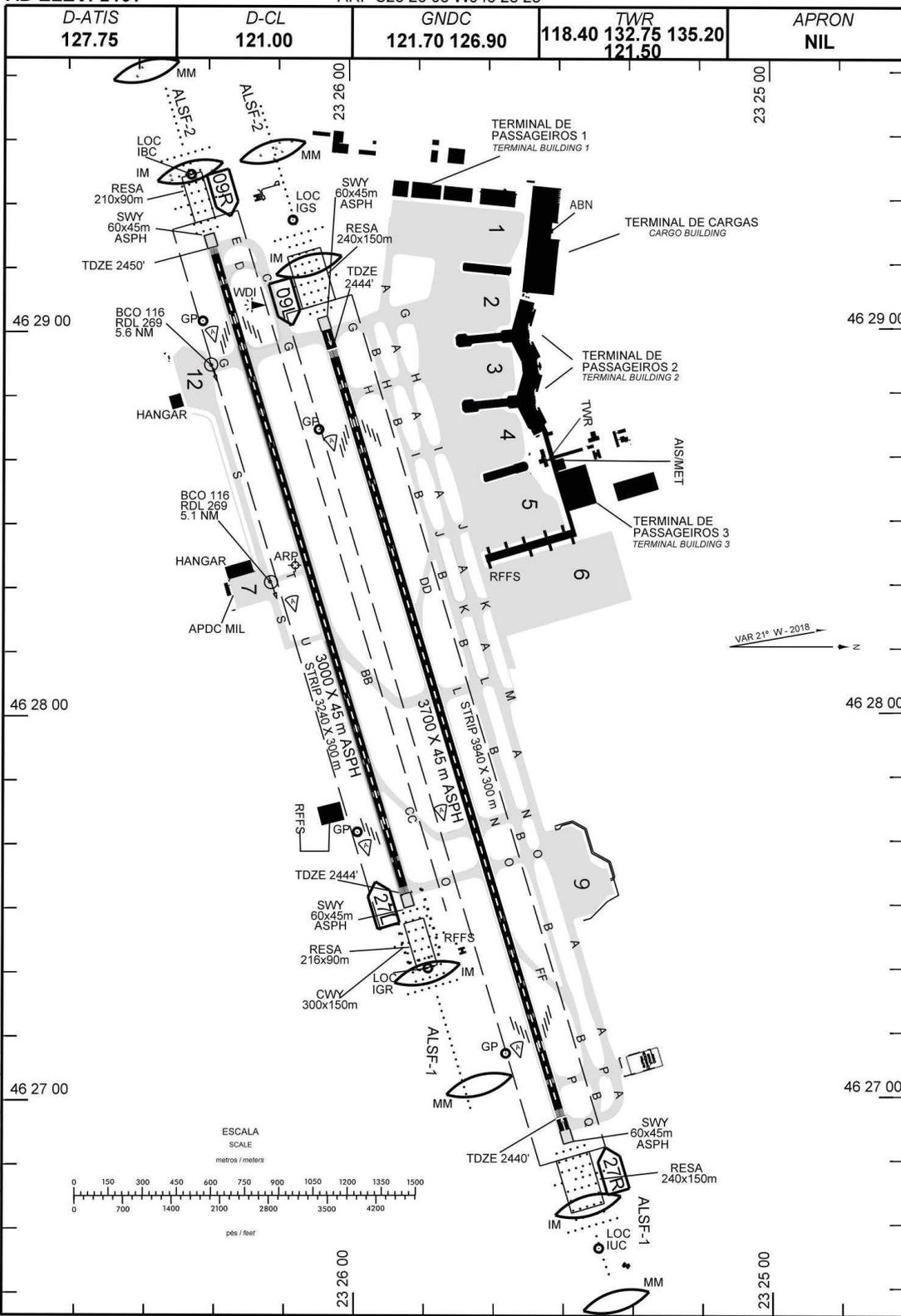
AERODROME CHART (ADC)

SÃO PAULO / Guarulhos - Gov. André Franco Montoro, INTL (SBGR)

SP-BRASIL

AD ELEV: 2461'

ARP S23 26 08 W046 28 23



CHANGES: INTERSEÇÃO LAYOUT, TDZE, ALT. GEODAL

AIRAC AMDT 18/18 11 OCT 18

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO

SBGR_ADC_02U 1/2

Fonte: DECEA, 2019c.

D.4 – AEROPORTO INTERNACIONAL DE ATLANTA

