



**Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Departamento de Engenharia Civil**

**Eduarda Silva Barreto**

**Restauração de pista de pouso e decolagem de aeródromo com apoio em ferramenta de retroanálise: estudo de caso no Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto**

26 de junho de 2024

**Eduarda Silva Barreto**

**Restauração de pista de pouso e decolagem de aeródromo com apoio em ferramenta de retroanálise: estudo de caso no Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado pela acadêmica Eduarda Silva Barreto à banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Professor orientador: Alexandre Hering Coelho, Dr.

26 de junho de 2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Barreto, Eduarda Silva

Restauração de pista de pouso e decolagem de aeródromo com apoio em ferramenta de retroanálise: estudo de caso no Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto / Eduarda Silva Barreto ; orientador, Alexandre Hering Coelho, 2024. 161 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Aeroportos. 3. Pavimentos. 4. Restauração. 5. Retroanálise. I. Coelho, Alexandre Hering. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**Eduarda Silva Barreto**

**Restauração de pista de pouso e decolagem de aeródromo com apoio em ferramenta de retroanálise: estudo de caso no Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheira Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Liane Ramos da Silva, Dra.  
Coordenadora do Curso

26 de junho de 2024

**Banca examinadora:**

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.  
Orientador

Prof. Liseane Padilha Thives, Dra.  
Membro

Prof. Luciana Rohde, Dra.  
Membro

Eng. José dos Santos de Magalhães  
Membro

## Agradecimentos

Aos meus pais, Rosimar e Adão, fontes inestimáveis de apoio e incentivo ao longo desta jornada acadêmica, que sempre acreditaram em mim, mesmo nos momentos em que duvidei de minhas próprias capacidades, por compartilharem dos meus sonhos e cuja força, determinação e resiliência admiro muito.

Ao professor Alexandre Hering Coelho, por ter sido meu orientador e desempenhado tal função com dedicação e paciência, por ser o primeiro a acompanhar, desde o início, a elaboração deste trabalho e por sempre me inspirar a buscar a excelência em todas as esferas da vida.

À professora Liseane Padilha Thives, por todos ensinamentos e momentos de descontração, pela amizade fora da sala de aula e por ter tornado os anos de graduação mais leves e proveitosos.

À professora Luciana Rohde, por ter me motivado nos momentos de insegurança, pelos ensinamentos, conselhos e, principalmente, por ter me feito conhecer a área de Pavimentação, pela qual nutro profundo interesse e adoração.

Ao Eng. José dos Santos de Magalhães, por ter aceitado o convite de participar da banca examinadora e cujas contribuições ao meio técnico admiro muito.

A todos os amigos que encontrei ao longo da graduação e, em especial, a Maicon e Júlia, pela amizade incondicional, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas, por serem um lugar de refúgio e acolhimento nos momentos mais difíceis e por compreenderem a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

A Alexis, que apesar das 5 horas de diferença de fuso horário e dos 10 mil quilômetros de distância, sempre foi presente e apoiou a elaboração deste trabalho, mesmo quando se tratava de somente dois parágrafos, por ser um exemplo de profissionalismo e dedicação e me inspirar todos os dias.

À EC Projetos, por ter disponibilizado sua infraestrutura física e computacional para apoiar a elaboração deste trabalho e pelo aprendizado constante.

Ao Laboratório de Transportes e Logística, por todas as experiências proporcionadas durante os quase 3 anos em que fui bolsista, por ter me inserido na área de Transportes e por ter contribuído com meu desenvolvimento profissional mais do que eu poderia colocar em palavras.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela formação acadêmica, profissional e pessoal, por todas as oportunidades de crescimento fornecidas, principalmente, os subsídios para a realização do meu intercâmbio acadêmico na École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, em Paris.

A todos que de alguma forma contribuíram, direta ou indiretamente, com este trabalho.

*O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano. Mas o que seria o oceano se não infinitas gotas?*

—Isaac Newton

# RESUMO

Este trabalho aborda as especificações para a restauração de pistas de pouso e decolagem em aeródromos, com foco em um estudo de caso em um aeródromo brasileiro. O estudo investiga os desafios enfrentados pelos operadores de aeródromos na gestão e manutenção de pavimentos, destacando a importância da análise periódica das condições funcionais e estruturais para garantir a segurança operacional dos pavimentos. O objetivo é desenvolver uma sequência metodológica para elaboração de especificações técnicas de restauração, considerando avaliações funcionais, estruturais e a utilização de ferramenta de retroanálise. O método empregado envolve a identificação de defeitos no pavimento, avaliação funcional (PCI, irregularidade longitudinal, macrotextura e atrito), avaliação estrutural (deflexão), escolha da linha crítica do ensaio deflectométrico para posterior determinação dos segmentos homogêneos, retroanálise de cada segmento homogêneo, estimativa da vida útil remanescente do pavimento, escolha da técnica de restauração mais adequada, determinação do PCN e elaboração do projeto de sinalização horizontal. Os resultados demonstram o uso consolidado de segmentos homogêneos na avaliação de pistas de pouso e decolagem, a importância das avaliações funcional e estrutural para investigação da conformidade das pistas de pouso e decolagem de aeródromos com as normativas vigentes, a relevância da comparação dos módulos de elasticidade retroanalizados com ensaios destrutivos, o impacto da preseça de concreto de cimento Portland na vida útil do pavimento e a maneira que o PCN pode ser empregado no estudo de pavimentos de aeródromos. O trabalho visa contribuir para aprimorar os processos de gestão e restauração de pistas de pouso e decolagem de aeródromos.

Palavras-chave: pavimentos de aeródromos, restauração de pavimentos, avaliação estrutural e retroanálise.

# ABSTRACT

This study addresses the specifications for rehabilitation of runways at aerodromes, focusing on a case study at a Brazilian aerodrome. The study investigates the challenges faced by aerodrome operators in sidewalk management and maintenance, highlighting the importance of periodic analysis of functional and structural conditions to ensure the operational safety of sidewalks. The purpose is to develop a methodological sequence for elaborate technical specifications for rehabilitation, taking into account functional and structural assessments and the use of back-calculation tool. The method employed involves the identification of sidewalk defects, functional assessment (PCI, longitudinal irregularity, macrotexture and friction), structural assessment (deflection), choice of the critical line of the deflectometric test for subsequent determination of homogeneous segments, back-calculation of each homogeneous segment, estimative of the the remaining useful life of the paving, choosing the most suitable rehabilitation technique, determining the PCN and elaboration of the horizontal signaling project. The results demonstrate the consolidated use of homogeneous segments in the evaluation of runways, the importance of functional and structural assessments for investigating the compliance of aerodrome runways with current regulations, the relevance of comparing the moduli of elasticity with destructive tests, the impact of the presence of Portland cement concrete on the service life of the pavement and the way in which the PCN can be used to study of airfield pavings. The work aims to help improve the management and restoration of runways. restoration of airfield runways.

*Key-words: airport pavements, pavement rehabilitation, structural evaluation and back-calculation.*

## Lista de Figuras

1	Seção-tipo de um pavimento de aeródromo (FAA, 2021) . . . . .	6
2	Exemplos de tipos de trem de pouso de aeronaves (FAA, 2005) . . . . .	7
3	Tipos de configuração de rodas em veículos rodoviários (DNIT, 2012a) . . . . .	8
4	Interações entre defeitos em pavimentos (DNIT, 2006a) . . . . .	15
5	Defeitos de superfície (BERNUCCI et al., 2008; FAA, 2014a; ANAC, 2021a) . . . . .	16
6	Defeitos de deformação superficial (BERNUCCI et al., 2008; FAA, 2014a) . . . . .	17
7	Trincas e fissuras (FAA, 2014a; ANAC, 2021a) . . . . .	18
8	Buracos e remendos (ANAC, 2021a) . . . . .	19
9	Outros defeitos (ANAC, 2021a) . . . . .	20
10	Deflectômetro de impacto (DNIT, 2006a) . . . . .	26
11	Ensaio com <i>Ground Penetrating Radar</i> (GALLI; VIEIRA; ALENCAR, 2017) . . . . .	27
12	Esquema do cone de penetração dinâmica (JUNIOR, 2005) . . . . .	28
13	Tipos de trado (ABNT, 2023) . . . . .	29
14	Fluxograma de uso dos dados de deflexão (FAA, 2011) . . . . .	32
15	Gráfico de deflexões normalizadas (FAA, 2011) . . . . .	39
16	Exemplo de determinação de segmentos homogêneos pelo Método das Diferenças Acumuladas (BERNUCCI et al., 2022) . . . . .	40
17	Esquema dos dados necessários para se fazer a retroanálise de um pavimento (NÓ-BREGA, 2003 <i>apud</i> Bernucci et al, 2022) . . . . .	44
18	Interface do <i>software</i> BackMeDiNa . . . . .	45
19	Interface do <i>software</i> BAKFAA . . . . .	47
20	Emprego da mistura SMA em pavimentos asfálticos . . . . .	51
21	Cenário da pista de táxi de acesso paralelo (ANAC, 2020) . . . . .	57
22	Cenário da pista de táxi de acesso central (ANAC, 2020) . . . . .	57
23	Formato e dimensões dos números e letras para sinalização horizontal de designação de pistas de pouso e decolagem (em metros) (ANAC, 2021d) . . . . .	61
24	Sinalização horizontal de designação de pista de pouso e decolagem, de eixo e cabeceira (ANAC, 2021d) . . . . .	63
25	Sinalização horizontal de cabeceira deslocada (ANAC, 2021d) . . . . .	64
26	Sinalização horizontal de ponto de visada e de zona de toque (ANAC, 2021d) . . . . .	67
27	Localização do Aeroporto Internacional de João Pessoa . . . . .	70
28	Vista superior do Aeroporto Internacional de João Pessoa . . . . .	71
29	Registros fotográficos da cabeceira 34 (INFRAERO, 2016b) . . . . .	71
30	Linha do tempo do pavimento . . . . .	73

31	Aeroporto Internacional de João Pessoa . . . . .	74
32	Aeroporto Internacional de João Pessoa - acesso terrestre . . . . .	75
33	Fachada do Terminal de Passageiros do Aeroporto Internacional de João Pessoa . . . . .	75
34	Configuração do sistema de pistas do aeródromo (GCA, 2018) . . . . .	78
35	Defeitos no pavimento do aeródromo (INFRAERO, 2016b) . . . . .	79
36	Remoção do acúmulo de borracha (INFRAERO, 2016b) . . . . .	84
37	Estrutura do pavimento da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de João Pessoa (dimensões em cm) (INFRAERO, 2016a) . . . . .	85
38	Registros fotográficos - ensaios destrutivos (DYNATEST, 2016a) . . . . .	86
39	Fluxograma do método . . . . .	89
40	Esquema das posições dos conjuntos de trem de pouso principais das aeronaves e linhas de ensaios (dimensões em metros) . . . . .	98
41	Dimensões do Bombardier Challenger 300 (BOMBARDIER, 2008) . . . . .	99
42	Dimensões do A320 (AIRBUS, 2005a) . . . . .	100
43	Gráfico de CDF - contribuições individual e acumulada . . . . .	102
44	Segmentos homogêneos - linha de ensaio 3E . . . . .	103
45	Segmentos homogêneos - linha de ensaio 3D . . . . .	104
46	Bacias deflectométricas - BAKFAA, "User Defined" . . . . .	112
47	Bacias deflectométricas - BAKFAA, materiais da biblioteca . . . . .	113
48	Bacias deflectométricas - BackMeDiNa, granular . . . . .	115
49	Bacias deflectométricas - BackMeDiNa, estabilizada . . . . .	116
50	RMS por tipo de abordagem de retroanálise . . . . .	117
51	Módulos de elasticidade - concreto asfáltico . . . . .	118
52	Módulos de elasticidade - concreto de cimento Portland . . . . .	120
53	Módulos de elasticidade - sub-base . . . . .	120
54	Módulos de elasticidade - subleito . . . . .	121
55	Ábaco para determinação da espessura equivalente total . . . . .	128
56	Interface do COMFAA 3.0 com configurações para determinação do PCN . . . . .	129
57	Sinalização horizontal - total de tinta . . . . .	131

## Lista de Tabelas

1	Diferenças entre pistas de aeródromos e pistas rodoviárias (MEDINA, 1997) . . . . .	7
2	Espessuras mínimas para estruturas de pavimento flexível (FAA, 2021) . . . . .	12
3	Espessuras mínimas para estruturas de pavimento rígido (FAA, 2021) . . . . .	13
4	Classificação da textura de um pavimento (BERNUCCI et al., 2022) . . . . .	24
5	Pressão no solo em função do equipamento e da carga utilizados (ANAC, 2021c) . .	35
6	Resumo dos métodos utilizados por referência bibliográfica . . . . .	37
7	Cálculo de Z em função do tamanho da amostra (DNER, 1979) . . . . .	41
8	Valores de resistência de subleito para aplicação do método ACN-PCN em pavimentos rígidos (ANAC, 2016b) . . . . .	54
9	Valores de resistência de subleito para aplicação do método ACN-PCN em pavimentos flexíveis (ANAC, 2016b) . . . . .	55
10	Valores de resistência de subleito para aplicação do método ACN-PCN em pavimentos flexível (ANAC, 2016b) . . . . .	55
11	Orientação para a seleção inicial da variável P/TC (ANAC, 2016b) . . . . .	58
12	Elementos de sinalização por tipo de regras de voo (adaptado de Horonjeff et al. (2010) e FAA (2020)) . . . . .	60
13	Número de faixas da sinalização horizontal de cabeceira de pista (ANAC, 2021d) . .	62
14	Localização e dimensões da sinalização horizontal de ponto de visada (ANAC, 2021d)	65
15	Quantidade de pares de retângulos da sinalização horizontal de zona de toque (ANAC, 2021d) . . . . .	66
16	Movimentos de pousos durante o dia e noite de um dia médio de 2016. Adaptado de (GCA, 2018; ANAC, 2021d) . . . . .	70
17	Mix de aeronaves do Aeroporto Internacional de João Pessoa (INFRAERO, 2016a) .	76
18	Peso bruto máximo e distância entre trens de pouso principais . . . . .	77
19	Medição da irregularidade longitudinal - 3 metros à esquerda do eixo da pista (GONÇALVES, 2017) . . . . .	80
20	Medição da irregularidade longitudinal - 3 metros à direita do eixo da pista (GONÇALVES, 2017) . . . . .	80
21	Medição da irregularidade longitudinal - 6 metros à esquerda do eixo da pista (GONÇALVES, 2017) . . . . .	81
22	Medição da irregularidade longitudinal - 6 metros à direita do eixo da pista (GONÇALVES, 2017) . . . . .	81
23	Medição do coeficiente de atrito. Adaptado de Gonçalves (2017) . . . . .	82
24	Medição da macrotextura. Adaptado de Gonçalves (2017) . . . . .	83

25	Resumo de CBR na pista de pouso e decolagem (INFRAERO, 2016a) . . . . .	87
26	Resumo da avaliação funcional . . . . .	97
27	Considerações sobre o eixo de aeronaves de peso bruto superior a 13.000 kg. Adaptado de FAA (1995) . . . . .	101
28	Fator de dano acumulado por aeronave . . . . .	102
29	Deflexão S1E - inicial . . . . .	105
30	Deflexão S1E - 1º tratamento . . . . .	106
31	Deflexão S1E - 2º tratamento . . . . .	106
32	Resultados tratamento estatístico - S1E . . . . .	107
33	Resultados tratamento estatístico - S2E . . . . .	108
34	Resultados tratamento estatístico - S3E . . . . .	108
35	Resultados tratamento estatístico - S4E . . . . .	108
36	Resultados tratamento estatístico - S1D . . . . .	109
37	Resultados tratamento estatístico - S2D . . . . .	109
38	Resultados tratamento estatístico - S3D . . . . .	109
39	Módulos de elasticidade iniciais e coeficientes de Poisson - BackMeDiNa . . . . .	110
40	Módulos de elasticidade iniciais e coeficientes de Poisson - BAKFAA . . . . .	111
41	Módulo de elasticidade em função do <i>software</i> de retroanálise. Adaptado de Chaves, Almeida e Oliveira (2023) . . . . .	119
42	Vida útil remanescente do pavimento por segmento . . . . .	123
43	Diferença percentual entre pesos máximos de táxi e decolagem . . . . .	125
44	Número equivalente anual de decolagens da aeronave de projeto . . . . .	127
45	Aplicação do Método das Diferenças Acumuladas (BERNUCCI et al., 2008) . . . . .	136

## Lista de siglas abreviaturas

<b>AASHTO</b>	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ANAC</b>	Agência Nacional de Aviação Civil
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>CAP</b>	Cimento Asfáltico de Petróleo
<b>CBR</b>	<i>California Bearing Ration</i>
<b>CDF</b>	<i>Cumulative Damage Factor</i>
<b>CDFU</b>	<i>Cumulative Damage Factor Used</i>
<b>CV</b>	Coefficiente de variação
<b>DCP</b>	Cone de Penetração Dinâmica
<b>DN</b>	Índice de Penetração DCP
<b>DNER</b>	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
<b>DNIT</b>	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
<b>DSM</b>	<i>Dynamic Stiffness Modulus</i>
<b>FAA</b>	<i>Federal Aviation Administration</i>
<b>FAARFIELD</b>	<i>Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Interactive Elastic Layered Design</i>
<b>FWD</b>	<i>Falling Wiegth Deflectometer</i>
<b>GPR</b>	<i>Ground Penetrating Radar</i>
<b>HDM</b>	<i>Highway Development and Management System</i>
<b>HWD</b>	<i>Heavy Wiegth Deflectometer</i>
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>ICAO</b>	<i>International Civil Aviation Organisation</i>

<b>IFR</b>	<i>Instrument Flight Rules</i>
<b>INFRAERO</b>	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
<b>ISC</b>	Índice de Suporte Califórnia
<b>ISM</b>	<i>Impulse Stiffness Modulus</i>
<b>IRI</b>	<i>International Roughness Index</i>
<b>NDT</b>	<i>Nondestructive Testing</i>
<b>PCC</b>	<i>Portland Cement Concrete</i>
<b>PCI</b>	<i>Pavement Condition Index</i>
<b>PCN</b>	<i>Pavement Classification Number</i>
<b>PDF</b>	<i>Portable Document Format</i>
<b>PIARC</b>	<i>The World Road Association</i>
<b>PPD</b>	Pista de Pouso e Decolagem
<b>RBAC</b>	Regulamento Brasileiro da Aviação Civil
<b>RMS</b>	Erro Quadrático Médio
<b>SBGF</b>	Sociedade Brasileira de Geofísica
<b>SCI</b>	<i>Structural Condition Index</i>
<b>SGPA</b>	Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários
<b>SBJP</b>	Código ICAO do Aeroporto Internacional de João Pessoa
<b>SMA</b>	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
<b>TF</b>	Tonelada(s)-força
<b>TRB</b>	<i>Transportation Research Board</i>
<b>VB</b>	Viga Benkelman
<b>VFR</b>	<i>Visual Flight Rules</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	3
1.1.1	Objetivo geral . . . . .	3
1.1.2	Objetivos específicos . . . . .	3
1.2	Limitações . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1	Pavimentos . . . . .	4
2.1.1	Tipos de pavimentos . . . . .	5
2.1.2	Dimensionamento do pavimento . . . . .	8
2.2	Avaliação de pavimentos . . . . .	13
2.2.1	Defeitos em pavimentos de aeródromos . . . . .	14
2.2.2	Inspeção visual . . . . .	21
2.2.3	Avaliação funcional . . . . .	21
2.2.4	Avaliação estrutural . . . . .	24
2.3	Tratamento de dados de deflexão de ensaios não destrutivos . . . . .	30
2.3.1	Linha de ensaio crítica . . . . .	31
2.3.2	Método da <i>Advisory Circular</i> 150/5370 - 11B . . . . .	31
2.3.3	Método das Diferenças Acumuladas da AASHTO . . . . .	36
2.3.4	Resumo dos métodos . . . . .	37
2.4	Segmentos homogêneos . . . . .	38
2.4.1	Determinação dos segmentos homogêneos . . . . .	38
2.4.2	Determinação da deflexão do segmento . . . . .	39
2.5	Retroanálise . . . . .	42
2.5.1	Módulo de elasticidade . . . . .	42
2.5.2	Processo de retroanálise . . . . .	43
2.5.3	<i>Softwares</i> de retroanálise . . . . .	44
2.5.4	Estimativa da vida útil estrutural . . . . .	47
2.6	Restauração de pavimentos . . . . .	48
2.6.1	Técnicas de restauração . . . . .	50
2.7	Método ACN-PCN . . . . .	52
2.7.1	Determinação do ACN . . . . .	53
2.7.2	Determinação do PCN . . . . .	54
2.7.3	Uso do COMFAA 3.0 . . . . .	55

2.8	Sinalização horizontal em pistas de pouso e decolagem de aeródromos . . . . .	59
2.8.1	Designação da pista . . . . .	61
2.8.2	Eixo de pista . . . . .	62
2.8.3	Faixas de cabeceira . . . . .	62
2.8.4	Ponto de visada . . . . .	63
2.8.5	Zona de toque . . . . .	65
2.8.6	Borda da pista . . . . .	66
<b>3</b>	<b>Área de estudo – Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto</b>	<b>68</b>
3.1	Critérios para seleção da área de estudo . . . . .	68
3.2	Histórico . . . . .	71
3.3	Mix de aeronaves . . . . .	76
3.4	Configuração do sistema de pistas . . . . .	77
3.5	Defeitos no pavimento . . . . .	77
3.6	Avaliação funcional . . . . .	77
3.7	Avaliação estrutural não-destrutiva . . . . .	83
3.7.1	<i>Failing Weight Deflectometer</i> . . . . .	83
3.7.2	<i>Ground Penetrating Radar</i> . . . . .	85
3.8	Avaliações estruturais semidestrutiva e destrutiva . . . . .	85
3.9	Condição de abastecimento das aeronaves . . . . .	87
<b>4</b>	<b>Método</b>	<b>88</b>
4.1	Identificação de defeitos no pavimento . . . . .	90
4.2	Obtenção dos índices de avaliação funcional . . . . .	90
4.3	Obtenção dos parâmetros de avaliação estrutural . . . . .	90
4.4	Escolha da linha crítica . . . . .	90
4.5	Escolha da carga normalizada . . . . .	92
4.6	Determinação dos segmentos homogêneos . . . . .	93
4.7	Determinação da deflexão do segmento homogêneo . . . . .	93
4.8	Retroanálise dos módulos de elasticidade . . . . .	93
4.9	Estimativa da vida útil remanescente do pavimento . . . . .	94
4.10	Escolha da(s) técnica(s) de restauração . . . . .	94
4.11	Dimensionamento da nova estrutura do pavimento . . . . .	94
4.12	Determinação do PCN da nova estrutura . . . . .	94
4.13	Indicação das especificações técnicas para execução do projeto de pavimentação . . . . .	95
4.14	Elaboração do projeto de sinalização horizontal . . . . .	95

<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>96</b>
5.1	Avaliação funcional . . . . .	96
5.2	Escolha da linha crítica . . . . .	97
5.3	Tratamento dos dados de deflexão . . . . .	99
5.4	Determinação dos segmentos homogêneos . . . . .	103
5.5	Determinação da deflexão de cada segmento homogêneo . . . . .	105
5.6	Retroanálise dos módulos de elasticidade . . . . .	110
5.6.1	Diferença entre bacias deflectométricas medidas e retroanalizadas – Erro quadrático médio . . . . .	111
5.6.2	Camada de revestimento: concreto asfáltico . . . . .	118
5.6.3	Camada de base: concreto de cimento Portland . . . . .	119
5.6.4	Camada de sub-base . . . . .	120
5.6.5	Subleito . . . . .	121
5.7	Estimativa da vida útil remanescente do pavimento . . . . .	122
5.8	Especificações técnicas para a pavimentação . . . . .	124
5.9	Determinação do PCN . . . . .	125
5.10	Elaboração do projeto de sinalização horizontal . . . . .	130
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>132</b>
6.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	135
<b>7</b>	<b>Anexos</b>	<b>136</b>
7.1	Anexo A: Exemplo de aplicação do Método Das Diferenças Acumuladas . . . . .	136
7.2	Anexo B: <i>Script</i> de conversão BackMeDiNa - BAKFAA . . . . .	137
7.3	Anexo C: Arquivo de saída COMFAA 3.0 . . . . .	138
7.4	Anexo D: Projeto de sinalização horizontal . . . . .	139
	<b>Referências</b>	<b>141</b>

# 1 Introdução

Para cumprir as disposições normativas do órgão regulador do setor e, sobretudo, garantir a segurança operacional aos usuários do aeródromo, sejam pilotos, passageiros ou colaboradores em solo, é necessária a análise periódica das condições funcionais e estruturais do pavimento, a fim de identificar eventuais defeitos e propor adequadas técnicas de restauração.

ANAC (2017a) define operador de aeródromo como “pessoa natural ou jurídica a quem a ANAC tenha outorgado o direito de administrar ou prestar serviços em aeródromo público ou privado, próprio ou não, com ou sem fins lucrativos.”

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), por meio do Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) nº 153 Emenda 07 (ANAC, 2023b), informa que o operador de aeródromo deve verificar as condições físicas e funcionais de diversos elementos presentes no aeródromo, como o pavimento e a sinalização horizontal.

Além disso, a RBAC nº 153 estabelece a responsabilidade do operador de aeródromo de implementar um sistema de manutenção que abranja a infraestrutura do aeródromo em sua totalidade. As áreas pavimentadas, como pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátios de estacionamento de aeronaves, assim como as vias de circulação de veículos, equipamentos e pessoas, devem estar contempladas no sistema de manutenção. ANAC (2016a) define as áreas pavimentadas em aeródromos como aquelas cuja camada superficial não seja em leito natural, isto é, o material da camada de revestimento seja de revestimento à base de cimento asfáltico de petróleo (CAP), de cimento Portland ou pavimento intertravado.

Segundo o Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários (SGPA) (ANAC, 2017b), somente os aeródromos de Classe IV, cujo número de passageiros processados é superior a 5 milhões, devem obrigatoriamente possuir um SGPA. Assim, a efetiva implementação de um sistema de manutenção abrangente, principalmente em aeródromos das Classes I, II e III pode ser desafiadora.

ANAC (2017b) apresenta um SGPA como um conjunto de ferramentas e técnicas que auxiliam os gestores e tomadores de decisão a desenvolver, avaliar e preservar pavimentos em um estado funcional aceitável ao longo de um determinado período.

Os pavimentos de aeródromos estão expostos às intempéries ambientais, como variações de temperatura e umidade, além de serem submetidos à heterogeneidade das cargas atuantes na estrutura, em virtude das diferentes configurações de trem de pouso das aeronaves. Essas condições, no decorrer do tempo, levam à deterioração funcional e/ou estrutural do pavimento.

Em relação ao aspecto funcional, Bernucci et al. (2022) descreve que as principais causas do aparecimento precoce dos defeitos superficiais são erros de projeto, falhas na seleção, dosagem

ou produção dos materiais, falhas construtivas e inadequação ou inexistência de alternativas de conservação e manutenção.

Por sua vez, a deterioração estrutural é associada à deformação plástica, também chamada permanente, e à deformação elástica, também chamada recuperável ou resiliente. Uma das formas de identificar as condições estruturais do pavimento é por meio de ensaios não-destrutivos. Esse tipo de ensaio não é intrusivo, ao contrário dos ensaios destrutivos, pois não demanda a coleta de material do pavimento para avaliação em laboratório. Uma das principais vantagens do uso dessa abordagem é a redução do tempo de interrupção parcial ou total das operações do aeródromo.

Conforme apresentado em Bernucci et al. (2022), os principais equipamentos utilizados em ensaios não-destrutivos em pavimentos são o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), o *Heavy Weight Deflectometer* (HWD) e a *Viga Belkeman* (VB). O princípio de utilização destes equipamentos é medir deflexões nas camadas do pavimento, durante e após a aplicação de uma carga que simule a ação do tráfego real. Esses ensaios também são chamados de levantamentos deflectométricos. Com as deflexões medidas, é possível gerar a bacia de deflexões da estrutura.

Com base nas deflexões obtidas através desses ensaios, é possível desenvolver a retroanálise do pavimento. A retroanálise estima o módulo de elasticidade atual de cada camada, a partir do conhecimento do módulo de elasticidade inicial, ou de projeto, e da espessura de cada camada. Com os módulos de elasticidade da estrutura existente, é possível estimar a vida útil remanescente e dimensionar, se viável técnica e economicamente, uma nova estrutura, ou seja, determinar o material e a espessura da(s) camada(s) da nova estrutura.

Se for identificada a necessidade de intervenção no pavimento, ou seja, extração da(s) camada(s) deteriorada(s) e sobreposição de uma nova camada, no caso de pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátio de aeronaves, é necessário recompor, igualmente, a sinalização horizontal presente na superfície do pavimento que pode ter sido afetada pela execução do novo projeto de restauração. A sinalização horizontal deve respeitar as especificações previstas pela ANAC.

Entretanto, a falta de informações precisas e atualizadas tanto das condições das pistas quanto das características do aeródromo, além da complexidade na interpretação dos resultados dos ensaios não-destrutivos, a limitação de recursos técnicos e humanos, e as restrições orçamentárias são alguns dos desafios enfrentados pelos operadores de aeródromos na identificação da necessidade de intervenção e na busca por soluções eficazes de restauração, se preciso.

Nesse cenário desafiador, a comunidade técnica e científica se dedica a aprimorar os processos envolvidos na gestão e restauração de pistas de aeródromos. À medida que os desafios se intensificam, os operadores de aeródromos buscam adotar abordagens metodológicas sólidas para enfrentar os problemas existentes na gestão de pavimentos de aeródromos.

Este trabalho busca contribuir para esse avanço, propondo uma análise das dificuldades enfrentadas pelos operadores de aeródromos e apresentando um método que reúna e organize os princípios

abordados na literatura técnica, com o intuito de contribuir à tomada de decisão de operadores de aeródromos em seu processo de restauração de pistas de pouso e decolagem, no âmbito da gestão de pavimentos de aeródromos.

## 1.1 Objetivos

Esta seção apresenta os objetivos geral e específicos do trabalho.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é delimitar e aplicar uma sequência metodológica para elaboração das especificações técnicas de restauração de pista de pouso e decolagem, com base nas avaliações funcional e estrutural de pavimentos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- (a) avaliar o grau de dificuldade em rastrear o processo com base na literatura técnica relacionada;
- (b) identificar, utilizar e avaliar *softwares* que auxiliem nas etapas do processo;
- (c) avaliar a disponibilidade e qualidade dos dados de deflexão e mix de tráfego de aeródromos;
- (d) identificar as vantagens e desvantagens do uso da retroanálise no projeto de restauração de pavimentos;
- (e) investigar o uso de segmentos homogêneos em pavimentos de aeródromos.

## 1.2 Limitações

O presente trabalho de conclusão de curso abrange os projetos de pavimentação e sinalização horizontal, não sendo contemplados os projetos de terraplenagem, de drenagem e de proteção ambiental.

A prática comum em projetos de manutenção de pavimentos em aeródromos envolve toda a área de movimentação, o que inclui pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátios de estacionamento de aeronaves. Neste trabalho é realizada, exclusivamente, a análise em pista de pouso e decolagem.

## 2 Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta os principais conceitos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho. A primeira seção apresenta o conceito e os tipos de pavimentos. Em seguida, são descritos os tipos de avaliação de pavimentos e os conceitos relacionados à restauração de pavimentos. Nas seções seguintes, são apresentados e conceituados a ferramenta de retroanálise e o Método ACN-PCN. Por último, são apresentados conceitos da sinalização horizontal de pistas de pouso e decolagem de aeródromos.

### 2.1 Pavimentos

O projeto de restauração de pista de pouso e decolagem depende diretamente do tipo de pavimento, o qual é heterogêneo em relação às cargas atuantes, à espessura das camadas e aos materiais constituintes.

Balbo (2007) define pavimento como estrutura não perene, formada por camadas de diferentes materiais compactados a partir do subleito, adequada para atender tanto funcional quanto estruturalmente o tráfego, de forma durável e econômica.

Para Bernucci et al. (2022), a função da pavimentação é garantir a trafegabilidade, independente das condições climáticas ou dos períodos do ano, de forma que entregue aos usuários conforto e segurança. Posto que o solo natural não apresenta, individualmente, adequadas características mecânicas para suportar as tensões e deformações provenientes da ação do tráfego durante a vida útil, torna-se necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, sobre o solo natural, para disseminar as cargas nas camadas que formam o pavimento.

Balbo (2007) e Bernucci et al. (2022) definem as camadas do pavimento em revestimento, base, sub-base e subleito, sendo:

- revestimento: camada que recebe diretamente a ação de rolamento dos veículos;
- base: camada situada imediatamente abaixo do revestimento, destinada a distribuir os esforços verticais provenientes do revestimento;
- sub-base: camada situada entre a base e o subleito, cuja função é melhorar a capacidade de suporte do subleito, proporcionando drenagem e contribuindo para a distribuição das cargas;
- subleito: terreno de fundação do pavimento, constituído por material consolidado e compactado.

Portanto, para o dimensionamento adequado da estrutura de pavimento e para que esta atenda suas funções funcional e estrutural, é fundamental conhecer o tipo e o volume de tráfego atuante no

período de projeto e as propriedades físicas e mecânicas dos materiais empregados na estrutura do pavimento.

### 2.1.1 Tipos de pavimentos

O projeto de restauração de pavimentos é diretamente relacionado à natureza do pavimento na qual é feita esta intervenção, em razão da heterogeneidade de materiais e espessuras utilizados em cada tipo de pavimento.

Para FAA (2021) e Bernucci et al. (2022), os pavimentos também são divididos nos tipos flexível e rígido. Os pavimentos flexíveis são os relacionados aos concretos asfálticos, compostos por uma camada superior asfáltica e camadas inferiores granulares, de solos ou de mistura de solos, que não levem em sua estrutura substâncias cimentantes. São exemplos de materiais granulares e solos: a brita graduada simples, o solo argiloso laterítico e o macadame seco. Já os pavimentos rígidos são aqueles que empregam concreto de cimento Portland em sua estrutura, seja na forma de placas armadas ou não, apoiadas sobre uma camada de material granular ou estabilizado com cimento.

A Figura 1 ilustra uma seção-tipo de pavimento de aeródromo. Seja do tipo flexível ou rígido, a estrutura, normalmente, apresenta as camadas de revestimento, base e sub-base, o reforço de subleito (caso necessário), acima do subleito, de espessura semi-infinita.

Há, ainda, os pavimentos semirrígidos. Segundo Bernucci et al. (2022), os pavimentos semirrígidos pertencem ao tipo flexível e são aqueles que possuem a camada superior constituída de revestimento asfáltico e as demais camadas compostas por material cimentado, como brita graduada tratada com cimento, solo-cimento e solo-cal.

Para Horonjeff et al. (2010), tanto pavimentos flexíveis quanto pavimentos rígidos são encontrados em aeródromos e a escolha por um deles é função do tipo e frequência de uso das aeronaves, condições climáticas e custos de construção e manutenção.

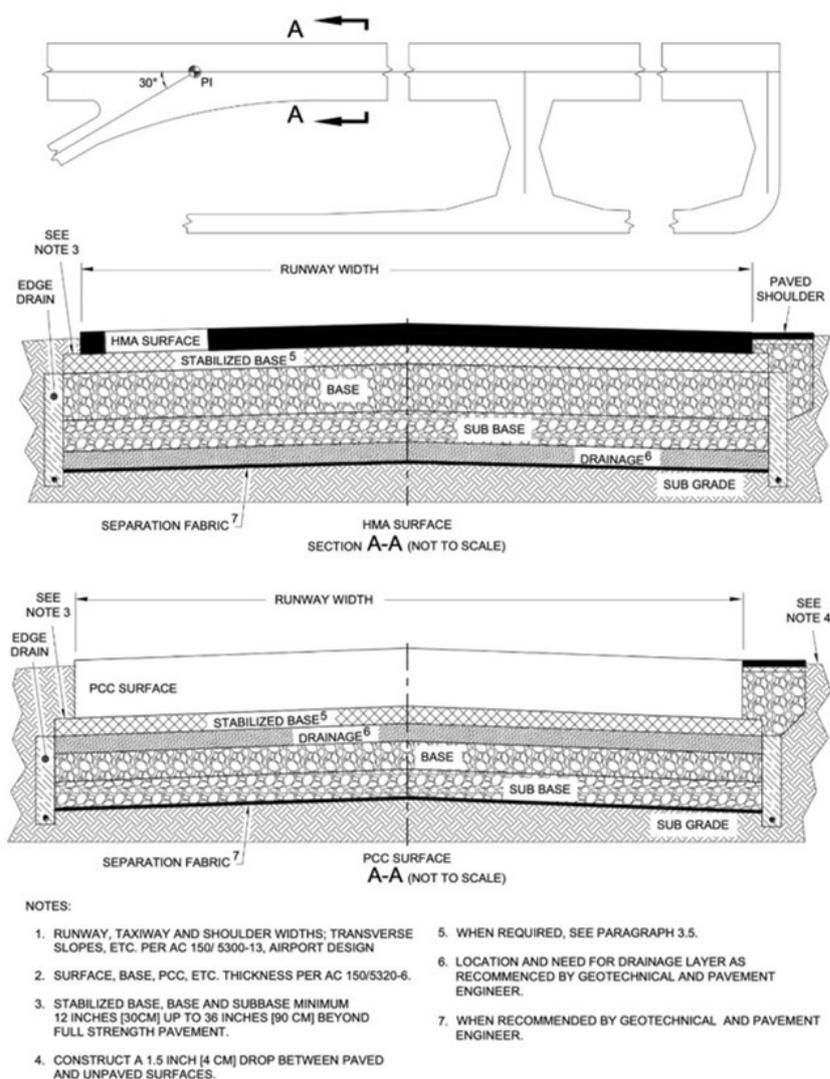
Ainda que os tipos de pavimentos encontrados tanto em rodovias quanto em aeródromos sejam os mesmos, é necessário considerar as particularidades dos pavimentos de aeródromos, que podem não ser aplicáveis ou necessários em rodovias.

De acordo com Medina (1997), os pavimentos encontrados em aeródromos diferem daqueles implantados em rodovias em relação às suas características geométricas e físicas, em razão das solicitações dos veículos. As pistas de pouso e decolagem de aeródromos são sujeitas a cargas de maior intensidade e ao menor número de solicitações, em comparação às pistas rodoviárias. A Tabela 1 apresenta as diferenças entre pistas de aeródromos e pistas rodoviárias.

Outra diferença reside na geometria de rodas dos veículos rodoviários e das aeronaves. A Figura 2 apresenta exemplos de tipos de trem de pouso de aeronaves.

A Figura 3 apresenta tipos de configuração de rodas em veículos rodoviários.

Figura 1: Seção-tipo de um pavimento de aeródromo (FAA, 2021)



Assim, em razão da magnitude de cargas que solicitam os pavimentos de aeródromos serem superiores àquelas que solicitam os pavimentos rodoviários, também há diferença quanto ao(s) método(s) de dimensionamento de cada pavimento.

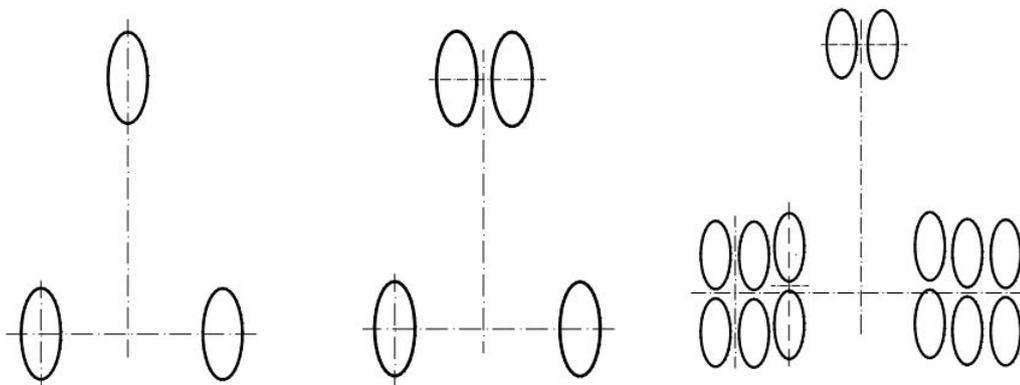
O Manual de Projetos Aeroportuários (ANAC, 2021f) explica que o projetista pode definir os controles tecnológicos, critérios de aceitação e de medição dos serviços por conta própria ou utilizar as especificações de serviços de órgãos consagrados (DNIT, DIRINFRA, ABNT), ajustando-as às necessidades do projeto. Neste documento, também é prevista a avaliação dos pavimentos existentes com os mesmos levantamentos e equipamentos utilizados na avaliação de pavimentos rodoviários.

Assim, ainda que os métodos de dimensionamento sejam diferentes daqueles empregados em pavimentos rodoviários, é permitida a utilização das especificações de materiais de aplicação em

Tabela 1: Diferenças entre pistas de aeródromos e pistas rodoviárias (MEDINA, 1997)

Descrição	Pistas de aeródromos	Pistas rodoviárias
Largura	20 a 50 metros (10 a 25 metros para pistas de táxis)	7 a 10 metros
Comprimento	Cerca de 3000 metros	Vários quilômetros
Cargas	100 tf ou mais por trem de pouso principais	10 toneladas-força (tf) por eixo, sendo 40 tf o máximo por veículo
Frequência de repetição de cargas	Milhares por dia	50 a 100 por dia
Impacto do veículo no pavimento	Grande no pouso de aeronaves, mas minorado pela sustentação e amortecimento	Pequeno
Pressão dos pneumáticos	1,0 a 3,0 MPa em aeródromos	0,15 a 0,60 MPa
Vibrações de veículos parados	Considerada nas cabeceiras de pistas de pouso e decolagem e nas pistas de táxi	Não considerada em rodovias

Figura 2: Exemplos de tipos de trem de pouso de aeronaves (FAA, 2005)



(a) Trem de pouso principal de roda simples com trem de pouso de nariz de roda simples.

(b) Trem de pouso principal de roda simples com trem de pouso de nariz de roda dupla.

(c) Trem de pouso principal com duas rodas triplas em tandem e trem de pouso de nariz com roda dupla.

Figura 3: Tipos de configuração de rodas em veículos rodoviários (DNIT, 2012a)



pavimentos rodoviários em pavimentos de aeródromos assim como os mesmos tipos de avaliação de pavimentos utilizados em rodovias.

### 2.1.2 Dimensionamento do pavimento

O dimensionamento de pavimentos de aeródromos consiste na determinação da espessura e do material de cada camada que compõe a estrutura do pavimento.

Horonjeff et al. (2010) indica que os dois fatores fundamentais para a determinação da espessura de cada camada são a capacidade de suporte do subleito e a quantidade e peso das aeronaves que trafegam sobre o pavimento. Quanto maior a capacidade de suporte do subleito, menores serão as espessuras das camadas superiores.

Em relação à quantidade e peso das aeronaves, a carga máxima permitida no pavimento de aeródromos é estabelecida a partir da estrutura do avião, as condições de operação nas pistas e a etapa de voo (MEDINA, 1997).

FAA (2021) explica que o procedimento de projeto de pavimentos de aeródromos geralmente assume que 95% do peso bruto da aeronave é transportado pelos trens de pouso principais e 5% é transportado pelo trem de pouso do nariz.

Os trens de pouso principais são localizados próximo ao centro de gravidade da aeronave, nas adjacências das asas. As rodas pertencentes ao trem de pouso principal são as primeiras a tocar o solo durante o pouso e as últimas a deixá-lo durante a decolagem. Já o trem de pouso de nariz está localizado na parte frontal da aeronave, sob a cabine do piloto.

Para caracterizar o subleito, é imprescindível a compreensão das propriedades físicas do solo, como limites de plasticidade e liquidez, perfil do solo, ensaio de compactação e densidade máxima, umidade do solo, curva granulométrica, expansão e, sobretudo, o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), do inglês *California Bearing Ratio* (CBR), pertencente ao tipo de avaliação estrutural destrutiva, mas que pode ser estimado por avaliação estrutural semidestrutiva, descrita na Seção 2.2.4.

A *Federal Aviation Administration* (FAA) disponibiliza diretrizes para a elaboração de pavimentos de aeródromo em sua *Advisory Circular 150/5320 - 6G* (FAA, 2021), originalmente publicada em 1975 e revisada em 2008 para considerar novos métodos de projeto mais apropriados para os pesados aviões comerciais.

A *Advisory Circular 150/5320 - 6D* de 1995 é a última versão que utiliza o método antigo de dimensionamento e descreve que devido à heterogeneidade das configurações de trem de pouso e pesos das aeronaves, é necessário considerar os efeitos agregados do tráfego como um todo em termos de uma aeronave de projeto.

Inicialmente, os pavimentos devem ser projetados individualmente para cada tipo de aeronave presente no mix de tráfego. A aeronave de projeto é identificada como aquela que requer o pavimento mais espesso entre todas as aeronaves do mix de tráfego.

Na sequência, todas as aeronaves são convertidas para a mesma configuração de trem de pouso que a aeronave de projeto. Essa conversão é abordada a partir de fatores que são constantes e aplicáveis a pavimentos flexíveis e rígidos. Esses fatores representam uma estimativa dos efeitos comparativos de fadiga entre diferentes tipos de trens de pouso e são descritos em FAA (1995). Após o agrupamento das aeronaves para a mesma configuração de trem de pouso, são convertidas as partidas anuais das aeronaves para partidas anuais equivalentes da aeronave de projeto.

Esse método aplica a utilização de ábacos de dimensionamento em função da configuração de trem de pouso principal, cujos dados de entrada são o CBR do subleito, o peso bruto e o número de partidas anuais equivalentes da aeronave de projeto, para pavimentos flexíveis, e determinação do módulo de fundação ( $k$ ), peso bruto e o número de partidas anuais equivalentes da aeronave de projeto, para pavimentos rígidos.

Conforme consta em FAA (1995), o módulo de fundação  $k$  deve ser designado ao material imediatamente abaixo do pavimento de concreto. No entanto, é aconselhável definir um valor  $k$  para o subleito inicialmente e, em seguida, ajustá-lo para considerar os efeitos da sub-base. O valor  $k$  é uma medida elástica constante para o material de suporte ao pavimento rígido.

Para determinação da aeronave de projeto, é necessário calcular separadamente os pavimentos para cada aeronave do mix, a fim de determinar qual delas requer um pavimento de maior espessura, identificando assim a aeronave de projeto. Em seguida, é realizada a conversão para partidas anuais equivalentes da aeronave de projeto, a partir da Equação 1.

$$\log(R1) = \log(R2) \cdot \left(\frac{W2}{W1}\right)^{1/2} \quad (1)$$

onde:

$R1$  é o número equivalente anual de decolagens da aeronave de projeto;

$R2$  é o número anual de decolagens expresso no trem de pouso da aeronave de projeto;

$W_1$  é a carga da roda da aeronave de projeto;

$W_2$  é a carga da roda da aeronave que se deseja converter para a aeronave de projeto.

A *Advisory Circular* 150/5320 - 6G (FAA, 2021) é o método atual de dimensionamento de pavimentos de aeródromos. Nesta *advisory circular*, é apresentado o programa de computador FAARFIELD<sup>1</sup>, abreviação de *Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Interactive Elastic Layered Design*. O *software* FAARFIELD emprega procedimentos de projeto, tanto para novos pavimentos quanto para a sobreposição em pavimentos flexíveis e rígidos (no âmbito de projetos de reconstrução), baseados na teoria elástica em camadas e a análise de elementos finitos.

Para o caso de pavimentos flexíveis, o *software* FAARFIELD utiliza a máxima deformação vertical no topo do subleito, do inglês *the maximum vertical strain at the top of the subgrade*, e a máxima tensão horizontal na base da camada de revestimento asfáltico. Segundo Howell, Kozyreff e Ockendon (2008), *strain* consiste em um valor adimensional que mede a extensão final (após a aplicação de uma carga) no objeto em relação ao seu comprimento inicial.

Para o caso de pavimentos rígidos, o *software* FAARFIELD utiliza a máxima deformação horizontal na base da placa de concreto de cimento Portland.

FAA (2021) coloca que o *software* FAARFIELD é baseado no conceito de fator de dano acumulado, do inglês *Cumulative Damage Factor* (CDF), em que a contribuição de cada tipo de aeronave em uma determinada combinação (mix) de tráfego é somada para obter o dano cumulativo total de todas as operações de aeronaves na combinação de tráfego.

A determinação da espessura, com o emprego do *software* FAARFIELD, utiliza todo o mix de tráfego, sem designar uma aeronave de projeto. Entretanto, utilizando o CDF, são identificadas quais aeronaves do mix de tráfego contribuem para a maior quantidade de danos ao pavimento.

Conforme consta em FAA (2021), o CDF representa a quantidade de vida de fadiga estrutural de um pavimento que foi usado. É definido como o número de repetições de carga aplicadas sobre as repetições de carga permitidas para a ruptura.

No contexto do dimensionamento de um novo pavimento, a estrutura do pavimento é ajustada até o CDF cumulativo ser igual a 1 para o mix de tráfego aplicado ao longo do período de vida do projeto de pavimentação.

$$CDF = \frac{N_{RA}}{N_{RP}} \quad (2)$$

onde:

$CDF$  = fator de dano acumulado;

$N_{RA}$  = número aplicado de repetições de carga;

---

<sup>1</sup>Disponível em: <<https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/ArtMID/3682/ArticleID/2841/FAARFIELD-20>>

$N_{RP}$  = número permitido de repetições de carga.

As etapas básicas de dimensionamento no FAARFIELD incluem:

- seleção do tipo de pavimento;
- alteração da estrutura do pavimento pela adição, exclusão ou mudança das camadas, caso seja necessário;
- criação do mix de tráfego pela seleção de um mix armazenado ou criado pelo usuário do programa ou escolhendo o mix através da biblioteca de aeronaves;
- se necessário, alterar o peso bruto ou número de partidas de aeronaves do mix de tráfego;
- executar o módulo Design de Espessura, do inglês *Thickness Design*;
- execução do módulo Vida/Compactação, do inglês *Life/Compaction* para compactação do subleito e estimativa da vida útil do pavimento;
- visualização ou impressão do relatório de dimensionamento do pavimento.

FAA (2021) estabelece espessuras mínimas de camada para pavimentos flexíveis e rígidos, em função das diferentes classes de peso da aeronave. O *software* FAARFIELD estabelece os requisitos mínimos de espessura de camada de acordo com o mix de tráfego inserido. Contudo, o usuário deve consultar as Tabelas 2 e 3 para assegurar que todos os requisitos mínimos de espessura sejam atendidos.

O *software* FAARFIELD determina automaticamente o valor do módulo de elasticidade do subleito a partir do CBR. Caso o usuário deseje informar diretamente o valor do módulo de elasticidade do subleito, FAA (2021) apresenta a Equação 3.

$$E = 10 \times CBR \quad (3)$$

onde:

$E$  = o módulo de elasticidade do subleito, em MPa;

$CBR$  = medida da resistência do subleito, em %.

FAA (2021) descreve que, estruturalmente, a reconstrução não é diferente do projeto de um novo pavimento. A reconstrução, considerada como sobreposição de novas camadas no pavimento existente no *software* FAARFIELD é baseada em métodos de análise de elementos finitos tridimensionais e elásticos em camadas.

Os tipos de estruturas de pavimentos com sobreposição inclusas no *software* FAARFIELD são:

- sobreposição de revestimento de concreto asfáltico em pavimento flexível existente;

Tabela 2: Espessuras mínimas para estruturas de pavimento flexível (FAA, 2021)

Tipo da camada	Especificação do item pela FAA	Peso bruto máximo da aeronave operando no pavimento, libras (kg)		
		< 60.000 (27.215)	< 100.000 (45.360)	≥ 100.000 (45.360)
Superfície de asfalto	P-401/P-403	3 in. (75 mm)	4 in. (100 mm)	4 in. (100 mm)
Base estabilizada	P-401 ou P-403; P-304; P-306	Não requerido	Não requerido	5 in. (125 mm)
Base de agregado triturado	P-209, P-211	Não requerido	6 in. (150 mm)	6 in. (150 mm)
Base de agregado	P-207, P-208, P-210, P-212, P-213, P-219	3 in. (75 mm)	Não usada	Não usada
Base drenável (quando usada)	P-307, P-407	Não requerido	6 in. (150 mm) quando usada	6 in. (150 mm) quando usada
Sub-base	P-154	6 in. (150 mm) (se requerido)	6 in. (150 mm) (se requerido)	6 in. (150 mm) (se requerido)

- sobreposição de revestimento de concreto asfáltico em pavimento rígido existente;
- sobreposição de revestimento de concreto de cimento Portland em pavimento flexível existente;
- sobreposição de revestimento de concreto de cimento Portland em pavimento rígido existente.

FAA (2021) descreve que, no caso de sobreposição de concreto asfáltico em pavimento flexível existente, o projeto de um revestimento para um pavimento flexível existente é semelhante ao projetar um novo pavimento, exceto que a camada de projeto é a nova camada de revestimento.

A fresagem da superfície do asfalto pode ser necessária para corrigir deficiências de superfície e nivelamento e/ou remover o material deteriorado da superfície do revestimento existente.

No *software* FAARFIELD, é inserida a espessura final considerando a fresagem, e não a espessura original, para a camada de asfalto existente. Internamente, o *software* FAARFIELD itera a espessura da camada de revestimento até que o CDF no topo do subleito seja igual a 1,0. A espessura mínima da camada de revestimento é de 75 mm. A espessura de projeto da camada de revestimento é a maior entre:

- a espessura mínima; ou

Tabela 3: Espessuras mínimas para estruturas de pavimento rígido (FAA, 2021)

Tipo da camada	Especificação do item pela FAA	Peso bruto máximo da aeronave operando no pavimento, libras (kg)		
		< 60.000 (27.215)	< 100.000 (45.360)	≥ 100.000 (45.360)
Superfície rígida	P-501, pavimento de CCP	6 in. (150 mm)	6 in. (150 mm)	6 in. (150 mm)
Base drenável (quando usada)	P-307, P-407		6 in. (150 mm) quando usada	6 in. (150 mm) quando usada
Base estabilizada	P-401 ou P-403; P-304; P-306	Não requerido	Não requerido	5 in. (125 mm)
Base	P-209, P-207, P-208, P-210, P-211, P-212, P-213, P-219, P-220	Não requerido	6 in. (150 mm)	6 in. (150 mm)
Sub-base	P-154	6 in. (150 mm)	Como requerido para congelamento ou para criar uma plataforma de trabalho	Como requerido para congelamento ou para criar uma plataforma de trabalho

- a espessura necessária para atingir um CDF do material do subleito ou do concreto asfáltico de 1.

Em FAA (2021), a sobreposição de revestimento de concreto asfáltico em pavimento rígido existente considera duas condições possíveis:

- Índice de Condição Estrutural, do inglês *Structural Condition Index* (SCI) inferior a 100; ou
- SCI igual a 100.

O SCI é apresentado em uma escala de 0 a 100. Um pavimento sem nenhuma falha estrutural visível teria um SCI de 100 e um pavimento com falha estrutural severa teria um SCI de 0. Quando o SCI do pavimento rígido atinge um valor de ruptura, é considerado que a estrutura do pavimento falhou.

## 2.2 Avaliação de pavimentos

A condição de um pavimento representa o nível de degradação resultante dos processos associados ao meio ambiente e ao seu uso continuado pelo tráfego (DNIT, 2006a).

Nesse sentido, a avaliação de pavimentos tem por objetivo apresentar um diagnóstico da estrutura *in loco*. Em outras palavras, consiste em caracterizar as atuais condições do pavimento. É a partir do conhecimento dos estados funcional e/ou estrutural que uma técnica de restauração ou, de forma mais ampla, um projeto de restauração pode ou não ser justificado e iniciado.

Uma vez que as formas de avaliação de pavimentos rodoviários são as mesmas utilizadas em pavimentos de aeródromos, são apresentados os materiais técnicos propostos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT).

### 2.2.1 Defeitos em pavimentos de aeródromos

O uso diário das pistas de pouso e decolagem sujeita os pavimentos a cargas especiais e desgaste importantes, além da exposição às condições climáticas, levando à uma degradação contínua dos seus desempenhos funcional e estrutural. Essa deterioração é constantemente avaliada pelos operadores dos aeródromos, que tomam medidas corretivas ou de mitigação, algumas das quais podem ser urgentes ou programadas.

Segundo Bernucci et al. (2022), os defeitos de natureza funcional, também denominados superficiais, são área trincada e severidade do trincamento, deformações permanentes e irregularidade longitudinal.

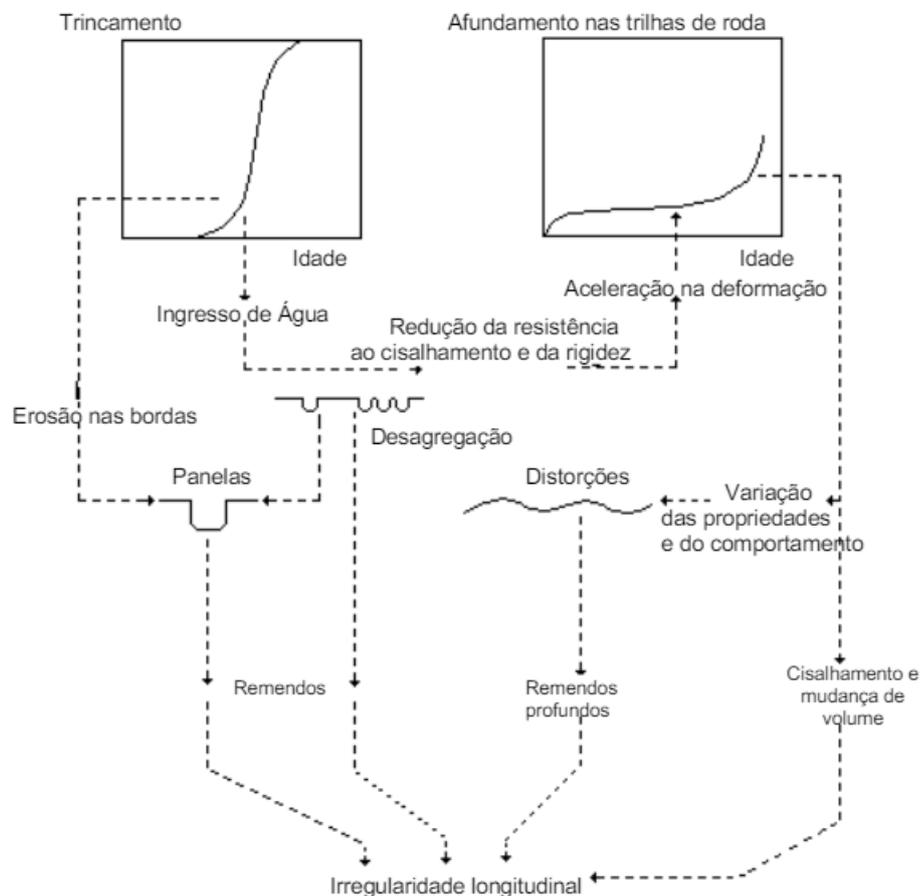
Em relação aos defeitos estruturais, são relacionadas em dois grupos, dependendo da natureza da deformação: afundamento de trilha de rodas, associado à deformação permanente, e trincamento por fadiga, associado à deformação elástica.

Os defeitos funcionais podem ser relacionados aos defeitos estruturais. DNIT (2006a) explica que trincas na superfície possibilitam a infiltração de água no pavimento, o que acelera o processo de deterioração, diminui a resistência ao cisalhamento dos materiais não tratados e aumenta a velocidade das deformações causadas pelas tensões originadas pelo tráfego. Logo, problemas funcionais não corrigidos podem contribuir para o aparecimento ou agravamento de problemas estruturais no pavimento. DNIT (2006a) estabelece como o exemplo a irregularidade longitudinal, considerada como a soma das deformações que ocorrem ao longo de toda a estrutura do pavimento e que reflete nos afundamentos nas trilhas das rodas e nas distorções do perfil longitudinal do pavimento. A Figura 4 apresenta as interações entre os defeitos em pavimentos.

O trincamento por fadiga é uma resposta da estrutura após carregamentos cíclicos. Ou seja, há um primeiro evento de ação da carga, ou passagem do veículo, um evento de descarga e repouso e, em seguida, outro evento de carga. Ao longo do tempo, com a repetição deste processo, a estrutura começa a apresentar trincas e fissuras.

Em 2018, ANAC elaborou a Biblioteca de Patologias de Pavimentos Aeroportuários, atualizando-a em 2021, cujas referências utilizadas são FAA (2014a), Bernucci et al. (2022) e ANAC

Figura 4: Interações entre defeitos em pavimentos (DNIT, 2006a)



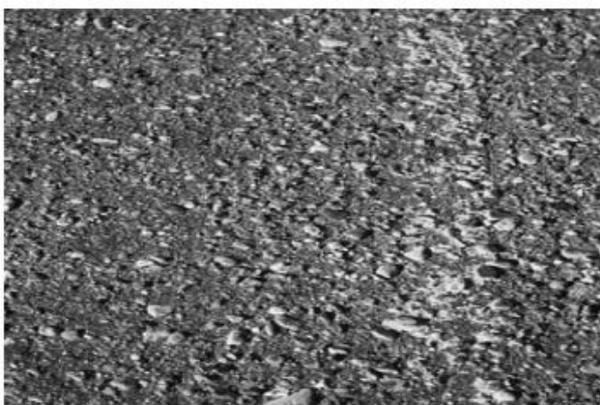
(2023b). Esse documento divide as patologias em defeitos de superfície, deformação superficial, trincas e fissuras, remendos e buracos e outras patologias.

Os defeitos de superfície apresentados em ANAC (2021a) são:

- desgaste superficial: identificada perda superficial de ligante, além de material fino, sem formação de painéis ou concentrações de desgaste;
- polimento: observado predomínio de agregados lustrados na superfície, com pouca presença de ligante, denunciando menor atrito e macrotextura. Pode ocorrer perda de finos e compor quadro de desgaste superficial;
- exsudação: acúmulo de ligante segregado da massa, com pouco agregado visível e compondo um filme liso;
- desagregação: perda de agregados, deixando a superfície rugosa e despreendendo material de granulação fina a média.

A Figura 5 ilustra o desgaste superficial, o polimento, a exsudação e a desagregação.

Figura 5: Defeitos de superfície (BERNUCCI et al., 2008; FAA, 2014a; ANAC, 2021a)



(a) Degaste superficial



(b) Polimento



(c) Exsudação



(d) Desagregação

Quanto à deformação superficial, são exemplos de defeitos:

- afundamento em trilha de rodas: perceptível com o acúmulo de água. Normalmente, não há perda de material, apenas o deslocamento lateral da massa. Há a ruptura longitudinal da camada superficial, com aparecimento de trincas;
- afundamento pontual: a deformação do pavimento é localizada, com trincas por afundamento e formação de bacia de deformação.
- fluência em extremidade: ocorre por deslocamento de material em direção à área não pavimentada. Comum quando a faixa de rolamento é muito próxima da extremidade do pavimento.

A Figura 6 ilustra o afundamento em trilha de rodas, o afundamento pontual e a fluência em extremidade.

ANAC (2021a) também expõe os tipos de trincas e fissuras, as quais podem ser do tipo:

Figura 6: Defeitos de deformação superficial (BERNUCCI et al., 2008; FAA, 2014a)



(a) Afundamento em trilha de rodas



(b) Afundamento pontual



(c) Fluência em extremidade

- “couro de jacaré” são caracterizadas pela formação de pequenos blocos, formando textura que denuncia a ruptura estrutural do revestimento;
- gerais são relacionadas à movimentação térmica do pavimento asfáltico e/ou às juntas construtivas (ou de trabalho);
- em concreto: ocorrem, geralmente, no encontro de um pavimento flexível com um rígido, ou no desgaste de uma selagem anterior nas juntas de placas de concreto, possibilitando a infiltração de água e perda de finos do material.

O esborcinamento designa a quebra nos cantos em placas de concreto e, se não tratado, pode resultar no desprendimento da ponta da placa. A Figura 7 ilustra as trincas tipo “couro de jacaré”, as trincas gerais, as trincas em concreto e o esborcinamento.

Os buracos (ou panelas) possuem dimensão superior a 10 centímetros. Podem se apresentar com desprendimento de material asfáltico ou progressão de uma trinca do tipo “couro de jacaré”

Figura 7: Trincas e fissuras (FAA, 2014a; ANAC, 2021a)



(a) Trincas tipo “couro de jacaré”



(b) Trincas gerais



(c) Trincas em concreto



(d) Esborcinamento

que afundou e perdeu material de superfície. Também podem ser resultado de degradação contínua sem tratamento, provocando o alargamento e aprofundamento do defeito.

Os remendos em desnível têm sua origem na execução inadequada de reparos no pavimento, apresentando bordas construtivas, além de trincas. A depender da velocidade, pode provocar solavanco durante o tráfego das aeronaves e risco de descontrole direcional. A sobreposição de remendos pode denunciar condição limítrofe quanto à vida útil do pavimento, carecendo de trabalho geral de restauração. A Figura 8 ilustra os buracos e remendos em desnível.

São exemplos de outros defeitos o *grooving*, os empoçamentos e o acúmulo visual de borracha.

ANAC (2021e) explica que em regiões com elevada intensidade de chuvas, uma das formas de acelerar a retirada de água da superfície do pavimento é por meio de tratamento superficial, como a camada porosa de atrito (CPA) e o *grooving*. O *grooving* é formado por ranhuras executadas transversalmente ao sentido de operação das aeronaves.

Figura 8: Buracos e remendos (ANAC, 2021a)



(a) Buraco em pista de táxi



(b) Buraco decorrente de degradação contínua sem tratamento



(c) Remendo em desnível em pista de pouso e decolagem



(d) Remendo em desnível em pista de táxi

O *grooving* tem como propósitos reduzir a aquaplanagem e aumentar o contato entre as rodas das aeronaves e o pavimento. A manutenção do *grooving* é fundamental para garantir seu desempenho funcional. O operador do aeródromo deve estar atento ao acúmulo de borracha no interior das ranhuras transversais, ao esmagamento das ranhuras, a eventuais pontos de obstrução e à verificação da integridade das canaletas.

ANAC (2021a) alerta que ranhuras preenchidas parcialmente por borracha e sujeira prejudicam a velocidade de escoamento da água no interior da camada porosa. Na falta de monitoramento adequado, a técnica, idealizada para auxiliar no processo de drenagem do aeródromo, se torna um defeito.

Por sua vez, os empoçamentos são decorrentes de falhas no nivelamento construtivos ou deformações decorrentes do uso (trilha de rodas). Em áreas de junção de duas etapas de pavimentação,

onde a área mais antiga e danificada não conserva declividade mínima para drenagem, também é comum a presença de empoçamentos.

Outro defeito presente em pavimentos de aeródromos é o acúmulo de borracha, muito comum em zonas de toque ou em suas adjacências. Segundo Oliveira (2008), proveniente dos pneus das aeronaves durante suas movimentações, sobretudo durante os procedimentos de pousos, tendo em vista a intensa interação pneu-pavimento, a borracha contribui para a redução do atrito do pavimento, principalmente quando molhado. O acúmulo de borracha favore a ocorrência de aquaplanagem pois, nessa situação, as aeronaves perdem aderência com o revestimento, uma vez que uma camada de água se acumula na superfície do pavimento. A Figura 9 ilustra o *grooving* enquanto defeito, o empoçamento e o acúmulo de borracha.

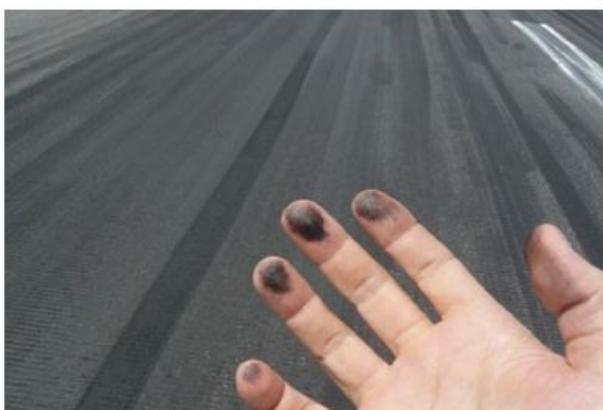
Figura 9: Outros defeitos (ANAC, 2021a)



(a) *Grooving*



(b) Empoçamento



(c) Acúmulo de borracha



(d) Acúmulo de borracha em pavimento de pista de pouso e decolagem, detectado por meio de inspeção visual.

### 2.2.2 Inspeção visual

A inspeção visual é um tipo de avaliação subjetiva, visto que sua precisão depende diretamente da interpretação e da percepção do avaliador em relação às condições superficiais do pavimento, possíveis de serem identificadas a olho nu.

No intuito de diminuir a subjetividade desta avaliação e garantir a adequada obtenção das informações sobre o pavimento, DNIT, por meio de suas normas DNIT 008/2003 - PRO: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos e DNIT 060/2004 - PRO: Pavimento rígido – Inspeção visual, estabelece procedimentos e critérios para a realização da inspeção visual.

ANAC (2021a) descreve casos em que o teste de coeficiente de atrito, realizado poucas semanas em um pavimento, comprovava os níveis mínimos de atrito. Entretanto, a condição visual levantava suspeitas sobre a conformidade desse índice.

Segundo ANAC (2021a), a inspeção visual produz resultado empírico que pode ser útil.

### 2.2.3 Avaliação funcional

DNIT (2006a) aborda a avaliação funcional como um dos tipos de avaliação de pavimentos, além da avaliação estrutural.

Bernucci et al. (2022) também apresentam a avaliação funcional separadamente da avaliação estrutural, descrevendo técnicas de restauração de pavimentos para problemas funcionais e técnicas de restauração de pavimentos para problemas estruturais.

A avaliação funcional deve ser realizada em conformidade com as normas DNIT 005/2003 – TER - Defeitos nos pavimentos asfálticos - Terminologia, DNIT 006/2003 – PRO - Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos - Procedimento, DNIT 007/2003 – PRO - Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimento flexível e semi-rígido para gerência de pavimentos e estudos e projetos - Procedimento, DNIT 008/2003 – PRO - Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos asfálticos - Procedimento e DNIT 009/2003 – PRO - Levantamento para avaliação subjetiva da superfície do pavimento - Procedimento.

Por outro lado, FAA (2021) relaciona a avaliação funcional com a avaliação estrutural, no contexto de um projeto de reconstrução de pavimento, através do Índice da Condição do Pavimento, do inglês *Pavement Condition Index* (PCI).

Segundo FAA (2021), pavimentos que apresentem PCIs entre 55 e 70 são mais indicados para reabilitação, enquanto aqueles com PCI inferior a 55 podem ser candidatos à reconstrução. Existem situações em que é necessário reconstruir um pavimento com um PCI superior a 55 e, de forma

análoga, um pavimento com um PCI menor que 55 pode ser reabilitado com um revestimento flexível ou rígido. Pavimentos com PCI superior a 70 são candidatos para alguma forma de manutenção.

Entretanto, FAA (2021) alerta que os valores numéricos do PCI devem ser usados com cautela, pois eles oferecem uma indicação relativa da condição da superfície de um pavimento. Logo, são apenas limites relativos e não devem ser interpretados como limites exatos quando utilizados para balizar a tomada de decisão por uma manutenção, reabilitação ou reconstrução de pavimento.

Assim, para DNIT (2006a) e Bernucci et al. (2022), a avaliação funcional (ou de superfície) e a avaliação estrutural são tratadas separadamente, ou seja, caso sejam identificados problemas funcionais em uma avaliação funcional, devem ser determinadas soluções funcionais e de forma análoga na avaliação estrutural. Apesar de FAA (2021) relacionar ambas, apresenta um alerta de que não devem ser utilizados como limites exatos. De forma geral, as avaliações funcional e estrutural proporcionam o conhecimento de diferentes aspectos do pavimento, sendo necessário abordá-las de maneira independente uma da outra.

A avaliação da superfície dos pavimentos dos aeroportos segue normas estabelecidas principalmente pela ANAC. Em geral a ANAC segue normas e procedimentos associados aos da FAA, americana (BERNUCCI et al., 2022).

Bernucci et al. (2022) descrevem que a necessidade de preservar a funcionalidade da superfície é fundamentada pelo perigo inerente aos procedimentos de pouso e decolagem, que ocorrem em alta velocidade e não oferecem margem para “desvios” por parte do piloto face aos possíveis defeitos.

Os regulamentos ANAC IS N° 153.203-001, Revisão A e ANAC IS N° 153.205-001, Revisão B abordam a avaliação da condição funcional através do PCI e estabelecem diretrizes para monitoramento da macrotextura, atrito e irregularidade das pistas de pouso e decolagem.

Conforme estipulado em ANAC (2023b), a frequência para realizar medições do atrito, profundidade da macrotextura, índice de irregularidade longitudinal e avaliação do acúmulo de borracha nas pistas de pouso e decolagem dos aeródromos é determinada pela média de pousos diários de aeronaves de asa fixa no ano anterior. Logo, a frequência da realização da avaliação funcional não é necessariamente a mesma da avaliação estrutural.

São exemplos de aeronaves de asa fixa o avião e o planador. Ao se deslocarem na atmosfera, as asas desse tipo de aeronave desviam o fluxo de ar, criando uma reação aerodinâmica para cima, denominada sustentação. No caso das aeronaves de asa rotativa, como o helicóptero, são as pás do rotor que, ao girar, criam a sustentação.

***Pavement Condition Index*** O PCI é um índice de serventia da condição geral da superfície do pavimento, no qual os valores se situam entre 0, representando um pavimento na condição de ruptura, e 100, representando um pavimento na condição excelente.

A norma que determina os procedimentos para a determinação do PCI é a D5340 – 12 - *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*, da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). ASTM (2015) descreve que PCI entre 0 a 10 designa pavimentos *failed*, entre 10 e 25, com problemas funcionais graves, entre 25 e 40, ruim, entre 40 e 70, regular e, entre 70 e 100, bom.

INFRAERO (2018b) apresenta outra escala qualitativa para o PCI: entre 0 e 35, péssimo; entre 36 e 55, ruim; entre 56 e 70, regular; entre 71 e 85, bom e entre 86 e 100 ótimo.

ANAC (2023b) descreve que a frequência mínima para a medição do PCI da pista de pouso e decolagem é determinada em função da classe dos aeródromos públicos, sendo 4 meses para aeródromos públicos das Classes I e II, 18 meses para aqueles da Classe III e 12 meses para aqueles da Classe IV. Conforme consta em ANAC (2016a), as classes de aeródromos públicos são determinadas em função do número de passageiros processados, considerando a média aritmética anual no período de referência (3 anos anteriores ao ano corrente).

- Classe I: menos de 200.000.
- Classe II: entre 200.000 e 1.000.000.
- Classe III: entre 1.000.000 e 5.000.000.
- Classe IV: a partir de 5.000.000.

**Irregularidade longitudinal** A irregularidade longitudinal do pavimento é determinada a partir de equipamento que possibilite a obtenção de valores expressos em conformidade com a escala internacional de irregularidade, do inglês *International Roughness Index* (IRI).

Conforme consta em ANAC (2023a), o IRI do pavimento deve ser igual ou inferior a 2,5 m/km, sendo reportado a cada 200 metros. Se o IRI exceder esse valor, o operador do aeródromo é obrigado a comunicar à ANAC, acompanhando o relatório de medição do IRI, as medidas que foram ou serão implementadas para restabelecer os valores que atendam ao requisito.

**Atrito** Conforme descrito em Wells e Young (2011), o atrito é o que possibilita a aceleração e frenagem seguras após os pousos. A ausência ou redução do coeficiente de atrito das pistas de pouso e decolagem pode ocasionar a necessidade de uma distância de frenagem maior, assim como ocorrências de derrapagem e deslizamento da aeronave.

ANAC (2023a) descreve que dentre os equipamentos de medição, o mais usual é o  $\mu$ meter. O ensaio é realizado com a pista molhada, para simular a pior condição em termos de atrito. O valor do coeficiente de atrito do pavimento deve ser igual ou superior aos parâmetros estabelecidos em função do tipo de equipamento de medição.

Por exemplo, para o equipamento *Grip tester*, com velocidade de ensaio igual a 65 km/h, o coeficiente de atrito mínimo é 0,43 e 0,53 a nível de manutenção.

**Macrotextura** ANAC (2023a) indica a obrigatoriedade do operador do aeródromo de monitorar a profundidade da macrotextura do pavimento, com o ensaio volumétrico tipo mancha de areia, em área do pavimento sem ranhuras transversais (*grooving*). A profundidade média da macrotextura deve ser maior ou igual a 0,60 mm para pista de pouso e decolagem em operação.

ASTM (2004) define a macrotextura como o conjunto de desvios na superfície de um pavimento em relação a uma superfície que seja totalmente plana, com características de comprimento de onda e altura que vão de 0,5 mm até um ponto em que não cause mais impacto na interação entre pneu e pavimento.

Bernucci et al. (2022) apresentam a classificação da textura de um pavimento segundo o *The World Road Association* (PIARC), descrita na Tabela 24.

Tabela 4: Classificação da textura de um pavimento (BERNUCCI et al., 2022)

Classificação da textura	Faixa de comprimento de onda
Microtextura	$\lambda \leq 0,5 \text{ mm}$
Macrotextura	$0,5 \text{ mm} \leq \lambda < 50 \text{ mm}$
Megatextura	$50 \text{ mm} \leq \lambda < 500 \text{ mm}$
Irregularidade	$0,5 \text{ m} \leq \lambda < 50 \text{ m}$

**Remoção da borracha** A remoção de borracha não é um índice de avaliação funcional propriamente dito, como PCI, IRI, atrito e macrotextura, mas faz parte da avaliação funcional. Segundo ANAC (2023b), deve ser realizada quando afetar as condições adequadas de aderência da pista de pouso e decolagem.

#### 2.2.4 Avaliação estrutural

Bernucci et al. (2022) explicam a avaliação estrutural está associada ao conceito de capacidade de carga, vinculado diretamente ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento e pode ser feita a partir de três métodos: não destrutivo, semidestruutivo ou destrutivo.

ANAC (2021b) alerta que o uso somente de métodos não destrutivos pode gerar discrepância entre os resultados encontrados no ensaio não destrutivo e a situação real do pavimento, trazendo incerteza em relação à representatividade da análise da capacidade estrutural realizada.

Os ensaios destrutivos são ferramentas que balizam, ou seja, orientam as avaliações não destrutivas. Os ensaios não destrutivos são formas complementares que dão agilidade e velocidade no processo de inspeção de diversos pontos ao longo do pavimento (ANAC, 2021b).

Portanto, a avaliação estrutural ideal inclui tanto ensaios destrutivos quanto ensaios não destrutivos.

**Avaliação estrutural não destrutiva** DNIT (2006a) descreve que os ensaios não destrutivos, do inglês *Nondestructive Testing* (NDT) podem ser utilizados para:

- auxiliar o projeto de reforço estrutural;
- distinguir os diferentes segmentos para efeito de projeto, em função dos valores de deflexão encontrados;
- determinar causas de defeitos e verificar locais com falta de suporte ou excesso de vazios;
- diferenciar os períodos críticos de deterioração do pavimento, em função das variações sazonais nas deflexões;
- indicar a capacidade da estrutura do pavimento em suportar o tráfego atual e futuro;
- avaliação dos módulos de elasticidade por retroanálise (apresentada na seção 2.5).

FAA (2011) descreve que a avaliação estrutural não destrutiva tem por objetivo a medida da resposta da superfície do pavimento, isto é, deflexões, de uma carga dinâmica aplicada que simula uma roda em movimento.

A magnitude da carga dinâmica aplicada muda de modo que seja semelhante à carga em uma única roda da aeronave crítica ou de projeto.

FAA (2011) explica que a avaliação estrutural não destrutiva oferece várias vantagens em relação à avaliação estrutural destrutiva. A principal vantagem é a capacidade de coletar dados rapidamente em diversos locais, sem interromper as operações da pista de pouso e decolagem, da pista de táxi ou do pátio de estacionamento.

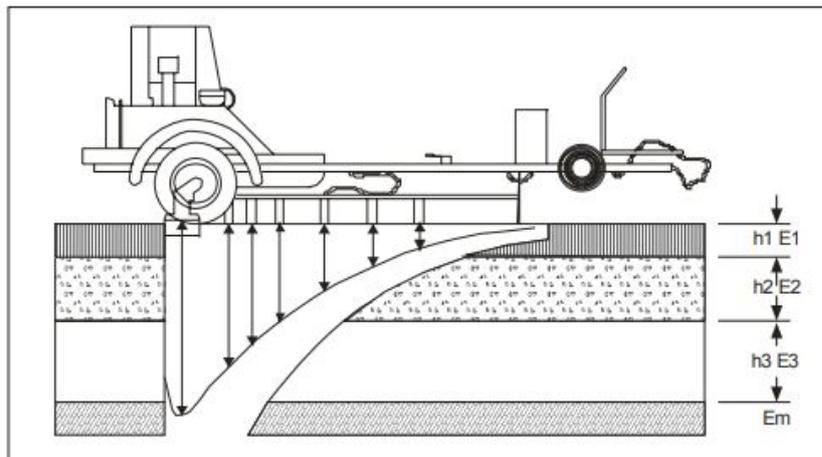
A mais importante (vantagem) é a capacidade de coletar dados rapidamente em vários locais, mantendo a pista de pouso e decolagem, a pista de táxi ou o pátio de estacionamento em operação durante esses testes de 2 a 3 minutos, desde que o teste esteja em contato com o controle de tráfego aéreo. Sem o NDT, os dados estruturais devem ser obtidos de vários núcleos, sondagens e poços de escavação em um pavimento de aeroporto existente. Isso pode atrapalhar muito as operações do aeroporto (FAA, 2011).

Os equipamentos dinâmicos de impacto, um dos tipos de equipamentos utilizados em ensaios não-destrutivos, submetem o pavimento à ação de um peso elevado até uma altura pré-determinada solto em queda livre para atingir a placa apoiada sobre a superfície. A placa transmite uma força de impulso à estrutura, a qual é variável em função do peso e/ou da altura de queda.

Os equipamentos incluem o *Falling Weight Deflectometer*, ou defletômetros de impactos. No Brasil, os mais conhecidos são o Dynatest FWD e o KUAB FWD.

Segundo DNIT (2006a) o registro da deflexão do pavimento é feito por um conjunto de sensores dispostos ao longo do centro da placa. Esse equipamento é instalado em um reboque e controlado automaticamente por um microcomputador presente em um veículo de suporte. A Figura 10 ilustra um defletômetro de impacto.

Figura 10: Defletômetro de impacto (DNIT, 2006a)



Conforme consta em Bernucci et al. (2022), os equipamentos empregados na avaliação estrutural não destrutiva medem os seguintes parâmetros:

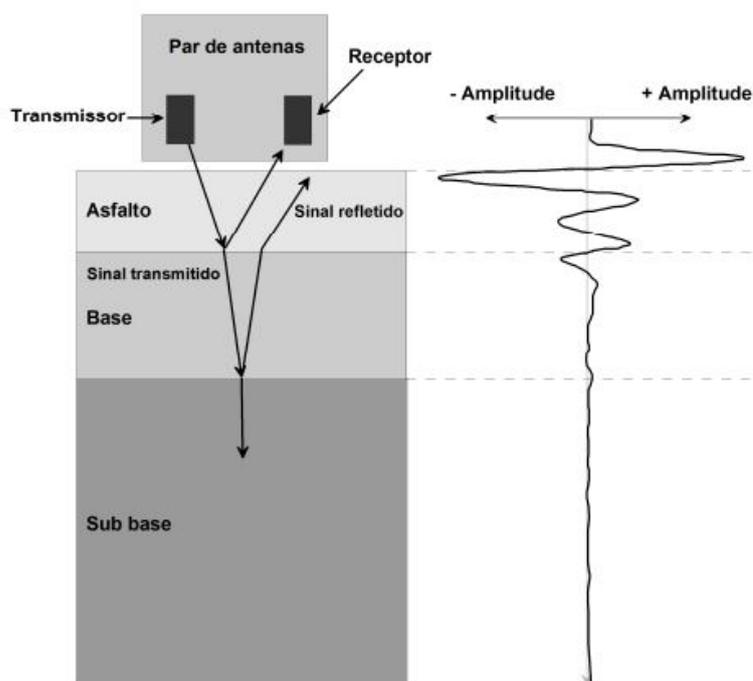
- deflexão máxima: deslocamento sob o centro da carga (FWD) ou sob o centro das rodas duplas de um eixo simples (viga *Benkelman*), sendo a deflexão normalmente expressa em  $10^{-2}$  mm ( $d_0$ );
- raio de curvatura: círculo ou arco de parábola que passa por dois pontos da bacia de deformação (viga *Benkelman*), normalmente sob a carga e a 25 cm do centro da mesma ( $d_0$  e  $d_{25}$ );
- deformada, bacia de deformação ou bacia deflectométrica: medidas dos deslocamentos elásticos ou recuperáveis em vários pon-

tos a partir do centro do carregamento ( $d_0$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{50}$  etc.) (BERNUCCI et al., 2022).

Uma técnica utilizada na avaliação estrutural de pavimento é o *Ground Penetration Radar* (GPR). O ensaio com radar GPR (Ground Penetrating Radar) é uma técnica não destrutiva que permite investigar a subsuperfície por meio da transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas pelo material analisado (GALLI; VIEIRA; ALENCAR, 2017).

Segundo Galli, Vieira e Alencar (2017), a velocidade dessas ondas muda dependendo das características dielétricas do material, o que permite identificar discontinuidades, como a transição entre a camada de material asfáltico e o material granular, assim como entre o material granular e o subleito, em pavimentos flexíveis. A Figura 11 ilustra o funcionamento do ensaio com o GPR.

Figura 11: Ensaio com *Ground Penetrating Radar* (GALLI; VIEIRA; ALENCAR, 2017)

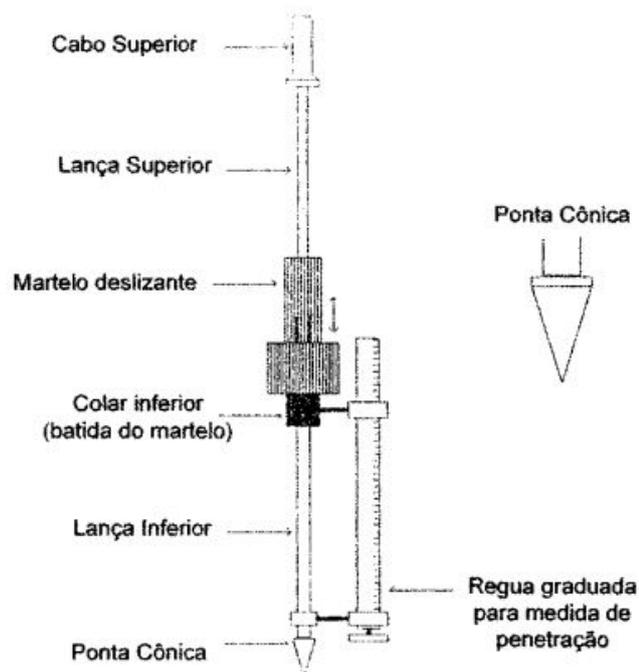


**Avaliação estrutural semidestrutiva** A avaliação estrutural semidestrutiva consiste no emprego de aberturas reduzidas de poços de sondagem, conhecidas como “janelas no pavimento”, que possibilitam o uso de um instrumento portátil de pequeno porte para avaliar a capacidade de carga de um pavimento, como é o caso do emprego de cones dinâmicos de penetração (DCP).

O DCP é composto por duas hastes metálicas conectadas através de um batedor. A haste inferior possui uma ponta cônica, a qual é introduzida no solo por meio de impactos dinâmicos no colar inferior, resultantes da queda livre de um peso de uma altura específica (golpes do martelo). O

diâmetro do cone é maior que o da haste para garantir que a resistência à penetração seja exercida pelo cone durante o impacto. A resistência do material é medida pela profundidade de penetração (geralmente em milímetros ou polegadas) por golpe do martelo. A Figura 12 ilustra o cone de penetração dinâmica.

Figura 12: Esquema do cone de penetração dinâmica (JUNIOR, 2005)



Uma aplicação útil é a detecção de mudança de material através da análise da inclinação das curvas DCP (milímetros por golpe) em função da profundidade (metros).

Kleyn (1975), Röhm (1984), Livneh (1989) e Trichês e Cardoso (1999) citados por Bernucci et al. (2022), explicam que o ensaio com DCP, geralmente, possibilita uma correlação com o Índice de Suporte Califórnia (ISC) dos materiais, com um nível de precisão adequado.

O Índice de Suporte Califórnia, do inglês *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), estabelece a relação, expressa em porcentagem, entre a pressão necessária para gerar a penetração de um pistão no corpo de prova de solo ou material granular e a mesma penetração em um material padronizado de referência (a brita estabilizada granulometricamente) para um teor de umidade ótimo e massa específica aparente máxima do material. A realização do ensaio compreende medidas de pressão para 2,54 mm (0,1") e 5,08 mm (0,2") de penetração do pistão. O ensaio ISC é conduzido de acordo com as normas ASTM D1883, NBR 9895 ou DNER-ME 049.

Junior (2005) apresenta o modelo matemático adotado por diversos autores para relacionar o CBR ao índice de penetração do DCP (DN), em mm/golpe, apresentado na Equação 4.

$$\log(CBR) = a + b \cdot \log(DN) \quad (4)$$

:

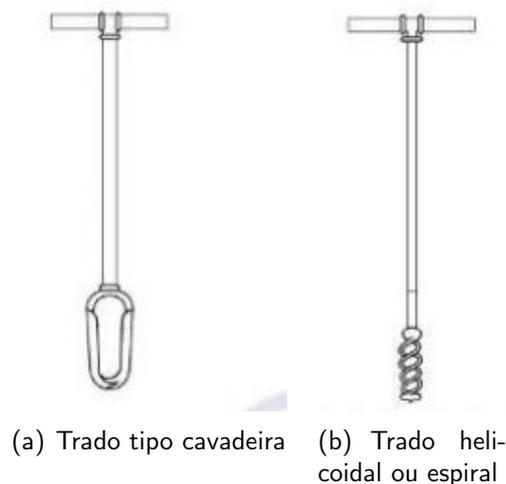
$DN$  = índice de penetração do DCP em mm/golpe);

$a$  e  $b$  = constante que mudam conforme o autor da pesquisa.

**Avaliação estrutural destrutiva** A avaliação estrutural destrutiva compreende a análise da integridade estrutural de cada camada do pavimento, através da abertura de trincheiras ou a realização de poços de sondagem para coletar amostras de cada material até o subleito, possibilitando a realização de testes de capacidade de carga *in situ*. Devido à sua natureza destrutiva, esse método só pode ser aplicado em pontos específicos selecionados para representar cada segmento a ser avaliado.

Um dos tipos de sondagem utilizada para coleta de amostras de solo é a sondagem a trado, orientada pela norma ABNT NBR 9603/2015 - Sondagem a trado - Procedimento. Conforme consta em ABNT (2023), a sondagem inicia com o trado tipo cavadeira e, se o avanço for difícil, devido à presença de rochas ou matacões, deve ser utilizado o trado helicoidal. O material retirado do furo é depositado sobre uma lona e protegido de intempéries, para evitar sua contaminação com o solo artificial do terreno ou grande perda de umidade. A Figura 13 apresenta os tipos de trado.

Figura 13: Tipos de trado (ABNT, 2023)



## 2.3 Tratamento de dados de deflexão de ensaios não destrutivos

A *Advisory Circular* 150/5370 - 11B (FAA, 2011) apresenta as diretrizes para equipamentos utilizados em ensaios não destrutivos assim como sugere procedimentos de coleta de dados e métodos de análise dos dados de deflexão. Os engenheiros podem avaliar os dados do NDT usando procedimentos qualitativos e quantitativos. Entre os métodos que podem ser usados para calcular e avaliar características do pavimento são citados:

- módulo de rigidez de impulso, do inglês, *Impulse Stiffness Modulus* (ISM), definido a partir de dispositivos de NDT de impulso;
- módulo de rigidez dinâmica, do inglês *Dynamic Stiffness Modulus* (DSM), definido a partir de dispositivos de NDT vibratórios;
- deflexões normalizadas;
- retroanálise do módulo de elasticidade das camadas do pavimento e do subleito;
- correlações com Índice de Suporte Califórnia;
- eficiência de transferência de carga de trincas e juntas;
- detecção de vazios em juntas de *Portland Cement Concrete* (PCC).

Segundo FAA (2011), para dispositivos ISM e DSM, a rigidez é definida como a carga dividida pela deflexão máxima sob a placa de carga.

$$I(D)SM = \frac{L}{d_0} \quad (5)$$

onde:

$I(D)SM$  = Módulo de rigidez dinâmica ou de impulso (polegadas);

$L$  = carga aplicada (em kips);

$d_0$  = deflexão máxima da placa de carga (em polegadas).

Além da normalização de deflexões e do ISM, outro método conhecido para tratamento de dados de deflexão é o Método de Diferenças Acumuladas, muito difundido no meio rodoviário. A apresentação dos métodos no presente trabalho busca avaliar as vantagens e desvantagens do uso de ambos e, para o Método das Diferenças Acumuladas, investigar sua aplicação em pavimentos de aeródromos.

### 2.3.1 Linha de ensaio crítica

Nas referências bibliográficas consultadas, não foram encontradas informações sobre o procedimento para escolha da linha de ensaio crítica ou, de como escolher a linha de ensaio a partir da qual os dados de deflexões coletados são utilizados.

### 2.3.2 Método da *Advisory Circular 150/5370 - 11B*

FAA (2011) descreve o processo de normalização de deflexões. A partir dos dados brutos de deflexões, estas são ajustadas à uma carga padrão.

A deflexão normalizada é dada pela Equação 6.

$$D_{0n} = \frac{L_{norm}}{L_{applied}} \cdot d_0 \quad (6)$$

onde:

$D_{0n}$  = deflexão normalizada;

$L_{norm}$  = carga normalizada;

$L_{applied}$  = carga aplicada no ensaio não destrutivo;

$d_0$  = deflexão registrada no ensaio não destrutivo.

Lima (2014) normaliza as deflexões para uma força de 150 kN, em sua avaliação do PCN em pavimentos aeroportuários, utilizando o Aeródromo de Bragança como área de estudo.

ATECEL (2016), em seu diagnóstico do pavimento do Aeroporto Internacional Governador Aluizio Alves, utiliza a normalização de deflexões. As deflexões medidas em campo foram ajustadas conforme as diretrizes de FAA (2011) e ajustadas para os dois níveis de cargas testados, 41 kN e 120 kN.

Martins (2017), em seu estudo estrutural de uma pista de aeródromo público, utiliza a normalização das deflexões. Para o autor, a avaliação estrutural através do FWD consiste na obtenção das deflexões nos diversos pontos da superfície do pavimento e sua normalização.

Lira (2023), em sua pesquisa da influência da intensidade carga na resposta estrutural de pavimentos aeroportuários avaliados por métodos não destrutivos, utiliza a normalização de deflexões prevista em FAA (2011), com o objetivo de tornar as deflexões comparáveis e possibilitar a avaliação da resposta estrutural do pavimento evidenciada a partir dos resultados da análise de dados brutos deflexões, de deflexão normalizada, de raio de curvatura, de ISM e de módulos resilientes recalculados.

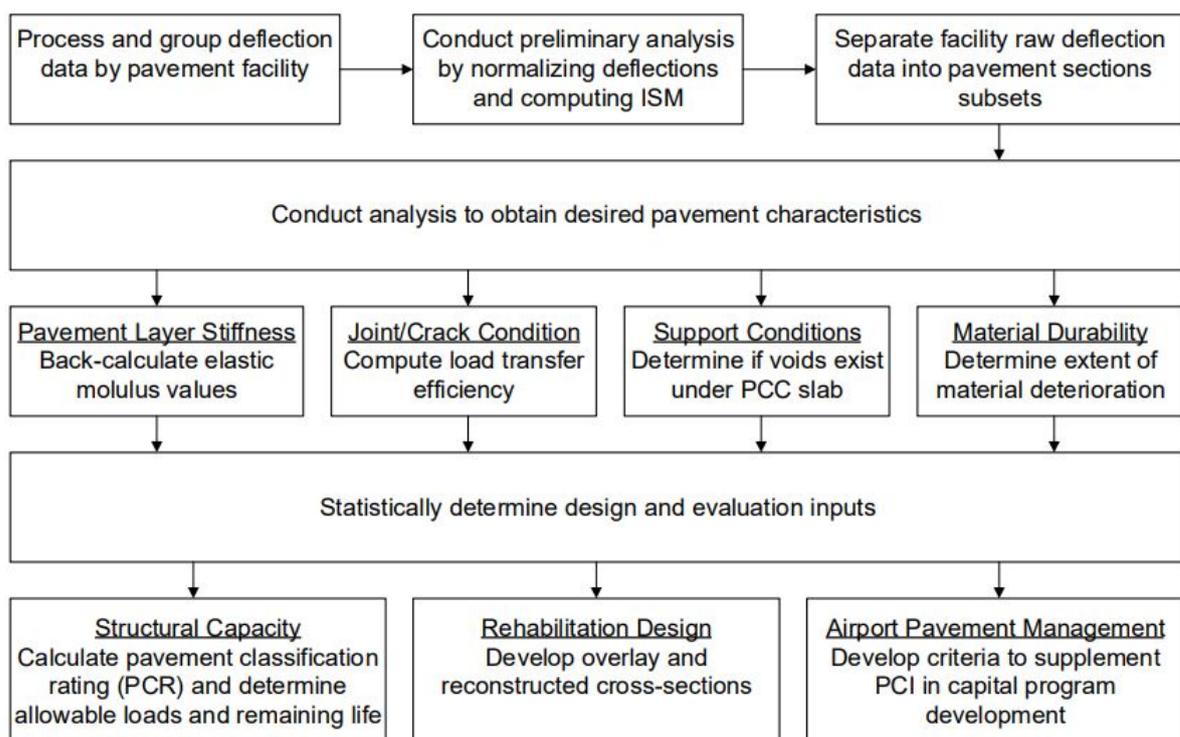
Portanto, FAA (2011), Lima (2014), ATECEL (2016), Martins (2017) e Lira (2023) concordam que a normalização é necessária para o tratamento dos valores das deflexões brutas obtidas no ensaio não destrutivo em pistas de aeródromos em valores relativos à uma carga normalizada ou, de

referência. Tanto as deflexões normalizadas quanto os valores de ISM são utilizados para identificar os segmentos homogêneos.

FAA (2021), em seu Apêndice C, oferece uma visão geral do processo de uso de dados de deflexão para avaliar a condição estrutural de um pavimento existente. O processo inclui, inicialmente, o processamento e o agrupamento de dados de deflexão por pavimento, a condução de análises preliminares a partir da normalização de deflexões ou do ISM e a divisão dos dados brutos de deflexão em seções de pavimento (subconjuntos ou, segmentos homogêneos).

Após a análise para obter as características desejadas do pavimento, é possível utilizar a re-análise para determinar o valor do módulo de elasticidade de cada camada do pavimento e estatisticamente, determinar *inputs* de design e avaliação. A Figura 14 apresenta o fluxograma de uso dos dados de deflexão.

Figura 14: Fluxograma de uso dos dados de deflexão (FAA, 2011)



**Escolha da carga normalizada** FAA (2011) afirma que durante a análise dos dados de deflexão, os engenheiros geralmente presumem que todas as camadas da estrutura respondem em um modo elástico linear. Significa, por exemplo, que um aumento de 10% na magnitude da carga dinâmica do dispositivo NDT levará a um aumento de 10% na resposta ao aumento da carga dinâmica. Essa resposta é a deflexão.

FAA (2021) descreve que para a maioria das estruturas de pavimento e condições de teste, os engenheiros presumem que os materiais tradicionais de pavimentação se comportarão de maneira elástica linear dentro da faixa de carga do teste. Para pavimentos que atendem a aeronaves comerciais, a faixa de carga de impulso se situa entre 90 kN e 250 kN. A amplitude da carga de impulso não é decisiva, desde que as deflexões do pavimento estejam dentro dos limites operacionais de cada sensor de deflexão.

Portanto, a utilização de mais de uma carga no ensaio com o equipamento FWD, com a finalidade de comprovar a linearidade entre as cargas é válida.

Para FAA (2021), os principais fatores que determinam a faixa permitida de cargas de impulso são as espessuras da camada, rigidez da camada e tipos de material da camada.

FAA (2011) apresenta as normas ASTM D 4694 *Standard Test Method for Deflections with A Falling-Weight Type Impulse Load Device* e ASTM D4685 *Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements*, as quais padronizam os vários componentes do equipamento de medição de deflexão para que a diferença do equipamento ou do teste possa ser minimizada.

ASTM (2003) e ASTM (2020) não informam diretamente quais são os critérios para definir a carga a ser usada no ensaio com o equipamento FWD.

SHRP (1993), em seu capítulo sobre o procedimento de calibração do equipamento, descreve que o FWD deve estar em temperatura ambiente e caso tenha ficado ao ar livre em temperaturas baixas ou elevadas, deve ser dado tempo suficiente para que ele se equilibre à temperatura ambiente. O procedimento de calibração também inclui definir a massa do FWD e as alturas de queda para produzir cargas dentro de 10% de 27, 40, 53 e 71 kN. No caso do Dynatest FWD, é possível estar dentro dessa tolerância para a carga mais alta e, ainda assim, ter a altura de queda definida muito alta.

FAA (2011) afirma que a magnitude da carga de impulso pode variar em função da mudança da massa e/ou da altura de queda, de modo que seja semelhante ao carregamento da roda no trem de pouso principal da aeronave.

Em relação às normas brasileiras, a norma DNER 273-96 - Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)" (DNER, 1996) apresenta o processo de ajustagem e calibração de aparelhagem. Essa norma afirma que deve ser verificado se a carga aplicada ao pavimento, medida pela cédula de carga, está de acordo com aquela especificada pelo projeto.

Caso contrário, a altura dos parafusos, que determinam a altura de queda, e a carga aplicada, deve ser alterada até se obter a carga desejada. Normalmente, é aplicada uma carga de 40kN (DNER, 1996).

Por sua vez, a norma DNIT 132/2010 - PRO: Pavimentos – Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)" -

Procedimento (DNIT, 2010a) concorda com SHRP (1993), descrevendo que o peso e as alturas de quedas do deflectômetro do tipo FWD devem ser ajustados para produzir cargas dentro de  $\pm 10\%$  de 27, 40, 53 e 71 kN. Além disso, um mínimo de três níveis de carga e um máximo de quatro são exigidos, sendo que a carga máxima a ser utilizada não deve ultrapassar 80 kN  $\pm 10\%$ , ou seja, carga máxima de 72 a 88 kN.

Entretanto, ANAC (2021c) alerta que, em função da inexistência de norma específica da ANAC sobre o tema, o emprego, muitas vezes por desconhecimento, da carga rodoviária padrão preconizada em DNER (1996), isto é, 80 kN (40 kN por roda), é inadequada, em razão de ser inferior às cargas por rodas aplicadas à estrutura por aeronaves da aviação regular.

Segundo essa referência, o B737-800 (B738) é responsável por aplicar uma carga ao pavimento da ordem de 180 kN por roda, enquanto o B763 aplica uma carga de cerca de 190 kN. Já o A380-800 é responsável por uma carga de cerca de 250 kN por roda.

A pressão da roda sobre o pavimento é mais importante, uma vez que essa consiste, fisicamente, na relação força/área. Dito isso, a forma de se avaliar a compatibilidade das cargas utilizadas nos equipamentos com as aeronaves do mix operacional é em termos de pressão (ANAC, 2021c).

Uma vez que a pressão aplicada ao solo depende do diâmetro do prato utilizado, faz-se necessário avaliar a pressão máxima de cada equipamento e, com essa informação, comparar com a pressão exercida pelo mix de aeronaves operante (ANAC, 2021b).

Segundo ANAC (2021b), os equipamentos FWD e HWD podem ser ambos utilizados na avaliação de pavimentos de pistas de pouso e decolagem que recebam aeronaves de médio/grande porte. Embora existam chances de o FWD não ser compatível com muitas aeronaves de médio/grande porte devido à limitação de sua carga máxima de ensaio, cerca de 120 kN, a visão do órgão regulador do setor é que o FWD pode ser utilizado em boa parte dos aeroportos da aviação regular, desde que aplicada a carga adequada.

ANAC (2021b) apresenta os cuidados que devem ser tomados em relação ao equipamento utilizado e a compatibilidade das cargas com as aeronaves operantes no aeroporto, expostos na Tabela 5

ANAC (2021c) informa a maneira correta do emprego da Tabela 5: para o aeroporto que opere o A380-800 como aeronave mais exigente, cuja pressão dos pneus é 1503 kPa, é necessário que o equipamento produza uma pressão igual ou superior a 1503 kPa. Para utilizar o FWD, a pressão compatível é 1698 kPa. Para produzir essa pressão, é necessário utilizar a carga de 120 kN.

Caso um levantamento deflectométrico seja realizado com as cargas de 40 e 80 kN, é possível normalizar as deflexões para outras cargas, mais adequadas às cargas das aeronaves.

O procedimento de normalizar as deflexões para uma carga que não foi empregada no levantamento deflectométrico é utilizado em Lima (2014) e Martins (2017). Outra forma de normalizar as deflexões é a partir da própria carga especificada para o ensaio.

Tabela 5: Pressão no solo em função do equipamento e da carga utilizados (ANAC, 2021c)

#	Aeronave	Pressão dos pneus (kPa)	LWD - Pressão exercida (kPa)	FWD - Pressão exercida (kPa)	HWD - Pressão exercida (kPa)	Carga utilizada (kN)
1	Cessna Citation II	896	849	212	94	15
2	B727-200	1020		566	252	40
3	EMB-195 STD	1062		1132	503	80
4	A320neo	1220		1698	754	120
5	A321-100	1358			1006	160
6	Learjet 45	1386			1258	200
7	737-800	1407			1509	240
8	777-300ER	1503			1761	280
9	A380-800	1503			1761	280
10	A350-900	1662			2012	320

ATECEL (2016) descreve que as deflexões medidas em campo foram ajustadas de acordo com as diretrizes de FAA (2011), com o objetivo de eliminar o efeito da diferença no carregamento. Foi observado que, nos levantamentos realizados, mesmo com a configuração do carregamento mantida constante, a carga efetivamente aplicada tendia a aumentar com a diminuição da temperatura da superfície do revestimento. Ou seja, mesmo com a configuração do equipamento para aplicação da carga de 41 kN, a carga realmente aplicada no pavimento difere desse valor, dependendo das condições de temperatura do pavimento. Isso se deve ao aumento da rigidez da camada asfáltica à medida que a temperatura diminui. Portanto, nessa referência, todas as deflexões foram normalizadas para os dois níveis de cargas ensaiados, 41 kN e 120 kN.

Finalmente, FAA (2021) descreve que as deflexões podem ser normalizadas ao ajustar as deflexões medidas à uma carga padrão da aeronave ou à aeronave crítica da frota. Por exemplo, caso seja necessário normalizar as deflexões para uma carga de roda de aeronave de 180 kN, dado que as deflexões em campo foram registradas com cargas de 140 kN, 160 kN e/ou 190 kN, cada deflexão registrada nesses níveis de carga teria de ser ajustada de forma a obter três deflexões normalizadas para uma carga de 180 kN.

VINCI (2021c) e VINCI (2021f) definem a aeronave crítica a partir do *software* FAARFIELD. Os parâmetros da seção e do mix foram imputados no *software* FAARFIELD, de modo a encontrar a aeronave que apresentasse o maior valor de dano acumulado.

### 2.3.3 Método das Diferenças Acumuladas da AASHTO

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), em seu Guia para Dimensionamento de Estruturas de Pavimento (AASHTO, 1993), instituiu um método para delimitação dos segmentos homogêneos a partir de levantamentos deflectométricos, denominado Método das Diferenças Acumuladas.

Nesse método, é calculado o valor médio da deflexão para duas deflexões consecutivas. Em seguida, é determinada a diferença entre cada valor individual da amostra e o valor médio. Por fim, as diferenças acumuladas são estabelecidas e formam o gráfico de deflexões acumuladas. No eixo das abscissas estão as distâncias e no eixo das ordenadas, os valores acumulados das diferenças. A deflexão média é dada pela Equação 7.

$$\overline{D}_i = \frac{D_i + D_{i-1}}{2} \quad (7)$$

onde:

$\overline{D}_i$  = deflexão média;

$D_i$  = deflexão no ponto;

$D_{i-1}$  = deflexão imediatamente anterior ao ponto.

Em seguida, a área entre estações é determinada pela Equação 8.

$$A_i = D_{i_{med}} \cdot \Delta l_i \quad (8)$$

onde:

$A_i$  = área entre estações;

$D_{i_{med}}$  = deflexão média no ponto;

$\Delta l_i$  = distância entre estações.

Para determinação da diferença acumulada em cada ponto, é necessário o cálculo da área acumulada e da distância acumulada. A área acumulada é dada pela Equação 9.

$$A_c = \sum_{i=1}^n A_i \quad (9)$$

onde:

$A_c$  = área acumulada;  $A_i$  = área entre estações e curva.

A distância acumulada é dada pela Equação 10.

$$L_c = \sum_{i=1}^n \Delta l_i \quad (10)$$

onde:

$L_c$  = distância acumulada;

Finalmente, a diferença acumulada é dada pela Equação 11.

$$Z_i = A_c - tg\alpha \cdot L_c \quad (11)$$

Sendo:

$$tg\alpha = \frac{A_c}{L_c} \quad (12)$$

onde:

$Z_i$  = diferença acumulada;

$tg\alpha$  = tangente do coeficiente angular da curva plotada.

O Anexo A apresenta um exemplo de aplicação do Método das Diferenças Acumuladas para determinação de segmentos homogêneos.

Os relatórios técnicos INFRAERO (2016a) e INFRAERO (2018a) utilizam o Método das Diferenças Acumuladas no tratamento dos dados de deflexão.

### 2.3.4 Resumo dos métodos

A Tabela 6 apresenta o método de tratamento de dados de ensaios não destrutivos utilizados por referência bibliográfica.

Tabela 6: Resumo dos métodos utilizados por referência bibliográfica

Método	Referência bibliográfica	Delimitação do pavimento em segmentos homogêneos?
<i>Advisory Circular</i> 150/5370 - 11B	Lima (2014), ATECEL (2016), Martins (2017) e Lira (2023)	Sim
Diferenças Acumuladas (AASHTO)	INFRAERO (2016a) e INFRAERO (2018a)	Sim
Híbrido (AASHTO (1993) e FAA (2011))	VINCI (2021a) e VINCI (2021d)	Sim

O uso difundido da delimitação dos pavimentos em segmentos homogêneos é evidenciado pela sua recorrência nas 10 fontes consultadas apresentadas na Tabela 6. Todas as referências analisadas

empregaram segmentos homogêneos em suas análises. Isso ressalta a relevância do processo de segmentação como uma ferramenta importante no estudo e na avaliação de pavimentos de aeródromos.

## 2.4 Segmentos homogêneos

Esta seção trata da determinação dos segmentos homogêneos, assim como a deflexão para cada segmento homogêneo determinado.

### 2.4.1 Determinação dos segmentos homogêneos

Oliveira (2016) propôs um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários, em nível de rede de pavimentos, através de um procedimento de avaliação técnico-econômica, com base em parâmetros estruturais, funcionais e de aderência, visando o apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação.

Nesse contexto, o autor afirma que a segmentação da pista de pouso e decolagem em seções homogêneas, facilita a análise a tomada de decisão, tanto em nível de rede, como em nível de projeto.

Bernucci et al. (2022) também descrevem que para realizar a análise de alternativas de restauração, em geral, são definidos segmentos homogêneos.

Segundo DNIT (2006a), no processo de segmentação, a extensão máxima de um segmento homogêneo é de 5,0 quilômetros e a mínima, 200 metros.

Balbo (2007) afirma que o princípio básico da divisão em segmentos homogêneos é o tratamento isolado de cada tipo de dado obtido em campo e define segmento homogêneo como:

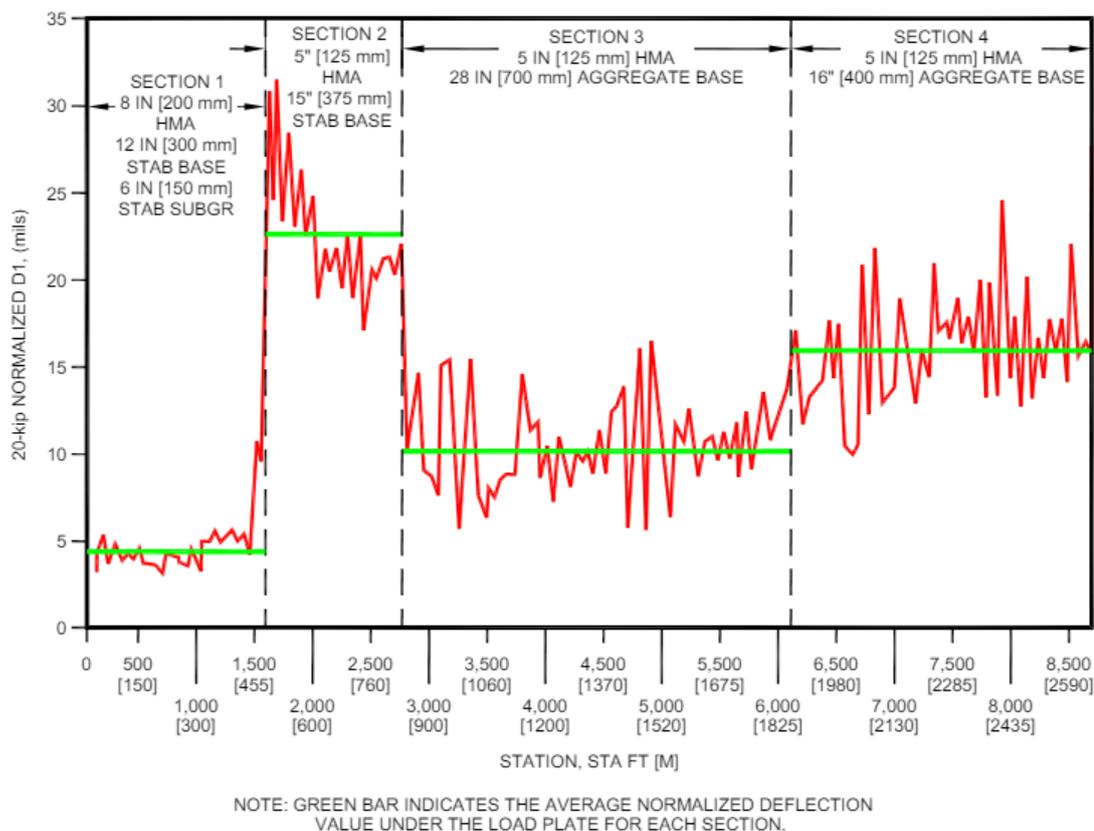
(...) um trecho de pavimento que apresenta, dentro de seus limites, similaridade em termos funcionais, estruturais e de tráfego (BALBO, 2007).

Os segmentos homogêneos são compreendidos, portanto, como sendo trechos do pavimento que apresentam características semelhantes, a depender da análise desejada.

Ao analisar os gráficos de perfil de deflexões normalizadas ou valores de ISM, o engenheiro deve procurar padrões de variabilidade. Para uma determinada carga de impulso (por exemplo, 180 kN), o aumento dos valores de ISM ou deflexões normalizadas decrescentes indicam aumento da resistência do pavimento (traduzido de FAA (2011)).

A Figura 15 apresenta o gráfico de deflexões normalizadas usado para identificar padrões de variabilidade.

Figura 15: Gráfico de deflexões normalizadas (FAA, 2011)



A Figura 16 apresenta segmentos homogêneos definidos pelo Método das Diferenças Acumuladas. Outra abordagem para a determinação dos segmentos homogêneos é pela aplicação do tratamento estatístico nas deflexões normalizadas.

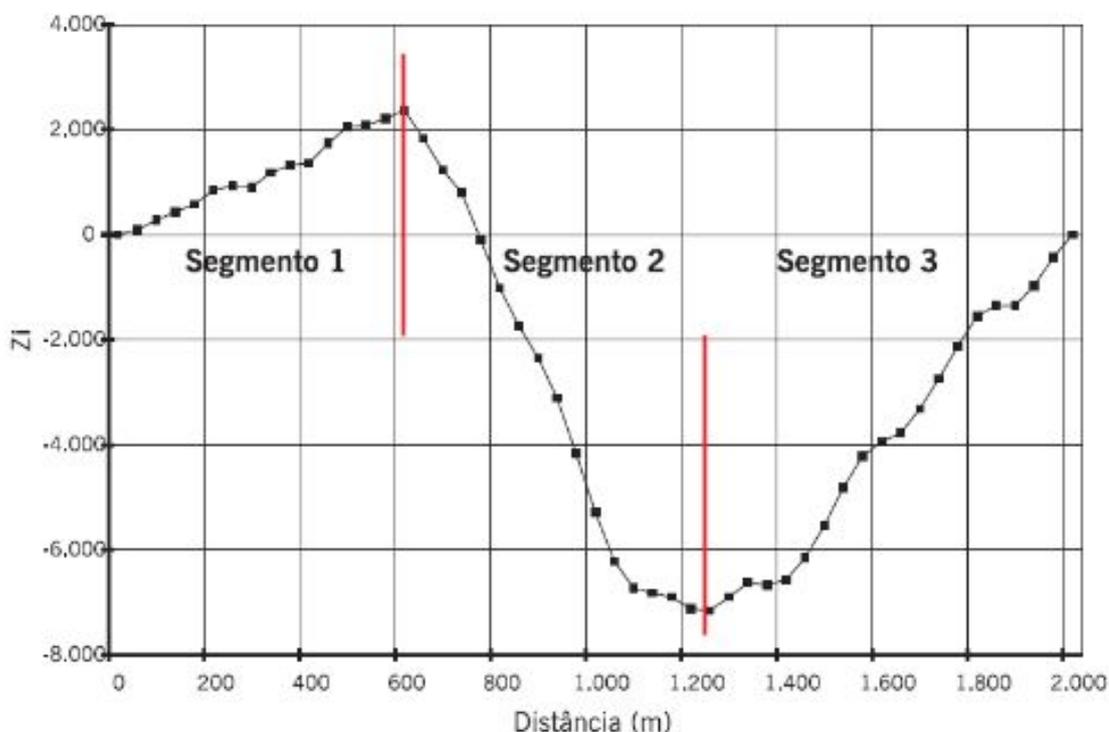
Conforme consta em Lima (2014), em sua metodologia de cálculo do *Pavement Capacity Number* (PCN) dos pavimentos flexíveis de aeródromos públicos baseados no método empírico da FAA, após a normalização dos dados de deflexão, é realizada a determinação dos segmentos homogêneos com base na análise visual do gráfico das deflexões normalizadas, utilizando o Método das Diferenças Acumuladas proposto pela AASHTO.

Independente do método utilizado no tratamento de deflexões, os segmentos homogêneos são definidos a partir da mudança de inclinação da curva gerada pela diferenças acumuladas distribuídas na extensão da pista. Cada segmento homogêneo apresenta, por definição, extensão superior a 200 metros.

#### 2.4.2 Determinação da deflexão do segmento

Após a delimitação dos segmentos homogêneos, é necessária a determinação da deflexão para cada segmento, a ser utilizada, posteriormente, na retroanálise, em conjunto com as espessuras

Figura 16: Exemplo de determinação de segmentos homogêneos pelo Método das Diferenças Acumuladas (BERNUCCI et al., 2022)



das camadas, coeficientes de Poisson e módulo de elasticidade inicial de cada material, para a determinação do módulo de elasticidade atual, abordado em 2.5.

Segundo o extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual DNIT, em sua norma DNER-PRO 011/79 - Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis, (DNER, 1979) para determinação do valor característico correspondente de deflexão, é adotado o seguinte procedimento:

1. tabulação dos valores individuais de deflexões encontradas ( $d_i$ );
2. cálculo da média aritmética,  $D_i$ , dos valores individuais (média da amostra);
3. cálculo do desvio-padrão da amostra;
4. determinação do intervalo de aceitação para os valores individuais  $d_m + z \cdot \sigma$  e  $d_m - z \cdot \sigma$ , sendo  $z$  determinado em função do tamanho da amostra, conforme Tabela 7;
5. exclusão dos valores individuais situados fora do intervalo anteriormente definido, seguindo para nova determinação de  $D_i$  e  $\sigma$ , fixação dos novos limites do intervalo de aceitação para a nova situação;

6. Repetição do procedimento, tantas vezes sucessivas quanto forem necessárias para enquadramento de todos os valores individuais remanescentes no intervalo de aceitação determinado.

São calculados os limites para aceitação de valores da amostra, ou seja,  $d_m + z$  e  $d_m - z$ . O cálculo de  $z$  depende do tamanho da amostra ( $n$ ), conforme descrito na Tabela 7. Os valores fora dos limites determinados são desconsiderados para, em seguida, recalculando os novos limites, até que não haja valores fora do intervalo  $d_m + z$  e  $d_m - z$ .

Tabela 7: Cálculo de Z em função do tamanho da amostra (DNER, 1979)

n	Z
3	1,0
4	1,5
5 - 6	2,0
7 - 19	2,5
$\geq 20$	3,0

A deflexão considerada na retroanálise é a deflexão média de todas as deflexões dentro do intervalo de aceitação. Esse procedimento é empregado em Soares e Motta (2000) e Claus (2022).

Soares e Motta (2000) compararam, em seu estudo das linhas de influência ou bacias deflectométricas do pátio de estacionamento das aeronaves de grande porte da Base Aérea de Fortaleza, as medidas de deflexões realizadas nos sentidos longitudinal e transversal do pátio, com o uso da viga *Benkelman*. O pátio foi dividido em 45 faixas, cada uma com largura de 3 metros e extensão de 200 metros. No sentido longitudinal do pátio, são calculados a média, do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV) de cada medida de deflexão das 331 bacias deflectométrica, sendo 16 medidas de deflexão por bacia, em razão da aplicação da carga com a viga *Benkelman* em pontos afastados. No estudo, foi determinada a média das deflexões máximas de cada uma das 45 faixas e comparado àquelas obtidas considerando o conjunto das 331 bacias. No sentido transversal do pátio, foram medidas 41 bacias deflectométricas e, de forma análoga ao sentido longitudinal, determinados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Em seguida, Soares e Motta (2000) aplicam um tratamento estatístico, o teste de hipótese entre duas variâncias, com o objetivo de testar a igual das médias de cada uma das medidas de deflexão, além do teste estatístico T para avaliar se as médias das deflexão são diferentes, concluindo que as medidas de deflexão das faixas longitudinal e transversal são equivalentes quando consideradas próximas à carga.

Claus (2022) descarta as deflexões que ultrapassam a média aritmética mais 3 vezes o desvio-padrão (limite superior dos dados) e, da mesma forma, descarta as deflexões inferior à média aritmética menos 3 vezes o desvio-padrão (limite inferior dos dados). Com esse processo, é obtida uma bacia de deformação média, utilizada na ferramenta retroanálise.

## 2.5 Retroanálise

Para Bernucci et al. (2022), o pavimento é considerado uma estrutura em várias camadas que trabalham de forma conjunta (ou solidária), permitindo compatibilizar os materiais em relação à rigidez. Ao aplicar os princípios da mecânica dos pavimentos, é possível realizar uma avaliação estrutural mais precisa das camadas e do subleito. É essencial entender a rigidez de todas as camadas e do subleito para calcular tensões, deformações e dimensionar o reforço do pavimento de forma adequada.

Muitos pavimentos foram projetados usando o método CBR, sem considerar as propriedades elásticas ou resilientes dos materiais ao longo do tempo e do uso. Embora a abertura de poços de sondagem seja uma opção para coletar amostras e determinar esses parâmetros em laboratório, é um processo demorado e perturbador para o tráfego e para o próprio pavimento. O GPR pode ser uma alternativa não invasiva para mapear as camadas do pavimento e reduzir a necessidade de poços de sondagem.

A retroanálise é justamente o método que permite estimar os módulos de elasticidade das camadas do pavimento e do subleito por meio da interpretação das deformações registradas na superfície do pavimento quando submetidos a ensaios não destrutivos.

### 2.5.1 Módulo de elasticidade

O termo “módulo” tem sido atualmente de forma pouco rigorosa no meio de pavimentação pois existem conceitos bastante distintos para ele (BERNUCCI et al., 2022). Existem os seguintes tipos de módulos:

- módulo de Young;
- módulo de cisalhamento;
- módulo de compressibilidade, hidrostático ou de elasticidade do volume;
- módulo complexo;
- módulo dinâmico;
- módulo de resiliência.

No contexto desse trabalho, são destacados os módulos de elasticidade, diferente do módulo de elasticidade do volume, e de resiliência.

Materiais com comportamento elástico linear são caracterizados pelo módulo de Young ou módulo de elasticidade. Entretanto, o ligante asfáltico apresenta um comportamento viscoelástico, o que torna a resposta do revestimento asfáltico diferente para carregamentos estáticos e dinâmicos.

Segundo Huang (1993 *apud* Bernucci et al, 2022), as misturas asfálticas (ligante asfáltico + agregados) são consideradas elásticas se a carga atuante for relativamente pequena em relação à resistência do material e o carregamento for repetido por ciclos longos.

Hveem (1955 *apud* Bernucci et al, 2022) descreve o termo “resiliência” como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. O nome “módulo de resiliência” foi criado para que não fosse confundido com o módulo de Young, determinado estaticamente. O termo “módulo de elasticidade”, no processo de retroanálise, é usado em Bernucci et al. (2022) (e ao longo desse trabalho) por se tratar de um parâmetro retrocalculado e não determinado em laboratório, através de ensaio específico, como é o caso do módulo de resiliência.

## 2.5.2 Processo de retroanálise

Através do conhecimento da carga externa aplicada para a qual foi obtida a bacia deflectométrica e de posse das características básicas dos tipos de materiais presentes em cada camada e suas espessuras, é possível estimar os módulos de elasticidade a partir das deflexões obtidas.

Balbo (2007) aborda a retroanálise, do inglês *back-calculation*, como o método utilizado para criar um modelo teórico que seja consistente com o comportamento estrutural do pavimento. Isso envolve verificar para quais parâmetros o modelo teórico pode representar com maior precisão as medições reais obtidas em campo, levando em conta o conhecimento das tensões e deformações da estrutura real. Ou seja, uma combinação específica de módulos das camadas para alinhar a bacia teórica calculada com a bacia observada no campo.

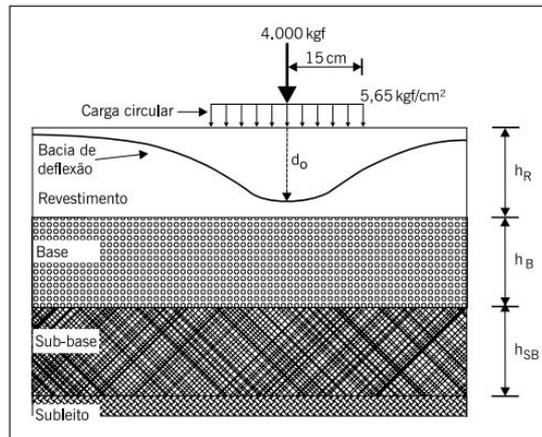
ANAC (2021b) resume o processo de retroanálise como o processo inverso ao dimensionamento do pavimento, isto é, a partir do conhecimento do material das camadas, espessuras e deflexões, é possível encontrar os módulos de elasticidade de cada camada.

Bernucci et al. (2022) definem que os dados de entrada necessários para utilizar a ferramenta de retroanálise são a configuração do carregamento, a bacia deflectométrica, a seção padrão do pavimento, os coeficientes de Poisson e os módulos de elasticidade de cada camada da seção do pavimento. A Figura 17 apresenta os dados necessários para a retroanálise.

Em relação aos segmentos homogêneos, normalmente a medida de deflexões é realizada em várias seções ou estacas intermediárias. Bernucci et al. (2022) questionam se a retroanálise deve ser realizada em todos os pontos levantados e em seguida, determinar a média dos módulos retroanalizados ou deve ser obtida uma bacia de deformações média e realizar somente uma retroanálise por segmento homogêneo. Essa referência conclui que:

A primeira hipótese sempre é a melhor, porém é muito trabalhosa e consome bastante tempo de análise. Mostra-se que é possível chegar

Figura 17: Esquema dos dados necessários para se fazer a retroanálise de um pavimento (NÓBREGA, 2003 *apud* Bernucci et al, 2022)



a resultados adequados definindo duas curvas correspondentes à curva média mais ou menos um desvio padrão, e assim fazer a retroanálise obtendo-se valores próximos da análise ponto a ponto (NÓBREGA, 2003 *apud* Bernucci et al, 2022).

O processo de retroanálise apresenta vantagens e desvantagens. ANAC (2021b) descreve que a retroanálise está sujeita ao modelo de falha empregado no *software* e apresenta restrições quanto ao número de camadas que podem ser consideradas. Quanto mais camadas forem incluídas, maior se torna a complexidade da análise. Isso se explica pelo fato de que o método de retroanálise não oferece uma solução única, o que torna necessário orientá-lo pelos resultados obtidos nos ensaios destrutivos realizados no pavimento.

O conjunto de módulos retroanalizados não é único, dependendo do programa utilizado para obtê-los, das hipóteses simplificadores, dos níveis de ajustes atingidos (BERNUCCI et al., 2022).

Outra desvantagem do processo de retroanálise é a sensibilidade do cálculo dos valores dos módulos de elasticidades em função dos valores das bacias deflectométricas, as quais apresentam uma imprecisão inerente aos levantamentos de campo. Logo, há a necessidade de balizar os programas de retroanálise por ensaios de laboratório ou faixas de valores de módulos consistentes.

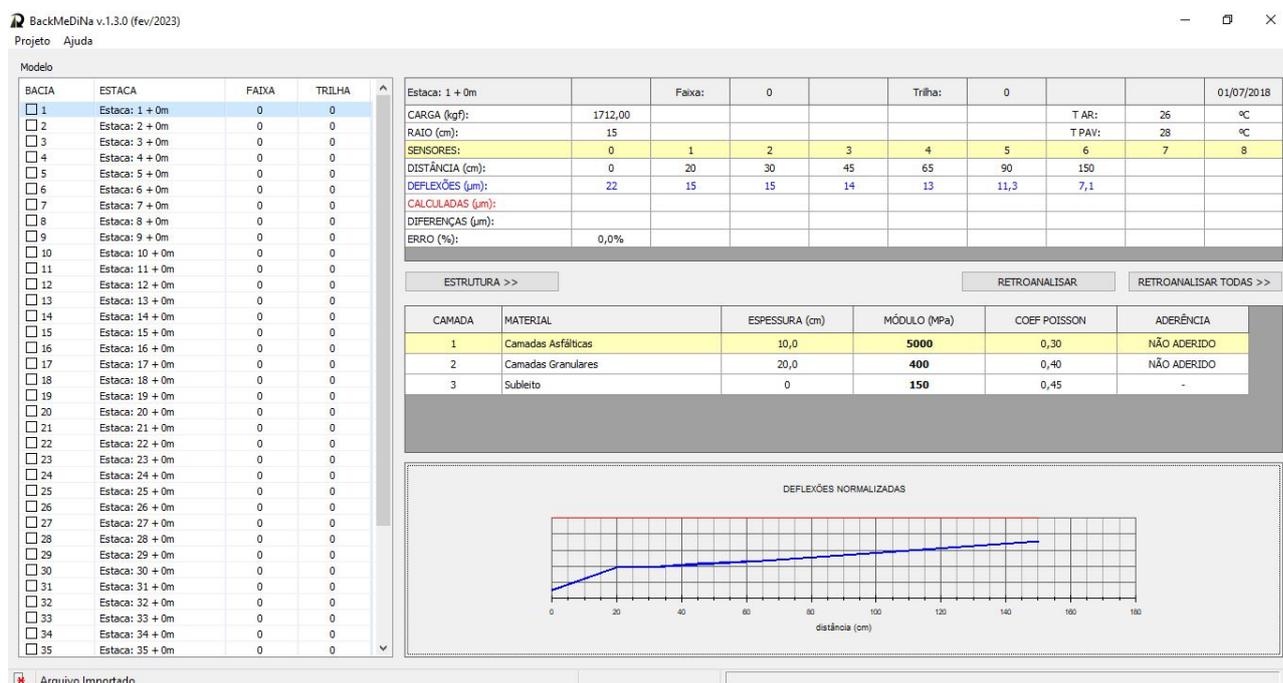
### 2.5.3 Softwares de retroanálise

Bernucci et al. (2022) citam como *softwares* de retroanálise o BAKFAA (vinculado à FAA), o BackSispav, o Evercalc e o Mnlayer. De forma a contornar a diversidade de programas de retroanálise e com o intuito de criar um novo método de projeto de reforço que substitua os tradicionais do antigo DNER, foi desenvolvido o novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do DNIT, o

MeDiNa. O pacote MeDiNa é composto por um programa de análise de tensões e deformações (AEMC), um programa de retroanálise (BackMeDiNa)<sup>2</sup> e um programa de dimensionamento em si (MeDiNa).

Franco (2020) descreve que o BackMeDiNa divide as informações em quatro quadros distintos: lista de bacias, dados da bacia selecionada, estrutura do pavimento e o gráfico do formato da bacia medida (em vermelho) com a retroanalizada (em azul). A Figura 18 apresenta a interface do programa.

Figura 18: Interface do *software* BackMeDiNa



O menu Projeto permite ao usuário a abertura e o salvamento de arquivos da extensão .bac, além do *download* do modelo de arquivo de bacias, a importação do arquivo de bacias na extensão .csv e a exportação dos resultados para o Excel. O usuário também deve configurar a unidade das grandezas físicas utilizadas no *software*, para garantir seu correto funcionamento. Em relação ao sistema de coordenadas, deve estar ajustado à posição dos sensores ou geofones do equipamento FWD, para possibilitar o cálculo coerente dos deslocamentos.

O arquivo de bacias a ser importado deve ser preenchido com o raio de carregamento aplicado pelo equipamento, a data do ensaio, a temperatura do pavimento no instante do ensaio, a carga aplicada no pavimento, a estaca localizando o ponto de ensaio, o complemento da estaca em metros, a faixa do pavimento, a trilha do pavimento e as deflexões. O usuário também pode inserir e excluir

<sup>2</sup>Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/solicitacao-de-download-do-medina>>

camadas a partir do menu “Estrutura”. Quanto à condição de aderência entre as camadas, “Não aderido” corresponde à situação em que não há cisalhamento na interface, enquanto na condição “Aderido”, há cisalhamento na interface.

Após a inserção das informações de “Estrutura” e os módulos de elasticidade iniciais, o usuário aciona o botão de comando “Retroanalisar”, para o cálculo do módulos de elasticidades das camadas para a bacia selecionada, em busca do menor erro quadrático médio (RMS).

Segundo Franco (2020), o RMS é determinado a partir das diferenças encontradas entre as deflexões calculadas e as deflexões medidas, expresso na Equação 13

$$RMS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_{calc} - d_{medido}}{d_{medido}} \right)^2 \quad (13)$$

onde:

$RMS$  = menor erro quadrático médio;

$d_{calc}$  = deflexão calculada;

$d_{medido}$  = deflexão medida em campo;

$N$  = número de deflexões.

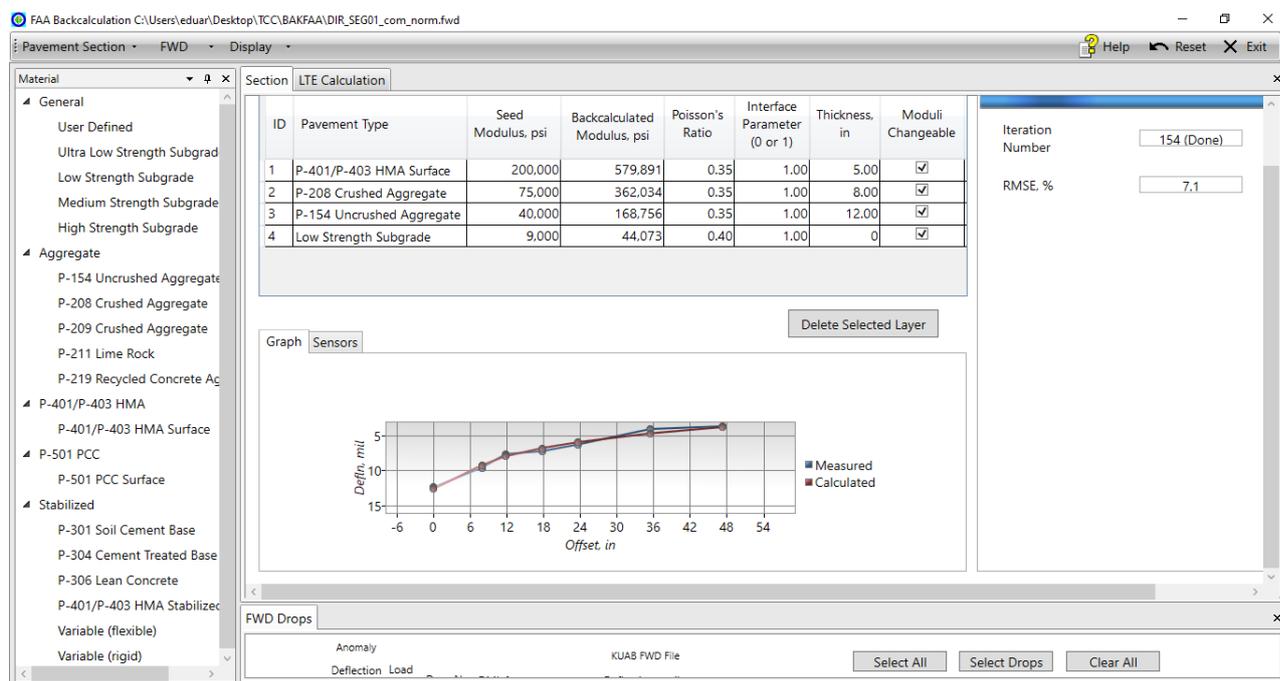
Se o erro for inferior a 5%, o *software* indica que a retroanálise foi realizada com uma correlação adequada entre o cálculo e o medido em campo. Erro entre 5% e 10% indica uma correlação razoável. Erro superior a 10% indica uma correlação inadequada.

Se as bacias foram obtidas a partir de um trecho homogêneo, o projetista, após avaliar a primeira bacia, pode se valer da opção “Aplicar nas demais camadas” que irá aplicar a primeira retroanálise em todas as demais bacias. Esse recurso pode facilitar as demais retroanálises (FRANCO, 2020).

Quanto ao *software* BAKFAA, os dados de entrada são muito semelhantes aos do *software* BackMeDiNa, com a inclusão das espessuras e dos materiais que compõem o pavimento, assim como os coeficientes de Poisson. Entretanto, o *software* BAKFAA, diferente do BackMeDiNa, não permite a inserção ou edição manual das deflexões, raio do prato de carregamento, carga utilizada no ensaio e a distância entre os sensores, sendo estes dados importados a partir de um arquivo com extensão .fwd.

Outra diferença entre os *software* é o número de iterações necessárias para a retroanálise, apresentado no BAKFAA e inexistente no BackMeDiNa. Além disso, o *software* BAKFAA também necessita da definição de uma profundidade de avaliação, que deve ser superior à espessura total do pavimento. A forma de apresentação das bacias deflectométricas é igual para ambos os *softwares*. A Figura 19 apresenta a tela do *software* BAKFAA após importação do arquivo com extensão .fwd e retroanálise.

Figura 19: Interface do software BAKFAA



## 2.5.4 Estimativa da vida útil estrutural

Brill (2014, *apud* Rodrigues et al, 2021) descreve que a vida útil do pavimento pode ser abordada em duas partes: vida estrutural e vida funcional. A vida estrutural se relaciona com a capacidade da estrutura de suportar as cargas das aeronaves, enquanto a vida funcional define as solicitações não estruturais que podem causar danos à superfície, afetando a segurança operacional da pista.

Conforme consta em FAA (2021), a vida útil do projeto no FAARFIELD refere-se à vida estrutural, o número total de ciclos de carga que uma estrutura de pavimento suportará antes de falhar estruturalmente. A vida funcional é o período de tempo em que o pavimento é capaz de fornecer um nível aceitável de serviço, conforme medido por indicadores de desempenho, resistência à derrapagem, resistência à derrapagem ou rugosidade. Os pavimentos podem ter uma vida funcional remanescente considerável, mesmo após terem falhado estruturalmente.

FAA (2021) discute que a falha estrutural em pavimentos rígidos ocorre quando os painéis de concreto apresentam extensas rachaduras estruturais. Por sua vez, a falha estrutural em pavimentos flexíveis ocorre quando o subleito não está mais protegido contra danos estruturais.

Dentro do módulo "*Life/Compaction*" no software FAARFIELD, é possível realizar a análise da vida útil estrutural do pavimento. Os dados de entrada são o Índice de Suporte Califórnia do subleito e o módulo de elasticidade das demais camadas, assim como a espessura das camadas acima do subleito, o mix de tráfego e o número de decolagens anuais de cada aeronave.

FAA (2021) explica que o valor do módulo de elasticidade (para pavimentos flexíveis) retroanalizado ou o valor da constante  $k$  (para pavimentos rígidos) pode ser inserido diretamente no *software* FAARFIELD. Se for usado um valor  $k$  retroanalizado, o *software* FAARFIELD converterá esse valor em um módulo de elasticidade usando a Equação 14.

$$E_{SG} = 20,15 \cdot k^{1,284} \quad (14)$$

onde:

$E_{SG}$  = módulo de elasticidade do subleito, em psi;

$k$  = módulo da fundação do pavimento rígido, em pci.

Após a entrada dessas informações, o *software* FAARFIELD retorna o CDF e a vida útil do pavimento.

## 2.6 Restauração de pavimentos

FAA (2021) descreve a reabilitação de pavimentos flexíveis como a substituição e remoção de uma ou de todas as camadas asfálticas, enquanto a reabilitação de pavimentos rígidos inclui a substituição de cerca de até 1/3 de placas de concreto ou camadas de revestimento asfáltico ou rígido, sobrepostas às placas de concreto.

Conforme consta em FAA (2021), a reconstrução é a substituição dos elementos estruturais principais do pavimento. Em pavimentos rígidos, as placas de concretos são o elemento estrutural principal. A reconstrução, nesse tipo de pavimento, é a substituição superior a 30% do total de placas de concreto. Já em pavimentos flexíveis, a reconstrução consiste na remoção ou substituição de qualquer camada abaixo do revestimento. A reabilitação é considerada, geralmente, uma solução técnica mais econômica que a reconstrução, sendo recomendada para pavimentos com PCI menor que 55 e empregada com a finalidade de corrigir as condições de superfície que interferem na performance da aeronave, como atrito, drenagem e rugosidade, problemas relacionados ao material ou reparo de danos estruturais localizados.

FAA (2021) explica que os materiais de base e sub-base existentes e em boas condições podem ser reutilizados no local.

Por sua vez, DNIT (2006a) ainda apresenta os termos “Conservação do Pavimento”, “Reconstrução do Pavimento”, “Recapeamento do Pavimento”, “Recuperação do Pavimento”, “Reabilitação do Pavimento” e “Restauração do Pavimento”. Segundo o documento, são definidos:

- Conservação do pavimento: conjunto de serviços destinados à preservação do pavimento nas condições em que ele foi origi-

nalmente construído ou no estado em que foi posteriormente restaurado.

- Reconstrução do pavimento: modalidade de intervenção, definida em um Projeto de Engenharia específico relativamente à Restauração do Pavimento e/ou à Reabilitação do Pavimento, que consiste na remoção parcial ou total da espessura do pavimento podendo eventualmente atingir o sub-leito, e na posterior execução adequada de novas camadas estruturais, cujas naturezas, constituições e especificações devem guardar consonância com os atributos correspondentes das áreas adjacentes do pavimento remanescente;
- Recapeamento do Pavimento: modalidade de intervenção, definida em Projeto de Engenharia específico relativamente à Restauração do Pavimento e/ou à Reabilitação do Pavimento, que consiste na adequada sobreposição ao pavimento existente de uma ou mais camada(s) constituída(s) de mistura betuminosa e/ou concreto de cimento Portland.
- Recuperação do Pavimento: processo a ser ordinariamente aplicado a um pavimento desgastado, com o objetivo de restabelecer as suas adequadas características técnicas. As intervenções físicas pertinentes compreenderão a Restauração e/ou a Reabilitação do Pavimento;
- Reabilitação do Pavimento: quando referido a um trecho, deve ser entendido como a Recuperação de um Pavimento que, como decorrência do alto grau de deterioração alcançado, perdeu a sua habilitação. Quando referido a um segmento homogêneo, deve guardar correspondência com as soluções que envolvem a Reconstrução do Pavimento.
- Restauração do Pavimento: quando referido a um segmento homogêneo, deve guardar correspondência com as soluções que envolvem o Recapeamento do Pavimento (DNIT, 2006a).

DNIT (2006a) descreve que os termos Remendo, Reparo e Reparação, com freqüência utilizados no meio técnico, não comportam definição específica e/ou precisa. Esses termos tratam uma diversidade de serviços de conservação de caráter corretivo/preventivo que podem contemplar, além do pavimento, os demais componentes da infraestrutura da via.

Além disso, essa referência explica que:

O termo “Recuperação do Pavimento” deve ser entendido como “Recuperação dos Atributos Funcionais e Estruturais do Pavimento”, não comportando qualquer conotação direta, em termos de serviços ou obras na Rodovia/Pavimento.

(...) processo Recuperação se materializa através da execução de intervenções físicas na Rodovia – intituladas de Restauração do Pavimento e/ou Reabilitação do Pavimento.

O termo “Restauração do Pavimento”, quando referido a um trecho, deve ser entendido como a Recuperação de um Pavimento que se apresenta deteriorado, mas cujo grau de deterioração não compromete a sua habilitação (a sua recuperação ocorrendo tempestivamente, dentro ou próximo do final do seu ciclo de vida) (DNIT, 2006a).

No âmbito do presente trabalho, diante das definições apresentadas por DNIT (2006a) e FAA (2021) e com o intuito de compatibilizá-las, **Restauração** define intervenção física proposta para **recuperar** o aspecto funcional e/ou estrutural do pavimento. Caso o pavimento apresente defeitos funcionais, a intervenção técnica é denominada **Recuperação**, caso apresente defeitos estruturais; é denominada **Recapeamento**, na situação em que seja necessária a sobreposição ao pavimento existente de mistura betuminosa e/ou concreto de cimento Portland; e denominada **Reconstrução**, na situação em que seja necessária a remoção parcial ou total da espessura do pavimento e na execução de novas camadas estruturais.

### 2.6.1 Técnicas de restauração

A proposição de técnicas de restauração adequadas depende da compreensão dos defeitos identificados a partir das avaliações funcional e estrutural.

Bernucci et al. (2022) explicam que na ausência de defeitos estruturais, sendo a restauração requerida para a correção de defeitos funcionais superficiais, são empregados, geralmente, os seguintes tipos de revestimentos, isolados ou combinados, antecedidos ou não por remoção de parte do revestimento antigo (fresagem) e regidos por normas de execução específicas:

- lama asfáltica para selagem de trincas e rejuvenescimento;
- tratamento superficial simples, para selagem de trincas e restauração da aderência superficial;
- microrrevestimento asfáltico, para selagem de trincas e restauração da aderência superficial na condição de existência de ação abrasiva acentuada do tráfego;
- concreto asfáltico, quando o principal defeito funcional é a irregularidade longitudinal acentuada;

- mistura do tipo camada porosa de atrito, *Stone Matrix Asphalt (SMA)* ou misturas descontínuas.

A mistura do tipo SMA para pavimentação é feita de agregado mineral graduado, material de enchimento, fibras de celulose e cimento asfáltico modificado por polímero. Recentemente, tem sido empregada em rodovias sob concessão, uma vez que as concessionárias procuram substitutos para o concreto asfáltico tradicional, visando aprimorar as propriedades do revestimento final do pavimento. Isso inclui melhorias na resistência, redução do ruído, aumento da aderência entre pneus e pavimento e aumento da segurança para os usuários. A Figura 20 ilustra o uso da mistura SMA no revestimento do pavimento<sup>3</sup>.

Figura 20: Emprego da mistura SMA em pavimentos asfálticos



Em relação à fresagem, segundo Bonfim (2016), se trata da técnica de desbaste ou corte de metais e outras peças, a partir de engrenagem motora em movimento giratório contínuo. A fresagem pode ser classificada em função da espessura de corte, como superficial, rasa (em torno de 5 cm) e profunda e quanto à rugosidade resultante na pista, em padrão, fina e microfresagem.

Conforme consta em Bonfim (2016), a fresagem rasa é empregada na correção de defeitos funcionais e em remedos superficiais. A fresagem padrão é utilizada quando o desbaste da camada especificada em projeto tem o intuito de aplicação de nova camada de revestimento.

DNIT (2021), entre as soluções de manutenção ao nível de recuperação do pavimento, é incluída a fresagem com recomposição de concreto asfáltico em locais de trincamento, instabilidade de massa, irregularidade longitudinal elevada ou trilha de roda.

Por sua vez, Bernucci et al. (2022) descreve que na existência de comprometimento estrutural ou perspectiva de aumento de tráfego, são empregadas soluções que restabeleçam a capacidade estrutural do pavimento através da introdução de novas camadas (recapeamento) ou tratamento de camadas existentes (reciclagem).

Os tipos de revestimentos geralmente utilizados como recapeamento são:

<sup>3</sup>Disponível em <<https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/pavimentacao-sma/>>, acesso em 15/03/2024

- concreto asfáltico;
- pré-misturado a quente + concreto asfáltico;
- concreto asfáltico + SMA;
- SMA e outras misturas asfálticas de granulometria descontínua;
- tratamento superficial duplo ou microrrevestimento asfáltico + concreto asfáltico (BERNUCCI et al., 2022).

Bernucci et al. (2022) descrevem que a reciclagem da base e revestimentos antigos com a sobreposição de uma camada de revestimento asfáltico é indicada para defeitos como trincamento de fadiga, trincamento de base e reflexão de trincas no revestimento, quando as placas de concreto de cimento Portland apresentam uma quantidade importante de trincas, em casos de deformação permanente em trilhas de roda, em buracos e quando há bombeamento de finos para a superfície.

O reforço estrutural, com recapeamento com mistura asfáltica usinada é indicado para defeitos como trincamento de fadiga, ondulação, buracos e bombeamento de finos para a superfície.

As especificações técnicas para o projeto de restauração são apresentadas conforme as intervenções técnicas empregadas para tratamento dos problemas funcionais e/ou estruturas.

Para pavimentos flexíveis que necessitem de reconstrução completa da estrutura do pavimento, a execução começa com a regularização do subleito, conforme a norma DNIT 137/2010-ES. A regularização molda o leito natural, utilizando equipamentos como motoniveladoras e rolos compactadores. Se necessário, segue-se a camada de reforço do subleito, descrita na norma DNIT 138/2010-ES. Depois, a sub-base é executada conforme a norma DNIT 139/2010-ES, utilizando equipamentos como pá-carregadeira e rolos compactadores. Para a base, a norma DNIT 141/2022-ES é utilizada, e a execução pode incluir materiais como brita graduada tratada com cimento.

Nas situações em que as intervenções sejam menos robustas, com o recapeamento ou recomposição do revestimento, a execução das camadas asfálticas segue com a imprimação asfáltica e a pintura de ligação, orientadas pelas normas DNIT 144/2014-ES e DNIT 145/2012-ES, respectivamente. A camada de revestimento pode ser de concreto asfáltico, seguindo a norma DNIT 031/2006-ES.

## 2.7 Método ACN-PCN

Em ANAC (2021d), o Método ACN-PCN, preconizado pela *International Civil Aviation Organisation* (ICAO) e em vigor desde 1981, é definido como o método empregado para comparar a resistência de pavimentos destinados a aeronaves de mais de 5.700 kg com as necessidades da aeronaves. O Número de Classificação de Pavimentos, do inglês *Pavement Classification Number* (PCN), expressa a capacidade de suporte de um pavimento para operações sem restrição, enquanto o Número de Classificação de Aeronaves, do inglês *Aircraft Classification Number* (ACN), expressa

o efeito individual de uma aeronave sobre diferentes pavimentos e varia em função do peso, tipo de trem de pouso e pressão dos pneus.

O propósito do método ACN-PCN não é desenvolver um procedimento para projeto de pavimento de aeródromos, mas informar sobre a resistência relativa de pavimentos, permitindo que o operador do aeródromo avalie se um determinado tipo de aeronave pode utilizar um pavimento.

Segundo ANAC (2020), a FAA disponibiliza dois *softwares* para o cálculo do PCN de pavimentos, o FAARFIELD e o COMFAA 3.0. Entretanto, os resultados de PCN podem ser diferentes de acordo com o *software* escolhido, em virtude da metodologia empregada em cada um. É recomendado o uso do COMFAA 3.0 para a determinação do PCN em pavimentos de aeródromos.

Para a realização dos cálculos nesses *softwares*, é necessário compreender os modelos de falha utilizados. ANAC (2022) descreve que os modelos de falha, desenvolvidos a partir de diversos estudos, avaliam danos estruturais ao longo da vida útil, considerando diversas cargas e variações no deslocamento da estrutura, bem como os materiais utilizados. Esses modelos são essenciais para otimizar recursos em projetos, evitando construções superestimadas ou subestimadas. Dada a natureza dos estudos, diferentes pesquisadores podem produzir modelos que mudam entre si, influenciados pelas características regionais e materiais disponíveis. Muitos países buscam estabelecer modelos específicos para suas regiões, incorporando-os em *softwares* para profissionais da área. À medida que novas pesquisas são conduzidas, os modelos são ajustados para refletir com mais precisão os danos causados pelas cargas aplicadas, mas esses estudos demandam tempo e extensa pesquisa.

Além disso, as limitações do método ACN-PCN não são mais justificáveis com os recursos tecnológicos e os avanços atuais na engenharia de pavimentos. Para resolver a incompatibilidade entre o projeto de pavimentos e a operacionalidade da estrutura ao longo da vida útil, foi necessário atualizar o método de cálculo de resistência de pavimentos aeroportuários ACN-PCN para o Método ACR-PCR. Os procedimentos de cálculo do método ACR-PCR se darão exclusivamente pelo *software* FAARFIELD, sendo o *software* COMFAA 3.0 excluído pela FAA do processo de cálculo.

O método ACR/PCR foi efetivado em julho de 2020 e será mandatório a partir de novembro/2024. Nesse ínterim, tanto o método ACN/PCN quanto o método ACR/PCR poderão ser utilizados e, a partir de novembro de 2024, apenas o método ACR/PCR será aceito pelas autoridades de aviação civil (ANAC, 2022).

### 2.7.1 Determinação do ACN

Conforme consta em ANAC (2016b), para pavimentos rígidos, o ACN deve ser obtido por meio da solução de Westergaard, que consiste em uma placa elástica carregada sobre uma sub-base de Winkler, assumindo uma tensão de trabalho para o concreto de 2,75 MPa. Para pavimentos flexíveis ou mistos, o ACN deve ser obtido por meio do método CBR.

Os valores de ACN são estabelecidos no Apêndice A de ANAC (2016b), considerando a carga total da aeronave (incluindo carga máxima de decolagem e peso operacional vazio), a pressão dos pneus, o tipo de pavimento (rígido ou flexível) e a resistência do subleito (alta, média, baixa e ultrabaixa).

## 2.7.2 Determinação do PCN

O PCN é expresso através de um código composto pelo valor numérico do PCN, tipo de pavimento, resistência do subleito, pressão de pneus e método de avaliação.

ANAC (2016b) descreve que o valor numérico do PCN é uma indicação da resistência de um pavimento em termos de uma carga de roda simples padrão, a uma pressão de pneus normalizada. Deve ser determinado em números inteiros, com arredondamento das frações para o número inteiro mais próximo. O método considera pressão de 1,25 MPa para os pneus, tensão de trabalho de 2,75 MPa no concreto para pavimentos rígidos e quatro categorias de resistência de subleito, apresentadas nas Tabelas 8 e 9. Segundo ANAC (2016b), o tipo de pavimento deve ser classificado:

- pelo código “R”, para pavimentos rígidos;
- pelo código “F”, para pavimentos flexíveis ou mistos.

A resistência do subleito deve ser classificada:

Tabela 8: Valores de resistência de subleito para aplicação do método ACN-PCN em pavimentos rígidos (ANAC, 2016b)

Categoria do subleito	Resistência do subleito $k$ (MN/m <sup>3</sup> )	Resistência do subleito normalizada $k$ (MN/m <sup>3</sup> )	Código
Alta	$k \geq 120$	150	A
Média	$60 < k < 120$	80	B
Baixa	$25 < k \leq 60$	40	C
Ultra-baixa	$k \leq 25$	20	D

Segundo ANAC (2016b), a pressão dos pneus deve ser classificada pelo código “W” e pelo código correspondente à coluna “Pressão máxima permitida nos pneus (MPa)” da Tabela 10 para pavimentos flexíveis ou compostos.

O método de determinação do PCN deve ser classificado:

- pelo código “T”, se adotado o método de avaliação técnica; ou
- pelo código “U”, se adotado o método experimental.

Tabela 9: Valores de resistência de subleito para aplicação do método ACN-PCN em pavimentos flexíveis (ANAC, 2016b)

Categoria do subleito	Resistência do subleito CBR	Resistência do subleito normalizada CBR	Código
Alta	$CBR \geq 13$	15	A
Média	$8 < CBR < 13$	10	B
Baixa	$4 < CBR \leq 8$	6	C
Ultra-baixa	$CBR \leq 4$	3	D

Tabela 10: Valores de resistência de subleito para aplicação do método ACN-PCN em pavimentos flexível (ANAC, 2016b)

Categoria	Código	Pressão máxima permitida nos pneus (MPa)
Ilimitada	W	Sem limite de pressão
Alta	X	Pressão limitada a 1,75 MPa
Média	Y	Pressão limitada a 1,25 MPa
Baixa	Z	Pressão limitada a 0,5 MPa

A avaliação técnica implica na aplicação de cálculos ou estudos técnicos para determinar o PCN. Esse método utiliza os mesmos princípios do projeto de pavimentos, calculando o PCN a partir da carga bruta admissível suportada pelo pavimento. Fatores como a frequência de operações e os níveis de tensão admissíveis são considerados, e a carga bruta da aeronave é determinada pelo processo inverso do dimensionamento. Além disso, é necessário avaliar o tráfego equivalente no aeródromo, considerando o efeito do tráfego de todas as aeronaves.

Por sua vez, a avaliação baseada na experiência com aeronaves implica em determinar o PCN escolhendo o maior valor de ACN entre as aeronaves normalmente utilizadas no aeródromo sem danificar o pavimento.

### 2.7.3 Uso do COMFAA 3.0

Segundo ANAC (2020), os dados de entrada para início do processo de cálculo do valor numérico do PCN no COMFAA 3.0 são as espessuras das camadas, o tipo de material de cada camada, CBR

do subleito, o mix de aeronaves em operação no aeródromo, a vida útil projetada para o pavimento e a configuração geométrica do sistema de pistas.

ANAC (2020) lista a sequência de etapas para determinação do PCN com o COMFAA 3.0:

1. Seleção do sistema métrico de unidades (recomendado);
2. Inclusão do mix de aeronaves do aeródromo;
3. Determinação do “*passes to traffic cycle*” (P/TC), definida como o número de passagens para cada movimento (pouso e/ou decolagem) que uma aeronave realiza sobre o pavimento;
4. Inserção do número de partidas anuais de cada aeronave do mix;
5. Inserção do valor do CBR (pavimentos flexíveis) ou módulo de reação do subleito  $k$  (pavimentos rígidos);
6. Utilização da planilha de apoio do COMFAA 3.0 para converter a estrutura de pavimento existente em uma configuração única, reconhecida pelo *software*.

Em relação ao mix de aeronaves, para incl ANAC (2020) descreve que:

Havendo arranjos semelhantes (de trens de pouso), deve-se escolher o arranjo cujo peso máximo de decolagem (PMD) default mais se aproxima do PMD da aeronave a ser incluída. Feito isso, insira os dados da aeronave, tais como “gross weight”, “% GW on main gears”, “tire pressure” e “annual departure”.

Entretanto, a nomenclatura visível na tela inicial do *software* COMFAA 3.0 é *gross weight*, em tradução livre, peso bruto, sem precisão ou menção do peso máximo de decolagem.

Ao comparar os valores *default* de *gross weight* das aeronaves presentes na biblioteca de aeronaves do *software* com o peso máximo de táxi apresentado pelo *software* FAARFIELD, os valores são numericamente idênticos, ainda que haja diferença na denominação do parâmetro.

Na ausência de maior precisão sobre o dado que deve ser inserido no *software* COMFAA 3.0, se o peso máximo de táxi ou se o peso máximo de decolagem, é adequado considerar o menor peso entre ambos, para que a análise seja a favor da segurança, isto é, ao tomar o menor valor, o valor numérico do PCN será menor, indicando que a capacidade de suporte do pavimento para operações sem restrição é inferior se comparado com o PCN resultante do cálculo com o maior valor.

Caso alguma aeronave não exista no grupo dos fabricantes, é possível selecionar uma aeronave genérica. A escolha deve ser feita a partir da configuração de trem de pouso principal que mais se

assemelha à aeronave desejada. Havendo arranjos semelhantes, deve ser escolhido o arranjo cujo peso máximo de decolagem (PMD) *default* mais se aproxima do PMD da aeronave desejada.

Quanto à relação P/TC, é definida em função da configuração do padrão de distribuição do carregamento do tráfego no pavimento, conforme o tipo de acesso da pista de táxi à pista de pouso e decolagem, ilustrada nas Figuras 21 e 22 e na Tabela 11.

Figura 21: Cenário da pista de táxi de acesso paralelo (ANAC, 2020)

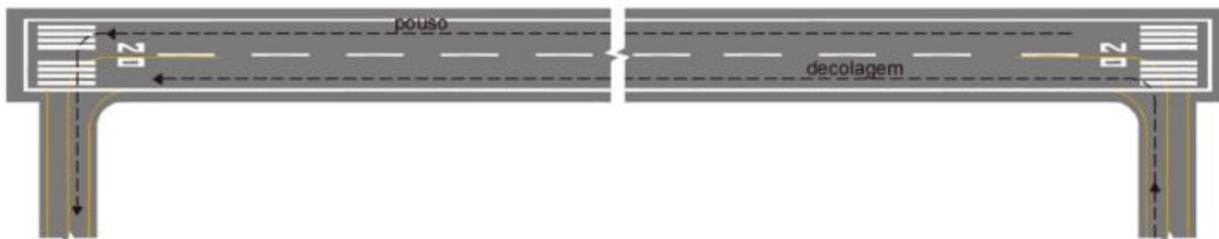


Figura 22: Cenário da pista de táxi de acesso central (ANAC, 2020)



Na condição sem abastecimento da aeronave, o peso de pouso é muito similar ao peso de decolagem da aeronave. Dessa forma, é computada as passagens da aeronave na pista tanto no momento do pouso quanto no momento da decolagem. Por sua vez, na condição com abastecimento, o peso de pouso é inferior ao peso de decolagem. Assim, é possível desprezar a passagem da aeronave nas pistas durante o pouso, computando apenas a passagem da aeronave durante a decolagem, pois o dano causado no pavimento pela aeronave pousando é relativamente inferior ao da decolagem.<sup>4</sup>

Segundo FAA (2022), na condição com abastecimento, são consideradas apenas as decolagens. Logo, a passagem com pista de táxi paralela à pista de pouso e decolagem é contabilizada 1 vez na condição de abastecimento e 2 vezes quando não há abastecimento. Já na configuração com pista de táxi central, são contabilizadas 2 vezes com abastecimento (meia passagem até chegar à cabeceira e 1 passagem percorrendo toda a PPD durante a decolagem, com arredondamento para o próximo número inteiro, 2) e 3 vezes sem abastecimento (1 passagem no pouso, meia passagem da

<sup>4</sup>O texto desse parágrafo é proveniente de discussão com os engenheiros José dos Santos Magalhães e Rodrigo Varella, em 16/02/24.

Tabela 11: Orientação para a seleção inicial da variável P/TC (ANAC, 2016b)

<i>Taxiway</i> de acesso à pista de pouso e decolagem (PPD)	P/TC Abastecimento de aeronave no aeroporto (Ex.: peso bruto na decolagem maior que o peso bruto no pouso)	P/TC Sem abastecimento de aeronave no aeroporto (Ex.: peso bruto na decolagem igual ao peso bruto no pouso)
Paralela	1	2
Central	2	3

Na condição “P/TC com abastecimento de aeronave no aeroporto”, deve-se atentar ao peso de entrada no COMFAA 3.0, o qual deverá ser o PMD, ou seja, o Peso Máximo de Decolagem, também conhecido como MTOW (Maximum Take-off Weight).

Na condição “P/TC sem abastecimento de aeronave no aeroporto”, deve-se atentar ao peso de entrada no COMFAA 3.0, o qual deverá ser o PMP, ou seja, o Peso Máximo de Pouso da aeronave, também conhecido como MLW (Maximum Landing Weight), na sigla em inglês.

cabeceira até a pista de táxi durante o pouso, meia passagem da pista de táxi central até a cabeceira durante a decolagem e 1 passagem percorrendo toda a PPD na decolagem).

Em relação à situação mais comum em aeroportos (sem ou com abastecimento), depende de diversos fatores para a companhia aérea, como o valor do querosene no aeroporto e da rota realizada. A decisão mais adequada é considerar que há abastecimento, para uma cenário mais conservador em termos de peso ou, que resulte em uma relação P/TC maior.<sup>5</sup>

Podem ser necessárias correções no valor numérico do PCN em função do valor de CDF encontrado. Conforme consta em ANAC (2016b), o valor de PCN obtido só é representativo em uma determinada faixa de CDF. Algumas correções do PCN em função do valor do CDF:

- $CDF \ll 0,15$  (pavimentos superdimensionados para o mix): variar relação P/TC do valor original até 10 e verificar o impacto no CDF. Se não for suficiente, retornar a relação P/TC para o valor original e multiplicar o movimento de aeronaves (partidas anuais) por 10. Se ainda não for suficiente, alterar a relação P/TC para 10 e ver o impacto com a movimentação também multiplicada por 10. Realizar o procedimento descrito até o máximo de 1.000x a movimentação de aeronaves. Se ainda não for suficiente, os resultados apresentados não serão confiáveis. Visando à obtenção de algum resultado válido, é sugerida a redução virtual das camadas do pavimento, realizando o procedimento descrito desde o início;
- $CDF < 0,15$ : realizar a operação “0,15/CDF encontrado”. Se o valor obtido for inferior a 10, inserir o resultado da divisão como o novo valor de P/TC. O resultado se aproximará de 0,15;

<sup>5</sup>O texto desse parágrafo é proveniente de discussão com os engenheiros José dos Santos Magalhães e Rodrigo Varela, em 16/02/24.

- $0,15 \leq CDF \leq 1,00$ : resultado encontra-se dentro dos parâmetros normais preconizados pela AC 150/5335-5C da FAA, não sendo necessário ajuste adicional.
- $CDF > 1,00$ : o resultado aponta para sobrecarga da estrutura do pavimento avaliado. É tolerável uma sobrecarga de até 10% para pavimentos flexíveis e de até 5% para pavimentos rígidos. É sugerido limitar a quantidade de operações permitidas da aeronave que aplica a sobrecarga em 500 movimentos;
- $CDF \gg 1,00$  (pavimentos subdimensionados para o mix): avaliação pelo operador do aeródromo da realização de reforço estrutural do pavimento e cálculo da vida útil da estrutura se, mantidas as operações do mix originalmente previstas, não for realizado reforço algum;
- $CDF > 20$ : a estrutura do pavimento construída ou a ser construída é incompatível com o mix em operação ou que se pretende operar no aeroporto.

## 2.8 Sinalização horizontal em pistas de pouso e decolagem de aeródromos

A sinalização horizontal é um aspecto fundamental para a segurança operacional de aeródromos. Ao longo de um projeto de restauração de pavimentos, o qual pode abranger a realização de avaliação destrutivas e/ou substituição de camadas do pavimento, a sinalização horizontal pode ficar comprometida, sendo necessário prever sua recomposição no projeto.

Para ANAC (2021d), a sinalização horizontal é a informação aeronáutica, que abrange os auxílios visuais à navegação aérea, através de pintura nas pistas de pouso e decolagem e de táxi, no pátio de aeronaves ou em outra área do aeródromo, com o propósito de auxiliar os pilotos de aeronaves e motoristas que transitam nas vias de serviços. Quanto à interrupção da sinalização horizontal, em ANAC (2021d) consta:

Na interseção de duas (ou mais) pistas de pouso e decolagem, a sinalização horizontal da pista mais importante, salvo pelas faixas de borda de pista de pouso e decolagem, deve ser traçada, e a da(s) outra(s) pista(s) deve ser interrompida. As faixas de borda de pista de pouso e decolagem da pista mais importante podem tanto ser continuadas através da interseção, como interrompidas (ANAC, 2021d).

Segundo ANAC (2021d), quando as pistas de pouso e decolagem e de táxi se intersectam, a sinalização na pista de táxi deve ser interrompida e a sinalização horizontal na pista de pouso e decolagem deve permanecer contínua.

Nessa referência, as pistas mais importantes são as de aproximação de precisão, na sequência, pistas de aproximação de não precisão e, por último, pistas para operação visual.

Para o projeto de sinalização horizontal de um aeródromo, é necessário conhecer as regras de voo nas quais as aeronaves operam: *Visual Flight Rules* (VFR) e/ou *Instrument Flight Rules* (IFR) pois os elementos de sinalização horizontal necessários são determinados em função do tipo de regras de voo, do comprimento e da classe da pista e do tipo de operações de aeronaves destinadas à pista. Os elementos mais comuns de sinalização horizontal incluem designação de pista, eixo de pista, faixas de cabeceira, ponto de visada, zona de toque e bordo de pista.

Segundo Horonjeff et al. (2010), a sigla VFR descreve o conjunto de regras visuais que orientam o piloto, a partir de referências visuais externas, enquanto IFR trata do conjunto de regras para o piloto orientar-se pelos instrumentos de bordo. O IFR é dividido em dois tipos: de precisão e de não precisão. O IFR de precisão emprega o sistema para orientação horizontal (curso, ou azimute) e vertical (rampa de planeio). Já o IFR de não precisão consiste em um instrumento para procedimento de aproximação com somente orientação horizontal.

A Tabela 12 apresenta os elementos de sinalização horizontal em pistas de pouso e decolagem em função das regras de voo.

Tabela 12: Elementos de sinalização por tipo de regras de voo (adaptado de Horonjeff et al. (2010) e FAA (2020))

Elementos de sinalização	VFR	IFR não precisão	IFR precisão
Designação da pista	Necessária	Necessária	Necessária
Eixo de pista	Necessário	Necessário	Necessário
Faixas de cabeceira	Nota 1	Necessárias	Necessárias
Ponto de visada	Nota 2	Nota 3	Necessário
Zona de toque	Desnecessária	Desnecessária	Necessária
Borda da pista	Nota 4	Nota 4	Necessária

Nota 1: Requeridas em pistas de pouso e decolagem servindo aeronaves de categorias de pouso C e D e para pistas de pouso e decolagem usadas, ou onde há intenção de usar, para transporte aéreo internacional.

Nota 2: Requerido em pistas de pouso e decolagem com 1280 metros ou mais longas servindo aeronaves de categorias C e D.

Nota 3: Requerido em pistas de pouso e decolagem instrumentadas com 1280 metros ou mais longas.

Nota 4: Usada quando a largura total do pavimento pode não ser disponível para uso como pista de pouso e decolagem.

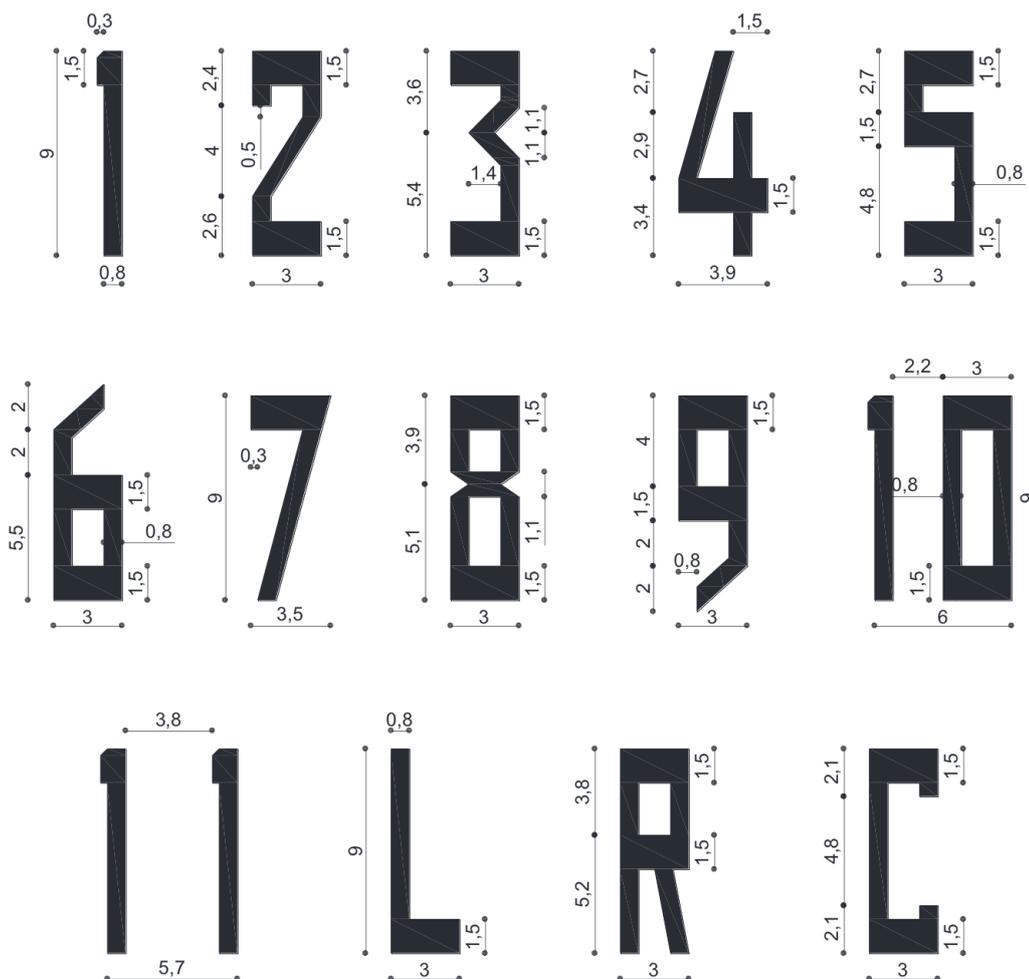
Quanto à cor da sinalização horizontal, ANAC (2021d) descreve que esta deve ser branca e, quando for necessário contraste na pista, as marcações na pista devem ser contornadas com a cor preta. Em aeródromos com operações noturnas, se necessário o aumento de visibilidade da sinalização horizontal, sobretudo em condição de pista molhada, a sinalização horizontal deve empregar materiais refletores.

### 2.8.1 Designação da pista

Conforme consta em ANAC (2021d), a sinalização horizontal de designação da pista de pouso e decolagem, presente em pistas pavimentadas ou não, se localiza na cabeceira da pista de pouso e decolagem. A designação é o número estabelecido pelo arredondamento do valor do norte magnético da cabeceira para o múltiplo de 10 mais próximo, com a eliminação do último dígito do valor do norte magnético.

Em caso de pistas paralelas e em função de sua quantidade, podem ser atribuídas as letras “L”, “R” e “C”, com o intuito de identificar a(s) pista(s) à esquerda, a pista central e a(s) pista(s) à direita. ANAC (2021d) informa os formatos e dimensões dos números e letras existentes na sinalização horizontal de designação de pista de pouso e decolagem, ilustrados na Figura 23.

Figura 23: Formato e dimensões dos números e letras para sinalização horizontal de designação de pistas de pouso e decolagem (em metros) (ANAC, 2021d)



## 2.8.2 Eixo de pista

ANAC (2021d) relata que a sinalização horizontal de eixo da pista de pouso e decolagem, presente em pistas pavimentadas, se localiza ao longo do eixo da pista de pouso e decolagem. Consiste em uma linha de faixas espaçadas por intervalos uniformes. A extensão de uma faixa mais um intervalo não deve ser menor que 50 metros nem ultrapassar 75 metros. A extensão de cada faixa deve ser, pelo menos, igual ao comprimento do intervalo entre elas ou 30 metros, o que for maior.

Em ANAC (2021d) é descrito que em pistas de aproximação de precisão de Categorias II e III, a largura das faixas deve ser de 90 cm, em pistas de aproximação de não-precisão com números de código 3 ou 4 e pistas de aproximação de precisão de Categoria I, 45 cm e, em pistas de aproximação de não-precisão com número de código 1 ou 2 e pistas para operação visual, 30 cm.

## 2.8.3 Faixas de cabeceira

ANAC (2021d) explica que a sinalização horizontal de faixas de cabeceira, presente em pistas pavimentadas, se inicia a 6 m a partir da cabeceira. É um padrão de faixas longitudinais de dimensões uniformes, dispostas simetricamente ao eixo da pista de pouso e decolagem. O número de faixas é determinado em função da largura da pista, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Número de faixas da sinalização horizontal de cabeceira de pista (ANAC, 2021d)

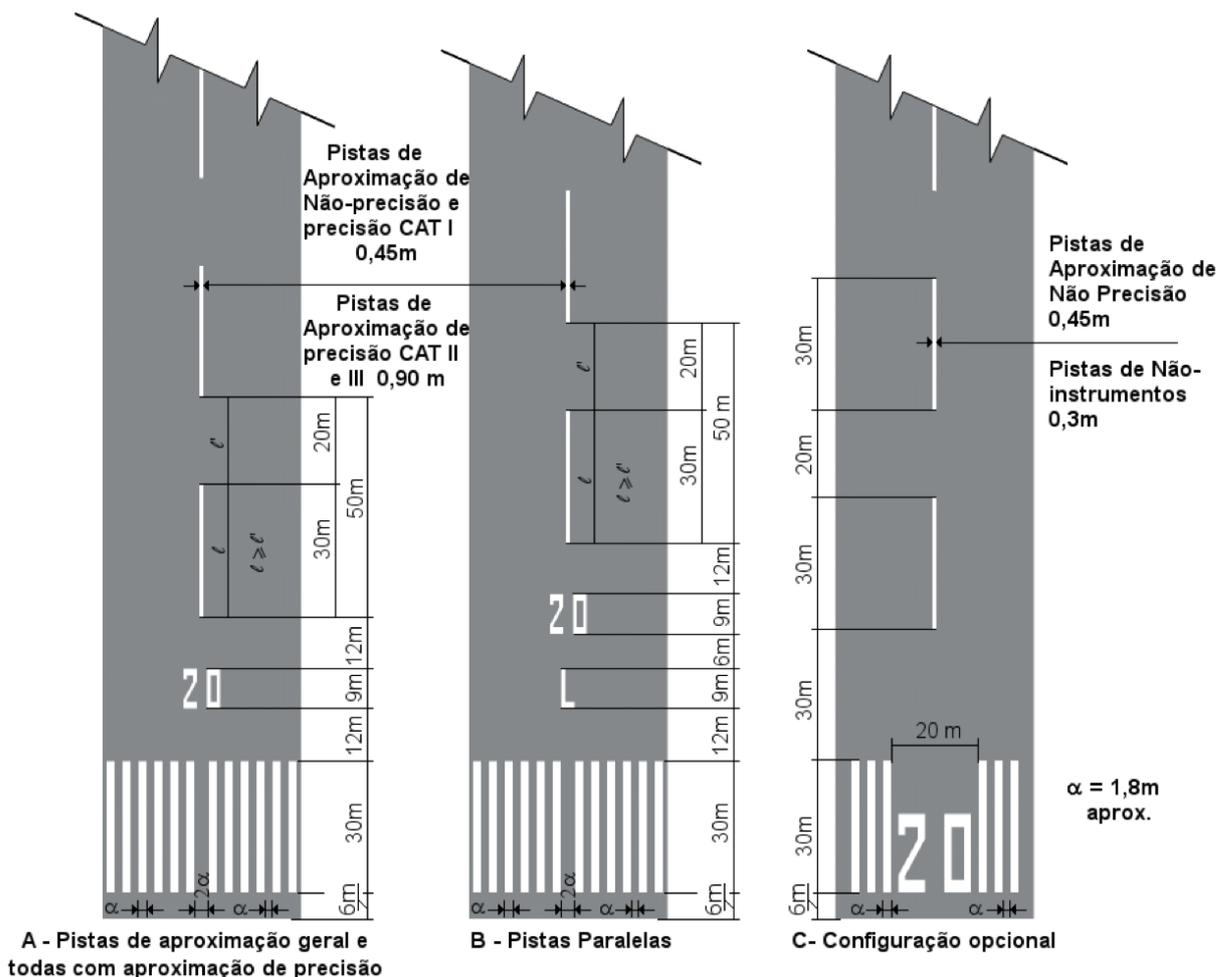
Largura da pista	Número de faixas
18 m	4
23 m	6
30 m	12
60 m	16

Segundo ANAC (2021d), as faixas devem possuir a extensão lateral até 3 metros da borda da pista de pouso e decolagem, ou até uma distância de 27 metros para cada lado do eixo da pista, o que resultar na menor distância lateral. Quando a sinalização horizontal indicada na pista de pouso e decolagem estiver inserida nas faixas da cabeceira, deve haver um mínimo de três faixas de cada lado do eixo da pista. Se a sinalização horizontal de designação da pista de pouso e decolagem estiver acima das faixas da cabeceira, as faixas devem ser ininterruptas, atravessando a pista.

Cada faixa deve ter pelo menos 30 metros de comprimento e cerca de 1,80 metro de largura, com espaçamentos de aproximadamente 1,80 metro entre elas. Quando as faixas atravessam a pista de pouso e decolagem em toda a sua largura, um espaçamento duplo deve ser usado para separar as duas faixas mais próximas ao eixo da pista. No caso de sinalização horizontal de designação de

pista estiver entre as faixas da cabeceira, o espaçamento deve ser de 22,5 metros. A sinalização horizontal de designação de pista, eixo de pista e faixas de cabeceira é ilustrada na Figura 24.

Figura 24: Sinalização horizontal de designação de pista de pouso e decolagem, de eixo e cabeceira (ANAC, 2021d)



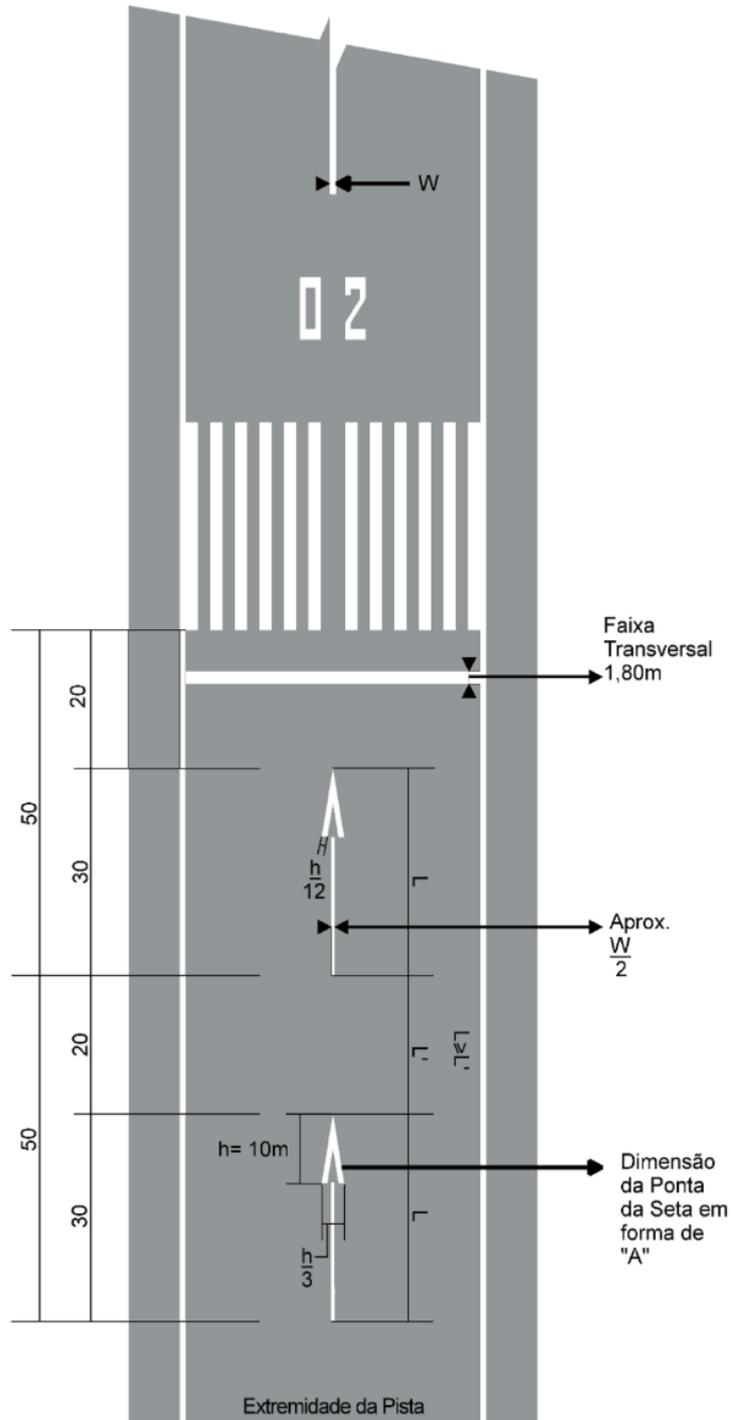
Quando uma cabeceira for deslocada da extremidade da pista de pouso e decolagem ou quando a extremidade da pista de pouso e decolagem não for perpendicular ao eixo, uma faixa transversal, deve ser adicionada à sinalização horizontal de cabeceira (ANAC, 2021d).

Quando a cabeceira de pista for permanentemente recuada, setas devem ser dispostas na porção da pista anterior à cabeceira recuada. A sinalização horizontal de cabeceira deslocada é ilustrada na Figura 25.

#### 2.8.4 Ponto de visada

ANAC (2021d) descreve que a sinalização horizontal de ponto de visada da pista de pouso e decolagem deve estar presente em cada extremidade de aproximação de uma pista para operação por

Figura 25: Sinalização horizontal de cabeceira deslocada (ANAC, 2021d)



instrumento pavimentada com número de código 2, 3 ou 4. Consiste em duas faixas contrastantes, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 14.

Quando houver sinalização horizontal de zona de toque de pista, o espaçamento lateral entre as faixas deve ser o mesmo que o espaçamento das sinalizações horizontais de zona de toque. Além disso, a sinalização horizontal de ponto de visada não deve começar mais perto da cabeceira do que a distância indicada na Tabela 14. Em pistas equipadas com sistemas visuais de indicação de rampa de aproximação, o início da sinalização horizontal deve coincidir com a origem da rampa de aproximação visual.

Tabela 14: Localização e dimensões da sinalização horizontal de ponto de visada (ANAC, 2021d)

Localização e dimensões	Distância de pouso disponível (m)			
	Menor que 800	800 até 1200 exclusive	1200 até 2400 exclusive	2400 ou maior
Distância da cabeceira ao início das sinalizações	150	250	300	400
Extensão da faixa <sup>a</sup>	30 a 45	30 a 45	45 a 60	45 a 60
Largura da faixa	4	6	6 a 10 <sup>b</sup>	6 a 10 <sup>b</sup>
Espaço lateral entre as laterais internas das faixas	6 <sup>c</sup>	9 <sup>c</sup>	18 a 22,5	18 a 22,5

Nota a: As maiores dimensões das variações especificadas estão destinadas ao uso em situações onde um maior contraste for necessário.

Nota b: O espaçamento lateral pode ser variado dentro desses limites, de modo a minimizar a contaminação da sinalização horizontal por depósitos de borracha.

Nota c: Esses cálculos foram deduzidos com base na distância entre as rodas externas do trem de pouso principal, que representa o elemento 2 do código de referência de aeródromos.

### 2.8.5 Zona de toque

Conforme consta em ANAC (2021d) a sinalização horizontal de zona de toque deve estar presente na zona de toque de pistas de aproximação de precisão pavimentadas com número de código 2, 3 ou 4. Consiste em pares de retângulos dispostos simetricamente ao eixo da pista de pouso e decolagem. O número dos pares são relacionados à distância de pouso disponível. Quando a sinalização horizontal for disposta em ambos os sentidos de aproximação da pista, o número de pares de sinais será relacionado à distância entre as cabeceiras, conforme Tabela 15.

ANAC (2021d) descreve que a sinalização horizontal de zona de toque deve estar de acordo com um dos dois padrões demonstrados na Figura 26. Para o padrão demonstrado na Figura 26 (A), a sinalização horizontal não deve ser inferior a 22,5 m de comprimento e 3 m de largura. Para o padrão ilustrado na Figura 26 (B), cada faixa da sinalização horizontal não deve ser inferior a 22,5

Tabela 15: Quantidade de pares de retângulos da sinalização horizontal de zona de toque (ANAC, 2021d)

Distância de pouso disponível ou distância entre as cabeceiras	Par(es) de sinalização horizontal
Menor que 900 m	1
1.200 m até 1.500 m, exclusive	3
1.500 m até 2.400 m, exclusive	4
2.400 m ou maior	6

m de comprimento e 1,8 m de largura, com um espaçamento de 1,5 m entre faixas adjacentes. O espaçamento lateral entre as laterais internas dos retângulos deve ser igual ao espaçamento das sinalizações horizontais de ponto de visada, quando existir. Onde não existir sinalizações horizontais de ponto de visada, o espaçamento lateral entre as laterais internas dos retângulos deve corresponder ao espaçamento lateral especificado para as sinalizações horizontais de ponto de visada na Tabela 14. Os pares de sinalizações horizontais devem ser dispostos em espaçamentos longitudinais de 150 m, a partir da cabeceira. Os pares de sinalizações horizontais de zona de toque coincidentes ou localizados a menos de 50 m da sinalização horizontal de ponto de visada devem ser apagados.

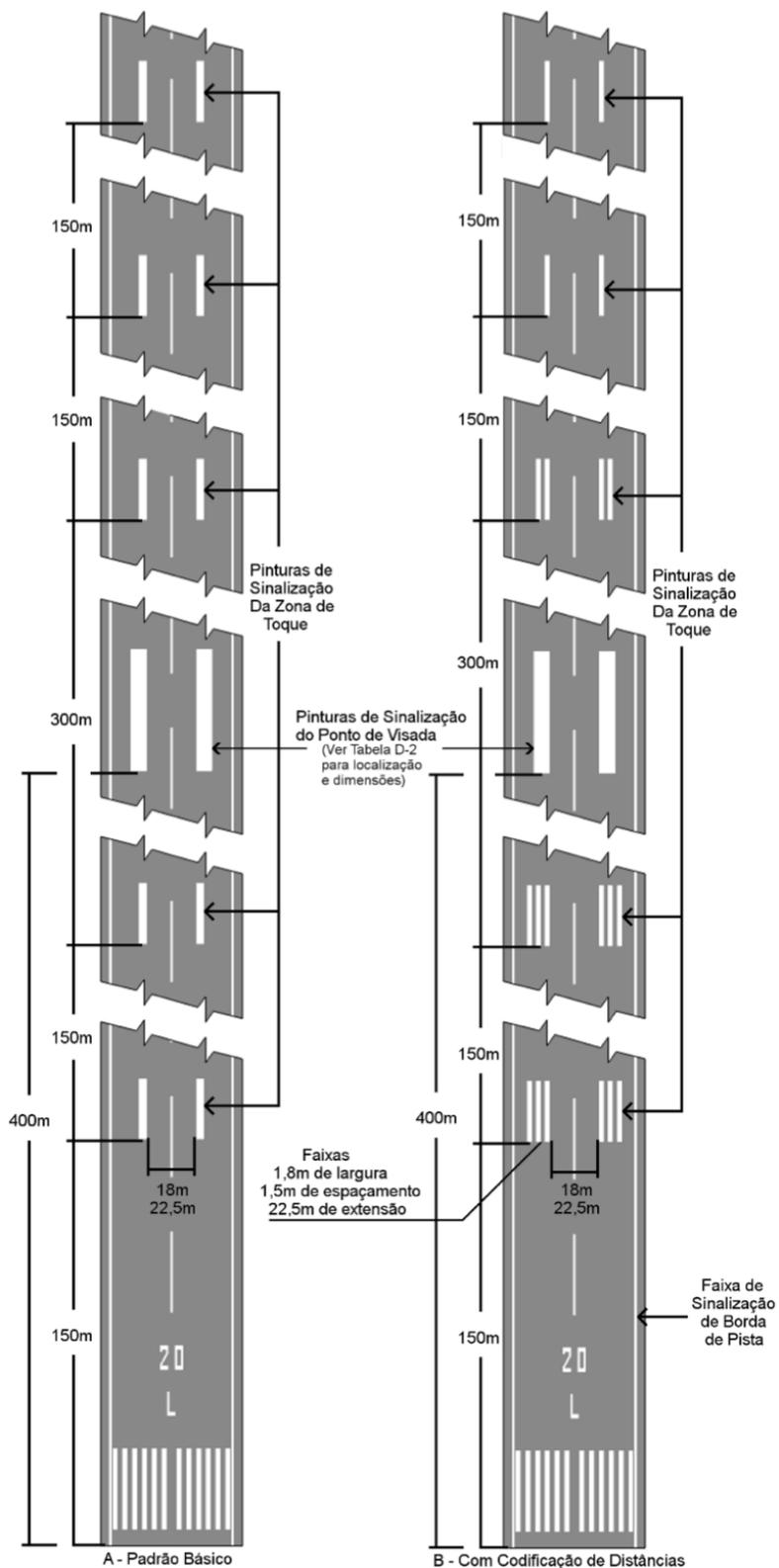
### 2.8.6 Borda da pista

Segundo ANAC (2021d), a sinalização horizontal de borda da pista deve estar presente entre as cabeceiras de uma pista pavimentada onde houver falta de contraste entre as bordas da pista e o acostamento ou o terreno no entorno e em pistas de aproximação de precisão, independentemente do contraste entre as bordas da pista e o acostamento ou o terreno ao redor.

A sinalização horizontal de borda da pista se localiza ao longo de cada uma das bordas da pista. Quando a pista possuir largura superior a 60 m, as faixas devem estar localizadas a 30 m do eixo da pista. Onde uma área de giro na pista de pouso for disponível, a sinalização horizontal de borda de pista de pouso e decolagem deve continuar entre a pista de pouso e a área de giro.

Essa referência expõe que a sinalização horizontal de borda de pista de pouso e decolagem deve ter uma largura total de, no mínimo, 0,90 m em pistas com 30 m ou mais de largura e, no mínimo, 0,45 m em pistas com largura menor do que 30 m.

Figura 26: Sinalização horizontal de ponto de visada e de zona de toque (ANAC, 2021d)



## 3 Área de estudo – Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto

Este capítulo apresenta o processo de seleção da área de estudo, assim como seus dados disponíveis.

### 3.1 Critérios para seleção da área de estudo

As deflexões, as espessuras das camadas, os módulos de elasticidade iniciais, os coeficientes de Poisson dos materiais, o raio do prato de carregamento e carga aplicada, dados necessários para a elaboração do presente trabalho, são obtidos a partir do Sistema Eletrônico de Informações (SEI) <sup>6</sup>, desenvolvido pela ANAC, que permite a consulta aos seus processos e documentos protegidos. No componente do sistema denominado “Pesquisa Pública” é possível acessar e imprimir documentos que não possuam restrição legal de acesso. Contudo, embora seja um sistema de dados abertos, é necessário especificar o seu uso.

As palavras-chave utilizadas na Pesquisa Pública são atrito, macrotextura, avaliação funcional, ensaio FWD, levantamento deflectométrico, ensaios não destrutivos, retroanálise, PCN, infraestrutura, relatório técnico e memorial de cálculo. A partir dessas palavras-chave, foram encontrados 14 aeródromos potenciais para a escolha da área de estudo.

Dos 14, 5 aeródromos, apesar de descreverem o processo de retroanálise e o cálculo do PCN, não apresentaram os dados brutos de deflexões do levantamento deflectométrico com o equipamento FWD, ou seja, as deflexões utilizadas no relatório técnico desses aeródromos já haviam passado por um tratamento estatístico preliminar e, portanto, invalidando sua escolha como área de estudo.

Outros 3 aeródromos não apresentaram mix de aeronaves claro ou completamente definido, de forma que também foram desconsiderados para a área de estudo.

Um aeródromo realizou seu levantamento deflectométrico com o equipamento HWD. Foram priorizados os relatórios técnicos que realizaram o levantamento deflectométrico com o equipamento FWD, devido à familiaridade da autora com esta abordagem.

Um dos aeródromos apresentou alto nível de dificuldade na compreensão das informações apresentadas em seu relatório técnico. Faltou clareza na exposição dos conceitos utilizados, excluindo-o das opções viáveis para a área de estudo.

Dois aeródromos realizaram o ensaio deflectométrico em pistas de táxi ou pátios. Em razão do presente trabalho privilegiar a restauração de pista de pouso e decolagem, os aeródromos foram igualmente excluídos.

---

<sup>6</sup>URL: <[https://sei.anac.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md\\_pesq\\_processo\\_pesquisar.php?acao\\_externa=protocolo\\_pesquisar&acao\\_origem\\_externa=protocolo\\_pesquisar&id\\_orgao\\_externo=0](https://sei.anac.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_processo_pesquisar.php?acao_externa=protocolo_pesquisar&acao_origem_externa=protocolo_pesquisar&id_orgao_externo=0)>

Dos 2 aeródromos restantes na lista, um deles se trata de um empreendimento novo, cuja atuação principal é no desenvolvimento local de sua região. Nesse contexto, um projeto de restauração ainda não seria necessário e foge do escopo do presente trabalho.

O aeródromo escolhido para a área de estudo foi então o Aeroporto Internacional de João Pessoa - Presidente Castro Pinto, em razão de apresentar os dados brutos de deflexões do levantamento deflectométrico com FWD, o mix de aeronaves melhor definido, o processo de retroanálise e a determinação do PCN em sua completude, em comparação aos outros aeródromos.

João Pessoa é a sétima cidade mais populosa da Região Nordeste e a vigésima do Brasil. Trata-se do ponto mais oriental das Américas, o que faz a cidade ser conhecida como “Porta do Sol”, em razão de ser o lugar em que o sol nasce primeiro no continente americano.

Segundo o Panorama das Cidades do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população do município era de 833.932 pessoas em 2022, com uma densidade demográfica de 3.970,27 habitante por quilômetro quadrado.<sup>7</sup>

O Aeroporto Internacional de João Pessoa – Presidente Castro Pinto está localizado a -7,148333° de latitude e -34,950278° de longitude, com altitude de 66 metros, no município de Bayeux, região metropolitana de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba. A distância entre o Aeroporto Internacional de João Pessoa e o centro da capital é de 11 quilômetros. O código ICAO deste aeródromo público é SBJP. Operam no aeródromo público as companhias aéreas Azul, Gol e Latam.

Segundo GCA (2018) este aeródromo público opera em VFR Diurno/Noturno e em IFR não precisão Diurno/Noturno e sua temperatura de referência é 31,1°C.

O Aeroporto Internacional de João Pessoa pertence à Classe III.<sup>8</sup>

Os Estudos de Engenharia e Afins (GCA, 2018), realizados com o intuito de subsidiar a modelagem das concessões para expansão, exploração e manutenção de aeroportos e que utilizou o ano de 2016 como atual/existente em suas considerações, determinou o movimento de pousos durante o dia e a noite de um dia médio de 2016, apresentados na Tabela 16.

No leilão disputado em 15 de março de 2019, a empresa espanhola Aena Internacional apresentou uma oferta de 1,9 bilhão de reais para obter a administração do Aeroporto Castro Pinto, juntamente com outros cinco aeroportos que faziam parte do Bloco Nordeste, durante a quinta rodada de privatizações. Os aeroportos incluídos no bloco eram Recife, Aracaju, Maceió, Campina Grande e Juazeiro do Norte. Conforme estabelecido no edital, a empresa vencedora ficaria responsável pela administração do aeroporto por um período de 30 anos.

O movimento total de pousos durante o dia e a noite é igual a 18,81.

A Figura 27 apresenta a localização do aeródromo público no Estado da Paraíba e no Brasil.<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup>Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/joao-pessoa/panorama>>.

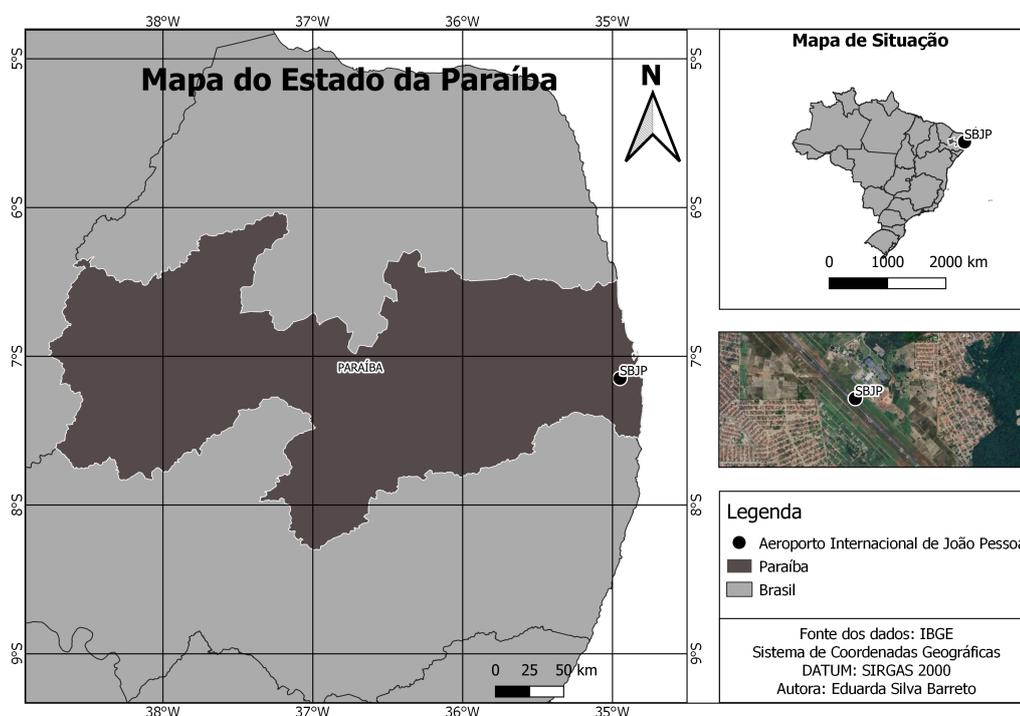
<sup>8</sup>Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aerodromos/lista-dos-aerodromos-de-uso-publico-por-classes-do-rbac-no-153-e-por-perfil-operacional-da-classe-i>>

<sup>9</sup>Resultado do processamento de dados do IBGE no *software* QGIS.

Tabela 16: Movimentos de pousos durante o dia e noite de um dia médio de 2016. Adaptado de (GCA, 2018; ANAC, 2021d)

Categoria	Envergadura	Dia	Noite	%
H	Não informado em ANAC (2021d)	0,51	0,00	2,7%
A	menor que 15 m	1,86	0,00	9,9%
B	maior ou igual a 15 m e menor que 24 m	0,65	0,00	3,5%
C	maior ou igual a 24 m e menor que 36 m	10,52	5,20	83,6%
D	maior ou igual a 36 m e menor que 52 m	0,00	0,07	0,4%
Total		13,54	5,27	100%

Figura 27: Localização do Aeroporto Internacional de João Pessoa



A Figura 28 apresenta a vista superior do aeródromo público.<sup>10</sup>

Figura 28: Vista superior do Aeroporto Internacional de João Pessoa



A Figura 29 apresenta registros fotográficos da cabeceira 34 da pista de pouso e decolagem.

Figura 29: Registros fotográficos da cabeceira 34 (INFRAERO, 2016b)



(a) Cabeceira 34 - Vista A

(b) Cabeceira 34 - Vista B

### 3.2 Histórico

Conforme apresentado em Jordão (2004), em sua avaliação estrutural das pistas de pouso e decolagem, pátios e acessos, o Aeroporto Internacional de João Pessoa - Presidente Castro Pinto foi

<sup>10</sup>Resultado do processamento de dados do IBGE no *software* QGIS.

construído na década de 1950, período no qual as companhias de aviação, geralmente, utilizavam em suas linhas comerciais regulares as aeronaves do tipo Douglas DC-3. Na época, a pista tinha um comprimento de 1495 metros.

O Terminal de Passageiros e a pista do aeroporto foram desenvolvidos pelo Comando da Aeronáutica em conjunto com o governo estadual, enquanto um Destacamento de Proteção ao Voo foi estabelecido para supervisionar e garantir a segurança do tráfego aéreo na região. Sua homologação pelas autoridades federais ocorreu em 20 de agosto de 1957.

Em 1 de fevereiro de 1979, a jurisdição técnica, administrativa e operacional foi transferida para a INFRAERO, conforme estipulado pela Portaria nº 136/GM5 de 30 de janeiro de 1979.

Segundo Jordão (2004), no final dos anos 1980, foi identificada a necessidade de realizar obras de ampliação e reforço na pista de pouso e decolagem, na pista de táxi e no pátio de aeronaves do Aeroporto Presidente Castro Pinto. Essas obras tinham o intuito de possibilitar a operação de aeronaves com maior número de passageiros.

O Relatório Técnico da INFRAERO (INFRAERO, 1980 *apud* Jordão, 2004) concluiu que a infraestrutura existente estava aquém dos requisitos mínimos para a operação segura de aeronaves de grande porte, como o Boeing 727/200, para os próximos 10 anos.

Pereira (2012) descreve que, com o propósito de aumentar a capacidade de atendimento e aperfeiçoar sua infraestrutura física, o Aeroporto Castro Pinto foi submetido a outro processo de reforma, iniciado em abril de 2004 e finalizado em julho de 2008. Esse projeto abrangeu o reforço do pavimento da pista de pouso e decolagem, das pistas de táxi e do pátio de estacionamento de aeronaves.

Em Jordão (2004), é descrito que inicialmente, a pista de pouso e decolagem possuía um comprimento de 1.495 metros e 42 metros de largura, com revestimento em placas de concreto de cimento Portland de dimensões 7,0 metros x 3,5 metros x 0,17 metros, sobre uma sub-base granular de 30 centímetros.

Nessa referência, após a ampliação, a pista de pouso e decolagem possuía 45 m de largura e com um acréscimo de 1020 metros de comprimento. A estrutura ampliada possui seção transversal de 15 cm de sub-base, 15 cm de base, 6 cm de binder e 4 cm de concreto asfáltico (CA).

A Figura 30 apresenta a linha do tempo do pavimento, com as principais intervenções descritas. O ano de 2016 é considerado como o de referência para este trabalho, uma vez que é o ano da medição das deflexões.

O Aeroporto Internacional de João Pessoa possui, atualmente, uma pista de pouso e decolagem, duas pistas de táxi (A e B) e 3 pátios de estacionamento de aeronaves (1, 2 e 3). O comprimento da sua pista de pouso e decolagem, cuja superfície é pavimentada com concreto asfáltico, é 2515 metros, com 45 metros de largura e com as cabeceiras orientadas a 160° e 340°.

Figura 30: Linha do tempo do pavimento



Nos 3 relatórios técnicos consultados, Dynatest (2016a), Dynatest (2016b) e INFRAERO (2016a), não é informado o método de dimensionamento utilizado para determinação da espessura das camadas do pavimento. Como o objetivo do relatório era a determinação do PCN do aeródromo utilizando os módulos de elasticidade retroanalizados, é necessário somente o resultado final do dimensionamento, isto é, a espessura de cada pavimento, não o método de dimensionamento em si. Supostamente, a espessura das camadas foi determinada pelo método antigo, descrito em FAA (1995), em vigor até 2008, no entanto, esse método não foi descrito com maior detalhe no capítulo de revisão bibliográfica, em razão do método de dimensionamento não interferir no método do presente trabalho.

Ou seja, o método de dimensionamento utilizado para a construção original do pavimento e, supostamente, também para outras restaurações posteriores, não é relevante para um novo projeto de restauração.

A resistência da pista de pouso e decolagem foi determinada como PCN 42/F/B/X/T, o que indica pavimento flexível (F), média resistência do subleito (B), CBR entre 8 e 13%, média pressão dos pneus (X), limitada a 1,5 MPa e que a avaliação para determinação do PCN foi realizada com base no resultado de um estudo técnico (T).<sup>11</sup>

Conforme consta em INFRAERO (2016a), no tipo de avaliação pelo estudo técnico, o valor numérico do PCN é determinado a partir da obtenção da carga bruta admissível que o pavimento suporta. São considerados fatores como frequência de operações e níveis de tensão admissíveis.

Apesar do Cadastro de Aeródromos da ANAC informar o valor numérico do PCN como 42, o valor informado em GCA (2018) é 52. O valor numérico igual a 52 corrobora com os resultados obtidos pelo estudo técnico (INFRAERO, 2016a), 52 para 20 anos e 57 para 10 anos.

<sup>11</sup>Cadastro de Aeródromos da Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em <<https://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/aerodromos/localizacao-geografica-arquivos/aerodromos/publicos-todas-as-regioes/download.table>>.

Segundo a atual administração do aeródromo, Aena Brasil <sup>12</sup>, o Aeroporto Internacional de João Pessoa possui cerca de quatro milhões de metros quadrados, incluindo pista de pouso e decolagem, com capacidade para atender 2,3 milhões de passageiros por ano. O terminal de passageiros possui 11.021,32 m<sup>2</sup>, dois pavimentos e um estacionamento com 600 vagas.

A administração do aeródromo também informa em seu endereço eletrônico <sup>13</sup> que o pátio de aeronaves 1 possui 6.653,30 m<sup>2</sup>, o pátio 2, 11.156,50 m<sup>2</sup>, e o pátio 3, 12.793,38 m<sup>2</sup>. O pátio 1 possibilita o estacionamento de aeronaves em 3 posições, e os pátios 2 e 3, em 5 posições.

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam a infraestrutura física e de acesso terrestre do Aeroporto Internacional de João Pessoa.

Figura 31: Aeroporto Internacional de João Pessoa



(a) Extraído de <<https://aeroin.net/movimentacao-do-aeroporto-de-joao-pessoa-pb-deve-aumentar/>>

<sup>12</sup>Disponível em: <<https://www.aenabrasil.com.br/pt/aeroportos/aeroporto-internacional-de-joao-pessoa-presidente-castro-pinto/Historico.html>>

<sup>13</sup>Disponível em: <<https://www.aenabrasil.com.br/pt/aeroportos/aeroporto-internacional-de-joao-pessoa-presidente-castro-pinto/Caracteristicas.html>>

Figura 32: Aeroporto Internacional de João Pessoa - acesso terrestre



(a) Extraído de <<https://jornaldaparaiba.com.br/politica/conversa-politica/aeroporto-joao-pessoa-castro-pinto-reforma-salas-de-embarque-posicoes-avioes/>>

Figura 33: Fachada do Terminal de Passageiros do Aeroporto Internacional de João Pessoa



(a) Extraído de <<https://estevampelomundo.com.br/avaliacoes/voos/como-e-o-aeroporto-de-joao-pessoa-pb/>>

### 3.3 Mix de aeronaves

Conforme consta em INFRAERO (2016a), o mix de aeronaves foi informado pelo gestor do aeródromo na época da realização do relatório, a Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), sendo apresentado na Tabela 17.

Para a confecção do mix de aeronaves, o relatório técnico citou a *Advisory Circular 150/5335-5D* (FAA, 2022), a qual descreve que o uso do método padronizado de informar a resistência do pavimento é aplicado somente a pavimentos de aeródromos de uso público com resistência de suporte de 12.500 libras (5.700 kg) ou maior.

A interpretação de INFRAERO (2016a) é que a FAA recomenda que uma aeronave deve ser considerada para a determinação do PCN se a mesma tiver peso superior a 5,7 toneladas e solicitar regularmente o pavimento, visto que, se as aeronaves operarem com pouca frequência no aeroporto, o valor de PCN gerado seria irrealista.

Para a pista de pouso e decolagem, foram consideradas apenas as maiores aeronaves do mix de aeronaves (acima de 35000 lbs) e aeronaves com mais de uma decolagem por ano (INFRAERO, 2016a).<sup>14</sup>

Tabela 17: Mix de aeronaves do Aeroporto Internacional de João Pessoa (INFRAERO, 2016a)

Aeronave	Decolagens médias anuais	Participação no mix (anual)
Boeing 737-800	1693	41,05%
Airbus A320	2628	63,72%
Boeing 737-700	120	2,91%
Airbus A319	38	0,92%
Airbus A318	8	0,19%
Embraer 190	410	9,94%
ATR-72	904	21,92%
Embraer 135	11	0,27%
Bombardier Challenger 300	5	0,12%

A Tabela 18 apresenta o peso máximo de táxi, a pressão do pneu<sup>15</sup>, a distância entre trens de pouso e a fonte consultada para a obtenção da distância entre trens de pouso principais.

<sup>14</sup>35000 libras equivalem aproximadamente a 15876 quilogramas.

<sup>15</sup>1 psi é aproximadamente 6,895 kPa.

Tabela 18: Peso bruto máximo e distância entre trens de pouso principais

Aeronave	Peso máximo de táxi (kg)	Pressão do pneu (psi)	Distância entre trens de pouso principais e eixo da pista (m)	Fonte
Boeing 737-800	79243	205,0	2,86	Boeing (2001)
Airbus A320	73900	200,1	3,80	Airbus (2005a)
Boeing 737-700	70307	205,0	2,86	Boeing (2001)
Airbus A319	64400	172,6	3,80	Airbus (2005b)
Airbus A318	59400	147,9	3,80	Airbus (2005c)
Embraer 190	47950	147,0	2,97	Embraer (2021)
ATR-72	20020	115,0	2,05	ATR (1999)
Embraer 135	19100	148,0	2,05	Embraer (2008)
Bombardier Challenger 300	17690	145,0	1,60	Bombardier (2008) e Bombardier (2016)

### 3.4 Configuração do sistema de pistas

Em relação à configuração do sistema de pistas, o Aeroporto Internacional de João Pessoa possui sua pista de táxi posicionada acessando a pista de pouso e decolagem de forma central, conforme exposto na Figura 34.

### 3.5 Defeitos no pavimento

GCA (2018) descreve a existência de trincas e remendos na pista de pouso e decolagem.

Na PPD 16/34 há trincas, pequenos buracos, o terço médio encontra-se com mais patologias e maior desgaste.

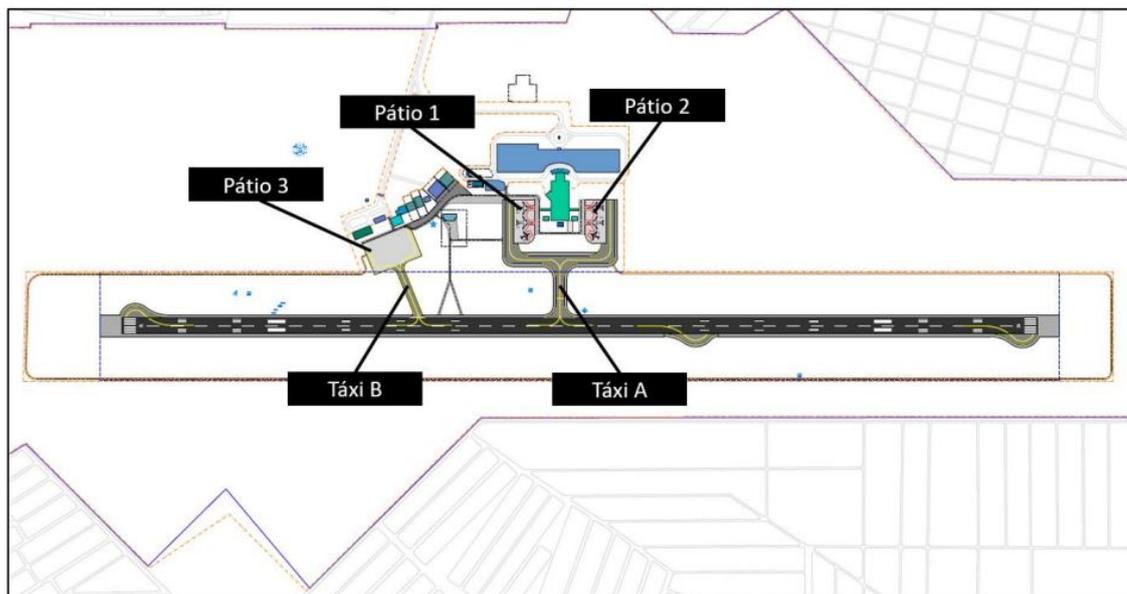
Na PPD 16/34, há trincas no pavimento da cabeceira 16 e um pequeno buraco no pavimento, no início da zona de toque da cabeceira 16 (GCA, 2018).

A Figura 35 apresenta os registros fotográficos dos defeitos da pista de pouso e decolagem.

### 3.6 Avaliação funcional

Conforme consta em ANAC (2023b), para a pista de pouso e decolagem de aeródromos Classe III, a frequência mínima de medição do PCI é 18 meses.

Figura 34: Configuração do sistema de pistas do aeródromo (GCA, 2018)



Segundo ANAC (2023b), para média de pousos diários de aeronaves de asa fixa com motor à reação, na cabeceira predominante maior ou igual a 16 e menor que 31 (a média do SBJP é 18,81), a frequência de medição do IRI é a cada 24 meses, da medição de atrito é a cada 180 dias, da macrotextura é a cada 180 dias e da remoção de borracha é a cada 360 dias.

Conforme apresentado em INFRAERO (2018b), para a inspeção dos pavimentos de aeródromos na determinação do PCI, contabilizados por metro quadrado, exceto na trinca de reflexão de junta e na trinca longitudinal e transversal, contabilizadas por metro, são consideradas os seguintes defeitos:

- trinca couro de crocodilo de fadiga;
- exsudação;
- trinca em bloco;
- corrugação/ondulação;
- depressão;
- trinca de reflexão de juntas;
- trinca longitudinal e transversal;
- contaminação por óleo;
- remendo;
- desagregação;
- trilha de roda;

Figura 35: Defeitos no pavimento do aeródromo (INFRAERO, 2016b)



(a) Trincas

(b) Remendo no área de giro - Cabeceira 16



(c) Remendo

- elevação no encontro de placas;
- trincas de escorregamento;
- expansão ou inchamento;
- envelhecimento.

Segundo INFRAERO (2018b), o PCI médio da PPD 16/34 é 75, o PCI mínimo é 62 e o PCI máximo é 83.

Os valores individuais de medição da irregularidade longitudinal, sentido cabeceira 34 para 16, são apresentados nas Tabelas 19, 20, 21 e 22. Gonçalves (2017) determinou o IRI médio, igual a 2,22 m/km à esquerda do eixo da pista e 2,34 m/km à direita do eixo da pista.

Por outro lado, GCA (2018) realizou o ensaio de IRI, concluindo que 25,0% dos valores das leituras são superiores a 2,5 m/km. Nesse documento, foi considerada como solução um recapeamento de 25,0% da área da superfície do pavimento da pista de pouso e decolagem.

Tabela 19: Medição da irregularidade longitudinal - 3 metros à esquerda do eixo da pista (GONÇALVES, 2017)

Início (m)	Fim (m)	IRI <sub>5</sub> (m/km)	IRI <sub>4</sub> (m/km)	IRI <sub>3</sub> (m/km)	IRI <sub>2</sub> (m/km)	IRI <sub>1</sub> (m/km)
2400	2515	2,87	2,65	2,07	2,45	2,64
2200	2400	1,77	2,07	1,59	1,90	2,33
2000	2200	1,86	1,88	1,73	1,83	2,25
1800	2000	1,98	2,14	2,27	2,22	2,67
1600	1800	2,32	2,32	2,36	2,15	2,59
1400	1600	2,14	2,11	2,28	2,07	2,46
1200	1400	2,11	1,86	2,18	2,04	2,21
1000	1200	1,99	2,24	2,20	1,78	2,38
800	1000	2,23	2,02	2,48	1,76	2,29
600	800	1,96	2,18	1,89	2,09	2,29
400	600	2,55	2,33	2,46	1,69	2,05
200	400	2,43	2,33	2,58	1,90	2,25
0	200	2,27	2,30	2,30	2,02	2,29

Tabela 20: Medição da irregularidade longitudinal - 3 metros à direita do eixo da pista (GONÇALVES, 2017)

Início (m)	Fim (m)	IRI <sub>1</sub> (m/km)	IRI <sub>2</sub> (m/km)	IRI <sub>3</sub> (m/km)	IRI <sub>4</sub> (m/km)	IRI <sub>5</sub> (m/km)
2400	2515	2,58	2,78	2,49	2,92	3,17
2200	2400	1,86	1,77	1,45	1,50	1,71
2000	2200	2,02	1,75	1,71	1,73	1,80
1800	2000	2,47	2,16	2,32	2,54	2,31
1600	1800	2,26	2,00	2,08	2,21	2,10
1400	1600	3,42	2,69	2,54	3,14	2,97
1200	1400	2,88	2,14	2,22	2,83	2,56
1000	1200	2,28	2,37	1,98	2,12	2,31
800	1000	2,23	2,33	2,09	2,08	2,34
600	800	2,17	2,04	2,28	2,26	2,33
400	600	1,95	2,31	1,94	2,38	2,69
200	400	1,99	2,38	1,89	1,70	1,99
0	200	2,58	2,26	2,42	1,97	2,29

Tabela 21: Medição da irregularidade longitudinal - 6 metros à esquerda do eixo da pista (GONÇALVES, 2017)

Início (m)	Fim (m)	IRI <sub>5</sub> (m/km)	IRI <sub>4</sub> (m/km)	IRI <sub>3</sub> (m/km)	IRI <sub>2</sub> (m/km)	IRI <sub>1</sub> (m/km)
2400	2515	2,95	2,87	2,91	2,31	2,20
2200	2400	2,20	1,98	1,66	1,87	1,97
2000	2200	2,29	1,94	1,67	1,52	1,85
1800	2000	2,79	2,10	1,86	1,78	2,09
1600	1800	2,75	2,40	2,02	2,10	2,34
1400	1600	2,71	2,53	2,07	2,30	2,82
1200	1400	2,28	2,32	1,85	1,98	2,15
1000	1200	2,10	2,74	1,77	2,16	2,39
800	1000	2,01	2,45	1,87	2,67	2,77
600	800	2,19	2,71	2,12	2,05	2,23
400	600	2,78	2,90	2,58	2,30	2,32
200	400	2,20	2,31	1,99	2,06	2,29
0	200	2,21	2,28	1,96	2,15	2,50

Tabela 22: Medição da irregularidade longitudinal - 6 metros à direita do eixo da pista (GONÇALVES, 2017)

Início (m)	Fim (m)	IRI <sub>1</sub> (m/km)	IRI <sub>2</sub> (m/km)	IRI <sub>3</sub> (m/km)	IRI <sub>4</sub> (m/km)	IRI <sub>5</sub> (m/km)
2400	2515	2,52	2,85	1,78	1,74	2,54
2200	2400	2,13	2,08	1,78	1,61	1,89
2000	2200	2,06	2,05	1,57	1,51	2,01
1800	2000	2,42	2,95	2,03	1,95	2,45
1600	1800	2,30	2,62	1,95	2,33	2,94
1400	1600	3,36	3,43	2,58	2,83	3,41
1200	1400	3,10	2,82	2,07	2,55	3,35
1000	1200	2,31	2,66	2,15	2,30	2,67
800	1000	2,22	2,55	2,29	2,37	2,32
600	800	2,14	2,43	2,03	2,20	2,25
400	600	2,70	3,39	2,60	3,52	3,27
200	400	2,01	2,47	1,80	2,37	2,71
0	200	2,38	2,67	2,06	2,38	2,51

INFRAERO (2017a) mediu o coeficiente de atrito na extensão da pista de pouso e decolagem. Os valores individuais resultantes da medição do coeficiente de atrito, sentido cabeceira 16 para 34, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Medição do coeficiente de atrito. Adaptado de Gonçalves (2017)

Distância (m)	6 metros à esquerda	3 metros à esquerda	3 metros à direita	6 metros à direita
100	0,65	0,67	0,64	0,68
200	0,61	0,69	0,56	0,69
300	0,69	0,62	0,71	0,66
400	0,72	0,58	0,76	0,67
500	0,69	0,68	0,83	0,70
600	0,66	0,64	0,84	0,66
700	0,62	0,77	0,78	0,67
800	0,65	0,75	0,75	0,66
900	0,64	0,71	0,65	0,69
1000	0,71	0,75	0,67	0,64
1100	0,63	0,66	0,65	0,65
1200	0,69	0,73	0,60	0,67
1300	0,71	0,72	0,57	0,66
1400	0,71	0,69	0,68	0,60
1500	0,70	0,71	0,71	0,61
1600	0,70	0,66	0,61	0,60
1700	0,72	0,68	0,59	0,66
1800	0,71	0,68	0,70	0,70
1900	0,70	0,71	0,66	0,80
2000	0,75	0,71	0,66	0,77
2100	0,67	0,70	0,67	0,64
2200	0,66	0,71	0,71	0,57
2300	0,64	0,73	0,70	0,61

INFRAERO (2017b) mediu a macrotextura na extensão da pista de pouso e decolagem. Os valores individuais resultantes da medição de macrotextura são apresentados na Tabela 24. A macrotextura foi medida a 3 metros do eixo da pista, sendo a letra “D” correspondente ao lado direito do eixo, enquanto a letra “E”, ao lado esquerdo.

INFRAERO (2016b) efetuou a remoção da borracha. Os registros fotográficos são apresentados na Figura 36.

Tabela 24: Medição da macrotextura. Adaptado de Gonçalves (2017)

Trecho (m)	Lado	Profundidade	Classificação
0	E	0,60	Média
100	D	1,01	Aberta
200	E	1,07	Aberta
300	D	0,93	Aberta
400	E	0,98	Aberta
500	D	1,03	Aberta
600	E	0,89	Aberta
700	D	1,24	Muito aberta
800	E	1,02	Aberta
900	D	0,89	Aberta
1000	E	1,06	Aberta
1100	D	1,21	Muito aberta
1200	E	1,24	Muito aberta
1300	D	1,22	Muito aberta
1400	E	1,61	Muito aberta
1500	D	1,23	Muito aberta
1600	E	1,47	Muito aberta
1700	D	1,35	Muito aberta
1800	E	0,93	Aberta
1900	D	1,07	Aberta
2000	E	0,99	Aberta
2100	D	1,05	Aberta
2200	E	0,82	Aberta
2300	D	0,77	Aberta
2400	E	0,85	Aberta

### 3.7 Avaliação estrutural não-destrutiva

#### 3.7.1 *Failing Weight Deflectometer*

Dynatest (2016b) descreve que o ensaio deflectométrico utilizou o equipamento *Failing Weight Deflectometer Dynatest 8000*, um deflectômetro de impacto projetado para simular o efeito de cargas de roda em movimento.

O ensaio foi realizado com a passagem do veículo em linhas longitudinais à pista, no sentido da cabeceira 16 à 34. Cada linha está localizada a uma distância do eixo da pista, seja 3 m ou 6 m, tanto à esquerda quanto à direita, para cada uma das 2 cargas utilizadas, totalizando 10 passagens.

Para o estudo em questão, foi executado um ensaio por ponto avaliado, e carga dinâmica de 4,1 e 8,2 toneladas. Esta variação tem

Figura 36: Remoção do acúmulo de borracha (INFRAERO, 2016b)



(a) Antes do procedimento



(b) Depois do procedimento

o intuito de verificar o comportamento linear do pavimento sob a aplicação de diferentes níveis de carga, bem como diagnosticar seu comportamento face aos níveis de pressão de carga semelhantes aos das aeronaves (DYNATEST, 2016b).<sup>16</sup>

O Termo de Referência para a elaboração do relatório de avaliação estrutural e funcional das pistas de pouso e decolagem, das pistas de táxi e dos pátios de aeronaves, além da determinação do PCN nos aeroportos da rede INFRAERO, cujo Aeroporto Internacional de João Pessoa fazia parte em 2016, instruiu a execução de dois ensaios por ponto ensaiado, no levantamento deflectométrico, o primeiro com a carga de 4,1 toneladas e o segundo com 8,2 toneladas.<sup>17</sup>

Contudo, os ensaios descritos no Termo de Referência pertencem somente à classe de avaliação estrutural. Para o cálculo do PCN, não são necessárias informações sobre as condições funcionais da pista de pouso e decolagem.

O processo de aquisição das deflexões consiste em submeter o material à uma carga, resultando na curvatura da superfície e na formação de uma bacia de deformação. Nesse contexto, as deflexões em várias distâncias do centro de carga são registradas por meio de sensores (geofones) e armazenadas em um arquivo de dados.

Foram empregados os espaçamentos 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm para os geofones. O primeiro geofone mede a deflexão sob a ação da carga ( $Df_1$ ), o segundo geofone mede a deformação do pavimento a 20 cm do ponto de aplicação da carga ( $Df_2$ ) e assim, sucessivamente.

<sup>16</sup>8,2 toneladas equivalem a aproximadamente 80,4 kN

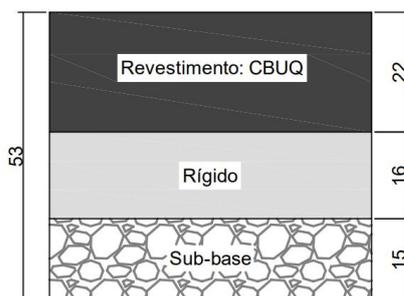
<sup>17</sup>Disponível em <[https://licitacao.infraero.gov.br/arquivos/\\$\\_licitacao/2015/CSBR/085\\$\\_LABR\\$\\_CSBR\\$\\_2015\\$\\_PG-e/X\\$\\_Termo%20de%20Refer%EAncia.pdf](https://licitacao.infraero.gov.br/arquivos/$_licitacao/2015/CSBR/085$_LABR$_CSBR$_2015$_PG-e/X$_Termo%20de%20Refer%EAncia.pdf)>

O raio da placa de aplicação da carga é 15 cm. Em cada ponto de aplicação da carga, é medida a temperatura do ar e a temperatura do pavimento, expressa em °C. A carga aplicada, 4,1 ou 8,2 toneladas, muda ponto a ponto, em função do comportamento do concreto asfáltico face à temperatura. Com o aumento da temperatura, menor é sua rigidez e maior é a força aplicada no ponto, expressa em quilogramas-força. Ao aplicar a carga de 4,1 toneladas (4100 kgf), a força aplicada no ponto pode ser 4517 kgf, 4333 kgf, 4347 kgf, por exemplo.

### 3.7.2 *Ground Penetrating Radar*

Outro ensaio não-destrutivo utilizado foi o GPR. A partir do GPR, é possível obter a estrutura do pavimento da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de João Pessoa, com as espessuras de cada camada, apresentada na Figura 37. O GPR permitiu identificar a presença de materiais metálicos, topos rochosos, tubulações, cabos, cavidades, empilhamento estratigráfico e anomalias em geral.

Figura 37: Estrutura do pavimento da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de João Pessoa (dimensões em cm) (INFRAERO, 2016a)



O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é atualmente denominado concreto asfáltico. Não consta no relatório o tipo de material da sub-base.

## 3.8 Avaliações estruturais semidestrutiva e destrutiva

Conforme recomenda ANAC (2021b), os ensaios não-destrutivos devem ser complementares aos ensaios destrutivos.

Segundo Dynatest (2016a), foram executadas 11 sondagens a trado e 4 ensaios de cone de penetração dinâmica na pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de João Pessoa, em 26 de agosto de 2016, com o intuito de medir as espessuras das camadas do pavimento, além de

coletar amostras para os ensaios de resistência à compressão simples e ensaio Marshall (estabilidade e fluência).<sup>18</sup>

A Figura 38 apresenta os registros fotográficos dos ensaios destrutivos.

Figura 38: Registros fotográficos - ensaios destrutivos (DYNATEST, 2016a)



A resistência do subleito é medida pela penetração em milímetros em comparação com golpes do martelo. INFRAERO (2016a) utilizou a relação empírica entre a resistência à penetração do penetrômetro dinâmico de cone e as medidas de CBR, descrita em Alves (2002). Vários autores obtiveram correlações entre os dois ensaios, sendo escolhido Alves (2002) por ser o modelo matemático que melhor se ajustou aos valores retroanalizados por INFRAERO (2016a).

A relação empírica descrita em Alves (2002) é apresentada na Equação 17.

$$CBR = 79,46 \cdot DN^{-0,82} \quad (15)$$

onde:

*CBR* é o Índice de Suporte Califórnia do subleito;

*DN* é o índice de penetração do cone (mm/golpe).

<sup>18</sup>Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e ensaio Marshall (estabilidade e fluência) não foram detalhados por não fazerem parte do escopo desse trabalho.

O resumo dos valores de CBR para a pista de pouso e decolagem são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25: Resumo de CBR na pista de pouso e decolagem (INFRAERO, 2016a)

Ensaio	Local	DN (mm/golpe)	CBR (%)
CPD-01	Pista km 0,375	12,3	10,2
CPD-02	Pista km 0,960	11,8	10,5
CPD-03	Pista km 1,570	5,3	20,1
CPD-04	Pista km 2,475	5,0	21,3

Foram abertas trincheiras para facilitar o ensaio de CPD, sendo o mesmo iniciado na camada imediatamente subjacente à camada de base com aplicação de golpes até o comprimento total da régua utilizada ser vencida. Portanto, os primeiros golpes até 20 cm em média referem-se a camada de subbase atravessada. De forma a definir o valor de CBR da camada de subleito foram descartados os golpes até 20 cm de penetração referentes a camada de subbase (DYNATEST, 2016a).

### 3.9 Condição de abastecimento das aeronaves

Não foram encontradas informadas em relação à condição de abastecimento das aeronaves no Aeroporto Internacional de João Pessoa em INFRAERO (2016a), Dynatest (2016a) ou Dynatest (2016b), nem no site oficial da administração aeroportuária.

Seguindo o descrito na Seção 2.7, é considerado que há abastecimento, pois se trata de uma situação mais conservadora em termos de peso, isto é, fornece uma relação P/TC maior.

## 4 Método

No presente estudo, a obtenção e organização dos dados são etapas fundamentais para alcançar os objetivos do trabalho. É adotada a abordagem de extração de dados de documentos em *Portable Document Format* (PDF) para planilhas eletrônicas.

A extração de dados é realizada por meio de ferramentas especializadas em conversão de documentos do formato .pdf para o formato .xlsx, quando necessário, garantindo a preservação da estrutura e integridade dos dados originais.

A identificação de defeitos, avaliação funcional e a avaliação estrutural são independentes entre si e podem ser realizadas simultaneamente. A descrição da etapa de diagnóstico de defeitos, antes de outras etapas, é somente para fins de organização da sequência do método.

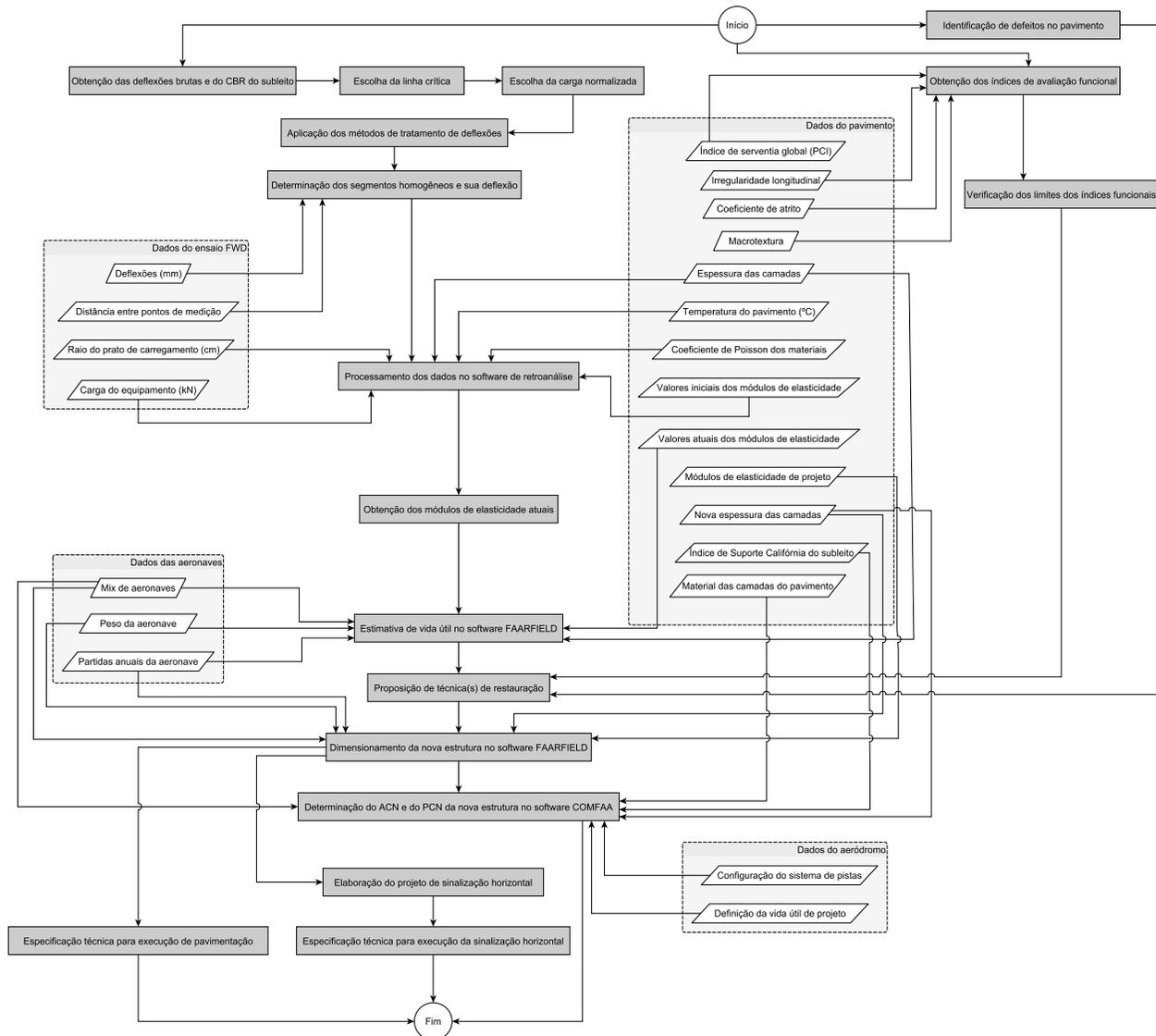
A especificação do projeto de pavimentação não guarda vínculo de dependência com a determinação do ACN-PCN e é descrita após esta etapa somente para fins de organização da sequência do método.

De forma análoga, as etapas de especificação técnica para execução da restauração e elaboração do projeto de sinalização horizontal também podem seguir sequências paralelas.

No contexto deste trabalho, foi feita a opção por processar os dados de deflexão a partir do método de deflexões normalizadas, descrito em FAA (2011), pois ele é mais simples em relação aos demais, sendo de domínio da autora, e por produzir resultados adequados.

As etapas do método estão apresentadas na Figura 39 e detalhadas na sequência deste capítulo.

Figura 39: Fluxograma do método



## 4.1 Identificação de defeitos no pavimento

A partir da consulta ao SEI, são coletadas informações e registros fotográficos da situação atual do pavimento, para identificação de defeitos existentes.

## 4.2 Obtenção dos índices de avaliação funcional

A partir da consulta ao SEI, são obtidos os índices de avaliação funcional PCI, IRI, coeficiente de atrito e macrotextura. Em seguida, esses índices são comparados aos limites impostos por ANAC (2023b). Se algum dos índices estiver fora dos limites, é proposta uma intervenção técnica para corrigir o defeito funcional. Também é verificado se a remoção da borracha foi realizada em conformidade a ANAC (2023b).

## 4.3 Obtenção dos parâmetros de avaliação estrutural

Através da consulta ao SEI, são obtidas as deflexões brutas provenientes dos levantamentos defletoométricos (avaliação estrutural não destrutiva) e o CBR do subleito (avaliação estrutural destrutiva). Se as deflexões não são disponibilizadas em forma de planilha eletrônica, elas são convertidas da extensão .pdf para .xlsx.

## 4.4 Escolha da linha crítica

Deve ser escolhida uma linha de ensaio para desenvolvimento das próximas etapas do método pois a utilização de várias linhas sem processamento computacional pode ser inviável.

A maneira mais rigorosa de trabalhar com as deflexões seria utilizando todas as linhas de ensaio e observar qual delas apresenta os maiores valores de deflexões. Entretanto, desenvolver esse procedimento, a partir de planilhas eletrônicas, é incompatível com o contexto do presente trabalho.

Para escolher a linha crítica entre aquelas em que é realizado o levantamento defletoométrico, é desenvolvido um esquema preliminar exibindo as linhas de ensaios e a posição dos trens de pouso principais de cada aeronave. Com esse esquema, é possível, visualmente, determinar a linha de ensaio crítica, isto é, a mais próxima dos trens de pouso principais das aeronaves.

Em seguida, é realizada uma média ponderada do peso máximo de táxi e da distância entre eixos do trem de pouso, apresentada na Equação 16, com o intuito de determinar a linha de ensaio crítica de forma numérica e objetiva, além da visual.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n (PMT_i \cdot x_i)}{PMT_{total}} \quad (16)$$

onde:

$X$  = distância ponderada ao eixo da pista considerando o PMT de todo o mix;

$PMT_i$  = peso máximo de táxi de cada aeronave do mix;

$x_i$  = distância do eixo do trem de pouso principal até o eixo da pista de pouso e decolagem;

$PMT_{total}$  = soma do peso máximo de táxi de cada aeronave do mix.

O peso máximo de táxi, assim como a distância entre os trens de pouso principais de cada aeronave, foram obtidos a partir da consulta ao manual do fabricante da aeronaves, em razão de ser a fonte oficial das características da aeronaves. Foi observada discrepância entre os valores de distância entre os trens de pouso principais apresentados pelo *software* FAARFIELD e pelos manuais do fabricante, razão que também motivou a escolha pela utilização dos valores que constam nos manuais.

Segundo Ashford, Mumayiz e Wright (2011), o peso máximo de táxi, normalmente, é levemente superior ao máximo permitido para decolagem, garantindo assim que o combustível necessário para esperase deslocamentos não comprometa a carga que pode ser levantada para decolar.

A pressão do pneu informada pelo operador do aeródromo não condiz exatamente com aquela apresentada pelo *software* FAARFIELD para cada aeronave. Não é possível modificar a pressão informada pelo *software* FAARFIELD para aeronaves importadas de sua própria biblioteca, sendo possível alterá-la somente para aeronaves criadas pelo próprio usuário. Durante a execução do método, é escolhido utilizar a pressão informada pelo *software* FAARFIELD, para aeronaves já presentes em sua biblioteca, para evitar a inserção manual de todas as características das aeronaves do mix de tráfego e por se tratar da ferramenta oficial de dimensionamento de pavimentos de aeródromos. Para as aeronaves que, eventualmente, necessitam ser importadas manualmente, é considerada a pressão informada pelo operador do aeródromo, na falta de precisão maior no manual de seus respectivos fabricantes.

Segundo FAA (2022), os pavimentos compostos são, na maioria das vezes, o resultado de sobreposições na superfície do pavimento aplicadas em vários estágios da vida útil da estrutura do pavimento. Se um pavimento for composto, o tipo de pavimento (flexível ou rígido) deve ser descrito como o tipo que reflete com mais precisão o comportamento estrutural do pavimento.

Para FAA (2022), o FAARFIELD considerará que um pavimento rígido sobreposto com flexível é um pavimento rígido até que a espessura do revestimento (flexível) corresponda à espessura do pavimento rígido, além de destacar que é uma boa prática no meio técnico incluir uma nota informando que o pavimento é composto e observar o tipo de revestimento.

Como apresentado na Figura 37, a espessura do revestimento flexível (22 cm) é superior à espessura do pavimento rígido (16 cm). Logo, de acordo com a premissa de FAA (2022), o tipo de pavimento não pode ser considerado como rígido, sendo tratado como flexível ao longo de INFRAERO (2016a).

INFRAERO (2016a) determina o CBR de projeto, isto é, o CBR representativo de toda a pista de pouso e decolagem a partir da distribuição de probabilidade t de *Student*, com 90% de confiabilidade, apresentada na Equação 17.

$$CBR_{projeto} = CBR_{med} - \sigma \cdot \frac{t_{0,90}}{(n-1)^{0,5}} \quad (17)$$

onde:

$CBR_{projeto}$  = Índice de Suporte Califórnia de projeto do subleito;

$CBR_{med}$  = média aritmética dos valores de CBR da Tabela 25;

$\sigma$  = desvio padrão da amostra;

$t_{0,90}$  = coeficiente de *Student* relativo a 90% de confiabilidade, igual a 1,64;

$n$  = número da amostra, igual a 4, conforme apresentado na Tabela 25.

Assim, o CBR de projeto da pista de pouso e decolagem resulta em:

$$CBR_{projeto} = 15,525 - 5,193 \cdot \frac{1,64}{(4-1)^{0,5}} = 10,6\% \quad (18)$$

## 4.5 Escolha da carga normalizada

As deflexões brutas da linha de ensaio crítica determinada devem passar pela normalização de deflexões antes de serem utilizadas no processo de retroanálise.

São escolhidas somente as deflexões no ponto de aplicação da carga, ou  $D_0$ , pois são os maiores valores de deflexão.

A escolha da carga normalizada segue as etapas:

1. escolha da aeronave crítica, a partir do maior valor de CDF no *software* FAARFIELD, entre as aeronaves do mix;
2. determinação da pressão dos pneus da aeronave crítica escolhida;
3. determinação da pressão correspondente exercida pelo equipamento FWD, conforme Tabela 5
4. determinação da carga a ser utilizada no ensaio correspondente à pressão exercida pelo equipamento FWD. Essa carga é a carga normalizada a ser utilizada na Equação 6 para normalização das deflexões obtidas no ensaio realizado.

É escolhida a carga utilizada no ensaio deflectométrico mais próxima da carga normalizada na Equação 6.

Foi utilizada a versão mais atual do *software* FAARFIELD, 2.1.1., até o momento da elaboração do presente trabalho.

## 4.6 Determinação dos segmentos homogêneos

Com a determinação da carga normalizada, é possível determinar os segmentos homogêneos por qualquer um dos 2 métodos de tratamento de dados de deflexão, pois todos os dados estão disponíveis.

Entretanto, o método da média, desvio-padrão e coeficiente de variação é desconsiderado pois é o método menos sofisticado entre os quatro.

Após a aplicação dos métodos e determinação dos segmentos homogêneos correspondentes a cada método, os resultados gráficos são comparados entre si, a fim de determinar quais segmentos homogêneos são utilizados nas etapas seguintes.

## 4.7 Determinação da deflexão do segmento homogêneo

A deflexão do segmento homogêneo é determinada pois reduz o tempo computacional para processamento das bacias de deflexão no *software* utilizado para a retroanálise. Quanto menor o número de deflexões a ser inserido no *software*, menor é o tempo de processamento computacional.

## 4.8 Retroanálise dos módulos de elasticidade

A deflexão característica de cada segmento homogêneo, assim como a espessura e o material das camadas, o módulo de elasticidade inicial das camadas e o coeficiente de Poisson, razão entre a deformação lateral e a deformação longitudinal de um material quando submetido a uma carga, são inseridos no *software* BackMeDina para iniciar o processo de retroanálise e obtenção do módulo de elasticidade atual de cada camada.

Por sua vez, no *software* BAKFAA não é necessária a inclusão das temperaturas do ar e do pavimento, mas a inclusão da profundidade de avaliação, cuja única restrição é ser superior à espessura total do pavimento. É considerada a profundidade de avaliação igual a 63,5 cm, por ser a espessura *default* informada pelo *software*, sendo adequada para a espessura total do pavimento (53 cm).

Uma vez que o *software* BAKFAA, em sua versão mais atual até a data de elaboração do presente trabalho, não permite a inclusão manual das informações relativas às deflexões, aceitando somente a importação de um arquivo com extensão *.fwd*, para possibilitar a importação das deflexões, distância entre geofones, carga e raio do prato de carregamento no *software* BAKFAA, é elaborado um *script* na linguagem de programação Python.

Seu objetivo é converter os dados de entrada utilizados no *software* BackMeDiNa no *software* BAKFAA, gerando como saída um arquivo com extensão .fwd, o qual pode ser adequadamente lido pelo *software* BAKFAA, permitindo a retroanálise do pavimento.

O Anexo B apresenta o *script* utilizado.

#### **4.9 Estimativa da vida útil remanescente do pavimento**

Com o módulo de elasticidade atual de cada camada e suas espessuras, o CBR do subleito, o mix de aeronaves, o peso de táxi de cada aeronave e seu número de partidas anuais, é determinada a vida útil remanescente do pavimento através do módulo “Life/Compaction” do *software* FAARFIELD.

As aeronaves ausentes na biblioteca do *software* FAARFIELD são adicionadas conforme as instruções de FAA (2021).

#### **4.10 Escolha da(s) técnica(s) de restauração**

Com o resultado da identificação de defeitos, da avaliação funcional e da estimativa da vida útil (a partir das etapas vinculadas aos parâmetros da avaliação estrutural, CBR do subleito e deflexões), é (são) proposta(s) técnica(s) de restauração de acordo com a origem do defeito, funcional ou estrutural.

#### **4.11 Dimensionamento da nova estrutura do pavimento**

Definida(s) a(s) técnica(s) de restauração adequada(s) ao tipo de defeito encontrado, a nova estrutura do pavimento é determinada a partir do dimensionamento no módulo “Thickness/Design” do *software* FAARFIELD. Os dados de entrada são o módulo de elasticidade atual de cada camada, as espessuras, o CBR do subleito, o mix de aeronaves, o peso de táxi de cada aeronave e seu número de partidas anuais.

#### **4.12 Determinação do PCN da nova estrutura**

Apesar da existência do novo método PCR, o emprego do método PCN é empregado por ser um método conhecido pelo autor e por ser ainda o método vigente no momento da elaboração deste trabalho.

Com a espessura e o material das novas camadas determinadas pelo *software* FAARFIELD, o CBR do subleito, o mix de aeronaves, a configuração do sistema de pista e o período de vida útil de projeto, o valor numérico do PCN é determinado pelo *software* COMFAA.

#### **4.13 Indicação das especificações técnicas para execução do projeto de pavimentação**

Após o dimensionamento da nova estrutura do pavimento, são indicadas as normas de execução correspondentes aos materiais empregados na estrutura e do tipo de pavimento (flexível ou rígido).

#### **4.14 Elaboração do projeto de sinalização horizontal**

O projeto de sinalização horizontal é desenvolvido através do *software* R-Marking.<sup>19</sup>

Após a elaboração do projeto de sinalização horizontal, são indicadas as normas de execução e utilização de tintas específicas, correspondentes ao tipo de pavimento (flexível ou rígido).

---

<sup>19</sup>Disponível em: <<http://ahcoelho.paginas.ufsc.br/files/2024/03/R-Marking.zip>>

## 5 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados após aplicação do método do trabalho na área de estudo.

### 5.1 Avaliação funcional

Os índices de avaliação funcional aferidos são o *Pavement Condition Index*, a irregularidade longitudinal, o atrito e a macrotextura.

Em relação ao PCI, tanto pela classificação de ASTM (2015) quanto de INFRAERO (2018b), o PCI médio determinado para a pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, igual a 75, é considerado como “Bom”. Ao analisar o PCI mínimo, igual a 62, tal valor seria considerado como “Regular”, em ambas as classificações.

No presente trabalho, é considerado que não são necessárias ações imediatas para aumento do PCI.

As Tabelas 19, 20, 21 e 22 apresentam a irregularidade longitudinal medida ao longo da pista de pouso e decolagem. Após o processamento estatístico dos dados de irregularidade longitudinal, Gonçalves (2017) conclui que, uma vez que o IRI médio é igual a 2,22 m/km à esquerda do eixo da pista e 2,34 m/km à direita, logo, inferiores ao limite imposto por ANAC (2023b) (2,5 m/km), a pista de pouso e decolagem se encontra em condição regular para este índice.

Entretanto, ao analisar os dados brutos da medição de irregularidade longitudinal, sem o processamento estatístico, é possível perceber que alguns valores individuais são superiores a 2,5 m/km, sendo 8% dos valores superiores a 2,5 m/km a 3 metros à esquerda do eixo da pista, 23% a 3 metros à direita do eixo e 31% a 6 metros tanto à esquerda quanto à direita do eixo.

GCA (2018) também corrobora a inconformidade da irregularidade longitudinal em relação a ANAC (2023b).

Dessa forma, tendo em vista a quantidade de valores individuais acima de 2,5 m/km e por entender que a média dos valores medidos não é uma forma adequada de avaliação da conformidade do IRI, é considerado que a pista de pouso e decolagem não atende o limite de 2,5 m/km e, diante desse cenário, requer ação corretiva.

Em relação ao atrito, conforme apresentado na Tabela 23, todos os valores individuais de medição do atrito são superior ao nível mínimo (0,43) e ao nível de manutenção (0,53) para a medição realizada com o equipamento *Grip tester* e velocidade de ensaio igual a 65 km/h.

Portanto, não são necessárias ações corretivas quanto ao atrito e a pista de pouso e decolagem é considerada regular em relação a esse índice.

Quanto à macrotextura, conforme apresentado na Tabela 24, todos os valores individuais de profundidade de macrotextura são iguais ou superiores a 0,60, limite imposto por ANAC (2023b).

A macrotextura é classificada como aberta em 62,50% dos pontos avaliados, como muito aberta em 33,33% e como média em 4,17%. O primeiro e o terceiro terço apresentam valores menores de macrotextura em comparação ao segundo terço, situação esperada devido às operações de pouso das aeronaves ocorrerem com maior frequência nessa região, justamente próximas à zona de toque.

A macrotextura foi avaliada após a remoção do acúmulo de borracha na superfície do revestimento de concreto asfáltico da pista de pouso e decolagem, o que mostra que esta ação não impactou a textura superficial e, nesse sentido, não são necessárias ações corretivas para restauração da textura superficial.

A remoção do acúmulo de borracha foi realizada e, uma vez que a sinalização horizontal foi severamente apagada, conforme apresentado na Figura 36, é recomendada ação corretiva para recuperação da sinalização horizontal da pista de pouso e decolagem.

Logo, com exceção da irregularidade longitudinal, todos os outros índices de avaliação funcional e a remoção da borracha estão em conformidade com ANAC (2023b).

A Tabela 26 apresenta o resumo da avaliação funcional.

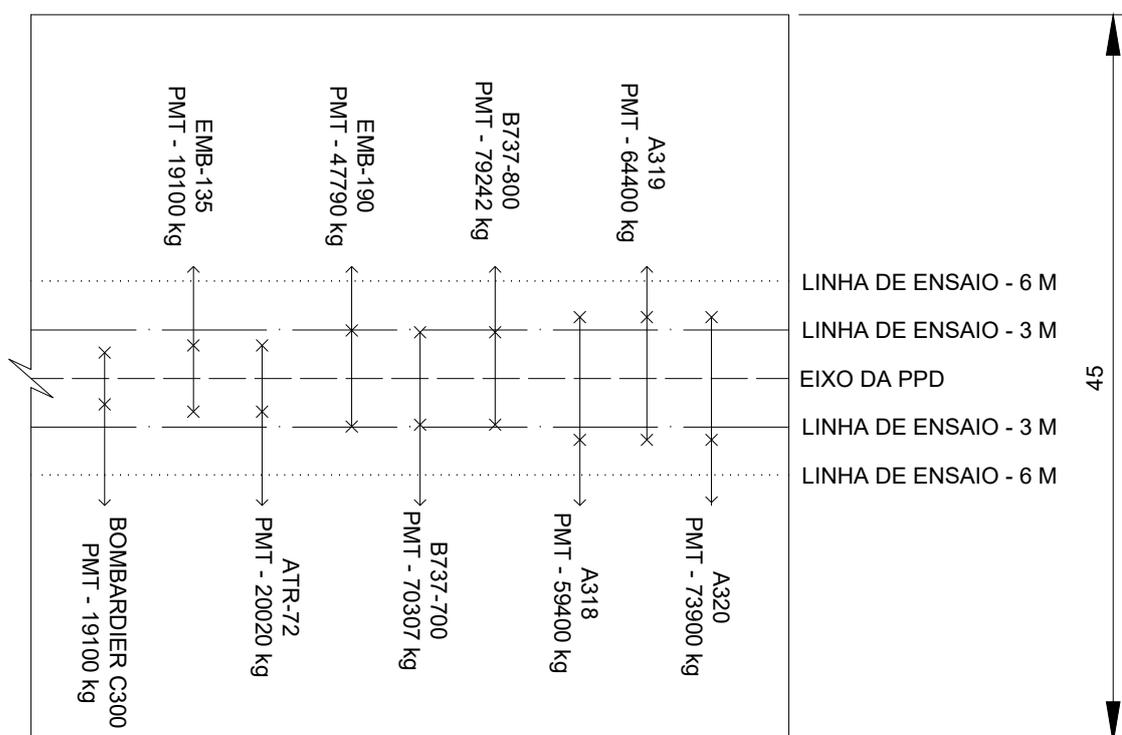
Tabela 26: Resumo da avaliação funcional

Descrição	Conformidade com IS nº 153.205-001 C	Ação corretiva
PCI	Sim	Não requerida
IRI	Não	Fresagem e recomposição de 5 cm de concreto asfáltico convencional
Atrito	Sim	Não requerida
Macrotextura	Sim	Não requerida
Remoção do acúmulo de borracha	Sim	Não requerida

## 5.2 Escolha da linha crítica

Para escolher a linha de ensaio crítica entre as 5 disponíveis (no eixo da pista de pouso e decolagem, 3 metros à esquerda do eixo, 3 metros à direita do eixo, 6 metros à esquerda do eixo e 6 metros à direita do eixo), é elaborado um esquema preliminar, ilustrado na Figura 40, exibindo as linhas de ensaios e a posição dos trens de pouso principais de cada aeronave.

Figura 40: Esquema das posições dos conjuntos de trem de pouso principais das aeronaves e linhas de ensaios (dimensões em metros)



Conforme apresentado em FAA (1975), as aeronaves pousam em relação ao eixo da pista de pouso e decolagem de acordo com a distribuição normal, o que torna as posições dos centros dos grupos de rodas estável, isto é, apesar de variações individuais em cada pouso, essas posições seguem uma distribuição normal e tendem a se concentrar em torno de um valor médio com uma dispersão conhecida. Essa regularidade permite prever, com razoável confiabilidade, a posição na qual a maioria dos grupos de rodas das aeronaves provavelmente estará em relação ao eixo da pista após o pouso.

Portanto, de forma visual, já é possível identificar que as linhas de ensaio mais próximas dos trens de pouso principais de cada aeronave do mix de tráfego são aquelas localizadas a 3 metros à esquerda e a 3 metros à direita do eixo da pista de pouso e decolagem.

Para determinação objetiva da linha de ensaio utilizada nas etapas seguintes, é aplicada a Equação 16, a partir das informações da Tabela 18. A distância ponderada ao eixo da pista, considerando o peso máximo de táxi total do mix de aeronaves é igual a 3,16 metros, corroborando a escolha

preliminar pelas linhas de ensaio situadas a 3 metros à esquerda e a 3 metros à direita do eixo da pista de pouso e decolagem.

### 5.3 Tratamento dos dados de deflexão

Para determinação da carga normalizada, o mix de tráfego é incluído no *software* FAARFIELD.

As aeronaves do mix de tráfego ausentes da biblioteca do FAARFIELD, ATR-72 (ATR, 1999) e Bombardier Challenger 300 (BOMBARDIER, 2008) são adicionadas no *software* FAARFIELD conforme as instruções de FAA (2021), com o auxílio das informações presentes no manual do fabricante, como *User Defined Aircraft* (UDA).

Entretanto, os manuais do fabricante de ambas as aeronaves não informam a distância entre os dois pneus do trem de pouso principal. É informada apenas a distância entre os eixos do trem de pouso. Visto que a distância entre pneus é necessária para a correta inserção das aeronaves no *software* FAARFIELD, essa informação foi extraída de fontes alternativas.

A Figura 41 apresenta as dimensões do Bombardier Challenger 300. É possível observar que somente a medida 3,20 metros, ou seja, a distância entre eixos do trem de pouso principal, é informada. Por sua vez, a Figura 42, a qual ilustra as dimensões do A320, apresenta tanto a distância entre eixos, 24,90 metros, quando a distância entre pneus, 0,93 metros.

Figura 41: Dimensões do Bombardier Challenger 300 (BOMBARDIER, 2008)

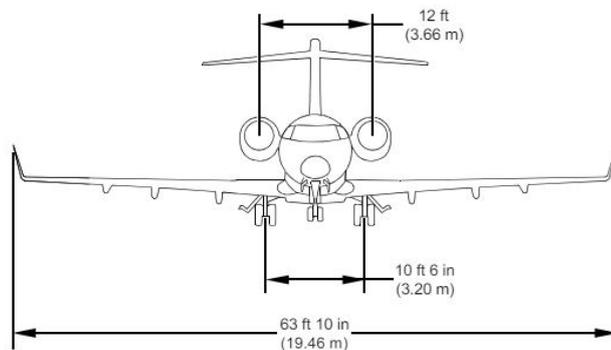
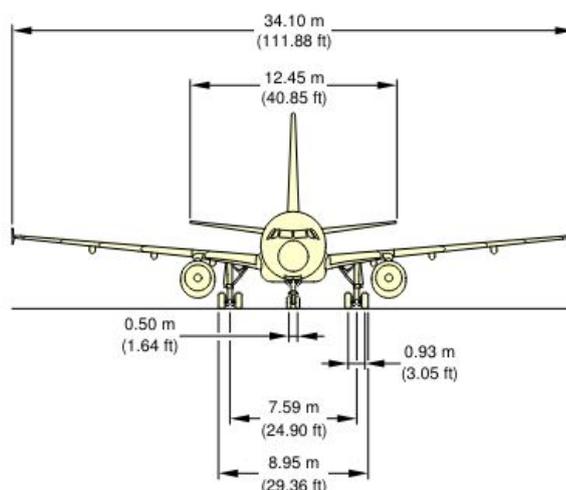


Figura 42: Dimensões do A320 (AIRBUS, 2005a)



FAA (1995) detalha as configurações dos eixos do trem pouso, das áreas de contato dos pneus e das pressões dos pneus, as quais podem ser relacionadas com o peso bruto da aeronave (*gross weight*).

This chapter covers pavement design for airports serving aircraft with gross weights of 30,000 pounds (13 000 kg) or more. Chapter 5 is devoted to the design of pavements serving lighter aircraft with gross weights under 30,000 pounds (13 000 kg) (FAA, 1995).

Para aeronaves cujo peso bruto é igual ou superior a 13.000 kg<sup>20</sup>, são apresentadas as considerações da Tabela 27.

FAA (1995) se trata de uma *Advisory Circular* cancelada, substituída por novas versões, até a atual FAA (2021). Nas *Advisory Circulars* posteriores a de 1995, não é mencionada a Tabela 27 nem quaisquer informações sobre formas de determinação da distância entre eixos dos pneus do trem de pouso.

As aeronaves que precisaram ser incluídas manualmente no *software* FAARFIELD são aeronaves de aviação geral e de menor participação no mix de tráfego, portanto, de menor impacto na determinação do CDF e, posteriormente, na vida útil do pavimento. Nesse contexto, a autora escolheu utilizar o espaçamento informado por FAA (1995), apesar de seu cancelamento, por se tratar da fonte mais oficial encontrada sobre o tema.

<sup>20</sup>O peso bruto das aeronaves do mix não é informado nas referências consultadas. O peso máximo de táxi de todas as aeronaves do mix de tráfego, informado pelo manual do fabricante ou pelo *software* FAARFIELD é igual ou superior a 19.100 kg.

Tabela 27: Considerações sobre o eixo de aeronaves de peso bruto superior a 13.000 kg. Adaptado de FAA (1995)

Tipo de eixo	Considerações
Simples	Nenhuma consideração especial foi feita.
Duplo	Considerado espaçamento de 0,51 m entre os eixos dos pneus
Duplo Tandem	Considerado espaçamento de 0,76 m entre o centro das rodas duplas e espaçamento de 1,40 m entre os eixos tandem.
Aeronaves de fuselagem larga ( <i>wide body</i> )	Devido à diferença entre os trens de pouso dessas aeronaves, como o B 747, DC-10 e o L-101 1, houve a necessidade de desenvolvimento de ábacos de dimensionamento específicos.

Portanto, para as aeronaves ATR-72 e Bombardier Challenger 300, ambas de eixo duplo e peso máximo de táxi superior a 13.000 kg, é considerado o espaçamento de 0,51 m entre os eixos dos pneus, para inserção da aeronave no *software* FAARFIELD.

Após inclusão do mix de tráfego, da estrutura do pavimento, com as respectivas espessuras e CBR de projeto do subleito, do período de projeto, definido em 50 anos por ser o limite superior do *software*, é escolhido o tipo de pavimento *HMA Overlay on Rigid*, a qual, segundo FAA (2021), se trata do modo de análise na qual há sobreposição de uma camada de concreto asfáltico sobre placas de concreto de cimento Portland.

O item "SCI", conforme indicado por FAA (2021), é definido em 80, por ser a definição de FAA de falha estrutural de um pavimento rígido e por ser inferior a 100. O item "CDFU" é igual a 100, o qual representa a porcentagem estimada da vida de fadiga de um pavimento já consumida.

Ao processar a estrutura no modo *Thickness Design*, a espessura do revestimento de concreto asfáltico foi reduzida de 22 para 16 centímetros, indicando que para o período de projeto e mix de tráfego considerados, a estrutura atual estaria superdimensionada.

A Tabela 28 apresenta os valores de CDF por aeronave. A aeronave que resultou no maior valor de CDF foi o A320-200, também de maior participação do mix. As aeronaves cujo CDF é igual a 0 apresentam menores participações no mix de tráfego, conforme apresentado na Tabela 17.

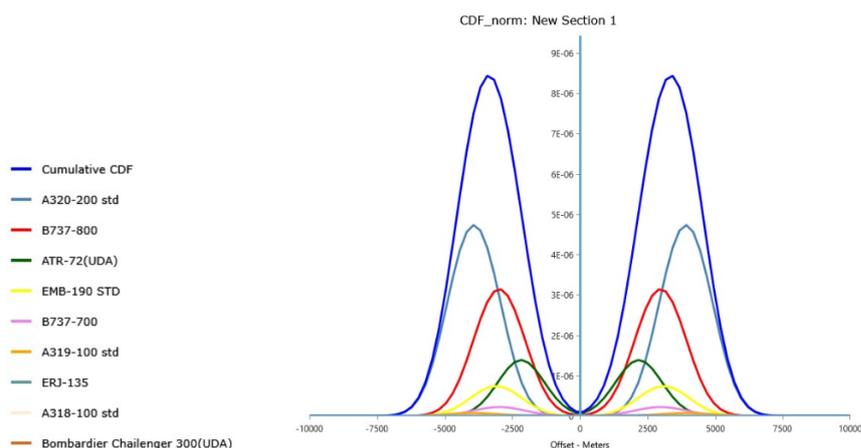
A Figura 43 apresenta o gráfico com os valores de CDF<sup>21</sup>, exibindo a contribuição de cada aeronave assim como o CDF acumulado. É possível perceber que a zona crítica está situada na posição do trem de pouso de cada aeronave.

<sup>21</sup>Resultado de processamento no *software* FAARFIELD.

Tabela 28: Fator de dano acumulado por aeronave

Aeromave	Fator de dano acumulado
A320-200	0,49
B737-800	0,33
EMB-190	0,08
ATR-72	0,06
B737-700	0,02
A319-100	0,01
ERJ-135	0
A318-100	0
Bombardier C300	0

Figura 43: Gráfico de CDF - contribuições individual e acumulada



A pressão dos pneus do A320-200, informada pelo *software* FAARFIELD é igual a 1378,95 kPa. Considerando o uso do equipamento FWD no levantamento deflectométrico e para simular a pressão desta aeronave, é necessária a aplicação de pressão superior ou igual. De acordo com a Tabela 5, a carga utilizada para simular a pressão exercida de 1698 kPa é de 120 kN.

Em razão do princípio da linearidade entre cargas e deflexões, tanto a carga de 80 kN quanto a carga de 40 kN poderiam ser utilizadas durante o processo de normalização de deflexões. É escolhida a carga de 80 kN, por ser a mais próxima da carga normalizada (120 kN).

Portanto, a partir do Método de FAA (2011), todas as deflexões, de  $D_0$  a  $D_7$ , das linhas de ensaio escolhidas, são multiplicadas pelo fator resultante da razão entre a carga normalizada, igual a 120 kN, e a carga efetivamente aplicada no ensaio.

Para aplicação do Método das Diferenças Acumuladas da AASHTO (1993), são consideradas somente as deflexões  $D_0$ , no ponto de aplicação da carga e, portanto, as máximas deflexões entre os 7 geofones.

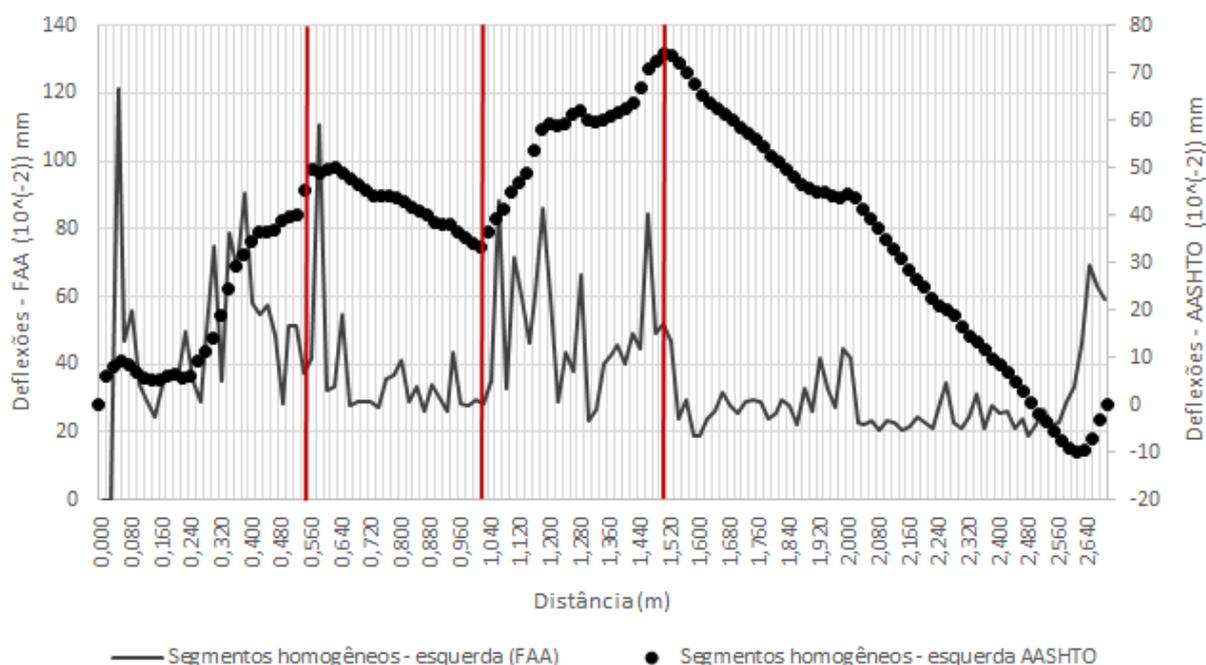
As deflexões são organizadas da mesma forma apresentada na Tabela 45, sendo determinadas a deflexão média, a área entre estações, a área acumulada, a distância acumulada, a tangente do ângulo alpha e a diferença acumulada, conforme Equações 7, 8, 9, 10, 12 e 11, respectivamente.

## 5.4 Determinação dos segmentos homogêneos

A determinação dos segmentos homogêneos é realizada a partir da análise visual dos gráficos gerados entre a deflexão normalizada pela distância, no Método de FAA (2011) e entre a diferença acumulada pela distância, no Método de AASHTO (1993).

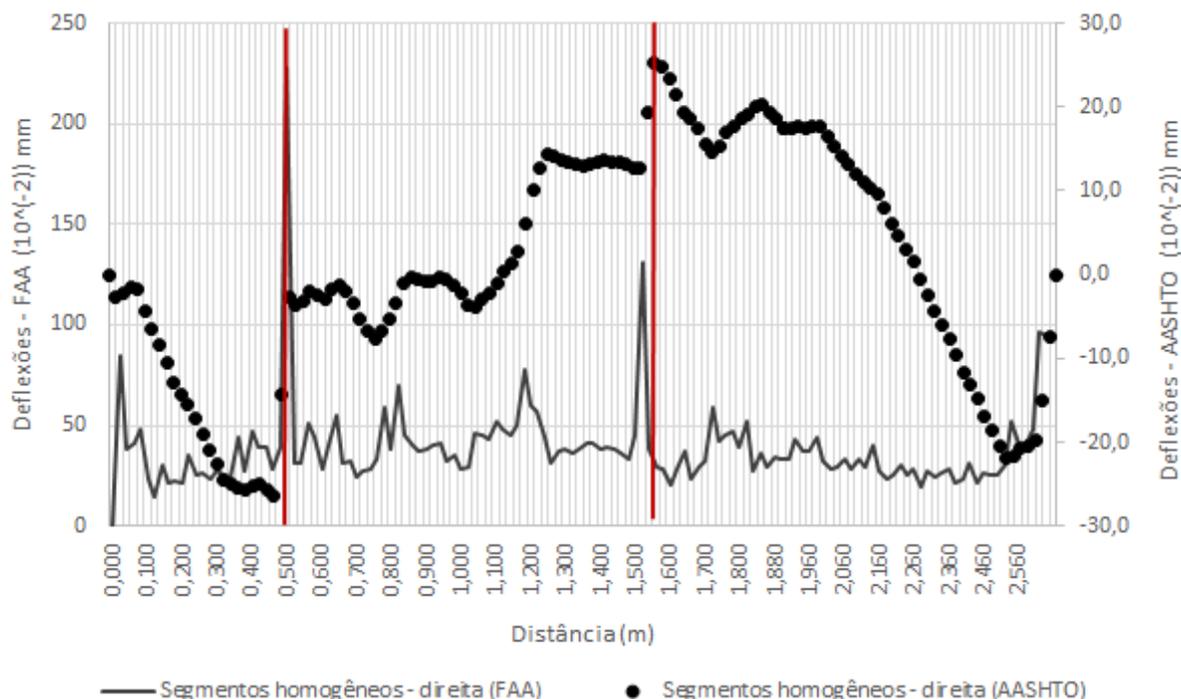
A Figura 44 apresenta os 4 segmentos homogêneos determinados para a linha de ensaio situada a 3 metros à esquerda do eixo, abreviada para 3E, para simplificação.

Figura 44: Segmentos homogêneos - linha de ensaio 3E



A Figura 45 apresenta os 3 segmentos homogêneos determinados para a linha de ensaio situada a 3 metros à direita do eixo, abreviada para 3D, para simplificação.

Figura 45: Segmentos homogêneos - linha de ensaio 3D



Uma vez que a determinação dos segmentos homogêneos é feita de forma visual, não é incomum que a quantidade de segmentos homogêneos de um lado da pista seja diferente da quantidade do outro lado, dependendo de como o projetista deseja proceder sua análise.

É possível observar que os segmentos homogêneos definidos tanto pelo primeiro quanto pelo segundo método apresentados, em ambas as linhas de ensaio, coincidem, evidenciando que qualquer um dos dois métodos poderia ser utilizado nas etapas seguintes do trabalho.

São utilizadas as deflexões normalizadas pelo Método de FAA (2011), por ser um método que considera a carga normalizada definida através do órgão regulamentador do setor, ANAC, que indica a carga mais adequada a ser utilizada no equipamento de ensaio.

Além da coincidência dos segmentos homogêneos, a posição dos *outliers*, isto é, dados que se diferenciam drasticamente de todos os outros, também é a mesma.

Existem *outliers*, sobretudo, nos bordos da pista, ocorrência que pode ser explicada por duas razões:

- os bordos da pista ou, o início/fim da pista, são, geralmente, zonas de transição entre pavimentos, por exemplo, entre o pavimento flexível e o terreno natural, podendo indicar uma área de concentração de tensões proveniente da aplicação da carga do ensaio;
- além disso, os bordos são áreas de menor utilização da pista, uma vez que as aeronaves, em condições normais, não realizam o pouso exatamente na borda, visto que a zona de toque

se localiza mais adiante. Ao aplicar a carga de ensaio, aquela que deve simular a pressão da aeronave, o pavimento passar por uma etapa de “consolidação” da carga, apresentando maiores deflexões visto que não se trata de sua situação comum de carregamento. Ou seja, essas áreas podem ter deflexões que não representam a condição real de tráfego da pista, sendo traduzidas como valores extremos de deflexão quando comparados às medidas no centro da pista.

## 5.5 Determinação da deflexão de cada segmento homogêneo

O primeiro segmento homogêneo da linha 3E, abreviado para S1E e definido entre 0,00 e 0,54 km, compreende **28 valores de deflexão**. Logo, segundo a Tabela 7, uma vez que  $n$  é superior a 20,  $Z$  é igual a 3,0, portanto o limite superior é determinado pela média mais 3 vezes o desvio-padrão e o limite inferior, a média menos 3 vezes o desvio-padrão. São determinados a média das deflexões do segmento, o desvio-padrão, os limites de aceitação e a quantidade de valores individuais enquadrados nesse limite, apresentados na Tabela 29.

Tabela 29: Deflexão S1E - inicial

Descrição	Média do segmento ( $10^{-2}$ mm)	Desvio-padrão ( $10^{-2}$ mm)	Limite inferior ( $10^{-2}$ mm)	Limite superior ( $10^{-2}$ mm)	Valores individuais dentro do limite de aceitação
$D_0$	52,5	23,7	-18,7	123,6	28,0
$D_{20}$	39,6	17,5	-12,8	91,9	27,0
$D_{30}$	30,9	12,8	-7,4	69,1	27,0
$D_{45}$	29,1	11,1	-4,0	62,3	27,0
$D_{60}$	24,7	9,8	-4,6	54,0	28,0
$D_{90}$	16,1	6,7	-4,1	36,2	28,0
$D_{120}$	14,4	5,9	-3,4	32,2	28,0

É aplicado o mesmo procedimento para as temperaturas do ar e do pavimento, dados de entrada para a retroanálise no BackMeDiNa. Os resultados são apresentados na Tabela 30.

Como não houve redução nos valores enquadrados nos limites superior e inferior, é possível utilizar a média das temperaturas na retroanálise.

É observada uma redução da quantidade inicial dos valores de deflexão  $D_{20}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{45}$ , que eram 28, para os valores que se enquadram nos limites superior e inferior, que totalizam 27. Essa redução se deve à exclusão dos valores *outliers*, observados nos gráficos de segmentos homogêneos, que

Tabela 30: Deflexão S1E - 1º tratamento

Descrição	Média do segmento (10 <sup>-2</sup> mm)	Desvio-padrão (10 <sup>-2</sup> mm)	Limite inferior (10 <sup>-2</sup> mm)	Limite superior (10 <sup>-2</sup> mm)	Valores individuais dentro do limite de aceitação
Temperatura do ar	24,0	0,0	24,0	24,0	28,0
Temperatura do pavimento	29,6	0,6	27,9	31,3	28,0

não devem ser considerados para determinação da deflexão que representa o segmento homogêneo, aquela que, posteriormente, é utilizada na retroanálise.

Após a exclusão dos *outliers*, são novamente determinados a média das deflexões do segmento, o desvio-padrão, os limites de aceitação e a quantidade de valores individuais enquadrados nesse limite, somente para as deflexões  $D_{20}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{45}$ , uma vez que as outras deflexões já haviam se enquadrado nos limites inicialmente fixados. Os resultados desse 2º tratamento são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31: Deflexão S1E - 2º tratamento

Descrição	Média do segmento (10 <sup>-2</sup> mm)	Desvio-padrão (10 <sup>-2</sup> mm)	Limite inferior (10 <sup>-2</sup> mm)	Limite superior (10 <sup>-2</sup> mm)	Valores individuais dentro do limite de aceitação
$D_{20}$	37,5	14,0	-4,4	79,4	27,0
$D_{30}$	29,2	9,6	0,5	57,9	27,0
$D_{45}$	27,9	9,0	0,7	55,0	27,0

Como não houve redução da quantidade de valores antes do tratamento para após o tratamento, significa que todos os valores após o 2º tratamento se enquadram nos novos limites inferior e superior determinados. Portanto, todos os valores podem ser considerados na retroanálise.

As deflexões utilizadas na retroanálise são a média de cada deflexão ( $D_0$ ,  $D_{20}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{45}$ ,  $D_{60}$ ,  $D_{90}$  e  $D_{120}$ ), em micrômetros, no momento em que todos os valores individuais de cada deflexão são enquadrados nos limites superior e inferior determinados. Além dessas deflexões, são incluídos

a carga utilizada no ensaio (kgf), o raio do prato de carregamento (cm), as temperaturas do ar e do pavimento (°C) e a distância entre os geofones (cm).

A distância entre os geofones é relacionada ao número presente na nomenclatura da deflexão. Por exemplo, a  $D_0$  está localizada a 0 cm do ponto de aplicação da carga, isto é, é o próprio ponto, a  $D_{20}$  está localizada a 20 cm do ponto de aplicação da carga, a  $D_{30}$  a 30 cm, e assim por diante para as outras deflexões.

Os resultados do tratamento estatístico de deflexões para o S1E são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32: Resultados tratamento estatístico - S1E

Descrição	Valor	Unidade
$D_0$	525,0	$\mu\text{m}$
$D_{20}$	375,0	$\mu\text{m}$
$D_{30}$	292,0	$\mu\text{m}$
$D_{45}$	279,0	$\mu\text{m}$
$D_{60}$	247,0	$\mu\text{m}$
$D_{90}$	161,0	$\mu\text{m}$
$D_{120}$	144,0	$\mu\text{m}$
Carga	12236,6	kgf
Raio	15,0	cm
Temperatura do ar	24,0	°C
Temperatura do pavimento	29,6	°C

É aplicado o mesmo procedimento para os outros 6 segmentos homogêneos: determinação da média das deflexões do segmento, do desvio-padrão, dos limites de aceitação até que todos os valores individuais estejam dentro desses limites, momento em que se toma a média determinada para uso na retroanálise. A carga aplicada e o raio de carregamento utilizado são dados do equipamento de ensaio, sendo igual para todos os segmentos.

As Tabelas 33, 34, 35, 36, 37 e 38 apresentam os dados de entrada no *software* BackMeDiNa, respectivamente, para o segundo segmento da linha da esquerda, S2E, terceiro segmento da linha da esquerda, S3E, quarto segmento da linha da esquerda, S4E, primeiro segmento da linha da direita, S1D, segundo segmento da linha da direita, S2D e terceiro segmento da linha da direita, S3D.

Bernucci et al. (2022) apresenta exemplos de valores típicos de deflexão máxima, ainda que sua ordem de grandeza dependa das características da estrutura, tipo de revestimento, nível de trincamento e condições climáticas. Para pavimentos flexíveis novos com base granular, a deflexão máxima se situa entre 30 a 50 ( $\times 10^{-2}$  mm), para pavimentos com revestimento de tratamento superficial, na ordem de 80 ( $\times 10^{-2}$  mm) e para pavimentos flexíveis com base ou sub-base cimentadas, da ordem de 10 a 30 ( $\times 10^{-2}$  mm).

Tabela 33: Resultados tratamento estatístico - S2E

Descrição	Valor	Unidade
$D_0$	315,0	$\mu\text{m}$
$D_{20}$	249,0	$\mu\text{m}$
$D_{30}$	191,0	$\mu\text{m}$
$D_{45}$	194,0	$\mu\text{m}$
$D_{60}$	172,0	$\mu\text{m}$
$D_{90}$	117,0	$\mu\text{m}$
$D_{120}$	108,0	$\mu\text{m}$
Temperatura do ar	24,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura do pavimento	29,8	$^{\circ}\text{C}$

Tabela 34: Resultados tratamento estatístico - S3E

Descrição	Valor	Unidade
$D_0$	492,0	$\mu\text{m}$
$D_{20}$	409,0	$\mu\text{m}$
$D_{30}$	325,0	$\mu\text{m}$
$D_{45}$	331,0	$\mu\text{m}$
$D_{60}$	291,0	$\mu\text{m}$
$D_{90}$	200,0	$\mu\text{m}$
$D_{120}$	185,0	$\mu\text{m}$
Temperatura do ar	24,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura do pavimento	30,0	$^{\circ}\text{C}$

Tabela 35: Resultados tratamento estatístico - S4E

Descrição	Valor	Unidade
$D_0$	252,0	$\mu\text{m}$
$D_{20}$	188,0	$\mu\text{m}$
$D_{30}$	135,0	$\mu\text{m}$
$D_{45}$	117,0	$\mu\text{m}$
$D_{60}$	89,0	$\mu\text{m}$
$D_{90}$	51,0	$\mu\text{m}$
$D_{120}$	44,0	$\mu\text{m}$
Temperatura do ar	24,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura do pavimento	30,2	$^{\circ}\text{C}$

Tabela 36: Resultados tratamento estatístico - S1D

Descrição	Valor	Unidade
$D_0$	309,0	$\mu\text{m}$
$D_{20}$	240,0	$\mu\text{m}$
$D_{30}$	190,0	$\mu\text{m}$
$D_{45}$	180,0	$\mu\text{m}$
$D_{60}$	156,0	$\mu\text{m}$
$D_{90}$	100,0	$\mu\text{m}$
$D_{120}$	90,0	$\mu\text{m}$
Temperatura do ar	22,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura do pavimento	27,8	$^{\circ}\text{C}$

Tabela 37: Resultados tratamento estatístico - S2D

Descrição	Valor	Unidade
$D_0$	397,0	$\mu\text{m}$
$D_{20}$	324,0	$\mu\text{m}$
$D_{30}$	261,0	$\mu\text{m}$
$D_{45}$	251,0	$\mu\text{m}$
$D_{60}$	228,0	$\mu\text{m}$
$D_{90}$	152,0	$\mu\text{m}$
$D_{120}$	137,0	$\mu\text{m}$
Temperatura do ar	22,3	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura do pavimento	28,9	$^{\circ}\text{C}$

Tabela 38: Resultados tratamento estatístico - S3D

Descrição	Valor	Unidade
$D_0$	323,0	$\mu\text{m}$
$D_{20}$	218,0	$\mu\text{m}$
$D_{30}$	149,0	$\mu\text{m}$
$D_{45}$	117,0	$\mu\text{m}$
$D_{60}$	91,0	$\mu\text{m}$
$D_{90}$	56,0	$\mu\text{m}$
$D_{120}$	44,0	$\mu\text{m}$
Temperatura do ar	23,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura do pavimento	30,1	$^{\circ}\text{C}$

A maior deflexão resultante do tratamento estatístico é 52,5 ( $\times 10^{-2}$  mm) e a maioria das deflexões se situam entre 10 e 52,5 ( $\times 10^{-2}$  mm), valores condizentes devido à presença do concreto de cimento Portland e por se tratar de um pavimento de aproximadamente 75 anos.

## 5.6 Retroanálise dos módulos de elasticidade

Uma vez que o *software* BackMedina é utilizado para retroanálises de pavimentos flexíveis, não há a opção de descrever as placas de concreto de cimento Portland, sendo necessário compatibilizar essa camada com uma das descrições existentes na ferramenta. São realizadas duas análises: a primeira descreve a camada rígida como camada granular e a segunda, a descreve como camada estabilizada.

Os módulos de elasticidade iniciais e os respectivos coeficientes de Poisson, adotados pelo projetista como os indicados pelo *software* BackMeDiNa, são informados na Tabela 39. Uma vez que não há sobreposição de camada asfáltica sobre camada asfáltica, a condições de aderência entre as camadas é “Não aderido” para todas as retroanálises.

Tabela 39: Módulos de elasticidade iniciais e coeficientes de Poisson - BackMeDiNa

Descrição	Módulo de elasticidade inicial	Coefficiente de Poisson
Camadas asfálticas	5000	0,30
Camadas granulares	400	0,40
Camadas estabilizadas	12000	0,20
Subleito	150	0,45

De forma análoga ao *software* BackMeDiNa, também são realizadas duas análises no *software* BAKFAA: a primeira é a retroanálise utilizando os materiais pertencentes à biblioteca do programa, que inclui automaticamente seu módulo de elasticidade inicial e seu coeficiente de Poisson, a segunda é a retroanálise utilizando o material definido pelo usuário, ou “User Defined”, que permite a definição manual desses parâmetros.

É considerado um subleito de resistência média, uma vez que não são encontradas informações sobre a resistência inicial de projeto do subleito.

Os módulos de elasticidade iniciais e os respectivos coeficientes de Poisson, adotados pelo projetista no *software* BAKFAA, são informados na Tabela 40.

Os resultados da retroanálise são apresentados em função do erro entre a bacia deflectométrica real (medida no ensaio) e a bacia deflectométrica calculada pelo *software* utilizado na retroanálise e de acordo com a camada da estrutura do pavimento.

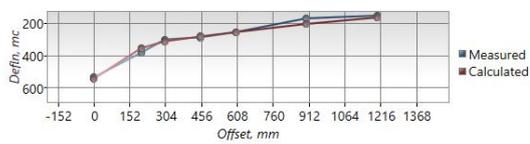
Tabela 40: Módulos de elasticidade iniciais e coeficientes de Poisson - BAKFAA

Material	Módulo de elasticidade inicial (biblioteca do programa) (MPa)	Módulo de elasticidade inicial (definido pelo usuário) (MPa)	Coefficiente de Poisson
<i>P-401/P-403 HMA Surface</i>	1379	5000	0,35
<i>P-501 PCC Surface</i>	27560	27560	0,20
<i>P-154 Uncrushed Aggregate</i>	276	400	0,40
<i>Medium Strength Subgrade</i>	100	150	0,45

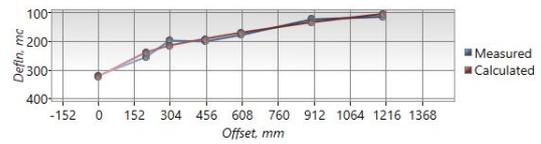
### 5.6.1 Diferença entre bacias deflectométricas medidas e retroanalizadas – Erro quadrático médio

As bacias deflectométricas medidas e calculadas na retroanálise realizada no *software* BAKFAA são apresentadas nas Figuras 46 e 47.

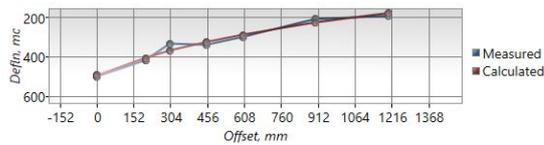
Figura 46: Bacias deflectométricas - BAKFAA, "User Defined"



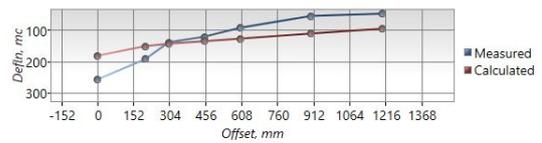
(a) S1E



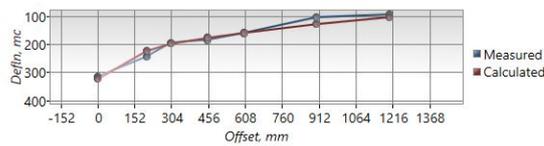
(b) S2E



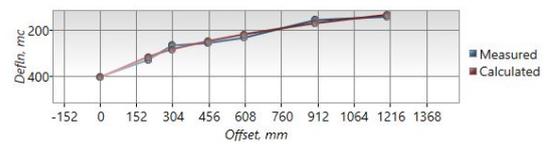
(c) S3E



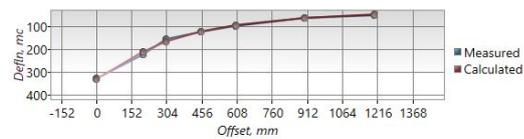
(d) S4E



(e) S1D

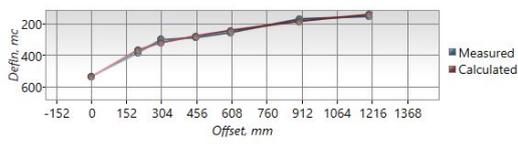


(f) S2D

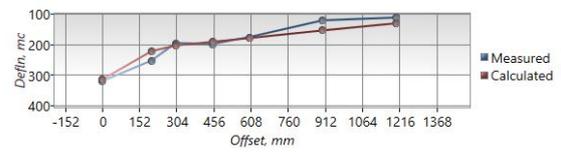


(g) S3D

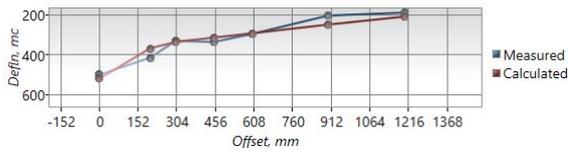
Figura 47: Bacias deflectométricas - BAKFAA, materiais da biblioteca



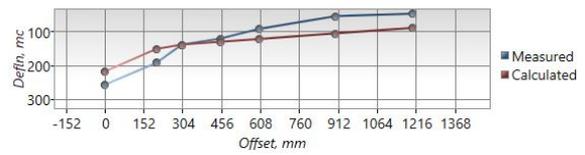
(a) S1E



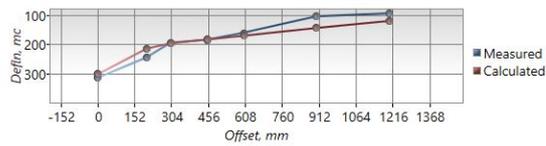
(b) S2E



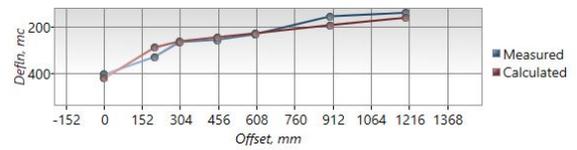
(c) S3E



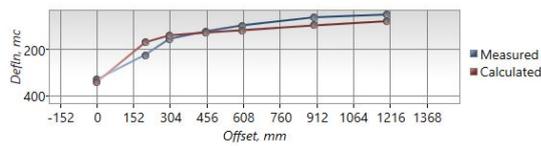
(d) S4E



(e) S1D



(f) S2D



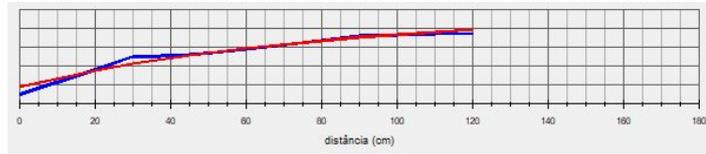
(g) S3D

Há redução do coeficiente de Poisson utilizado no subleito, 0,45, para 0,40 após a retroanálise realizada a partir dos materiais da biblioteca do programa. O *software* ajusta o coeficiente de Poisson, de forma que este seja compatível com o tipo de subleito escolhido, *Medium Strength*.

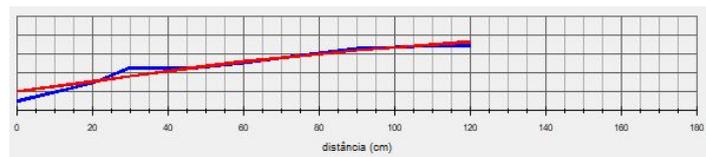
Visualmente, é possível perceber que as bacias deflectométricas calculadas resultantes da retroanálise com os materiais escolhidos da biblioteca do *software* BAKFAA são mais distantes das bacias deflectométricas reais, em comparação às bacias deflectométricas calculadas e reais resultantes da retroanálise com os materiais escolhidos pelo usuário, as quais são mais próximas, indicando uma correlação adequada na retroanálise.

As bacias deflectométricas medidas e calculadas na retroanálise realizada no *software* BackMe-DiNa são apresentadas nas Figuras 48 e 49. A curva vermelha é a bacia deflectométrica calculada, enquanto a curva azul é a bacia deflectométrica real.

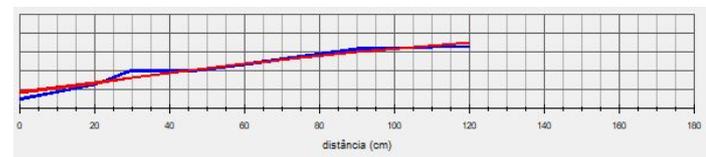
Figura 48: Bacias deflectométricas - BackMeDiNa, granular



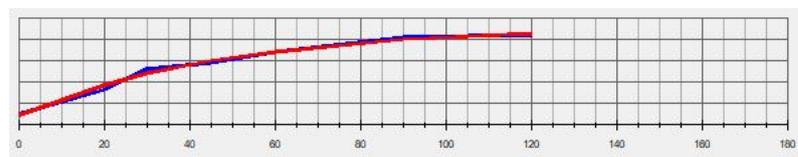
(a) S1E



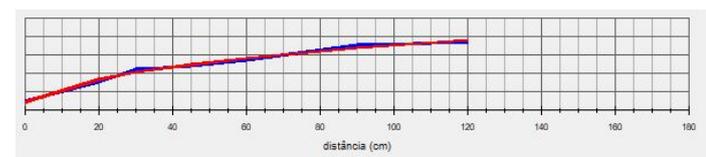
(b) S2E



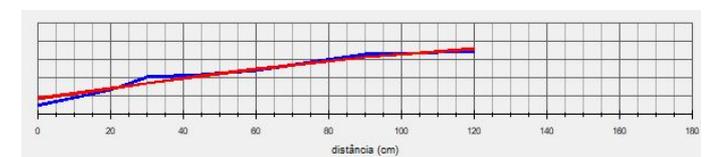
(c) S3E



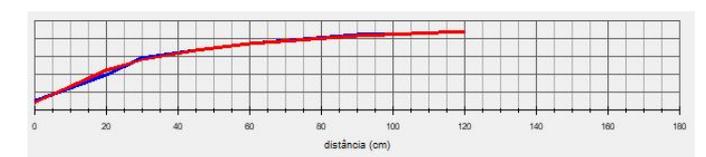
(d) S4E



(e) S1D

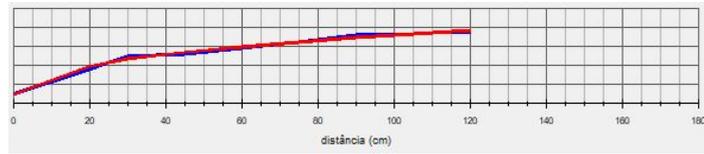


(f) S2D

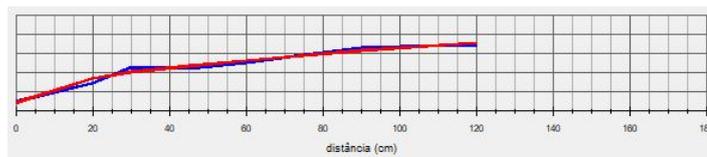


(g) S3D

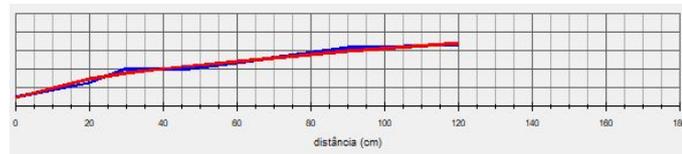
Figura 49: Bacias defletoométricas - BackMeDiNa, estabilizada



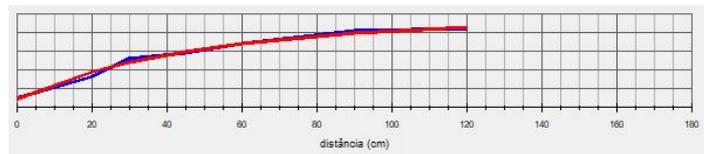
(a) S1E



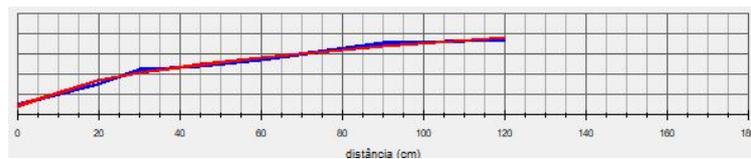
(b) S2E



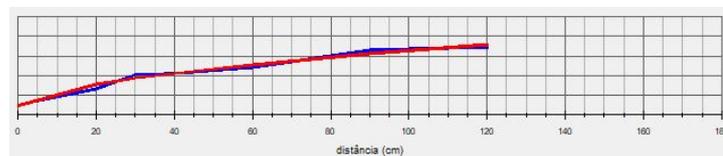
(c) S3E



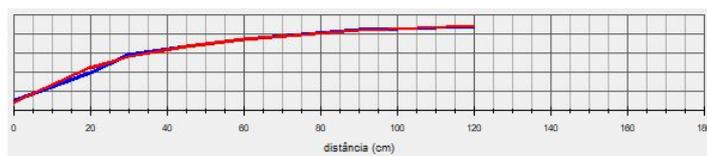
(d) S4E



(e) S1D



(f) S2D



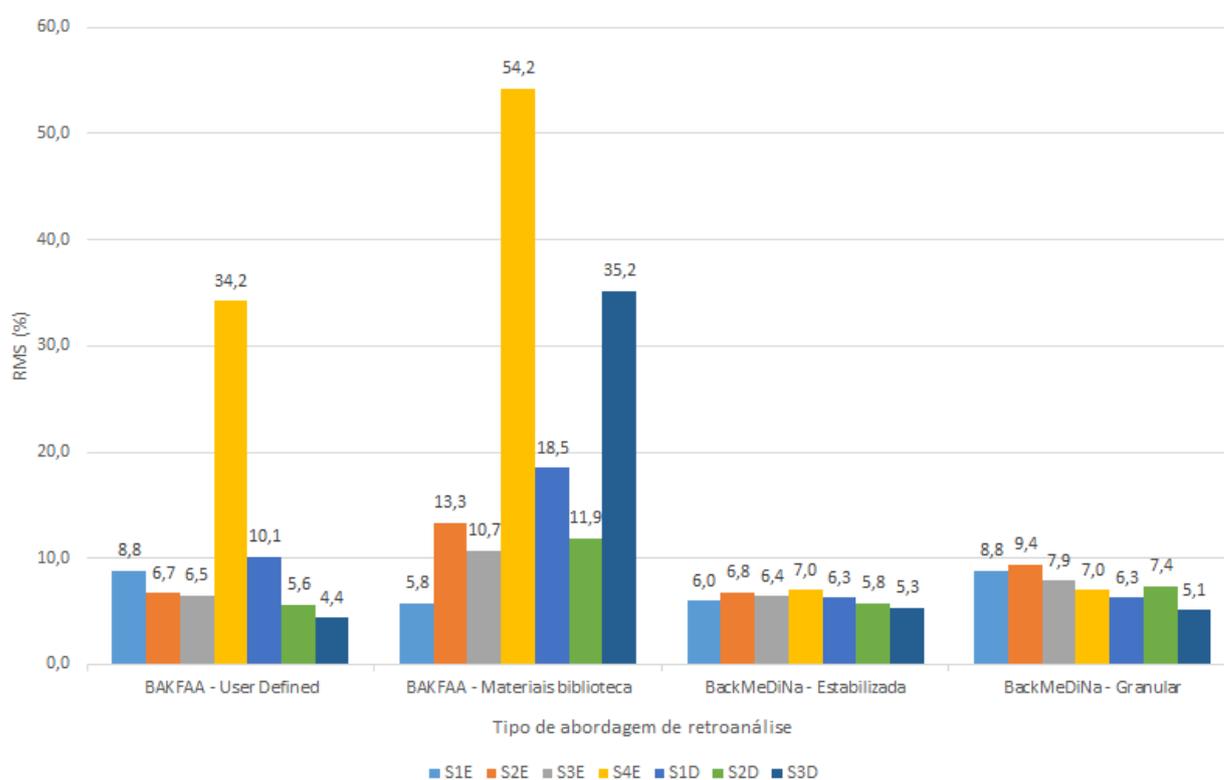
(g) S3D

O *software* BAKFAA é mais rápido em seu processamento que o *software* BackMeDiNa. Enquanto o primeiro faz a retroanálise em menos de um minuto, as retroanálises no *software* BackMeDiNa podem chegar até 55 minutos para serem finalizadas.

Comparando, visualmente, as bacias deflectométricas das duas análises, granular e estabilizada, as bacias calculadas e reais são próximas entre si, indicando uma correlação adequada na retroanálise.

Uma maneira mais objetiva de avaliar a diferença entre a bacia deflectométrica medida e a bacia retroanalizada é pelo RMS. A Figura 50 apresenta o RMS resultante dos 4 tipos de abordagens (BAKFAA - *User Defined*, BAKFAA - materiais da biblioteca, BackMeDiNa - estabilizada e BackMeDiNa - granular), de cada segmento homogêneo.

Figura 50: RMS por tipo de abordagem de retroanálise



Na comparação entre as duas abordagens no *software* BAKFAA, “User Defined” apresenta o menor erro associado à diferença entre a bacia deflectométrica medida e a bacia deflectométrica calculada em 6 dos 7 segmentos homogêneos. No segmento S1E, a abordagem “BAKFAA - materiais biblioteca” apresenta o menor erro associado.

Na comparação entre as duas abordagens no *software* BackMedina, a maior diferença percentual no erro associado é de 2,8%, no segmento S1E. Em 4 segmentos (S1E, S2E, S3E e S2D), considerar a camada de base como estabilizada resulta um erro menor que na consideração como granular. Em

2 segmentos (S4E e S1D), o erro é igual para ambas e em 1 segmento (S3D), considerar a camada de base como granular resulta em um erro menor que considerá-la como estabilizada.

Comparando as quatro abordagens, em 3 dos 7 segmentos, o menor erro apresentado é o de BAKFAA - "User Defined" (S2E, S2D e S3D), em 1 segmento, BAKFAA - Materiais biblioteca (S1E), em 1 segmento, BackMedina - Estabilizada (S3E) e em 2 segmentos (S4E e S1D), as 2 abordagens no *software* BackMedina apresentam o menor erro (6,3% e 7,0%, respectivamente).

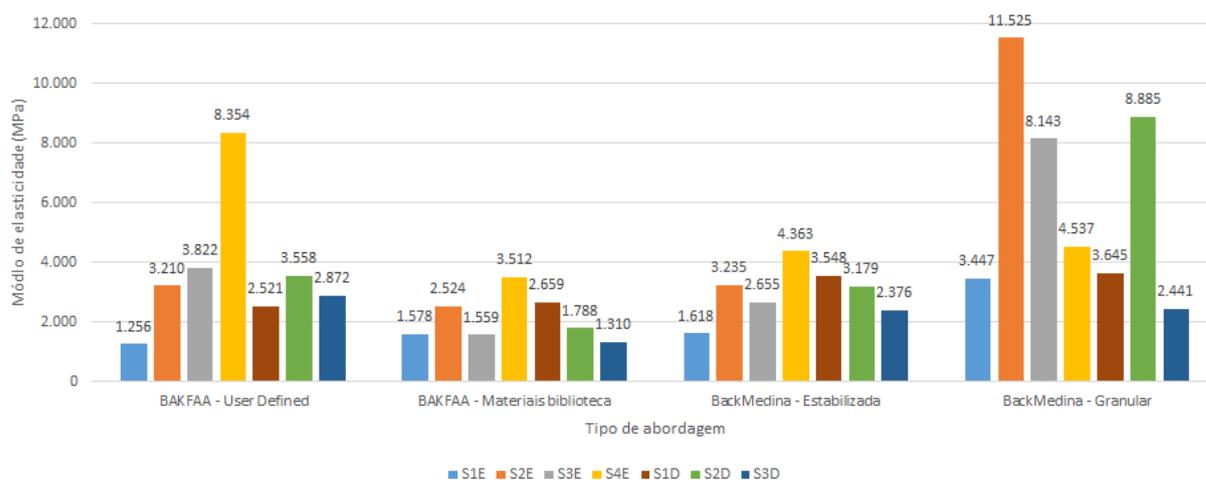
O segmento S4E apresenta erros de 34,2% e 54,2% no *software* BAKFAA, indicando que a correlação na retroanálise não é adequada, isto é, as deflexões calculadas não são próximas das deflexões medidas.

A partir da Figura 50, também é possível perceber que em função do *software* de retroanálise empregado, o RMS apresenta diferentes ordens de grandeza: no *software* BackMedina, o RMS se situa entre 5,1% e 9,4%, enquanto no *software* BAKFAA, o RMS se situa entre 4,4% e 54,2%.

### 5.6.2 Camada de revestimento: concreto asfáltico

A Figura 51 apresenta os módulos de elasticidade retroanalizados para a camada de concreto asfáltico.

Figura 51: Módulos de elasticidade - concreto asfáltico



A depender do *software* de retroanálise escolhido, há distintos valores de módulos de elasticidade, conforme observado na Figura 51.

Chaves, Almeida e Oliveira (2023), em suas simulações de dimensionamento e vida útil de pavimentos aeroportuários a partir de segmentos homogêneos retroanalizados, apresentam a Tabela 41 para evidenciar a diferença no valor do módulo de elasticidade em cada camada do pavimento, para os *softwares* estudados. São apresentados os resultados do *software* BAKFAA e do *software* BackMeDiNa, por serem os utilizados no presente trabalho.

Tabela 41: Módulo de elasticidade em função do *software* de retroanálise. Adaptado de Chaves, Almeida e Oliveira (2023)

Camada	<i>Software</i>	Módulo de elasticidade (MPa)
Revestimento	BAKFAA	2134,75
Revestimento	BackMeDiNa	1735,70
Base	BAKFAA	3321,91
Base	BackMeDiNa	1980,71
Sub-base	BAKFAA	504,74
Sub-base	BackMeDiNa	497,05
Subleito	BAKFAA	298,47
Subleito	BackMeDiNa	372,23

A diferença percentual entre os valores de módulo de elasticidade na camada de resvetimento é de 23,0% e na camada de base, 67,7%.

No presente trabalho, os valores mais elevados de módulos de elasticidade, que ultrapassam 5000 MPa (módulo de elasticidade inicial) ocorrem em diversos segmentos.

Usualmente, uma camada de concreto asfáltico novo possui módulo de elasticidade em torno de 5000 MPa. Os valores de módulos de elasticidade retroanalizados para os segmentos mostram valores superiores a este, mesmo que não se trate de um pavimento novo.

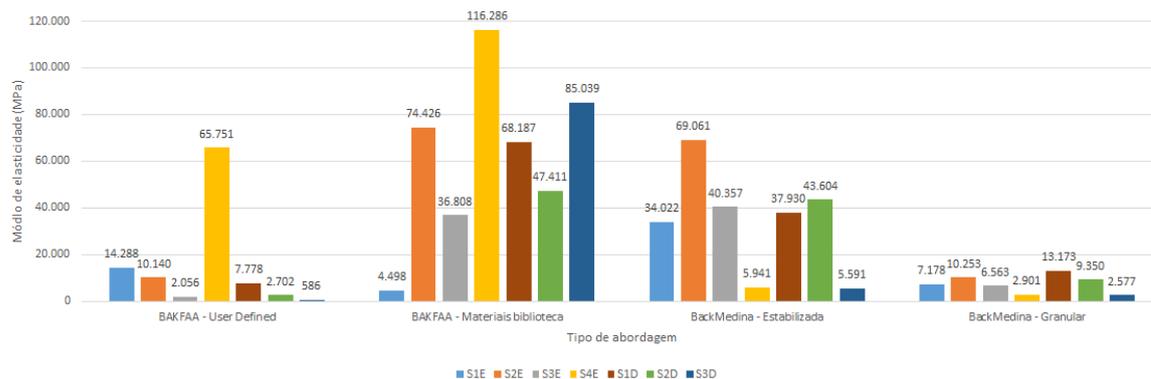
Isso se deve à camada de concreto de cimento Portland, que reduz as deflexões do pavimento, impactando sua rigidez. Para que o *software* de retroanálise determine uma adequada correlação entre as bacias deflectométricas medidas e as calculadas, dada a ordem de grandeza das deflexões medidas, sua ação é aumentar a rigidez do pavimento, de forma que essa rigidez traduza as deflexões medidas.

Entre os *softwares*, BAKFAA apresenta valores menores em comparação ao BackMeDiNa, que apresenta valores de módulos de elasticidade retroanalizados, em alguns segmentos, irreais.

### 5.6.3 Camada de base: concreto de cimento Portland

A Figura 52 apresenta os módulos de elasticidade retroanalizados para a camada de concreto de cimento Portland.

Figura 52: Módulos de elasticidade - concreto de cimento Portland



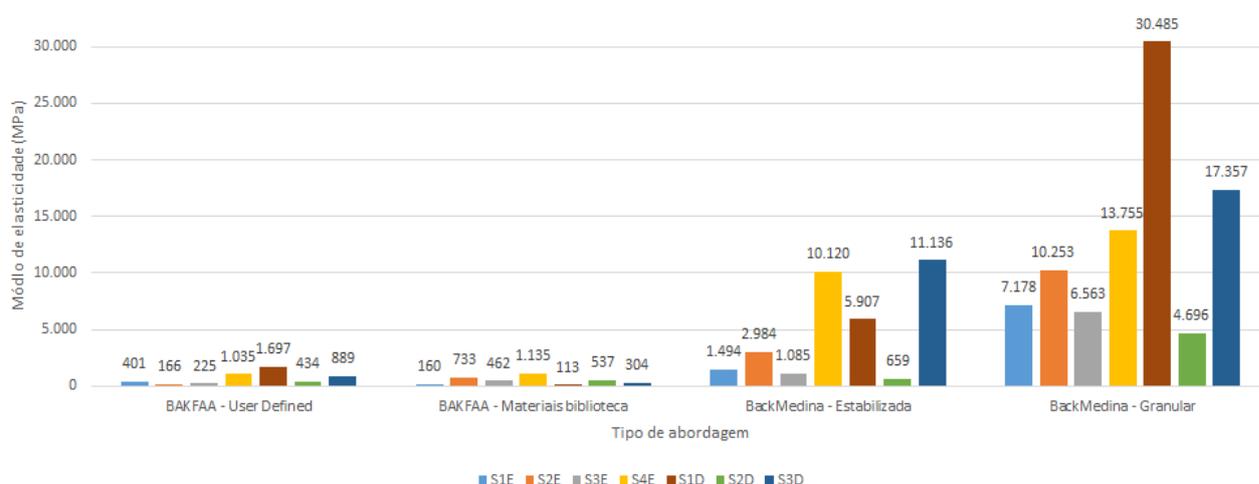
Em ambos os *softwares*, os módulos de elasticidade retroanalizados não condizem com a realidade, resultando em um problema físico, ainda que matematicamente, os erros apresentados pelo *software* BackMeDiNa sejam toleráveis.

No *software* BAKFAA, os módulos de elasticidade retroanalizados apresentam valores numéricos que ultrapassam o limite físico para o concreto de cimento Portland. Considerando uma camada de concreto de cimento Portland de um pavimento novo, o *software* FAARFIELD apresenta módulo de elasticidade igual a 27560 MPa, não permitindo a inserção manual de valores superiores a este.

#### 5.6.4 Camada de sub-base

A Figura 53 apresenta os módulos de elasticidade retroanalizados para a camada de sub-base.

Figura 53: Módulos de elasticidade - sub-base



Tanto no *software* BAKFAA quanto no *software* BackMeDiNa, ocorre o mesmo cenário descrito para a camada de base na camada de sub-base e no subleito, com valores que ultrapassam os

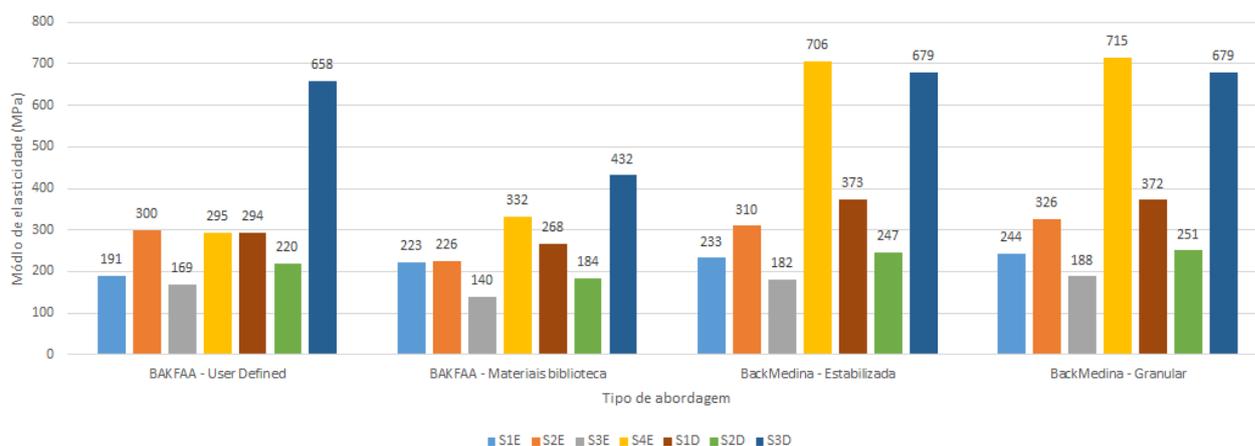
valores de módulos de elasticidade aceitáveis para o cenário, o qual se trata de um pavimento de, aproximadamente, 75 anos.

Em pavimentos novos, a camada de sub-base, usualmente, não resulta em módulos de elasticidade da ordem de grandeza apresentada na retroanálise, sendo o limite imposto pelo *software* FAARFIELD igual a 275,79 MPa.

### 5.6.5 Subleito

A Figura 54 apresenta os módulos de elasticidade retroanalizados para o subleito.

Figura 54: Módulos de elasticidade - subleito



Ao tomar o segmento S4E, por exemplo, para que o subleito apresente um módulo de elasticidade de 715 MPa, valor da abordagem granular no *software* BackMeDiNa, seu CBR deve ser de, no mínimo, 71,5% (dado pela Equação 3), o que não condiz com o CBR medido na pista, cujo valor máximo é de 21,3%, conforme apresentado na Tabela 25.

Os *softwares* apresentam tais valores irrealistas, em maior ou menor quantidade dependendo da camada e do segmento, devido às deflexões medidas: as maiores registradas no segmento S1E, da ordem de  $52 \times 10^{-2}$  mm e as menores, registradas no segmento S4E (vide Tabelas 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38), da ordem de  $25 \times 10^{-2}$  mm. Logo, é esperado que os *softwares* de retroanálise assumam rigidez mais alta ao pavimento, que seja compatível com as deflexões medidas.

Logo, apesar de os módulos de elasticidade terem sentido matemático, por serem resultantes das iterações dos *softwares* de determinar módulos de elasticidade condizentes com as deflexões medidas, tais valores não apresentam sentido físico real, por serem superiores, até mesmo, ao limite imposto pelo *software* FAARFIELD, no dimensionamento de pavimentos cujos materiais são escolhidos a partir de sua biblioteca.

## 5.7 Estimativa da vida útil remanescente do pavimento

Em relação à vida útil do pavimento, Chaves, Almeida e Oliveira (2023) observam que ao determiná-la a partir de dados retroanalizados, nesse caso, o módulo de elasticidade de cada camada, os valores são consideravelmente distitos em função do *software* escolhido. Os autores apresentam, para o mesmo segmento homogêneo, vida útil de 9.722 anos utilizando o *software* BAKFAA, 3.882 anos com o *software* BackMeDiNa, 31,6 anos com o *software* BackCAP e 56,7 anos com o *software* ELMOD.

Diante do impacto do *software* de retroanálise escolhido nas etapas seguintes do método, é considerado o emprego dos módulos de elasticidade retroanaliados pelo *software* BAKFAA, por ser o *software* oficial de retroanálise da FAA e por permitir a inclusão de camadas de concreto de cimento Portland, opção que o *software* BackMedina, por ter sido concebido para pavimentos flexíveis, não permite, sendo necessário que o usuário compatibilize a sua estrutura do pavimento com as opções de materiais de camada disponíveis.

Além disso, é a ferramenta que resulta no menor RMS na maioria dos segmentos (vide Figura 50), em comparação ao *software* BackMeDiNa. Entre as duas abordagens utilizadas no *software* BAKFAA, é considerada para a determinação da vida útil remanescente do pavimento no *software* FAARFIELD de cada segmento, aquela que resulta no menor RMS. Por exemplo, para determinação da vida útil do segmento S1E, são utilizados os módulos de elasticidade retroanalizados pela abordagem BAKFAA - Materiais biblioteca, enquanto para o segmento S2E, a abordagem BAKFAA - *User Defined*.

A Tabela 42 apresenta a vida útil remanescente do pavimento, em anos, determinada pelo *software* FAARFIELD, após inclusão da estrutura do pavimento, do mix de tráfego (peso máximo de táxi e número de decolagens anuais de cada aeronaves) e do período de projeto, considerado como 50 anos, por ser o limite superior da ferramenta. O tipo de pavimento escolhido para análise é o "New Flexible", uma vez que o *software* FAARFIELD não permite a alteração dos módulos de elasticidade no tipo "HMA Overlay on Rigid". Visto que a espessura da camada de concreto asfáltico é superior à espessura da camada de concreto de cimento Portland, segundo FAA (2022), a estrutura é considerada como flexível.

O CDF, na determinação da vida útil, é igual a 0 para todos os segmentos.

Dado o limite imposto pelo *software* FAARFIELD para os módulos de elasticidade para o subleito de 344,74 MPa e de 27579,04 MPa para as demais camadas, o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland do segmento S4E é reduzido para um valor inferior ao limite, igual a 27579,03 MPa, e o módulo de elasticidade do subleito do segmento S3D é reduzido para 344,73 MPa, para que a vida útil do segmento possa ser determinada.

Tabela 42: Vida útil remanescente do pavimento por segmento

Segmento	Módulo de elasticidade utilizados(MPa)				Vida útil (anos)
	Concreto asfáltico	Concreto de cimento Portland	Sub-base	Subleito	
S1E	1577,75	4497,63	159,66	222,80	5531310,00
S2E	3210,18	10140,15	165,52	299,54	5531310,00
S3E	3821,76	2055,66	225,30	169,07	5531310,00
S4E	8354,22	65750,52	1035,03	294,58	5531310,00
S1D	2521,29	7778,25	1697,20	293,60	5531310,00
S2D	3557,86	2701,54	434,07	219,61	5531310,00
S3D	2872,15	586,46	889,32	658,46	5531310,00

ANAC (2022) explica que no Brasil, é relativamente frequente encontrar estruturas superdimensionadas para o mix de aeronaves do aeródromo. Isso pode acontecer por diversas razões, como a utilização de diferentes métodos de cálculo, em comparação aos adotados pela FAA, além do conservadorismo durante o processo de cálculo e até mesmo as superestimativas de taxas de crescimento futuras das operações no aeródromo.

Conforme consta em ANAC (2022), é comum encontrar no país estruturas cuja vida útil, para o mix de aeronaves em operação, alcança 100, 300, 500 anos ou até mesmo uma vida infinita.

Em situações onde os pavimentos são superdimensionados, o valor do CDF tende a ser zero ou muito próximo de zero, justamente a situação da estrutura do pavimento em estudo: vida útil infinita e CDF igual a zero.

Além disso, já era esperado que a vida útil dos segmentos fosse elevada, uma vez que, inicialmente, para determinação da carga normalizada, é apresentado que a estrutura mais adequada ao mix de tráfego é de 16 cm de concreto asfáltico, sendo que, na realidade, essa espessura é de 22 cm.

O pavimento do presente trabalho não apresenta problemas estruturais, entretanto, caso fosse este o cenário, a etapa seguinte do método, dimensionamento da nova estrutura, para correção dos problemas estruturais, seria realizada.

Neste caso, não seria acrescentado nenhum processamento de dados a mais visto que todos os dados para dimensionamento da estrutura no *software* FAARFIELD, como mix de tráfego, CBR de projeto do subleito, materiais e espessuras das camadas existentes já estão disponíveis.

## 5.8 Especificações técnicas para a pavimentação

Diante dos resultados tanto do *software* FAARFIELD, nos módulos “Design” e “Life”, quanto as deflexões medidas, além dos módulos de elasticidade retroanalisados e do relatório GCA (2018) consultado, o pavimento não apresenta, em 2016 (ano de referência), problemas estruturais identificados a serem corrigidos.

Os problemas identificados são de aspecto funcional e devem ser previstas ações para correção da irregularidade longitudinal, único índice funcional em não conformidade com o proposto pelo órgão regulador do setor.

Não existem métodos de dimensionamento para a determinação da espessura de novas camadas (sobrepostas ou substituídas) que sejam necessárias a fim de corrigir problemas funcionais, somente para problemas estruturais.

Assim, o presente trabalho **sugere**, como ações corretivas, a fresagem rasa padrão de 5 centímetros do revestimento de concreto asfáltico em toda a extensão da pista de pouso e decolagem. Quanto à escolha do tipo de material para a camada de revestimento, são avaliadas, de forma apenas qualitativa, a inclusão da camada porosa de atrito ou do concreto asfáltico convencional, já utilizado no restante da pista de pouso e decolagem.

Não é sugerida a fresagem localizada nas áreas nas quais é identificada irregularidade longitudinal acima do limite imposto pois tal ação geraria descontinuidade na camada de revestimento, uma vez que existiria revestimentos de diferentes idades, e transferiria o problema de irregularidade para outro ponto da pista, sem efetivamente resolvê-lo.

Uma vez que a macrotextura e o coeficiente de atrito no segundo terço (terço médio), ainda que apresente defeitos não detalhados e maior desgaste, estão em conformidade com ANAC (2023b), não foi escolhida substituição do revestimento atual para a camada porosa de atrito nessa região.

Para manter o mesmo tipo de revestimento ao longo da pista, é indicado o concreto asfáltico convencional de 5 centímetros.

Entretanto, ainda que não haja necessidade de substituição e sobreposição de novas camadas no terço médio, a Figura 36 mostra o impacto da remoção do acúmulo de borracha na sinalização horizontal, que se encontra comprometida em diversos pontos da imagem.

Assim, além da fresagem e recomposição do concreto asfáltico convencional, também é indicada a reparação da sinalização horizontal por meio de pintura.

Para a pavimentação, deve ser seguida a especificação de serviço 031/2006 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico (DNIT, 2006c), **com utilização do CAP 30/45**, para dosagem da mistura asfáltica e execução do serviço.

Não é sugerida a aplicação de CAP 50/70 e/ou de CAP-85/100 pois a área de estudo se encontra em região de temperatura elevada (31,1°C), o que aumenta a suscetibilidade da camada

de revestimento à ocorrência de deformação plástica se aplicados tais ligantes. O CAP 30/45 é um cimento asfáltico de petróleo de alta resistência, ideal para condições de tráfego moderado a pesado (aeródromos) e regiões de clima mais quente.

## 5.9 Determinação do PCN

No caso em que o pavimento apresente problemas estruturais e é dimensionada uma nova estrutura, é interessante também determinar o PCN, por ser uma importante informação ao operador do aeródromo no âmbito de tomadas de decisões de manutenção do pavimento.

No presente trabalho, embora não existam problemas estruturais, o PCN é determinado, para fins de comparação com o PCN apresentado em INFRAERO (2016a).

Ao inserir o mix de tráfego no *software* COMFAA 3.0, é observado que o item referente ao peso da aeronave é denominado ‘gross weight’ e, por comparação numérica, é igual ao peso máximo de táxi apresentando nas aeronaves da biblioteca do *software* FAARFIELD. Entretanto, ANAC (2020) denomina esse campo como peso máximo de decolagem.

Visto que, nominalmente, há 3 termos distintos em relação ao peso das aeronaves envolvidos na interface do *software* COMFAA 3.0, ANAC (2020) e interface do *software* FAARFIELD, é realizada uma comparação percentual entre o peso máximo de táxi e o peso máximo de decolagem, para escolha de qual peso utilizar na determinação do PCN, apresentada na Tabela 43

Tabela 43: Diferença percentual entre pesos máximos de táxi e decolagem

Aeronave	Peso máximo de táxi (kg)	Peso máximo de decolagem	Diferença percentual
Boeing 737-800	79243	79016	0,29%
Airbus A320	73900	73500	0,54%
Boeing 737-700	70307	70080	0,32%
Airbus A319	64400	64000	0,62%
Airbus A318	59400	59000	0,67%
Embraer 190	47950	47790	0,33%
ATR-72	20020	19990	0,15%
Embraer 135	19100	19000	0,52%
Bombardier Challenger 300	17690	17622	0,38%

A maior diferença percentual é de 0,67%, para a aeronave Airbus A318, logo inferior a 1%. Essa diferença não gera um impacto importante na determinação do PCN, podendo ser usados tanto o peso máximo de táxi quanto o peso máximo de decolagem.

No presente trabalho, é escolhido pelo emprego do peso máximo de decolagem, para um PCN mais conservador, a favor de segurança. Ao utilizar esse peso, o PCN, ou seja, a capacidade de

suporte de um pavimento para operações sem restrição resultante é menor que na consideração do peso máximo de táxi.

ANAC (2020) ainda explica o uso da planilha de suporte do COMFAA 3.0, cuja função é transformar a estrutura do pavimento existente em uma configuração reconhecida pelo software, denominada “estrutura equivalente” ou “de referência”. Contudo, essa planilha de apoio não é encontrada na versão mais atual do *software* nem mencionada no manual de uso do *software*. Visto que a FAA não disponibiliza em seu endereço eletrônico as versões anteriores dessa ferramenta, também não é possível recuperá-la.

FAA (2014b), última *advisory circular* que trata do PCN e, conseqüentemente, do COMFAA 3.0, também descreve a “estrutura equivalente”, razão pela qual é realizada, no presente trabalho, a conversão da estrutura existente para a equivalente, ainda que de forma manual, sem auxílio da planilha de apoio.

Segundo FAA (2014b), quando nenhuma aeronave do mix de tráfego possuir quatro ou mais rodas em um trem de pouso principal, a estrutura de referência a ser usada é: 3 polegadas de camada de revestimento de concreto asfáltico e 6 polegadas de camada de base de agregado triturado, totalizando 228,6 milímetros.

INFRAERO (2016a) descreve:

A espessura excedente de asfalto e base granular em relação ao mínimo padrão deve ser convertida em espessura total adicional do pavimento de referência. O procedimento consiste em converter o excedente da camada betuminosa P-401 para P-209 (camada de base) e em seguida converter o excedente da camada de base P-209 para a camada de sub-base P-154 (INFRAERO, 2016a).

FAA (2014b) não descreve ou utiliza o uso de ábacos para determinação da espessura equivalente do pavimento. Para sua determinação, são utilizados somente os coeficientes de conversão.

Ao tentar replicar as etapas do exemplo apresentado nessa referência para pavimentos flexíveis no pavimento do presente trabalho, houve dificuldade em utilizar os coeficientes de conversão. Uma vez que não há coeficiente de conversão do concreto de cimento Portland para a base padrão (P-209), é necessário converter, primeiramente, o concreto de cimento Portland e, em seguida, converter o resultado da espessura em concreto asfáltico para o material P-209. Inserindo o valor da espessura equivalente total determinada a partir do uso dos coeficientes de conversão no *software* COMFAA, o CDF resultante é 0,00 para todas as aeronaves do mix, o que mostra que esse valor está exageradamente superdimensionado.

Uma vez que as explicações de INFRAERO (2016a) não são suficientes para a compreensão do método utilizado para determinar, manualmente (visto que a planilha de apoio não é mais

disponibilizada) e com resultados consistentes, a espessura equivalente empregada na determinação do PCN deste documento, e também não é possível determinar a espessura equivalente pelo *software* FAARFIELD, visto que este não disponibiliza os coeficientes de conversão, o presente trabalho utiliza os ábacos de FAA (1995) para determinação da espessura equivalente, por caracterizar a única forma de dar continuidade ao método do trabalho.

Conforme consta em FAA (1995), para utilização dos ábacos, é necessária a definição da aeronave de projeto, em seguida, as partidas anuais e a configuração de trens de pouso das demais aeronaves são convertidas, por meios de coeficientes de conversão, para as partidas anuais e configuração do trem de pouso da aeronaves de projeto.

Com o peso da aeronave, aqui utilizado o peso máximo de táxi, em libras, para obtenção de uma maior espessura equivalente, o total de partidas anuais e o CBR de projeto do subleito, igual a 10,6%, é possível determinar, no ábaco referente ao trem de pouso da aeronave de projeto, a espessura total do pavimento. Ao reduzir as 9 polegadas já determinadas para a camada de concreto asfáltico e base, a espessura equivalente restante é determinada.

Todas as aeronaves do mix possuem trem de pouso principal do tipo roda dupla, de forma que não é aplicado coeficientes de conversão neste elemento.

As aeronaves Boeing 737-800 e Airbus A320 apresentam a mesma espessura total de pavimento, individualmente, de 22 polegadas. A aeronave A320 é escolhida como aeronave de projeto por possui maior participação no mix de tráfego.

A Tabela 44 apresenta o número equivalente anual de decolagens da aeronave de projeto resultante da aplicação da Equação 1.

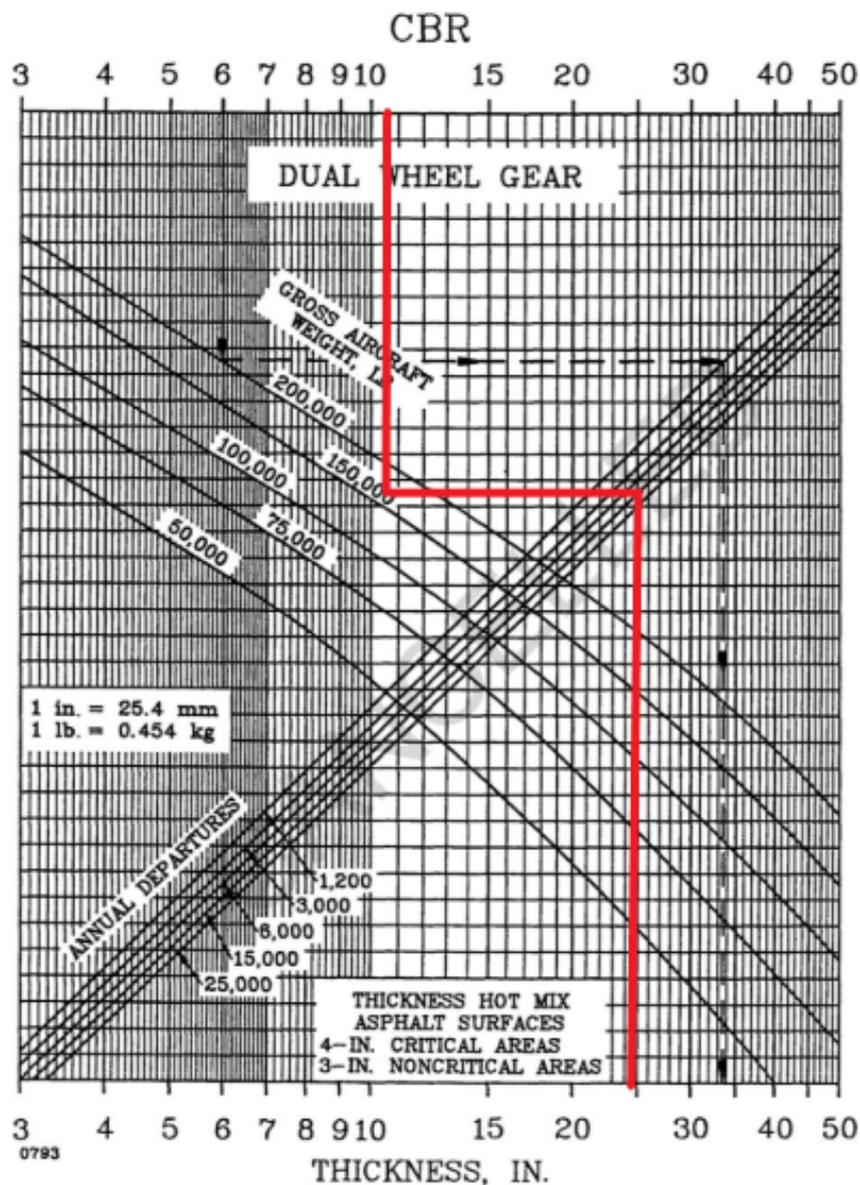
Tabela 44: Número equivalente anual de decolagens da aeronave de projeto

Aeronave	Carga da roda (kPa)	N° equivalente de decolagens anuais
Boeing 737-800	1406,53	2842,19
Airbus A320 (projeto)	1378,95	2628,00
Boeing 737-700	1358,27	2476,78
Airbus A319	1192,79	1515,07
Airbus A318	1074,27	1043,01
Embraer 190	1010,15	844,94
ATR-72	793,00	391,95
Embraer 135	923,90	629,64
Bombardier Challenger 300	1000,00	816,75

O total do número equivalente anual de decolagens da aeronave de projeto é 13188,33 e o peso máximo de táxi do A320 é 162921,61 libras, valores de entrada no ábaco para o trem de pouso de roda dupla.

A Figura 55 apresenta o ábaco utilizado para a determinação da espessura equivalente total, para um CBR de 10,6%.

Figura 55: Ábaco para determinação da espessura equivalente total

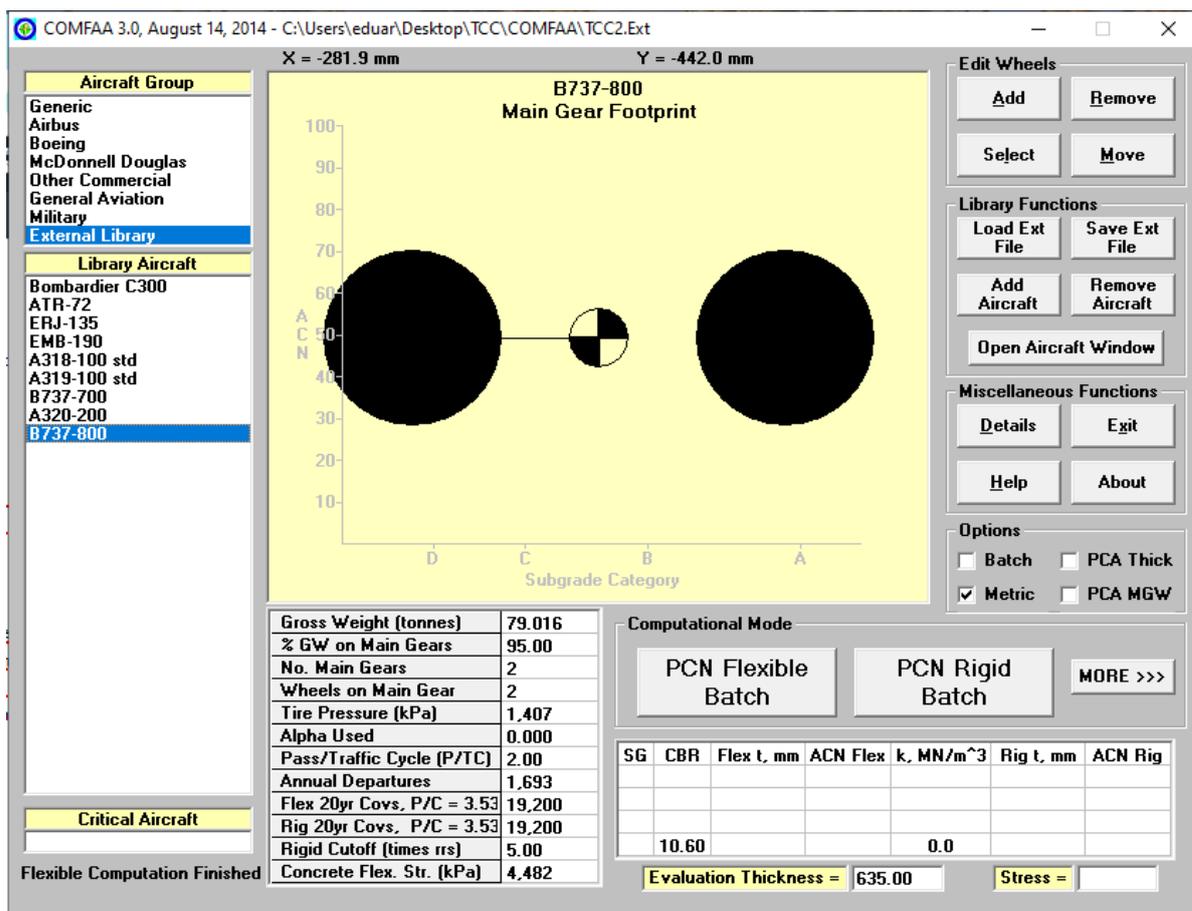


A espessura equivalente total resultante é de cerca de 25 polegadas, 635 milímetros. Sabendo que 9 polegadas são destinadas ao revestimento e à base, restam 406,4 milímetros da espessura equivalente.

São inseridos no *software* COMFAA 3.0: o peso máximo de decolagem de cada aeronave, o número de delocagens anuais de cada aeronave, o CBR de projeto do subleito de 10,6%, a espessura equivalente total de 635 milímetros e *passes to traffic cycle* igual a 2, por considerar pista de táxi com acesso central à pista de pouso e decolagem e com abastecimento da aeronave no aeródromo.

A Figura 56 apresenta a interface do *software* COMFAA 3.0 com os dados de entrada já inclusos. O *Computational Mode* escolhido é *PCN Flexible Batch*.

Figura 56: Interface do COMFAA 3.0 com configurações para determinação do PCN



O arquivo de saída do *software* COMFAA 3.0, apresentado no Anexo B, mostra o valor do CDF, igual a 0,3545. Uma vez que o CDF se encontra entre 0,15 e 1,00, conforme consta em ANAC (2020), o resultado está dentro dos parâmetros normais preconizados por FAA (2014b), não sendo necessário ajuste adicional.

Portanto, o valor numérico do PCN é igual a 51,5, arredondado para 52. Uma vez que o pavimento é considerado como flexível, é atribuída a letra "F", o CBR de projeto do subleito é igual a 10,6%, logo, é atribuída a letra "B". A pressão é limitada em 1,5 MPa, o que leva à atribuição da letra "X". O PCN é resultado de um estudo técnico, o que leva à atribuição da letra "T".

Finalmente, o PCN da pista de pouso e decolagem para um período de 20 anos é **52/F/B/X/T**.

O valor numérico do PCN informado em INFRAERO (2016a) é igual a 51,8 para 20 anos, após um ajuste no CDF, visto que a primeira determinação do PCN resultou em um CDF de 0,0094, portanto, fora do que preconiza FAA (2014b). A espessura equivalente total determinada é de 28,60 polegas, ou 726,44 milímetros, superior a espessura equivalente total determinada a partir do ábaco.

## 5.10 Elaboração do projeto de sinalização horizontal

Uma vez que o Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto opera em VFR e IFR de não precisão, conforme Tabela 12, são necessários os elementos designação de pista, eixo de pista e faixas de cabeceira no projeto de sinalização horizontal. Visto que a pista de pouso e decolagem possui comprimento superior a 1280 metros, também é necessário o ponto de visada.

São incluídos no *software* R-Marking como dados de entrada para determinação do total de tinta utilizado na pintura da sinalização horizontal:

- Comprimento da pista: 2515 metros;
- Altitude: 66,8 metros;
- Temperatura de referência: 31,1°C;
- Largura da pista: 45 metros;
- Orientação: 160°;
- Tipo de operação: IFR não precisão;
- Tipo de pista: pista única.

A Figura 57 apresenta a tela inicial do *software* R-Marking, assim como a determinação da quantidade de tinta total para a pista de pouso e decolagem.

Figura 57: Sinalização horizontal - total de tinta

The screenshot shows the R-Marking software interface with the following data:

Parameter	Value	Category	Paint Requirement (m²)
Comprimento (m)	2515	EIXO	616,05
Altitude (m)	66.8	BORDA	4527,00
Temperatura padrão = 14.6 °C		FAIXAS DE CABECEIRA	612,00
Temperatura de referência (°C)	31.1	PONTO DE VISADA	800,00
Declividade (%)	0	TINTA TOTAL	6555,05
Comprimento básico = 2125 m			
Código de pista = 4			
Largura (m)	45		
Orientação (graus)	160		
Designações: 16 e 34			
Tipo de operação	IFR não precisão		
Tipo de pista	Pista única		
Posição de pista	Direita		
Tipo de zona de toque	Simples		
Incluir borda	<input checked="" type="checkbox"/>		

Arquivo de saída: C:\Users\eduar\Desktop\TCC\sinalizacao.dxf

Processar

A tinta para a pintura das designações é estimada a partir da área dos números de designação, apresentados na Figura 23.

O total de tinta para pintura da sinalização horizontal é a soma do total informado pelo *software* R-Marking e das áreas dos números 1, 6, 3 e 4, resultando em 6606,25 m<sup>2</sup> de tinta. O projeto de sinalização horizontal é apresentado na íntegra no Anexo D.

Em relação às especificações técnicas, previamente à execução da sinalização horizontal, a empresa contratada deve limpar a superfície para remover quaisquer impurezas, como óleo combustível e materiais granulares, garantindo assim uma boa aderência da tinta e realizar a marcação prévia das sinalizações horizontais para assegurar que as medidas e a localização estejam de acordo com o projeto, seguindo o exposto na NBR 8348 - Execução de sinalização horizontal de pistas e pátios em aeroportos (ABNT, 2007).

A tinta aplicada deve atender a norma ABNT NBR 8169 - Aeroportos - Tinta à base de resina acrílica estirenada (ABNT, 2011).

## 6 Conclusões

Este trabalho resultou nas especificações para a restauração da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, envolvendo a recuperação de seu aspecto funcional visto que foi identificada irregularidade longitudinal acima do limite imposto pela Agência Nacional de Aviação Civil, órgão regulador do setor de aviação civil. Foram determinados, a partir das avaliações funcional e estrutural, o PCI, a irregularidade longitudinal, a macrotextura, o atrito e as deflexões de cada segmento homogêneo, consideradas baixas, tendo em vista a presença da camada de 16 centímetros de concreto de cimento Portland que as inibe.

Durante a execução do método do trabalho, foi constatada grande dificuldade em encontrar, tanto os dados de deflexão quanto o mix bem definido para os aeródromos não escolhidos como área de estudo. Quando encontrados, a maioria dos relatórios técnicos apresentaram informações incompletas, de difícil rastreamento, sendo necessário, em certas etapas, um considerável trabalho de dedução. Ainda que sejam informações comuns entre o meio técnico e engenheiros da área, a ausência de um melhor detalhamento nas informações apresentadas nos relatórios técnicos não configura um hábito recomendável, uma vez que esses documentos são utilizados para garantir que o pavimento está em condições seguras para o uso de aeronaves. Sem um nível de detalhe adequado, avaliar adequadamente o estado da estrutura pode ser um processo complexo, contribuindo com a possibilidade de negligência de defeitos, o que resulta no agravamento de deteriorações maiores e cujo custo de manutenção, a longo prazo, é mais oneroso.

Além disso, foi identificada inconsistência na reunião dos dados de aeronaves, tanto em relação à sua nomenclatura, quanto à definição de qual tipo de peso utilizar nas etapas do método (de decolagem, de táxi). Nos relatórios consultados, até mesmo aqueles da área de estudo escolhida, os nomes das aeronaves estão incompletos, sem informação do modelo específico da aeronave do mix de tráfego. O peso "bruto" informado pelo operador do aeródromo da área de estudo, que se trata, inclusive, de um termo vago para especificação do peso da aeronave, é conflitante com o manual do fabricante e o *software* oficial de dimensionamento de pavimentos de aeródromos da FAA. Também há dificuldade na inserção de aeronaves de forma manual nesse *software* pois nem sempre o manual apresenta todas as informações necessárias, como distância entre pneus no trem de pouso principal.

Quanto ao uso de correlações empíricas no processo de dimensionamento e/ou avaliação de pistas de pouso e decolagem, sobretudo a Equação 3, deve ser considerado que seu desenvolvimento se baseia em um conjunto específico de dados experimentais. Ela pode não ser aplicável a todos os solos ou condições de campo, especialmente aqueles que não foram representados no conjunto de dados original.

Além disso, a relação entre módulo de elasticidade e CBR muda conforme as condições ambientais, como umidade, parâmetro que o método não captura de forma adequada. Ainda, pistas

de pouso e decolagem estão sujeitas a carregamentos dinâmicos e a Equação 3 não considera o comportamento resiliente do solo sob tais condições de carregamento, o que é crucial para uma avaliação precisa. Sendo assim, a realização de ensaios de módulo de resiliência é uma prática mais adequada para medir a resposta elástica do solo sob estes carregamentos, simulando de forma mais precisa as condições reais de operação das pistas de pouso e decolagem.

O próprio uso de alguns *softwares* no método, como o BAKFAA e o COMFAA 3.0, não é trivial, uma vez que o manual da ferramenta não apresenta todas as informações necessárias aos usuários para a forma de inserção de dados. No caso do BAKFAA, se o usuário não possuir um arquivo de extensão .fwd, o uso da ferramenta é dificultado e no caso do COMFAA 3.0, é necessária a consulta a *advisory circular* correspondente para o conhecimento da necessidade de informar a espessura equivalente do pavimento.

Apesar das dificuldades encontradas no rastreamento do processo na literatura técnica relacionada, foi possível observar o uso consolidado dos segmentos homogêneos na avaliação de pistas de pouso e decolagem.

Os *softwares*, ainda que com suas limitações, foram úteis nas diversas etapas do método de trabalho, principalmente em relação à rapidez no processamento e apresentação dos resultados. O *software* BAKFAA se mostrou uma excelente ferramenta de retroanálise no que tange o tempo de processamento, em comparação ao BackMeDiNa, que levou até 55 minutos para retroanalisar um segmento homogêneo. As funcionalidades do *software* FAARFIELD também foram exploradas, tanto as do módulo *Thickness Design* quanto as do módulo *Life*.

Foi identificado um conflito entre a carga indicada para realização do ensaio com o equipamento pela ANAC e a carga efetivamente utilizada pelos operadores de aeródromos. Apesar desse conflito, o Método das Diferenças Acumuladas, que utilizou os dados de deflexão sem normalização para a carga indicada pelo órgão regulador, resultou exatamente nos mesmos segmentos homogêneos definidos pelo Método da FAA, que utiliza a normalização de deflexões. Portanto, ainda que o conflito de informações exista, não configura um impeditivo para a realização das etapas seguintes do método nem comprometimento dos resultados.

Em relação à aplicação da ferramenta de retroanálise, a presença da camada de concreto de cimento Portland aumentou consideravelmente os módulos de elasticidade retroanalizados. Além disso, alguns segmentos também apresentaram RMS elevado, evidenciando a distância entre as deflexões medidas e as deflexões retroanalizadas. Os resultados da retroanálise (módulos de elasticidade) corroboram com o que preconiza ANAC (2021b): o processo de retroanálise não possui solução única e deve ser guiado pelos resultados dos ensaios destrutivos no pavimento. Por isso, a necessidade de comparação entre os módulos de elasticidade retroanalizados que, no presente trabalho, para o subleito de alguns segmentos foi elevado, com o CBR do subleito efetivamente medido na pista.

Diante dos resultados da retroanálise, também foi possível observar que a estrutura apresenta, na realidade, um comportamento rígido ou, no mínimo, um comportamento misto, ainda que FAA (2022) classifique o pavimento como flexível. Logo, ainda que FAA (2022) tenha guiado a aplicação do método do trabalho tratando a estrutura como flexível, tal descrição não é condizente em termos de comportamento estrutural, o que se tornou ainda mais evidente com os módulos de elasticidades consideravelmente elevados e a vida estrutural infinita. Portanto, cabe questionamento se FAA (2022) é a referência mais adequada para classificar a estrutura do pavimento, uma vez que, à luz da evolução humana e dos avanços nos estudos do comportamento de estruturas de pavimento, torna-se evidente que suas diretrizes já não atendem adequadamente à heterogeneidade de estruturas de pavimento.

Quanto ao PCN, o valor determinado a partir das considerações do presente trabalho e o valor oficial, apresentado em INFRAERO (2016a) são bastante próximos: 51,5 e 51,8 (INFRAERO, 2016a). Logo, a escolha pela utilização do peso máximo de decolagem ou pelo máximo de táxi não impacta consideravelmente no valor numérico resultante. Entretanto, é observado que o valor de 51,8 foi encontrado após um ajuste no CDF, conforme orienta ANAC (2020), uma vez que este resultou, primeiramente, em 0,0094, muito abaixo de 0,15 e indica superdimensionamento da estrutura.

Este ajuste não foi necessário no PCN determinado pelo presente trabalho. Alguns fatores podem levar à essa diferença, como a forma de determinação da espessura equivalente total do pavimento. Em INFRAERO (2016a), a espessura equivalente total é 28,6 polegadas, sem maiores informações de como foi determinada, enquanto no presente trabalho, por meio do ábaco, a espessura equivalente total é 25 polegadas. A utilização de ábacos, por se tratar de uma determinação visual, não é tão precisa quanto uma planilha de apoio atrelada ao próprio *software*, mas resultou em uma espessura equivalente mais condizente com o mix de tráfego, razão que pode ter dispensado o ajuste no CDF.

Devido às características do aeródromo, como tipo de regras de voo, comprimento e largura da pista de pouso e decolagem, os elementos de sinalização horizontal incluem a designação da pista, o eixo de pista, faixas de cabeceira e ponto de visada. Apesar da borda de pista não ser necessária, também foi incluída no projeto de sinalização por não requerir processamento adicional no *software* utilizado e promover a clara delimitação da área operacional.

Finalmente, o método também poderia ser aplicado no dimensionamento de uma nova estrutura, caso o pavimento apresentasse problemas estruturais acentuados ou aumento e/ou mudança do mix de tráfego, fatores que demandariam uma nova avaliação estrutural do pavimento.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

A proposição da solução para correção da irregularidade longitudinal não considerou os custos envolvidos para execução desse serviço. Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a realização de orçamentos, para comparação entre os diferentes tipos de equipamentos de fresagem, assim como a aplicação de diferentes tipos de revestimentos.

É recomendado o estudo da aplicação de solução para correção da irregularidade longitudinal elevada com *micro-grooving* e também com o uso de ligantes asfálticos modificados.

Outra forma de avaliação dos diferentes cenários em função da solução aplicada é por meio do *Highway Development and Management System* (HDM), utilizado para rodovias, cuja aplicação em aeródromos também poderia ser futuramente estudada.

São sugeridas, ainda, a validação e aplicação do método em outros tipos de pavimentos de aeródromos, como pistas de táxi e pátios de estacionamento de aeronaves.

## 7 Anexos

### 7.1 Anexo A: Exemplo de aplicação do Método Das Diferenças Acumuladas

Tabela 45: Aplicação do Método das Diferenças Acumuladas (BERNUCCI et al., 2008)

Ponto	Deflexão i ( $\times 10^{-2}$ mm)	D	$\Delta I_i$	$\sum \Delta I_i$	$A_i$	$\sum A_i$	$Z_i$
0	87	0,0	0	0	0	0	0
40	89	88,0	40	40	3520	3520	98
80	91	90,0	40	80	3600	7120	276
120	88	89,5	40	120	3580	10700	434
160	90	89,0	40	160	3560	14260	572
200	95	92,5	40	200	3700	17960	850
240	80	87,5	40	240	3500	21460	928
280	90	85,0	40	280	3400	24860	906
320	95	92,5	40	320	3700	28567	1184
360	83	89,0	40	360	3560	32120	1322
400	90	86,5	40	400	3460	35580	1360
440	100	95,0	40	440	3800	39380	1738
480	87	93,5	40	480	3740	43120	2056
520	85	86,0	40	520	3440	46560	2074
560	93	89,0	40	560	3560	50120	2212
600	86	89,5	40	600	3580	53700	2370
640	58	72,0	40	640	2880	56580	1828
680	83	70,5	40	680	2820	59400	1226
720	67	75,0	40	720	3000	62400	804
760	59	63,0	40	760	2520	64920	-98
800	66	62,5	40	800	2500	67420	804
840	69	67,5	40	840	2700	70120	-1742
880	72	70,5	40	880	2820	72940	-2344
920	61	66,5	40	920	2660	75600	-3106
960	57	59,0	40	960	2360	77960	-4168

**Tabela 45 – Continuação da Tabela 45**

Ponto	Deflexão i ( $\times 10^{-2}$ mm)	D	$\Delta I_i$	$\Sigma \Delta I_i$	$A_i$	$\Sigma A_i$	$Z_i$
1000	58	57,5	40	1000	2300	80260	-5290
1040	67	62,5	40	1040	2500	82760	-6212
1080	78	72,5	40	1080	2900	85660	-6734
1120	89	83,5	40	1120	3340	89000	-6816
1160	78	83,5	40	1160	3340	92340	-6898
1200	82	80,0	40	1200	3200	95540	-7120
1240	87	84,5	40	1240	3380	98920	-7162
1280	97	92,0	40	1280	3680	102600	-6904
1320	88	92,5	40	1320	3700	106300	-6626
1360	81	84,5	40	1360	3380	109680	-6668
1400	95	88,0	40	1400	3520	113200	-6570
1440	97	96,0	40	1440	3840	117040	-6152
1480	105	101,0	40	1480	4040	121080	-5534
1520	102	103,5	40	1520	4140	125220	-4816
1560	99	100,5	40	1560	4020	129240	-4218
1600	86	92,5	40	1600	3700	132940	-3940
1640	93	89,5	40	1640	3580	136520	-3782
1680	101	97,0	40	1680	3880	140000	-3324
1720	99	100,0	40	1720	4000	144400	-2746
1760	103	101,0	40	1760	4040	148440	-2128
1800	97	100,0	40	1800	4000	152440	-1550
1840	84	90,5	40	1840	3620	156060	-1352
1880	87	85,5	40	1880	3420	159480	-1354
1920	103	95,0	40	1920	3800	163280	-976
1960	105	99,0	40	1960	3960	167240	-438
2000	98	96,0	40	2000	3860	171100	0
Total				2000		171100	

Os valores 2000 e 171100 são, respectivamente,  $L_c$  e  $A_c$ .

## 7.2 Anexo B: *Script* de conversão BackMeDiNa - BAKFAA

```

1  import glob
2  # -----
3  input_dir = "csv"
4  output_dir = "fwd"
5  carga = 120 #kN
6  distancias = [0, 20, 30, 45, 60, 90, 120]
7  # -----
8  def celsius_para_fahrenheit(celsius):
9      """Converte uma temperatura de Celsius para Fahrenheit."""
10     fahrenheit = celsius * 9 / 5 + 32
11     return fahrenheit
12 # -----
13 for input_file in glob.glob("csv/*.csv"):
14
15     output_file = output_dir + "/" + input_file.split("/") [1].split(".") [0] + ".fwd"
16     print(output_file)
17
18     dados = open(input_file, "r", encoding='cp1252').readlines()[4].split(";")
19     temp_ar = dados[1].replace(",",".")
20     temp_pav = dados[2].replace(",",".")
21     deflexoes = dados[8:15]
22
23     impact_load = carga * 224.81
24     out = open(output_file, "w")
25     out.write("IKUAB FWD FILE      :\n")
26     out.write("HSite                :\n")
27     out.write("HOperator             :\n")
28     out.write("HRoad                 :\n")
29     out.write("\n")
30     out.write("IDate Created        : 10/7/2010\n")
31     out.write("IVersion             : 2.2.17\n")
32     out.write("ILoad Mode           : 1          (18 + 18 buffers)\n")
33     out.write("IPlate Radius        : 5.91      (in)\n")
34     out.write("IExtra Field Set     : FAA\n")
35     out.write("IDrop Sequence       : 1\n")
36     out.write("INo of drops         : 1\n")
37     out.write("IRecord Drop?       : H\n")
38     out.write("IDrop Height         : 1\n")
39     out.write("IImpact Load         : %d lbf\n" % impact_load)
40     out.write("ISensor Number      :      0      1      2      3      4      5\n")
41     out.write("ISensor Distance    :      ")
42     for distancia in distancias:
43         out.write("%0.2f " % (distancia * 0.393701))
44     out.write(" (in)\n")
45     out.write("ISensor Position    : CENTER  CENTER CENTER CENTER CENTER CENTER\n")
46     out.write("IReference Offset   :      0 ft\n")
47     out.write("ITestpoint spacing  :      0 ft\n")
48     out.write("\n")
49     out.write("JDistance Imp Load  D0      D1      D2      D3      D4      D5\n")
50     out.write("D6      D7 Air Pave Station Time \n")
51     out.write("J      ft Num    lbf    mils    mils    mils    mils    mils    mils\n")
52     out.write("      °F      °F          \n")
53     out.write("J----- \n")
54     out.write("D      18  1 %d " % impact_load)
55     for deflexao in deflexoes:
56         out.write("%0.2f " % (float(deflexao) / 25.4))
57     out.write("%d " % celsius_para_fahrenheit(float(temp_ar)))
58     out.write("%d " % celsius_para_fahrenheit(float(temp_pav)))
59     out.write("1 00:00:00\n")
60     out.close()

```

### 7.3 Anexo C: Arquivo de saída COMFAA 3.0

This file name = PCN Results Flexible 6-2-2024 16:03:11.txt  
 Library file name = C:\Users\eduar\Desktop\TCC\COMFAA\TCC2.Ext  
 Units = Metric

Evaluation pavement type is flexible and design procedure is CBR.  
 Alpha Values are those approved by the ICAO in 2007.

CBR = 10.60 (Subgrade Category is B(10))  
 Evaluation pavement thickness = 635.0 mm  
 Pass to Traffic Cycle (PtoTC) Ratio = 2.00  
 Maximum number of wheels per gear = 2  
 Maximum number of gears per aircraft = 2

No aircraft have 4 or more wheels per gear. The FAA recommends a reference section assuming 76 mm of HMA and 152 mm of crushed aggregate for equivalent thickness calculations.

Results Table 1. Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Tire Gross Wt	Annual Press	20-yr Deps	6D Coverages	Thick
1	Bombardier C300	17.622	95.00	1,000	5	35	132.4
2	ATR-72	19.990	95.00	793	904	7,621	261.0
3	ERJ-135	19.000	95.00	924	11	84	160.4
4	EMB-190	47.790	95.00	1,010	410	4,642	422.0
5	A318-100 std	59.000	95.00	1,074	8	88	285.2
6	A319-100 std	64.000	95.00	1,193	38	411	367.7
7	B737-700	70.080	95.00	1,358	120	1,305	444.8
8	A320-200	73.500	95.00	1,379	2,628	28,365	565.3
9	B737-800	79.016	95.00	1,407	1,693	19,200	588.3

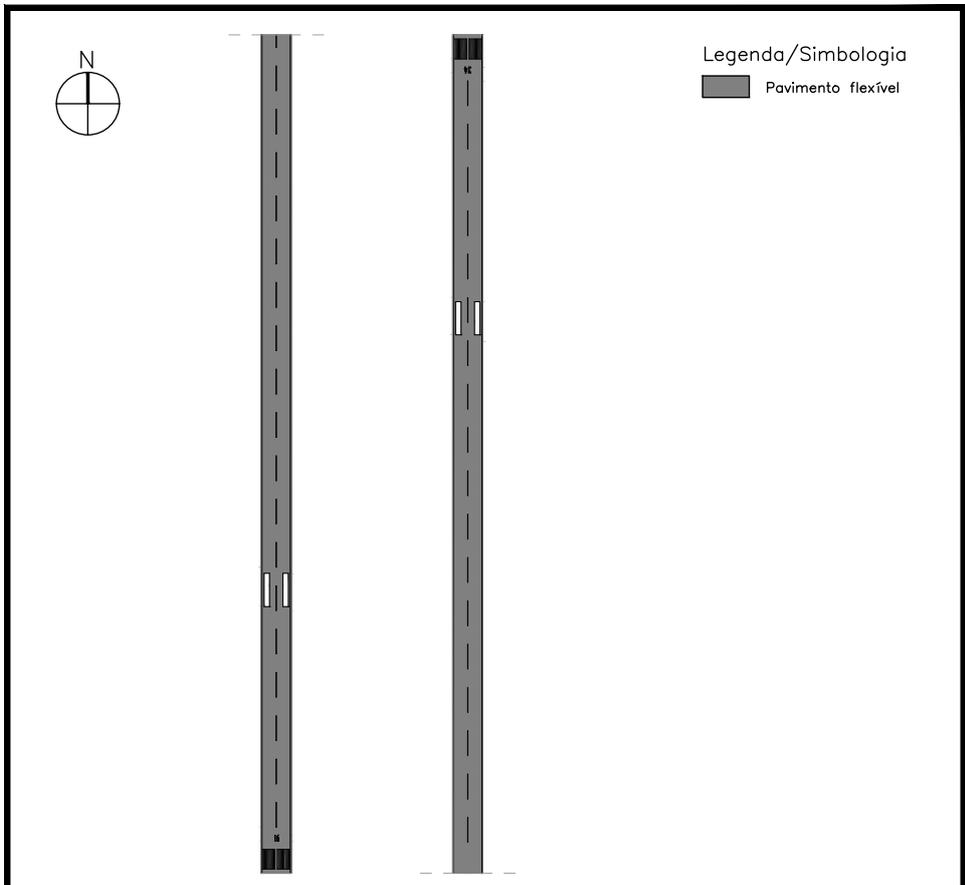
Results Table 2. PCN Values

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Weight	Thickness for Total Covs.	Maximum Allowable Equiv. Covs.	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	ACN on Gross Weight	PCN on CDF	B(10)
1	Bombardier C300	>5,000,000	411.0	35.489	400.44	0.0000	21.3	
2	ATR-72	>5,000,000	440.6	36.419	403.30	0.0000	21.6	
3	ERJ-135	>5,000,000	430.3	35.820	400.96	0.0000	21.4	
4	EMB-190	>5,000,000	622.5	49.382	476.70	0.0000	30.2	
5	A318-100 std	>5,000,000	620.9	61.128	486.17	0.0000	31.4	
6	A319-100 std	2,035,433	616.6	67.148	517.35	0.0001	35.5	
7	B737-700	157,386	609.4	75.006	567.47	0.0029	42.8	
8	A320-200	111,506	608.5	79.041	576.88	0.0902	44.2	
9	B737-800	26,051	599.5	86.384	622.35	0.2613	51.5	
Total CDF =								0.3545

Results Table 3. Flexible ACN at Indicated Gross Weight and Strength

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN Thick	ACN on B(10)
1	Bombardier C300	17.622	95.00	1,000	259.1	8.9
2	ATR-72	19.990	95.00	793	275.6	10.1
3	ERJ-135	19.000	95.00	924	269.5	9.6
4	EMB-190	47.790	95.00	1,010	466.5	28.9
5	A318-100 std	59.000	95.00	1,074	475.8	30.0

## 7.4 Anexo D: Projeto de sinalização horizontal



SINALIZAÇÃO HORIZONTAL DA PISTA DE POUSO E DECOLAGEM  
 esc 1:8

NOTAS:

AEROPORTO INTERNACIONAL PRESIDENTE CASTRO PINTO			
TÍTULO: RESTAURAÇÃO DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM		DATA DE ELABORAÇÃO: 10/06/2024	PRANCHA: 01/01
	DESENHO: SINALIZAÇÃO HORIZONTAL – PPD	ESPECIALIDADE: ENGENHARIA CIVIL	ESCALA: INDICADA
	ELABORAÇÃO: EDUARDA SILVA BARRETO		REVISÃO: 00 FOLHA: A4

## Referências

- AASHTO. *Guide for Design of Pavement Structure*. [S.l.], 1993.
- ABNT. *Norma NBR 8348 - Execução de sinalização horizontal de pistas e pátios em aeroportos*. [S.l.], 2007.
- ABNT. *Norma NBR 8169 - Aeroportos - Tinta à base de resina acrílica estirenada*. [S.l.], 2011.
- ABNT. *Norma NBR 9603 - Sondagem a trado - Procedimento*. [S.l.], 2023.
- Airbus. *Aircraft characteristics, airport and maintenance planning - A320*. [S.l.], 2005a.
- Airbus. *Aircraft characteristics, airport and maintenance planning - A319*. [S.l.], 2005b.
- Airbus. *Aircraft characteristics, airport and maintenance planning - A318*. [S.l.], 2005c.
- Alves, A. B. C. *Avaliação da capacidade de suporte e controle tecnológico de execução da camada final de terraplenagem utilizando o penetrômetro dinâmico de cone*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- ANAC. *Regulamento Brasileiro de Aviação Civil nº 153 emenda nº 01*. [S.l.], 2016a.
- ANAC. *Instrução Suplementar IS Nº 153.103-001 - Revisão A*. [S.l.], 2016b.
- ANAC. *Glossário*. [S.l.], 2017a.
- ANAC. *Manual de sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários*. 2017b.
- ANAC. *Manual para o cálculo de PCN de pavimentos aeroportuários usando o COMFAA 3.0*. [S.l.], 2020.
- ANAC. *Biblioteca de Patologia de Pavimentos Aeroportuários*. [S.l.], 2021a.
- ANAC. *Avaliações da infraestrutura*. [S.l.], 2021b.
- ANAC. *Alerta aos Operadores de Aeródromo nº 003/2021*. [S.l.], 2021c.
- ANAC. *Regulamento Brasileiro de Aviação Civil nº 154 emenda nº 07*. [S.l.], 2021d.
- ANAC. *Manual de projeto, execução e manutenção de grooving em pavimentos aeroportuários*. [S.l.], 2021e.
- ANAC. *Manual de Projetos Aeroportuários*. [S.l.], 2021f.
- ANAC. *Manual de cálculo de PCR de pavimentos aeroportuários*. [S.l.], 2022.
- ANAC. *Instrução suplementar - is nº 153.205-001 revisão c*. 2023a.
- ANAC. *Regulamento brasileiro de aviação civil nº 153 emenda nº 07*. 2023b.
- Ashford, N. J.; Mumayiz, S. A.; Wright, P. H. *Airport Engineering: Planning, Design and Development of 21st Century Airports*. 4. ed. [S.l.: s.n.], 2011.
- ASTM. *D 4694 – 96: Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device*. [S.l.], 2003.
- ASTM. *Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*. [S.l.], 2004.

ASTM. *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*. [S.l.], 2015.

ASTM. *D 4695-03: Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements*. [S.l.], 2020.

ATECEL. *Diagnóstico do pavimento do complexo aeroportuário internacional Governador Aluizio Alves*. [S.l.], 2016.

ATR. *Airplane characteristics - ATR-72*. [S.l.], 1999.

Balbo, J. T. *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*. [S.l.: s.n.], 2007.

Bernucci, L. B. B. et al. *Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. [S.l.]: ABEDA, 2008.

Bernucci, L. B. B. et al. *Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. [S.l.]: ABEDA, 2022.

Boeing. *Airplane Characteristics for Airport Planning - 737-600/700/800/900*. [S.l.], 2001.

Bombardier. *Flight Crew Operating Manual*. [S.l.], 2008.

Bombardier. *Challenger 300*. [S.l.], 2016.

Bonfim, V. *Fresagem de pavimentos asfálticos*. 3<sup>a</sup>. ed. [S.l.: s.n.], 2016.

Chaves, J. W. R.; Almeida, L. C.; Oliveira, F. H. Simulações de dimensionamento e vida útil de pavimento aeroportuário a partir de segmentos homogêneos retroanalisados por distintos softwares. *25<sup>o</sup> Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), 48<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)*, 2023.

Claus, P. R. *Relatório Técnico: Determinação do Pavement Classification Number (PCN) utilizando o software COMFAA 3.0 da Federal Aviation Administration (FAA)*. [S.l.], 2022.

DNER. *DNER-PRO 011/79: Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis*. [S.l.], 1979.

DNER. *Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)"*. [S.l.], 1996.

DNIT. *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. [S.l.], 2006a.

DNIT. *DNIT 031/2006 - ES - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço*. [S.l.], 2006c.

DNIT. *Pavimentos – Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)" - Procedimento*. [S.l.], 2010a.

DNIT. *Quadro de fabricantes de veículos*. [S.l.], 2012a.

DNIT. *Resolução nº 10*. [S.l.], 2021.

Dynatest. *Relatório Técnico - Sondagens e ensaios laboratoriais*. [S.l.], 2016a.

Dynatest. *Relatório Técnico - Levantamentos deflectométricos*. [S.l.], 2016b.

Embraer. *Airport Planning Manual - E135*. [S.l.], 2008.

Embraer. *Airport Planning Manual - E190*. [S.l.], 2021.

FAA. *Field Survey and Analysis of Aircraft Distribution on Airport Pavements*. [S.l.], 1975.

FAA. *Advisory Circular 150/5320-6D - Airport Pavement Design and Evaluation*. [S.l.], 1995.

- FAA. *Order 5300.7 – Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations*. [S.l.], 2005.
- FAA. *AC 150/5370-11B - Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements*. [S.l.], 2011.
- FAA. *Advisory circular 150/5320-17a - airfield pavement surface evaluation and rating manuals*. 2014a.
- FAA. *Advisory Circular 150/5335 - 5C - Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN*. [S.l.], 2014b.
- FAA. *Advisory Circular 150/5340-1M - Standards for Airport Markings*. [S.l.], 2020.
- FAA. *Advisory Circular 150/5320-6G - Airport Pavement Design and Evaluation*. [S.l.], 2021.
- FAA. *Advisory Circular 150/5335-5D - Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength (PCR)*. [S.l.], 2022.
- Franco, F. A. C. P. *Manual de Ajuda Programa BackMeDiNa versão 1.2.0*. [S.l.], 2020.
- Galli, V. L.; Vieira, R.; Alencar, C. L. *Gpr aplicado na investigação de pavimentos*. *Sociedade Brasileira de Geofísica*, 2017.
- GCA, C. *Estudos de Engenharia e Afins*. [S.l.], 2018.
- Gonçalves, F. J. P. *Medição de Irregularidade Longitudinal - IRI*. [S.l.], 2017.
- Horonjeff, R. et al. *Planning Design of Airports*. [S.l.: s.n.], 2010.
- Howell, P.; Kozyreff, G.; Ockendon, J. *Applied Solid Mechanics*. [S.l.]: Press Syndicate of the University of Cambridge, 2008.
- INFRAERO. *Relatório Técnico - Determinação do Pavement Classification Number (PCN)*. [S.l.], 2016a.
- INFRAERO. *Evidência NC 46 (OPS) - Anexo*. [S.l.], 2016b.
- INFRAERO. *Medição de atrito*. [S.l.], 2017a.
- INFRAERO. *Medição de macrotextura*. [S.l.], 2017b.
- INFRAERO. *Relatório deflectométrico com retroanálise e cálculo do PCN*. [S.l.], 2018a.
- INFRAERO. *Relatório consolidado das condições dos pavimentos aeroportuários seguindo a metodologia do pci. Aeroporto Internacional de João Pessoa - Presidente Castro Pinto*, 2018b.
- Jordão, L. P. *Avaliação estrutural das pistas de pouso e decolagem, pátios e acessos do Aeroporto Presidente Castro Pinto de João Pessoa*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2004.
- Junior, F. A. S. *Cone de Penetração Dinâmica (DCP): uma alternativa ao dimensionamento de pavimentos urbanos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2005.
- Lima, M. I. C. *Avaliação do PCN em pavimentos aeroportuários*. Dissertação (Mestrado), 2014.
- Lira, M. N. *The influence of load intensity on structural response of airport pavements assessed by nondestructive evaluation methods*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2023.
- Martins, G. A. *Estudo estrutural de uma pista de uma infraestrutura aeroportuária*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Politécnico de Bragança, 2017.

Medina, J. *Mecânica dos Pavimentos*. [S.l.: s.n.], 1997.

Oliveira, F. H. L. Considerações sobre a práticas dos serviços de remoção de borracha em pavimentos aeroportuários. *39ª Reunião Anual de Pavimentação - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*, 2008.

Oliveira, F. H. L. *Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, 2016.

Pereira, F. T. B. Em nome da "modernização": A reforma do aeroporto castro pinto, em João Pessoa. *Docomomo Brasil*, 2012.

SHRP. *Manual for FWD Testing in the Long-Term Pavement Performance Program*. [S.l.], 1993.

Soares, J. B.; Motta, L. M. G. a. S. R. F. Análise de bacias deflectométricas para o controle de construção de pavimentos asfálticos. *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 2000.

VINCI. *Relatório de retroanálise*. [S.l.], 2021a.

VINCI. *Relatório técnico: avaliações da infraestrutura*. [S.l.], 2021c.

VINCI. *Relatório de retroanálise*. [S.l.], 2021d.

VINCI. *Relatório técnico: avaliações da infraestrutura*. [S.l.], 2021f.

Wells, A. T.; Young, S. B. *Airport Planning and Management*. 6ª. ed. [S.l.: s.n.], 2011.