



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

FERNANDA LOPES DE SOUSA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO ESTRUTURAL DIFERENCIAL EM TRECHOS DE
UMA PISTA DE POUSO E DECOLAGEM**

FORTALEZA

2023

FERNANDA LOPES DE SOUSA

ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DIFERENCIAL EM TRECHOS DE
UMA PISTA DE POUSO E DECOLAGEM

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

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S696a Sousa, Fernanda Lopes de.

Análise de desempenho estrutural diferencial em trechos de uma pista de pouso e decolagem / Fernanda Lopes de Sousa. – 2023.

70 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2023.

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

1. Pista de pouso e decolagem. 2. Avaliação estrutural. 3. Desempenho estrutural. 4. HWD. I. Título.

CDD 620

FERNANDA LOPES DE SOUSA

ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DIFERENCIAL EM TRECHOS DE
UMA PISTA DE POUSO E DECOLAGEM

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

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Aprovada em: 13 / 12 / 2023

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dr. Marisete Dantas de Aquino
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Mateus do Nascimento Lira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por todas as bênçãos.

À minha mãe Goreth por toda dedicação em promover uma educação de qualidade e por ser meu maior exemplo de filha, irmã e mulher.

Aos meus irmãos Roberta, Bruno e Gabriela, por compartilharem a jornada da vida ao meu lado e serem suportes incondicionais.

Ao Renato, por toda atenção e auxílio nas idas e vindas das aulas.

À minha namorada por me ouvir e me incentivar em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira, pela atenção e excelente orientação. Agradeço pelas valiosas sugestões e correções que desempenharam um papel fundamental na produção deste trabalho.

Ao Prof. Me. Mateus Lira, por suas contribuições como coorientador. Agradeço imensamente pela disponibilidade, dedicação e paciência e, acima de tudo, por tornar esse processo mais leve.

Aos meus colegas de graduação, especialmente ao meu melhor amigo, Elivelton, pela amizade sincera e companheirismo constante ao longo de todos esses anos.

RESUMO

As pistas de pouso e decolagem desempenham um papel fundamental na segurança das operações aéreas, tornando-se essencial realizar avaliações em campo para compreensão de sua condição funcional e estrutural. Análises estruturais que examinam a distribuição de cargas impostas pelas aeronaves ao longo dos diferentes segmentos dessas pistas podem auxiliar na otimização do uso dos recursos de manutenção e reabilitação, assegurando a estabilidade das aeronaves e a segurança operacional. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar, por meio da aplicação de diferentes cargas, se existe desempenho estrutural diferencial em trechos distintos de uma pista de pouso e decolagem. Cargas de 80 kN e 280 kN foram aplicadas por equipamentos Falling Weight Deflectometer (FWD) e Heavy Weight Deflectometer (HWD) em eixos coincidentes com as trilhas de roda de aeronaves de médio e grande porte ao longo do pavimento. Mediante aquisição das deformações elásticas (deflexões), comparou-se a deflexão máxima em cada terço da pista estudada. Utilizando a retroanálise de bacias deflectométricas, com auxílio do software BAKFAA v.3.4.2, obtiveram-se os módulos de resiliência (MR) de cada camada do pavimento, comparando-os, também, para cada terço. Testes de hipóteses, como o de Wilcoxon, foram conduzidos para aprimorar a confiabilidade das análises e conclusões. A avaliação dos dados coletados na pista estudada revelou que o local de medição interfere na avaliação estrutural e que o terço mais distante da cabeceira predominante em operações apresenta uma condição estrutural superior, devido à sua menor solicitação em comparação com os demais terços. Os dois primeiros terços apresentaram maiores deflexões máximas, em virtude de uma pior condição estrutural resultante de uma maior solicitação da estrutura quando em comparação ao terceiro terço. A divergência nos valores do MR de cada camada do pavimento em cada terço demonstrou que estes possuem desempenho estrutural distinto em função das suas condições estruturais. Assim, constata-se a existência de desempenho estrutural diferencial que pode resultar em desgaste e deterioração desproporcionais em áreas distintas da pista de pouso e decolagem. Ao identificá-las, podem-se adotar medidas corretivas específicas para cada trecho, permitindo evitar custos elevados na aplicação das estratégias de manutenção e reabilitação.

Palavras-Chave: pista de pouso e decolagem; avaliação estrutural; desempenho estrutural, HWD.

ABSTRACT

The landing and takeoff runways play a crucial role in the safety of air operations, making it essential to be conducted field assessments to understand their functional and structural conditions. Structural analyses examining the distribution of loads imposed by aircraft along different segments of these runways can help optimizing maintenance and rehabilitation resources, ensuring aircraft stability and operational safety. In this context, the objective of this study is to evaluate whether the application of different loads results in differential structural performance in different sections of a runway. Loads of 80 kN and 280 kN were applied by Falling Weight Deflectometer (FWD) and Heavy Weight Deflectometer (HWD) equipment on axes coinciding with the wheel path of medium and large aircraft along the pavement. By acquiring elastic deformations (deflections), the maximum deflection in each third of the studied runway was compared. Using back-analysis of deflectometric basin, with the assistance of BAKFAA software v.3.4.2, the resilient modulus (RM) of each pavement layer was obtained, also comparing them in each third. Hypothesis tests, such as the Wilcoxon test, were conducted to enhance the reliability of the analyses. The evaluation of the collected data on the studied runway revealed that the measurement location influences on the structural assessment and that the third farthest from the predominant runway head in operations presents a superior structural condition due to its lower demand compared to the third one. The first two thirds showed higher maximum deflections due to a worse structural condition resulting from greater structural demand compared to the third. The divergence in the RM values of each pavement layer in each third demonstrated that they have distinct structural performance based on their structural conditions. Thus, there is evidence of differential structural performance that can result in unequal wear and deterioration in different areas of the landing and takeoff runway. By identifying these areas, specific corrective measures can be adopted for each section, avoiding high costs in the application of maintenance and rehabilitation strategies.

Keywords: landing and takeoff runway; structural assessment; structural performance; HWD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de pavimentos	16
Figura 2 – Resposta mecânica dos pavimentos.....	16
Figura 3 – Ciclo de vida típico das condições de um pavimento	18
Figura 4 – Zona submetida a esforços	20
Figura 5 – Diferentes bacias deflectométricas para a mesma deflexão máxima.....	21
Figura 6 – Esquema da viga Benkelman e exemplo de medida em campo.....	24
Figura 7 – Vibração de pulso de carga.....	24
Figura 8 – Reboque de deflexão Dynaflect	25
Figura 9 – Road Rater	26
Figura 10 – Princípio de funcionamento de um deflectômetro de impacto.....	27
Figura 11 – Representação esquemática da bacia de deformação obtida através dos deflectômetros de impacto	28
Figura 12 – Alguns elementos da interface <i>default</i> do BAKFAA.....	32
Figura 13 – Fluxograma metodológico	38
Figura 14 – Estrutura da pista analisada.....	39
Figura 15 – Deflexões máximas obtidas pela aplicação da carga de 80 kN	47
Figura 16 – Deflexões máximas obtidas pela queda de 280 kN.....	49
Figura 17 – % de deflexões máximas maiores no primeiro e segundo terço da pista, respectivamente.....	50
Figura 18 – Módulo de resiliência do revestimento na aplicação da carga de 80 kN	52
Figura 19 – Módulo de resiliência do revestimento quando aplicada a carga de 280 kN	53
Figura 20 – Módulo de resiliência nas camadas granulares quando aplicada a primeira queda de 80 kN	54
Figura 21 – Módulo de resiliência nas camadas granulares quando aplicada a segunda queda de 80 kN	55
Figura 22 – Módulos de resiliência nas camadas granulares quando aplicada a carga de 280 kN	56
Figura 23 – Módulos de resiliência no subleito quando aplicada a carga de 80 kN ..	57
Figura 24 – Módulos de resiliência no subleito quando aplicada a carga de 280 kN	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração de teste para o aeroporto estudado.....	40
Tabela 2 – Módulos iniciais sugeridos pelo software.....	42
Tabela 3 – Comprimento dos terços avaliados.....	43
Tabela 4 – Informações de pontos testados e comprimento em cada offset.....	45
Tabela 5 – % de deflexões que se aproximam da média e da mediana, respectivamente.....	46
Tabela 6 – Resumo das medianas das deflexões máximas normalizadas em cada terço para os carregamentos impostos (10^{-2} mm).....	59
Tabela 7 – Resumo das medianas dos MR das camadas constituintes do pavimento em cada terço para os carregamentos impostos (MPa).....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
M&R	Manutenção e Reabilitação
NDT	Nondestructive Testing
FAA	Federal Aviation Administration
FWD	Falling Weight Deflectometer
HWD	Heavy Weight Deflectometer
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
MR	Módulo de Resiliência
LEAF	Layered Elastic Analysis
ISM	Impulse Stiffness Modulus
DIRENG	Diretoria de Engenharia de Aeronáutica

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
mm	Milímetros
km/h	Quilômetros por hora
tf	Tonelada-força
m	Metros
cm	Centímetros
Hz	Hertz
kN	Quilonewton
Kg	Quilograma
Ms	Milissegundo
μm	Micrômetro
MPa	Mega Pascal
γ	Gama
μ	Micro
°C	Grau Celsius
°F	Grau Fahrenheit

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problema da pesquisa	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivos Específicos	14
1.3	Estrutura da monografia	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Uso e Desgaste das Estruturas de Pavimentos	15
2.2	Análise Estrutural	19
2.3	Métodos destrutivos e não destrutivos	21
2.4	Falling Weight Deflectometer e Heavy Weight Deflectometer	27
2.5	Módulo de Resiliência e Retroanálise	29
2.6	Correção dos dados	33
2.7	Resultados de estudos anteriores	34
3	MÉTODO DE PESQUISA	38
3.1	Pista de pouso e decolagem (PPD) de estudo	38
3.2	Obtenção das deflexões e bacia deflectométrica	39
3.3	Eliminação de valores atípicos de deflexão	40
3.4	Obtenção dos módulos de resiliência das camadas	41
3.5	Análise estatística	42
3.6	Análise dos dados	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Observações iniciais	45
4.2	Análise das deflexões máximas	47
4.3	Análise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento	51
4.3.1	Módulo de resiliência na camada de revestimento	52
4.3.2	Módulo de resiliência nas camadas granulares	54
4.3.3	Módulo de resiliência no subleito	57
5	CONCLUSÕES	61
5.1	Sugestões para pesquisas futuras	62
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A – HISTOGRAMA DE DEFLEXÕES MÁXIMAS PARA CARGA DE 80 KN E 280 KN NO <i>OFFSET</i> EIXO+3	67

APÊNDICE B – HISTOGRAMA DE DEFLEXÕES MÁXIMAS PARA CARGA DE 80 KN E 280 KN NO <i>OFFSET</i> EIXO+6.....	68
APÊNDICE C – HISTOGRAMA DE DEFLEXÕES MÁXIMAS PARA CARGA DE 80 KN E 280 KN NO <i>OFFSET</i> EIXO-6.....	69

1 INTRODUÇÃO

O transporte aéreo desempenha um papel essencial na promoção da integração nacional e na inserção de um país no mundo. Em países como o Brasil, de extensões continentais, é fundamental que haja infraestrutura de transporte que permita a rápida e eficiente interligação de suas regiões, facilitando a integração social, cultural e econômica, além do favorecimento de uma maior competitividade internacional por meio de atividades de comércio e turismo.

Com o progresso do panorama econômico brasileiro nas últimas duas décadas, observou-se um crescimento do segmento da aviação no país. Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil — ANAC (2022), a evolução anual no mercado doméstico saiu de cerca de 88,5 milhões de passageiros em 2012 para 95,1 milhões em 2019, cenário semelhante ao do mercado internacional no mesmo período. Em 2020, com a pandemia da Covid-19, houve uma queda na procura pelo transporte aéreo. Todavia, no ano seguinte iniciou-se a retomada do setor, com projeções de crescimento anuais de no mínimo 4,57% até 2026 (ANAC; COMAER, 2023).

Nesse contexto de crescimento de demanda, desenvolveram-se também aeronaves cada vez mais robustas e pesadas, pois além do peso próprio, elas podem transportar mais cargas, o que inclui os passageiros, as bagagens, as demais cargas e o combustível. Esse fato, aliado ao aumento das operações aeroportuárias, passa a exigir mais da infraestrutura aeroportuária como um todo, em especial dos pavimentos das pistas de pouso e decolagem, de taxiamento e dos pátios de estacionamento das aeronaves.

Em se tratando dos principais elementos da infraestrutura aeroportuária, evidencia-se a relevância das pistas de pouso e decolagem no desempenho das operações aéreas. Não há nenhuma atividade, direta ou indiretamente relacionada às aeronaves, que possam ser realizadas sem o correto funcionamento dos pavimentos (Oliveira, 2016).

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), a avaliação funcional de um pavimento consiste na análise do estado de sua superfície. Por sua vez, a avaliação estrutural está relacionada ao conceito de capacidade de carga. O pavimento, quando submetido ao processo de carregamento, responde por meio de deformações (elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes). Dessas deformações

resultam alguns defeitos, que comprometem tanto a sua superfície, quanto a estrutura. Desse modo, é imprescindível que sejam realizadas essas verificações que auxiliam na proposição de estratégias de manutenção e reabilitação (M&R) eficientes, buscando garantir conforto e, sobretudo, segurança nas operações.

A avaliação estrutural do pavimento permite que as agências de controle do espaço aéreo forneçam informações precisas sobre a capacidade de suporte estrutural dos pavimentos em seus respectivos aeroportos. Essa avaliação é importante para prevenir o deterioramento precoce das estruturas e garantir a segurança das operações aéreas. Ao identificar a capacidade de carga que o pavimento pode suportar, evita-se a operação frequente de aeronaves cujo peso bruto exceda os limites estabelecidos, o que poderia levar ao comprometimento da integridade do pavimento e a potenciais acidentes (Lira, 2023).

Assim, considerando a relevância do assunto, justifica-se a realização desta pesquisa, partindo da hipótese de que o primeiro terço da pista de pouso e decolagem é o mais exigido estruturalmente devido a diferentes fatores. Além de absorver o impacto da aeronave durante o pouso, esse trecho enfrenta uma solicitação maior, quando comparado aos demais terços, durante o processo de decolagem. A velocidade desenvolvida nesse trecho é menor em comparação aos trechos subsequentes da pista, contribuindo para o dano gerado no pavimento pela intensificação da tensão vertical e dos deslocamentos (Figur; Vicentini, 2018).

1.1 Problema da pesquisa

O desempenho estrutural desigual pode resultar em desgaste e deterioração desproporcionais em diferentes áreas de uma pista de pouso e decolagem. A ausência da verificação dessas disparidades pode ter um impacto negativo na proposição de estratégias de M&R. Ao deixar de identificá-las, não se faz a adoção de medidas corretivas específicas para cada trecho, o que prejudica a otimização do uso dos recursos necessários. A implementação de ações preventivas e corretivas direcionadas às áreas mais afetadas permite evitar custos elevados na aplicação das estratégias de M&R.

Além disso, garantir a uniformidade das condições estruturais do pavimento é crucial para prevenir problemas que possam comprometer a segurança das operações aeroportuárias. Em casos extremos, uma pista com diferentes

desempenhos estruturais pode resultar em condições de pouso e decolagem instáveis, afetando a estabilidade das aeronaves, aumentando o risco de acidentes e prejudicando a segurança dos passageiros, tripulação e cargas transportadas.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar, por meio da aplicação de diferentes cargas, se existe desempenho estrutural diferencial em trechos distintos de uma pista de pouso e decolagem.

1.2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos podem ser listados:

- a) Identificar possíveis disparidades na resposta estrutural do pavimento em trechos diferentes de uma pista de pouso e decolagem;
- b) Avaliar se a capacidade de deformação elástica do pavimento é alterada após solicitação;
- c) Verificar se existe um padrão de comportamento estrutural do pavimento ao ser submetido a carregamentos distintos.

1.3 Estrutura da monografia

A estrutura deste trabalho é composta por cinco capítulos distintos. Além deste capítulo introdutório, no segundo capítulo, encontra-se a fundamentação teórica necessária para compreender o trabalho, com as definições dos principais assuntos discutidos na pesquisa. O terceiro capítulo é dedicado à caracterização da pista a ser analisada e ao detalhamento das etapas metodológicas utilizadas no estudo. No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos com as respectivas discussões. No capítulo cinco, são apresentadas as principais conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresentará as principais produções bibliográficas que discutem o desempenho de pavimentos, com ênfase nos pavimentos flexíveis. Além disso, serão descritas algumas técnicas empregadas para a obtenção de parâmetros importantes no estudo das condições estruturais desse tipo de pavimento.

2.1 Uso e Desgaste das Estruturas de Pavimentos

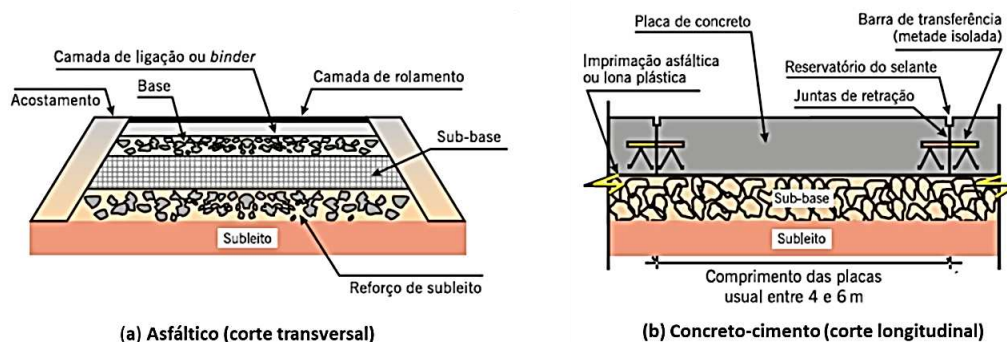
No âmbito dos transportes, o pavimento é caracterizado como uma estrutura composta por camadas dispostas sobre uma superfície final devidamente regularizada (subleito), cujo objetivo técnico e econômico é resistir às forças geradas pelo tráfego de veículos e pelas condições climáticas, além de proporcionar aos usuários um aumento no conforto, na economia e na segurança. Tal estrutura deve ser projetada de forma que cada camada tenha uma espessura e rigidez definidas, criando um sistema de camadas que recebe e transmite os esforços causados pelo tráfego para as camadas subjacentes — normalmente menos resistentes (Balbo, 2007; Bernucci *et al.*, 2022).

Os pavimentos são classificados conformes os materiais empregados e a forma como distribuem as tensões. Assim como nas rodovias, os pavimentos aeroportuários são divididos em dois tipos distintos: rígidos e flexíveis. Os pavimentos rígidos, mais recentemente chamados pavimentos de concreto-cimento, são aqueles cujo revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, podendo esta ser armada com barras de aço (Oliveira, 2009). Segundo Bernucci *et al.* (2022) a espessura do pavimento é determinada considerando a resistência à flexão das placas de concreto e a resistência das camadas inferiores. Para DNIT (2006a), nesse tipo de pavimento, o revestimento absorve quase totalmente as tensões provenientes da carga aplicada.

O pavimento flexível, por sua vez, é constituído por uma camada de revestimento asfáltico, assentada sobre camadas compostas por solos ou misturas de solos e materiais granulares que formam sua base, sub-base e, se necessário, o reforço do subleito. Todas as camadas experimentam deformação elástica significativa em resposta à carga aplicada, resultando em uma distribuição de carga que é aproximadamente equivalente entre as diferentes camadas (DNIT, 2006a; Bernucci

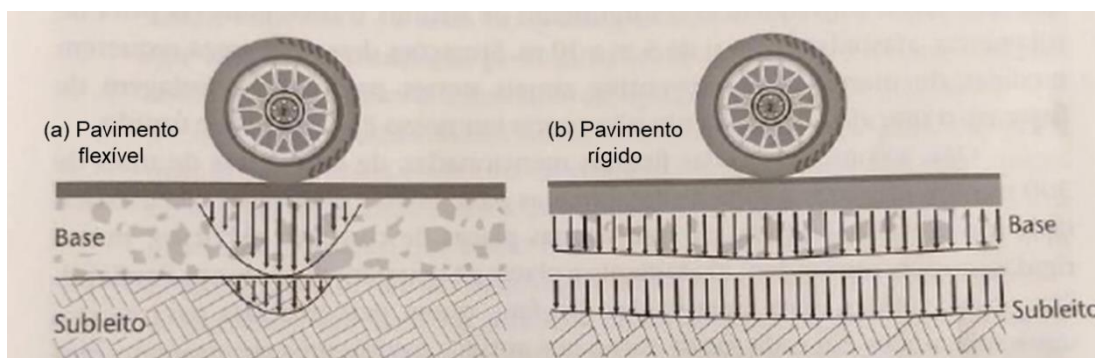
et al., 2022). As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, as diferenças na composição da estrutura e na resposta mecânica dos dois tipos de pavimentos comentados.

Figura 1 - Estrutura de pavimentos



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2022)

Figura 2 - Resposta mecânica dos pavimentos



Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

Segundo INFRAERO (2008), nos aeroportos brasileiros, a utilização de pavimentos flexíveis é comum em pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi para aeronaves e vias internas de serviço destinadas à circulação de veículos e equipamentos de apoio às aeronaves em solo. Nestes pavimentos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural.

As camadas de base e sub-base são utilizadas com o objetivo de reduzir as pressões exercidas sobre as camadas de solo subjacentes, além de desempenhar um papel significativo na drenagem subsuperficial. O reforço é aplicado quando o subleito é constituído por um solo com baixa resistência às cargas verticais provenientes do tráfego, mas seu uso não é obrigatório, pois maiores espessuras de

base e sub-base podem aliviar as forças sobre o subleito. O revestimento é a camada que está diretamente submetida às cargas dos veículos e às condições climáticas, portanto, deve ser o mais impermeável e resistente possível para lidar com as forças geradas pelo contato entre os pneus e o pavimento, as quais variam com a carga e a velocidade dos veículos (Balbo, 2007; Bernucci *et al.*, 2022).

A partir do momento que um pavimento é aberto ao tráfego, sua superfície começa a sofrer os impactos deste, das condições climáticas e de outros fatores. Conseqüentemente, segundo Nóbrega (2003), o valor de qualquer índice que avalie as condições e funcionalidade do pavimento varia ao longo de sua vida útil. Quando esse valor atinge o limite máximo de deterioração permitido, é necessária uma intervenção para restaurar suas condições para uso.

De acordo com Lopes (2012), algumas das causas mais conhecidas de deficiência no pavimento flexível são: a ruptura por fadiga da camada de material asfáltico e a deformação plástica excessiva do subleito. A ruptura por fadiga da mistura asfáltica não é súbita, e sim uma deterioração gradual dos seus aspectos funcionais e estruturais que ocorre após um determinado número de aplicações de carga e sob um estado de tensões que podem ocasionar o surgimento de trincas, fraturas e afundamentos, ou seja, o material sofre perda de resistência quando solicitado repetidas vezes por uma carga (Vieira, 2020).

A cada passagem de roda, o pavimento sofre um deslocamento total formado por duas componentes: uma permanente e outra recuperável. Deformações permanentes são aquelas que persistem mesmo após a carga ser removida, ou seja, possuem um caráter residual. Por outro lado, as deformações recuperáveis indicam um comportamento elástico da estrutura, desaparecendo alguns momentos após a retirada da carga (DNIT, 2006b). As deformações elásticas ou recuperáveis são chamadas de deflexões.

Conforme Kakuda (2010), as trincas em camadas de revestimentos acontecem predominantemente devido às elevadas deflexões a que os pavimentos estão sujeitos, sem necessariamente estarem acompanhadas de deformações permanentes. O trincamento por fadiga se inicia nas fibras inferiores da camada do revestimento, propagando-se gradualmente por toda sua espessura até o aparecimento de trincas na superfície. Entretanto, as trincas também podem se iniciar a partir do topo do revestimento quando a superfície do pavimento for solicitada por tensões críticas, podendo ainda serem agravadas pelo enrijecimento devido ao

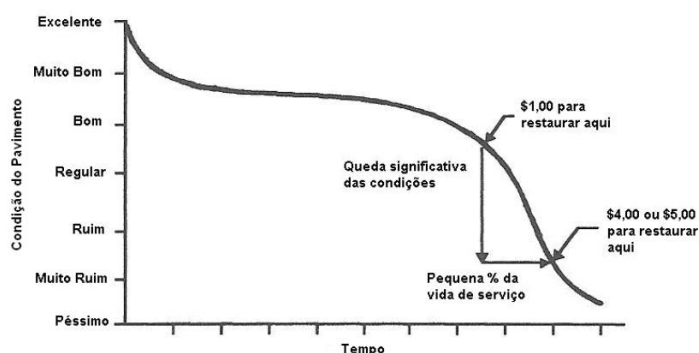
envelhecimento do ligante asfáltico e pela espessura da camada. Vale ressaltar que o envelhecimento do ligante se dá devido à ação das intempéries. No Brasil, em virtude de sua localização geográfica, há grande incidência de raios ultravioleta, e essa radiação desempenha um importante papel como iniciador de reações de degradação que ocorrem na superfície do pavimento asfáltico (Bernucci *et al.*, 2022).

Além disso, deformações excessivas do subleito, que podem ocorrer devido à variação de umidade, também incrementam as chances de ocorrer a fadiga. Essa fadiga, por sua vez, tem um impacto direto e negativo na durabilidade e na vida útil do pavimento (Kakuda, 2010; Gouveia *et al.*, 2021).

De acordo com Wells e Young (2004), a vida útil dos pavimentos asfálticos está normalmente entre 15 e 20 anos, desde que tenham projeto, construção e manutenção adequados. As pistas de aeroporto geralmente são mantidas com padrões de manutenção mais elevados do que estradas e estacionamentos. Em pavimentos aeroportuários, o levantamento de danos deve ser feito, no mínimo, a cada 1 a 5 anos. A medição da resistência a derrapagem e os testes de deflexão não destrutivos – os quais serão detalhados mais adiante – normalmente são realizados entre 5 e 10 anos (Shahin, 2005).

Shahin (2005) destaca ainda que quando utilizadas as estratégias de manutenção e reabilitação (M&R) durante os estágios iniciais de deterioração, antes da acentuada queda na condição do pavimento, mais de 50% dos custos de reparo podem ser evitados em comparação ao cenário onde essas estratégias inexistem. Além da economia de recursos, longos períodos de fechamento ao tráfego e desvios também podem ser evitados. As consequências de um cronograma de manutenção inadequado são mostradas na Figura 3.

Figura 3 - Ciclo de vida típico das condições de um pavimento



Fonte: Adaptado de Shahin (2005)

A seleção das medidas a serem adotadas é diretamente influenciada pelo conhecimento do estado atual do pavimento, especialmente em relação às suas condições estruturais. Para Argue (2005), uma das características de qualidade operacional que os pavimentos aeroportuários devem possuir é a resistência estrutural, isto é, a capacidade de suportar e resistir às cargas atuantes.

De acordo com Thom (2010), essa perspectiva é significativa, visto que as aeronaves constituem um meio de transporte com características particulares em relação às cargas exercidas pelas rodas, arranjos de eixos e velocidades de deslocamento. A avaliação de um pavimento deve ser realizada no intuito de, como já citado, assegurar um alto nível de serviço aos usuários, proporcionando condições que promovam segurança e conforto, evitando assim qualquer contribuição para a ocorrência de acidentes e/ou incidentes.

2.2 Análise Estrutural

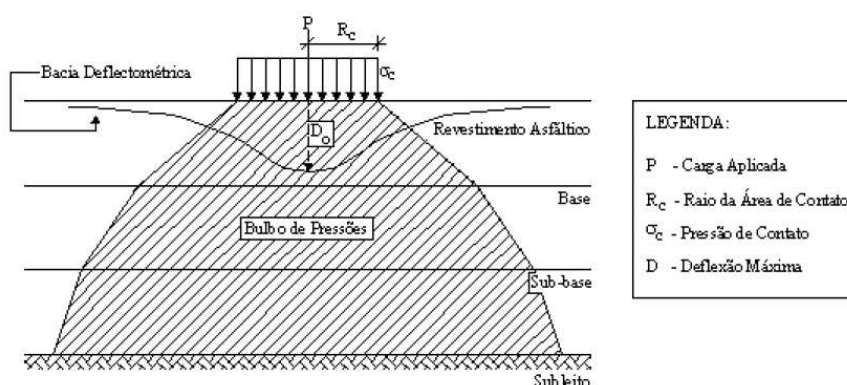
A avaliação estrutural de um pavimento, conforme Kakuda (2010), envolve a análise de sua capacidade em suportar as tensões geradas pelo tráfego. O principal propósito de desenvolver modelos de desempenho a partir dessa avaliação é possibilitar a previsão das condições futuras do pavimento com base nas condições atuais analisadas. Balbo (2007) define a avaliação estrutural como sendo a completa caracterização de elementos e variáveis estruturais dos pavimentos que permite uma descrição precisa do seu comportamento em resposta às cargas do tráfego e às condições ambientais. Essa caracterização da composição de um pavimento envolve a identificação dos materiais e espessuras de cada camada, juntamente com a avaliação da sua integridade através de indicadores estruturais. Uma das metodologias mais utilizadas para avaliar a condição estrutural do pavimento é a medição das deflexões (Lopes, 2012; Vieira, 2020).

A deflexão que ocorre na superfície diretamente sob o ponto de aplicação da carga é determinada pelas características combinadas de todas as camadas que compõem o pavimento, isto é, está intrinsecamente ligada à integridade da estrutura completa. Neste ponto, onde é medida a deflexão máxima (D_0), aproximadamente 70% dessa deformação é atribuída ao comportamento do subleito (Horak e Emery, 2006).

As deformações medidas a uma distância de até 300 mm a partir desse ponto refletem principalmente as condições estruturais da camada da base. No intervalo de 300 mm a 600 mm de distância do ponto de aplicação da carga, as medições indicam as condições estruturais da sub-base. Por outro lado, as deformações medidas a uma distância superior a 600 mm do ponto de aplicação da carga fornecem informações sobre o comportamento do subleito. Essa dinâmica ocorre devido à maneira como as cargas se dispersam pela estrutura do pavimento, seguindo um padrão conhecido como bulbo de pressões (Fabrício *et al.*, 1988; Horak e Emery, 2006).

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), ao medir o deslocamento elástico em vários pontos a partir da aplicação de carga, obtém-se o que é conhecido como bacia de deflexão ou linha de influência da carga em um determinado ponto do pavimento. A configuração das bacias de deflexão é determinada tanto pela carga aplicada na superfície quanto pelas características geométricas e elásticas das diferentes camadas que constituem o pavimento. A Figura 4 ilustra o esquema da zona submetida a esforços. As tensões geradas são propagadas para as camadas abaixo por meio de uma disseminação em forma de cone, cuja inclinação em cada camada, de acordo com Rocha Filho (1996), é determinada pela rigidez do material e espessura individual das camadas.

Figura 4 - Zona submetida a esforços

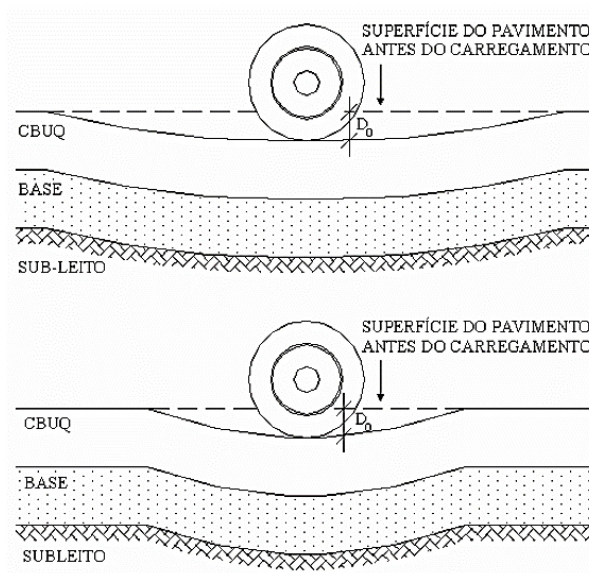


Fonte: Fabrício *et al.*(1988)

Segundo Nóbrega (2003), é importante realizar a caracterização da bacia de deflexão, uma vez que diferentes tipos de bacia podem surgir de uma mesma medida de deflexão máxima, conforme Figura 5. Ademais, de acordo Lopes (2012), à

medida que o valor da deflexão máxima recuperável aumenta, há o indicativo que a estrutura é mais elástica ou resiliente, portanto é maior também o seu comprometimento estrutural.

Figura 5 - Diferentes bacias deflectométricas para a mesma deflexão máxima



Fonte: Nóbrega (2003)

A medida das deflexões é feita por equipamentos denominados deflectômetros. O uso desses dispositivos configura a abordagem mais adequada para análise estrutural de um pavimento (Bernucci *et al.*, 2022). O objetivo dos deflectômetros é, conforme Lopes (2012), reproduzir as condições de carregamento do tráfego com o máximo de precisão, por meio do estabelecimento de procedimentos simplificados para operação e interpretação dos resultados. Isso visa a melhorar a produtividade e, ao mesmo tempo, reduzir os custos dos ensaios.

2.3 Métodos destrutivos e não destrutivos

A avaliação estrutural pode ser feita por meio de métodos destrutivos e não destrutivos. Os métodos destrutivos são definidos pela escavação de trincheiras ou poços de sondagem com o objetivo de investigar a condição estrutural de cada camada que constitui o pavimento. Essa abordagem permite a coleta de amostras de cada material até o subleito, bem como a realização de ensaios de capacidade de

carga *in situ* (Bernucci *et al.*, 2022). Apesar de fornecerem dados mais precisos sobre as características dos materiais do pavimento, a alteração física da estrutura modifica o nível de compactação da amostra. Assim, as propriedades medidas em laboratório podem não refletir o desempenho do material no campo. Também, de acordo com DNIT (2006b), outras desvantagens dos ensaios destrutivos podem ser descritas:

- a) é necessário interromper o fluxo de tráfego na rodovia por um período considerável;
- b) por terem caráter destrutivo, podem introduzir defeitos nas seções do pavimento;
- c) os ensaios são dispendiosos, consomem muito tempo e exigem uma grande quantidade de mão de obra, o que limita sua realização em larga escala;
- d) os resultados dos ensaios representam as condições do material em um ponto específico.

Assim, por manter a integridade física do pavimento, os métodos não destrutivos – ou do inglês *Nondestructive Testing* (NDT) – constituem-se na maneira mais apropriada para determinar a adequação estrutural daquele (DNIT, 2006b). Diferentemente dos testes destrutivos, os NDT permitem a reavaliação no mesmo local testado, possibilitando um acompanhamento contínuo ao longo do tempo (Lopes, 2012).

Um dos métodos de avaliação estrutural não destrutiva consiste na medição das deflexões em diferentes pontos da estrutura, resultantes de carregamentos conhecidos (Balbo, 2007). De acordo com a *Federal Aviation Administration* – FAA (FAA, 2011), os NDT provaram ser úteis no fornecimento de dados sobre as propriedades estruturais do pavimento e camadas de subleito. Com esta informação, o engenheiro pode projetar sobreposições de reabilitação e seções transversais novas/reconstruídas, ou otimizar uma opção de reabilitação desenvolvida.

Os equipamentos de medição podem ser classificados em três tipos distintos, conforme modo de carregamento aplicado:

- a) quase estático: Viga Benkelman, por exemplo.
- b) vibratório: Dynaflect, por exemplo.
- c) por impacto: *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e *Heavy Weight Deflectometer* (HWD).

Segundo Rocha Filho (1996), os equipamentos que empregam o método estático de carregamento são identificados por mensurar as deflexões do pavimento quando uma carga de roda passa sobre ele em velocidade reduzida (aproximadamente 3,0 km/h). A viga Benkelman é um exemplo deste tipo de equipamento e, no Brasil, é um dos ensaios mais utilizados. Introduzida no país em 1962, é composta por uma viga horizontal (viga de referência) suportada por três pés, um traseiro e dois dianteiros. Na parte frontal da viga de referência, há um braço de prova rotulado (como uma alavanca interfixa), com a porção maior posicionada à frente da viga e a menor sob ela. A ponta do braço de prova deve entrar em contato com o pavimento no ponto a ser testado, enquanto na outra extremidade aciona um extensômetro, conectado à viga, com sensibilidade de 0,01 mm.

As deflexões são registradas sob a carga de prova de uma roda dupla traseira direita de um caminhão basculante, equivalente a uma carga de eixo de 8,2 tf. Após posicionar a ponta de prova no centro de carga da roda dupla, é realizada a leitura inicial L_0 no extensômetro. Em seguida, o caminhão se afasta lentamente até 10 m de distância da ponta de prova ou até que o extensômetro não acuse mais variação da leitura. Após um intervalo de tempo adequado, é feita a segunda leitura L_f (DNIT, 2006b; Bernucci et. al, 2022). A deflexão máxima é dada pela Equação 1.

$$D_0 = (L_0 - L_f) \times K \quad (1)$$

Onde:

D_0 – Deflexão máxima;

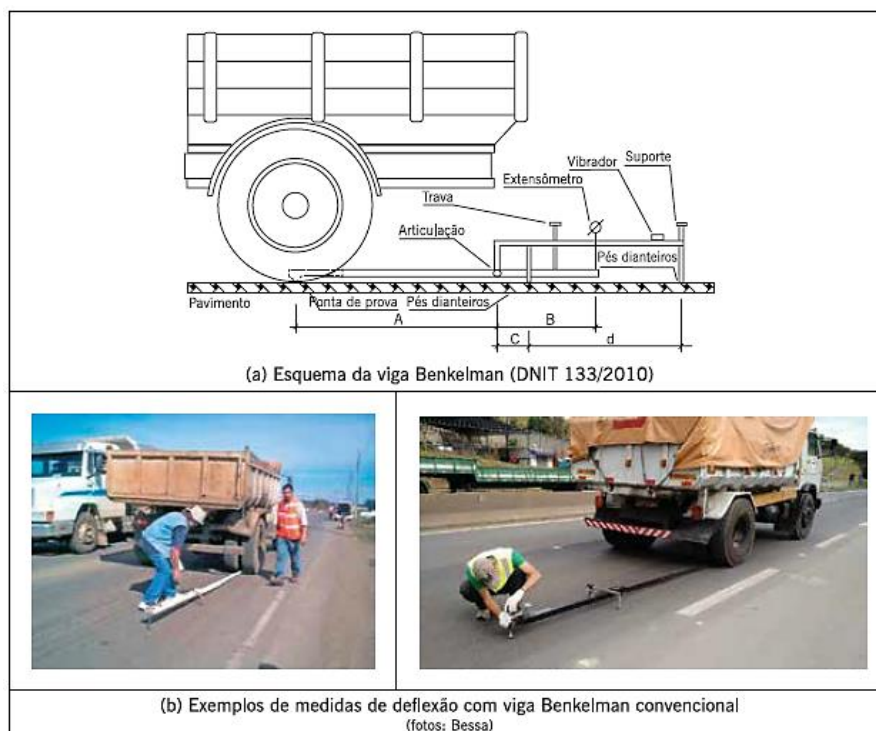
L_0 – Leitura inicial no extensômetro;

L_f – Leitura final no extensômetro;

K – Constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o braço menor, articulados.

A Figura 6 mostra o esquema da Viga Benkelman e um exemplo de medida em campo.

Figura 6 - Esquema da viga Benkelman e exemplo de medida em campo

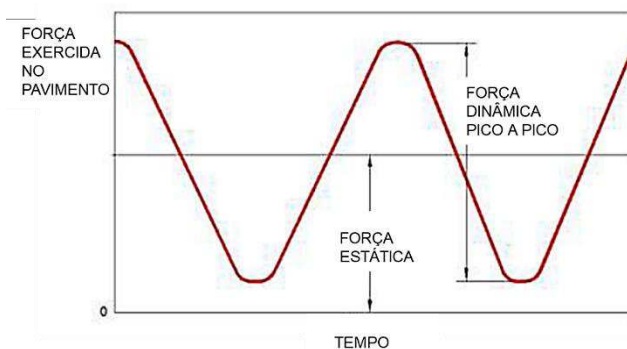


Fonte: Bernucci et. al (2022)

A Viga Benkelman é um equipamento de operação simples e versátil, porém o ensaio é lento e trabalhoso. Em alguns casos, segundo Haas *et al.* (1994), particularmente em pavimentos com maior rigidez, os pés de suporte podem estar dentro da área de influência do carregamento, o que resulta em medidas imprecisas.

No que diz respeito aos dispositivos vibratórios, são aqueles que induzem uma vibração em estado estacionário ao pavimento com um gerador de força dinâmica, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Vibração de pulso de carga



Fonte: FAA (2011)

Existem vários tipos de dispositivos vibratórios de estado estacionário, incluindo o Dynaflect e o Road Rater. O Dynaflect, mostrado na Figura 8, é um dispositivo eletromecânico para medir a deflexão dinâmica. É essencialmente constituído por um reboque tracionado por um veículo, contendo o sistema de aplicação de carga e os sensores de deflexão. O carregamento imposto ao pavimento por este equipamento é gerado por um mecanismo de força dinâmica montado no reboque, que utiliza pesos excêntricos para acionar duas rodas de aço, separadas por 50,0 cm e girando em direções opostas a uma frequência de 8,0 Hz. Ele aplica uma carga senoidal de 5,0 kN de pico a pico. As deflexões resultantes do carregamento dinâmico aplicado ao pavimento são automaticamente captadas por cinco geofones posicionados com espaçamentos de 30,5 cm a partir do centro de carga – entre as duas rodas de aço (Rocha Filho, 1996; FAA, 2011).

Figura 8 - Reboque de deflexão Dynaflect



Fonte: FAA (2011)

Dentre as suas vantagens pode-se destacar a alta confiabilidade, a baixa necessidade de manutenção e a capacidade de medir a bacia de deflexão. Uma grande desvantagem do equipamento, quando usado para a avaliação de pavimentos aeroportuários, é a baixa amplitude de carga dinâmica, que é significativamente menor do que as cargas normais de aeronaves. A carga relativamente leve pode não mobilizar as deformações que são produzidas pelas aeronaves e os módulos retroanalísados de subleito poderão ser imprecisos. Assim, o uso desse dispositivo é recomendado apenas para pavimentos de carga leve que atendem a aeronaves com peso inferior a 5.670 kg (DNIT, 2006a; FAA, 2011).

Segundo a FAA (2011), o Road Rater (Figura 9), também mede a deflexão dinâmica usando uma força senoidal gerada por uma aceleração hidráulica de uma massa de aço. Vários modelos estão disponíveis, com cargas de pico a pico variando de um mínimo de 2,0 kN a um máximo de 35,0 kN. A resposta do pavimento é medida no centro da placa de carga e em distâncias de deslocamento radial usando quatro a sete transdutores de velocidade, dependendo do modelo. O Road Rater pode medir bacias de deflexão, bem como a resposta dinâmica em uma ampla faixa de frequências. Possui um sistema de aquisição de dados rápido e seu amplo uso resultou na disponibilidade de grandes quantidades de dados sobre a resposta e desempenho do pavimento. Entretanto, a grande desvantagem de alguns modelos do Road Rater é a baixa amplitude de força (FAA, 2011).

Figura 9 - Road Rater



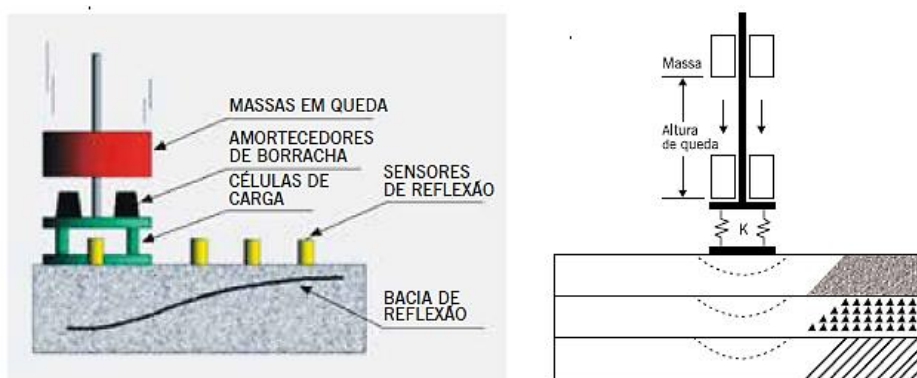
Fonte: FAA (2011)

Por outro lado, os dispositivos de carga por impacto (como o FWD ou o HWD) têm a capacidade de aplicar cargas equivalentes às dos trens de pouso de aeronaves, podendo ser utilizados em diversos tipos de pavimentos, inclusive para a análise de juntas e detecção de sobreposições em placas de concreto de cimento Portland (DNIT, 2006a). De acordo com FAA (2011), ao aplicarem seu carregamento dinâmico, FWD e HWD simulam melhor as cargas de rodas em movimento. Esses equipamentos podem medir a extensão da bacia de deflexão, possuem aquisição de dados relativamente rápida e exigem apenas uma pequena carga prévia na superfície do pavimento.

2.4 Falling Weight Deflectometer e Heavy Weight Deflectometer

O efeito dinâmico produzido por esses equipamentos é alcançado por meio da queda controlada de um conjunto de massas a alturas predefinidas. Esse peso cai sobre amortecedores de borracha que transmitem o impacto a uma placa circular metálica posicionada sobre o pavimento no local onde a deflexão máxima é medida (Bernucci *et al.*, 2022). De acordo com a FAA (2011), a duração da carga varia entre 25 e 56 ms e o tempo de carregamento de 12 a 28 ms. A Figura 10 mostra o mecanismo de funcionamento de um defletômetro de impacto.

Figura 10 - Princípio de funcionamento de um defletômetro de impacto



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

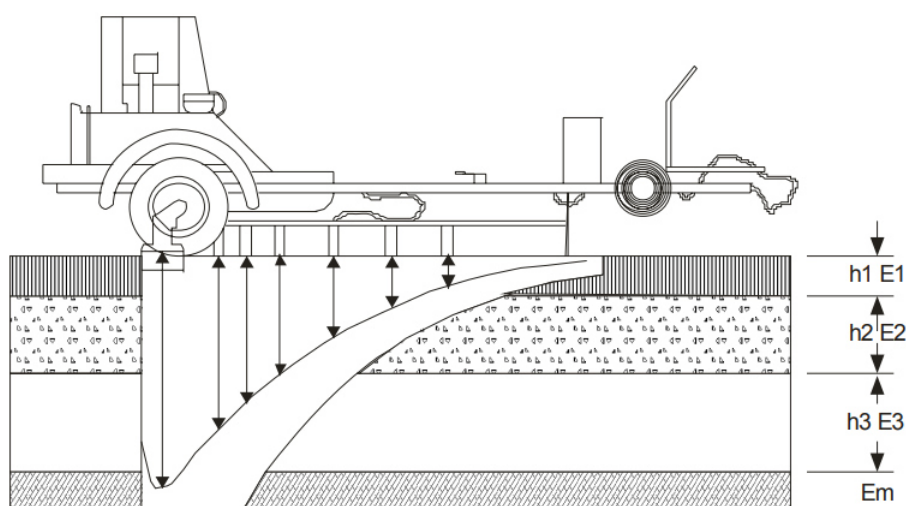
Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento são medidos utilizando geofones posicionados ao longo de uma barra metálica instalada em um veículo leve, que transporta o equipamento. Os geofones são posicionados a distâncias específicas do ponto onde a carga é aplicada (Lopes, 2012). A faixa do sensor de deflexão é de 2,0 mm a 5,0 mm, com resolução de 0,001 mm e precisão de $2,0 \mu\text{m} \pm 2\%$.

Nóbrega (2003) observa que pequenos equívocos nas medições das deflexões podem ter impactos significativos nos resultados de uma análise estrutural. Portanto, é de suma importância compreender a que distância a partir do centro da área carregada os sensores estão posicionados ao longo da bacia de deflexões. Conforme apontado por Pinto e Domingues (2001), normalmente são utilizados os seguintes arranjos de posicionamento dos sensores:

- a) para pavimentos flexíveis: 0, 20, 30, 45, 65, 90 e 120 cm;
- b) para pavimentos rígidos: 0, 20, 30, 80, 100, 160 e 200 cm.

Rocha Filho (1996) acredita que a seleção adequada das distâncias entre sensores deve ser guiada pela rigidez e espessura das camadas do pavimento a ser avaliado. Em pavimentos flexíveis mais espessos, é recomendável posicionar o último sensor a uma distância maior para permitir o registro das deflexões originadas principalmente pelo subleito. Em contraste, pavimentos mais finos podem ter o último sensor posicionado mais próximo do ponto de aplicação da carga. Ademais, na Figura 11, tem-se a representação esquemática da bacia de deformação obtida por meio do FWD e/ou HWD.

Figura 11 - Representação esquemática da bacia de deformação obtida através dos deflectômetros de impacto



Fonte: DNIT (2006b)

A principal diferença entre o FWD e o HWD é a carga de impulso aplicada durante ensaio. Enquanto o carregamento dinâmico do FWD varia entre 7,0 e 120,0 kN, o HWD pode empregar cargas de até 320,0 kN (ANAC, 2021). Desse modo, o carregamento imposto pelo FWD é geralmente utilizado para representar o tráfego de aeronaves leves, enquanto o HWD representa melhor as cargas de aeronaves pesadas. A intensidade do carregamento de impulso pode ser ajustada ao variar o peso e/ou a altura da queda.

Segundo Lopes (2012), o equipamento FWD permite a medição e registro automatizado das temperaturas do ar e da superfície do pavimento, bem como a distância percorrida entre os pontos de ensaio. Deve-se atentar para a temperatura de ensaio, pois valores mais altos de temperaturas provocam uma redução na rigidez de pavimentos flexíveis, levando-os a apresentar maiores deflexões, principalmente

para as deflexões máximas medidas no revestimento, sendo as deflexões mais distantes do ponto de aplicação da carga praticamente inalteradas, demonstrando que o revestimento superficial é a camada do pavimento mais afetada pela temperatura. A temperatura em climas quentes pode impactar, ainda, na rigidez dos amortecedores do FWD durante a compressão dos pesos em queda, resultando em variações na carga transmitida ao pavimento (Rocha Filho, 1996).

Como o processo de medição é automatizado, é viável utilizar toda a bacia deflectométrica e não somente a deflexão máxima como parâmetro de análise, pois assim é possível obter uma compreensão mais precisa do comportamento da estrutura do pavimento. Tal entendimento ocorre porque a bacia é empregada na determinação dos módulos de elasticidade das camadas do pavimento por meio de um processo chamado retroanálise.

2.5 Módulo de Resiliência e Retroanálise

O módulo de elasticidade de um material é a propriedade mecânica que mede sua rigidez ao relacionar tensão e deformação. De acordo com Vellasco (2018) quando o carregamento aplicado é repetitivo e de pequena magnitude, é possível afirmar que a deformação resultante é completamente recuperável e proporcional à carga aplicada. Nessa situação, o módulo de elasticidade é denominado módulo de resiliência (MR) e pode ser calculado utilizando a Equação 2:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2)$$

Onde:

MR - Módulo de resiliência, em MPa;

σ_d - tensão desvio, caracterizada pela diferença entre a tensão vertical de compressão e a tensão de confinamento (quando existente), em MPa;

ε_r = deformação axial recuperável ou elástica, em mm/mm.

É importante ressaltar que a relação entre tensão e deformação nem sempre é constante ou linear. Essa relação depende dos níveis de tensão presentes

e, em certas circunstâncias, da frequência das cargas aplicadas e da temperatura, como ocorre nos materiais asfálticos (Balbo, 2007).

Os módulos elásticos das camadas do pavimento e do subleito são obtidos mediante um procedimento chamado retroanálise. Ao obter as respostas de tensão e deformação do pavimento, juntamente com suas características geométricas, é possível inferir os módulos de resiliência teóricos. Esses módulos são calculados de forma que as deflexões correspondentes calculadas se aproximem o máximo possível das obtidas em campo (Aguiar, 2017).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), os valores de MR variam conforme o tempo e o uso do pavimento – ou em alguns casos pela ação climática. Uma das vantagens da retroanálise, além da plena utilização das deflexões medidas, é a obtenção dos módulos em condições de campo. Entretanto, esses módulos retroanalizados não necessariamente são os reais.

O ponto central dos procedimentos de retroanálise, segundo Rocha Filho (1996), reside na determinação dos módulos de elasticidade que conduzem ao ajuste ótimo entre a bacia de deflexão obtida em campo e a bacia calculada. Isso destaca a importância da confiabilidade e consistência dos equipamentos deflectométricos utilizados no levantamento das bacias em campo, a fim de obter resultados precisos.

É crucial garantir uma alta precisão nas leituras deflectométricas nos pontos mais distantes do ponto de aplicação da carga, uma vez que é a partir dessas leituras que se inicia todo o processo de retroanálise. Deve-se atentar para a credibilidade dos instrumentos e procedimentos operacionais de medição, de modo a evitar bacias de deflexão com inconsistências (Rocha Filho, 1996; Bernucci *et al.*, 2022). De acordo com FAA (2011), tais inconsistências podem ocorrer por vários motivos, como a presença de uma rachadura perto da placa de carga, um sensor não funcional, um erro de configuração do sensor e do equipamento NDT, sensores não calibrados adequadamente, vazios nas camadas do pavimento, perda de suporte e variações de temperatura. Ainda de acordo com FAA (2011), podem ser verificados três tipos de erros em bacias de deflexão:

- Tipo I: As deflexões em um ou mais dos sensores são maiores do que a deflexão sob a placa de carga. Esse tipo produzirá o maior erro durante a análise de resultados da retroanálise;

- Tipo II: Diminuição brusca na deflexão entre dois sensores adjacentes. A quantidade de diminuição deve ser gradual e relativamente consistente entre todos os sensores;
- Tipo III: A deflexão no sensor mais externo de dois sensores adjacentes é maior do que a deflexão no sensor que está mais próximo da placa de carga.

Os dados de entrada do processo de retroanálise são: a magnitude das cargas, o raio da placa de carga, as deflexões medidas em campo, seção-tipo do pavimento, coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade do material de cada camada. De acordo com Nóbrega (2003), uma das questões mais desafiadoras nos procedimentos de retroanálise com base em bacias de deflexão é que cada seção analisada possui suas próprias características únicas, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e espessuras.

O coeficiente de Poisson estabelece a conexão entre as deformações radiais (horizontais) e axiais (verticais) dos materiais. Seu impacto nos cálculos de tensão e deformação é geralmente limitado, exceto nas deformações radiais, onde ele demonstra proporcionalidade. Para lidar com essa complexidade, é comum adotar valores estimados para as espessuras das camadas, calcular os valores da densidade (γ) e do coeficiente de Poisson (μ), concentrando-se principalmente no cálculo do módulo de resiliência (Nóbrega, 2003).

Dado que a seção do pavimento é um dos parâmetros de entrada no processo de retroanálise, torna-se importante o conhecimento das informações geotécnicas da estrutura (espessuras e materiais) para aumentar a precisão dos resultados obtidos. Ainda que um pavimento exiba uma seção uniforme e bem construída, podem surgir pequenas variações devido às tolerâncias na execução. Essas discrepâncias na espessura podem resultar em dispersões nas deflexões e, por conseguinte, os valores dos módulos retroanalizados podem conter imprecisões (Nóbrega, 2003; Rocha, 2020).

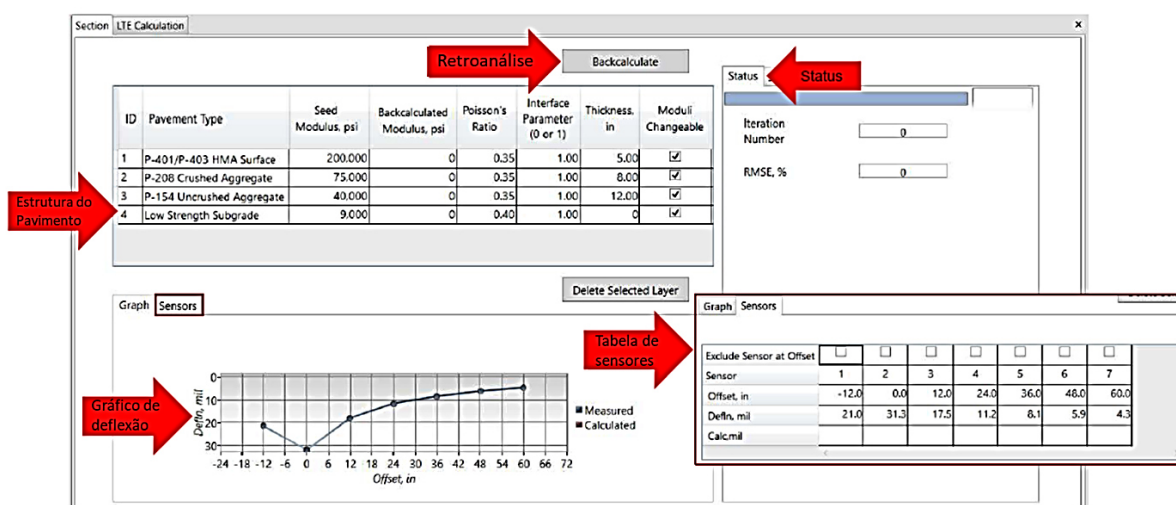
A retroanálise é realizada com a ajuda de *softwares* que empregam rotinas de cálculo, podendo ser simplificados ou iterativos. Os métodos simplificados utilizam equações empíricas e gráficos baseados na teoria da elasticidade. Por outro lado, os métodos iterativos visam alcançar a convergência entre as bacias medidas e calculadas por meio de modelagem matemática, utilizando parâmetros geométricos e

de rigidez dos materiais. As iterações são realizadas sucessivamente até que o critério de convergência das bacias seja atingido (Chaves; Araújo; Oliveira, 2022a).

Entre os *softwares* com modelagem mais avançada, destacam-se o PANDA, CRACKTIP e CAP3D. Por outro lado, para *softwares* baseados na Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas, que são mais simplificados, podem ser mencionados o BackMedina, BISAR e BAKFAA (Vieira, 2020).

O BAKFAA é um software desenvolvido pela FAA e permite realizar a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento, utilizando dados obtidos por meio de levantamentos deflectométricos com o ensaio de FWD e HWD. Ele foi elaborado com o intuito de avaliar pistas de aeroportos, mas pode ser aplicado em qualquer tipo de pavimento asfáltico. Os parâmetros de entrada para o *software* incluem as deflexões medidas em cada ponto de leitura, a intensidade da carga aplicada sobre o pavimento e o raio da placa de carga. A tela inicial do programa pode ser vista na Figura 12.

Figura 12 - Alguns elementos da interface *default* do BAKFAA



Fonte: Adaptado de FAA (2023)

Para calcular as respostas do pavimento sob vários tipos de carga, o BAKFAA contém uma sub-rotina, denominado *FAA Layered Elastic Analysis* (LEAF). O LEAF calcula a tensão, deformação, e valores de deflexão em diferentes pontos de avaliação dentro da estrutura do pavimento usando um modelo elástico. Modelos elásticos em camadas assumem que cada camada em uma estrutura de pavimento é homogênea, isotrópica e linearmente elástica. Além disso, é utilizado um algoritmo de

minimização multidimensional. Essa função de minimização soma os quadrados das diferenças entre deflexões, medidas por meio do deflectômetro (FAA, 2011).

O cálculo do erro da retroanálise é realizado utilizando o método da raiz média quadrática. Esse método envolve a determinação das diferenças entre as deflexões calculadas pelo programa e as deflexões medidas em campo. O processo de minimização de erros é realizado através da análise dos valores das diferenças entre as deflexões medidas e calculadas, visando reduzir ao máximo essas discrepâncias (FAA, 2023).

2.6 Correção dos dados

Como comentado anteriormente, o estudo da influência das temperaturas nas respostas mecânicas das estruturas de pavimentos é de interesse devido ao comportamento termosensível dos materiais, especialmente das camadas de revestimento asfáltico. Devido ao fato de os ensaios de FWD e HWD serem realizados em condições variáveis de temperatura, as deflexões – quando para análise das deflexões máximas – devem ser corrigidas para uma temperatura de referência para que os resultados sejam adequadamente utilizados. No caso de pavimentos brasileiros, a temperatura padrão utilizada é de 25°C (Lira, 2023). Para realizar esta correção, pode-se empregar o modelo de correção proposto por Chen *et al.* (2000). O modelo é apresentado na Equação 3.

$$D_{0,T_r} = D_{0,T} \left(\frac{1,0823^{-0,0098t}}{0,8631} T_r^{0,8316} T^{-0,8419} \right) \quad (3)$$

Onde :

D_{0,T_r} = Deflexão máxima ajustada na temperatura T_r (mm);

$D_{0,T}$ = deflexão máxima medida na temperatura T (mm);

T_r = Temperatura de referência (°C);

T = temperatura no meio da camada de concreto asfáltico no momento do levantamento deflectométrico (°C);

t = espessura da camada de revestimento (mm).

Para o cálculo dos módulos de resiliência por retroanálise, as deflexões não são corrigidas, porém os módulos resilientes do revestimento deverão ser ajustados.

Esse ajuste ocorre também para temperatura de 25°C, conforme Equação 4, proposta por Chen *et al.* (2000).

$$E_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{E_T T^{2,81}}{185000} \quad (4)$$

Onde:

$E_{25^{\circ}\text{C}}$ = Módulo ajustado para temperatura de 25°C (MPa);

E_T = Módulo retroanalísados para a temperatura T (MPa);

T = temperatura no meio da camada de concreto asfáltico no momento do levantamento defletoométrico (°F);

Ainda, para comparar as deflexões, mesmo quando essas são obtidas pela aplicação de diferentes cargas e sujeitas a variações induzidas pelo equipamento e pelas mudanças de temperatura, FAA (2011) apresenta um método para corrigir as deflexões máximas. O método de correção, chamado de normalização, pode ser visto na Equação 5.

$$d_{0n} = \left(\frac{L_{\text{normalizado}}}{L_{\text{aplicado}}} \right) d_0 \quad (5)$$

Onde:

D_{0n} = Deflexão ajustada (10^{-2} mm);

D_0 = Deflexão máxima medida (10^{-2} mm);

$L_{\text{normalizado}}$ = Carregamento normalizado (kN);

L_{aplicado} = Carregamento aplicado (kN).

2.7 Resultados de estudos anteriores

De acordo com Lira (2023), a ausência de um entendimento sólido sobre o comportamento do pavimento aeroportuário sob diferentes cargas emerge como uma preocupação, dadas as implicações de uma avaliação estrutural equivocada. Caso a capacidade de suporte da estrutura seja subestimada, isso pode acarretar despesas desnecessárias para realizar manutenção. Por outro lado, se essa capacidade for superestimada, pode-se permitir um tráfego mais pesado do que a estrutura pode suportar, resultando em uma deterioração acelerada do pavimento. Isso, por sua vez,

demandaria investimentos financeiros precoces e substanciais e, em um cenário mais grave, poderia representar um risco para as operações.

Por isso, segundo ANAC (2021), em pavimentos aeroportuários, os responsáveis devem avaliar se a intensidade das cargas é compatível com as aeronaves que utilizam a pista. Diversos são os estudos que verificaram o comportamento de algumas propriedades do pavimento em relação à variação do carregamento aplicado.

No intuito de se verificar a influência do carregamento no módulo de elasticidade de uma pista de pouso e decolagem, Chaves, Araújo e Oliveira (2022a) mediram 480 bacias obtidas empregando cargas de 80,0 e 200,0 kN por meio de um HWD, e utilizaram dois softwares de retroanálise distintos. A análise da correlação entre os dados de retroanálise revelou uma forte associação entre os resultados de módulo de elasticidade referentes aos carregamentos de 80,0 kN e 200,0 kN, nos dois softwares empregados. No entanto, a comparação estatística por meio de testes de hipótese indicou a presença de diferenças consideráveis entre as medianas dos módulos de elasticidade obtidos pelos dois carregamentos, destacando a importância da carga aplicada no pavimento durante o levantamento das bacias deflectométricas em aeródromos.

Além disso, verificou-se que o software utilizado também exerce influência sobre os valores dos Módulos de Elasticidade obtidos. Essa variação está relacionada às diversas camadas do pavimento, resultando em alterações no comportamento dos dados, especialmente no caso da sub-base. Ao considerar o carregamento de 200,0 kN como um parâmetro mais próximo da pressão exercida pela maioria das aeronaves em operação em aeródromos, o uso do carregamento de 80,0 kN pode resultar em uma subestimação das propriedades dos materiais que constituem a estrutura (Chaves; Araújo; Oliveira, 2022a). Ainda, uma outra pesquisa realizada por Chaves, Araújo e Oliveira (2022b) demonstrou que não foram identificadas diferenças significativas nos módulos de elasticidade retroanalizados resultantes da aplicação das cargas de 200 e 280 kN.

O estudo realizado por Grogan, Freeman e Alexander (1998), que abrangeu a avaliação de quatro pistas em aeroportos diferentes, envolveu a variação das cargas aplicadas por FWD e HWD. Os dados foram coletados em dois níveis de carga (baixa e alta) para cada dispositivo NDT. Os testes de FWD envolveram níveis de carga alvo

de 44-67 kN e 110 kN. Os testes de HWD, por sua vez envolveram níveis de carga alvo de 44-67 kN e 110 kN-220 kN.

Com base nos diferentes resultados do *Impulse Stiffness Modulus* – ISM (uma medida da rigidez relativa do pavimento no local do teste definida como a relação entre a carga aplicada e a deflexão do pavimento no ponto de aplicação da carga) fornecidos pelos testes FWD e HWD, percebeu-se que a resposta dos pavimentos asfálticos não está linearmente relacionada à carga aplicada. Todavia, de acordo com McQueen, Marsey e Arze (2001), realizando testes com cargas variando de 40kN a 160kN, as rigidezes do pavimento (ISM) e os módulos retroanalizados do subleito mostraram-se independentes das amplitudes de força do FWD e do HWD.

O estudo conduzido por Lira (2023) investigou as deflexões, as rigidezes e o módulo de resiliência (MR) em resposta à variação das cargas aplicadas em três aeroportos distintos em operação há mais de 50 anos. Foram examinados os padrões de comportamento desses parâmetros sob cargas de 80, 200 e 280 kN. Foi constatado que o ISM diminui quando as cargas aumentam, tendo uma diminuição média de 5%. Trata-se de uma pequena variação que não afeta o uso do ISM em avaliações estruturais práticas, mas que, segundo o autor, sustenta a conclusão sobre a não linearidade da resposta do pavimento à variação de carga.

Em relação ao MR, foram identificados alguns comportamentos. O primeiro deles foi o de que a influência da variação da carga aumenta à medida que a camada fica mais profunda, assim, o subleito apresentou uma maior quantidade de alterações estatisticamente significativas nos resultados. O segundo padrão identificado na resposta do MR à variação da carga é o de que os valores diminuem à medida que a carga aumenta, sendo mais evidente quando se compara uma carga mais leve e uma carga mais pesada, de modo que quanto maior for a diferença entre as intensidades de carga aplicadas, mais significativo é o impacto na diminuição do MR (Lira, 2023).

Para examinar como a variação no nível de cargas afeta os resultados dos módulos de elasticidade obtidos por meio de retroanálise, Rocha Filho (1996) utilizou o programa de computador LAYMOD na análise das bacias de deflexões. Com base na avaliação dos resultados, chegou-se à conclusão de que a estrutura é altamente linear, ou seja, à medida que a carga aplicada aumentou, as deflexões também aumentaram em todas as suas camadas.

Lira (2023) encontrou o mesmo resultado para as deflexões brutas. Entretanto, para analisar a linearidade da resposta estrutural foi realizada uma

normalização das deflexões (utilizando a mesma formulação apresentada na Equação 5). As deflexões foram normalizadas para uma carga de 200kN. Os resultados sugeriram que não há resposta linear do pavimento. Segundo o autor, quando uma carga idêntica é aplicada de forma repetida, as deflexões medidas tendem a diminuir. Esse fenômeno pode ser atribuído a um endurecimento instantâneo que a estrutura pode experimentar, resultando em deflexões menores nas subseqüentes aplicações de carga.

A pesquisa indicou ainda que a deflexão normalizada produzida pela carga de 200 kN apresenta uma diferença muito pequena em comparação com a carga de 280 kN, contribuindo para o aumento de 49% nos valores de deflexão. Quando se compara a carga de 80 kN com a de 200 kN, o acréscimo de 150% no carregamento gera um incremento de 175% nas deflexões. Esse crescimento nas deflexões é ainda mais significativo quando comparadas as cargas de 80 kN e a de 280 kN. A mudança de um carregamento para o outro aumenta as deflexões em cerca de 249% (Lira, 2023).

Inclusive, em se tratando de deflexões, em 1991, a Diretoria de Engenharia de Aeronáutica – DIRENG, conduziu uma análise empregando a viga Benkelman na pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional Pinto Martins. Analisando os dados coletados, verificou-se que a deflexão máxima registrada na pista de pouso e decolagem estava concentrada no trecho que corresponde ao primeiro terço da pista, na área de toque das aeronaves (DIRENG, 1991). Essa observação, de acordo com Oliveira (2009), confirma essa como sendo a região mais sujeita a solicitações.

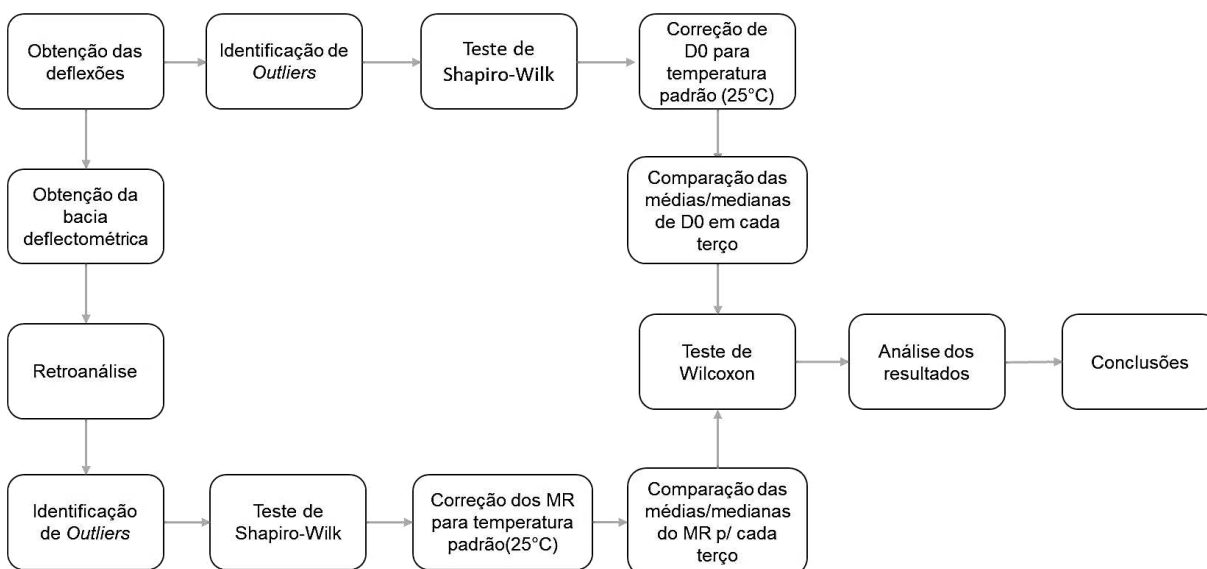
Considerando o exposto, torna-se evidente que o contexto dos pavimentos aeroportuários está carente de avaliações estruturais, particularmente no que diz respeito ao desgaste diferencial que pode ocorrer ao longo da extensão das pistas de pouso e decolagem. A ausência de pesquisas nessa área pode comprometer tanto a integridade quanto a eficácia dessas estruturas. Nesse sentido, a compreensão do comportamento estrutural emerge como uma necessidade fundamental para embasar decisões relacionadas à manutenção, reabilitação e futuros investimentos, assim como garantir a segurança das operações e o conforto dos usuários.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos da pesquisa, englobando a correção, organização e cálculo de parâmetros a partir dos dados coletados, além da condução de testes estatísticos para aprimorar a confiabilidade das análises. Essa sequência de etapas foi estabelecida com o objetivo de viabilizar a identificação de possíveis indícios de desempenho estrutural diferencial em uma pista de pouso e decolagem.

De forma resumida, a Figura 13 apresenta o fluxograma que ilustra o processo metodológico adotado na pesquisa.

Figura 13 - Fluxograma metodológico



Fonte: Produzido pela autora (2023)

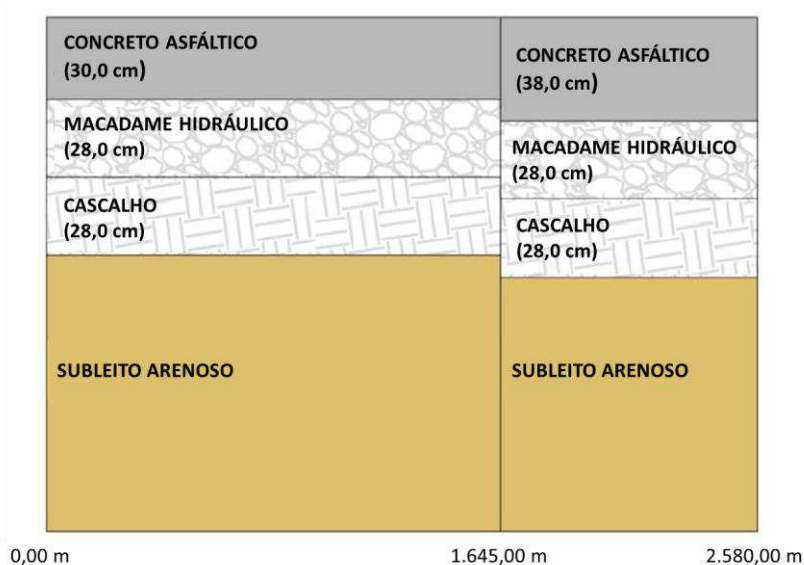
3.1 Pista de pouso e decolagem (PPD) de estudo

A PPD em análise está situada na região Nordeste do Brasil, estando em operação há mais de 40 anos, atendendo tanto a aviação civil como a militar, além de operar o transporte de cargas com aeronaves dedicadas a essa finalidade. Essa PPD possui uma de suas cabeceiras predominante em operações com cerca de 98% do tráfego de aeronaves, 2.755 m de comprimento e 45 m de largura.

A estrutura é flexível e composta por três camadas: revestimento, base e sub-base. O revestimento da pista varia em espessura, de 30,0 cm a 38,0 cm de

Concreto Asfáltico (CA). As camadas de base e sub-base possuem uma espessura uniforme de 28,0 cm e são construídas com macadame e cascalho, respectivamente. Essa estrutura está estabelecida sobre um subleito composto por solo arenoso, cujos valores de CBR podem alcançar até 24% (DIRENG,1991). A Figura 14 ilustra a estrutura do pavimento, cujo comprimento total estudado é de 2.580 m. A divergência em relação ao comprimento atual (de 2.755 m) ocorre devido à ampliação da pista efetuada após o levantamento dos dados desta pesquisa.

Figura 14 - Estrutura da pista analisada



Fonte: Adaptado de Lira (2023)

3.2 Obtenção das deflexões e bacia deflectométrica

Para obtenção das deflexões foi utilizado um dispositivo adaptado capaz de simular os ensaios *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e *Heavy Weight Deflectometer* (HWD), por meio de medições realizadas no período noturno. Nos ensaios, as estruturas foram avaliadas utilizando cargas-alvo de 80 kN e 280 kN, aplicadas por intermédio de uma placa de carga com diâmetro de 45 cm.

Esses valores de carga aplicada são amplamente adotados em análises estruturais, representando as características predominantes dos modelos de aeronaves em operação nos aeroportos brasileiros atuais, inclusive no aeroporto avaliado. A carga de 200 kN também é comumente empregada. No entanto, neste estudo, optou-se por não examinar o comportamento sob a carga de 200 kN, pois

baseado em Lira (2023), não há diferença significativa no comportamento estrutural do pavimento sob essa carga em comparação ao observado para carga de 280 kN. Além disso, a variação de carga de 80 kN a 280 kN é mais impactante no acréscimo das deflexões, quando comparada à variação de 80 kN a 200 kN.

Os testes foram conduzidos nos *offsets* de +3,0 m, -3,0 m, +6,0 m e -6,0 m em relação ao eixo da pista, com o levantamento adicional da linha do eixo da pista, iniciando no ponto correspondente ao início da cabeceira predominante nas operações de pouso e decolagem. As deflexões geradas foram capturadas por nove geofones (D_n) posicionados a distâncias que variaram de 0 mm a 1800 mm do centro da placa de carga. O pulso de carga teve uma duração de 0,25 ms, sendo realizadas duas quedas de carga para o valor de 80 kN e uma queda de carga para o valor de 280 kN. A Tabela 1 exibe a configuração do levantamento de campo feito nesta pesquisa.

Tabela 1 - Configuração de teste para o aeroporto estudado

Número de quedas		Espaçamento dos sensores (mm)								
80 kN	280 kN	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
2	1	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800

Fonte: Produzido pela autora (2023)

A coleta de dados foi realizada por meio de um único dispositivo adaptável, apto a transmitir cargas tanto para os ensaios FWD quanto HWD, com os pontos de teste espaçados entre 10 m e 25 m. O aparelho foi posicionado uma única vez em cada ponto, e as diferentes cargas foram aplicadas em um curto período, sem mover o equipamento, garantindo que os mesmos pontos pudessem ser avaliados em diferentes magnitudes de carga.

3.3 Eliminação de valores atípicos de deflexão

Os valores atípicos, também conhecidos como *outliers*, são dados que se afastam significativamente da maioria dos demais de um mesmo conjunto, podendo distorcer as análises estatísticas. Para detectar um *outlier*, adotou-se a definição de Devore (2005). De acordo com essa definição, o limite superior para aceitar um valor é determinado pela soma do terceiro quartil com a fração interquartil (que é calculada

fazendo a diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil). O limite inferior, por sua vez, é estabelecido como a diferença entre o primeiro quartil e a mesma fração interquartil. Valores que se encontram fora desse intervalo são considerados *outliers* e devem ser excluídos da análise. Esse processo foi conduzido separadamente para o conjunto de dados de cada *offset* avaliado. A Equação 6 apresenta a formulação que define o intervalo de dados utilizáveis.

$$Q_1 - 1,5FI \leq \text{dado utilizável} \leq Q_3 + 1,5FI \quad (6)$$

Onde:

Q_1 = Primeiro quartil;

Q_3 = Terceiro quartil;

FI = Fração interquartil.

No caso da identificação de um valor atípico de deflexão máxima, todas as medições dos nove geofones no ponto testado, para ambas as forças de impacto aplicadas no ponto, foram removidas do conjunto de dados. O mesmo procedimento foi feito quando uma bacia de deflexão com um erro foi identificada.

Entre os três tipos de erros, optou-se por excluírem-se somente as bacias que continham os erros do tipo I e III dos conjuntos de dados. O erro do tipo II não foi investigado devido à falta de definição detalhada sobre como identificá-lo, tanto no documento de referência quanto na literatura em geral.

3.4 Obtenção dos módulos de resiliência das camadas

Os módulos de resiliência (MR) de cada camada do pavimento foram obtidos mediante o processo de retroanálise. Para isso, foi utilizado o *software* BAKFAA 3.4.2, que exige a especificação de valores iniciais de módulo, a partir dos quais se inicia o processo iterativo para calcular os MR. Tais valores foram atribuídos a todas as camadas, pois, durante a retroanálise, todas eram suscetíveis a ter seus MR ajustados pelo *software*, incluindo o subleito. Para representar o material encontrado na estrutura da pista em estudo, foram adotados os valores sugeridos pelo programa para o tipo de material que mais se assemelha ao material de cada camada. Os valores iniciais dos MR sugeridos pelo BAKFAA estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 - Módulos iniciais sugeridos pelo software

Material <i>in situ</i>	Material equivalente no BAKFAA	Módulo inicial (MPa)
Concreto Asfáltico	P-401/P-403	1379
Macadame Hidráulico	P-208/P-209	517
Cascalho	P-154	276
Subleito	High Strength Subgrade	140

Fonte: Adaptado de FAA (2023)

Ressalta-se que, uma vez que os testes FWD e HWD são realizados sob condições variáveis de temperatura, o módulo obtido para as camadas asfálticas deve ser corrigido para uma temperatura de referência. Como se trata de um aeroporto localizado no Brasil, a temperatura padrão usada é de 25°C. Para realizar essa correção, utiliza-se a Equação 4.

3.5 Análise estatística

Com o objetivo de obter conclusões confiáveis a partir da análise dos dados, é indispensável que sejam conduzidos testes estatísticos. A normalidade na distribuição dos dados é uma das premissas que os testes estatísticos exigem para sua adequada aplicação em um conjunto de dados.

A distribuição normal dos dados foi verificada pela aplicação do teste de Shapiro-Wilk. A hipótese nula do Teste de Shapiro-Wilk é a existência de distribuição normal nos dados analisados, enquanto a hipótese alternativa diz que os dados não seguem uma distribuição normal. Se houver o indicativo de que os dados não apresentam uma distribuição normal, torna-se necessário o uso de testes não paramétricos para análises, como o de Wilcoxon.

Os testes estatísticos foram realizados por meio do uso do RStudio v.4.3.1, um *software* gratuito de análise estatística que trabalha com a linguagem de programação de computadores R. Ademais, todos os testes realizados adotaram uma confiança de 95%.

3.6 Análise dos dados

Com o intuito de verificar possível desempenho diferencial em diferentes trechos da pista, dividiu-se a extensão do pavimento estudado em 3 partes (terços). A divisão da PPD foi feita baseando-se apenas na sua extensão total, resultando em três partes de mesmo comprimento, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Comprimento dos terços avaliados

Comprimento (m)		
1º Terço	2º Terço	3º Terço
0 - 860	860 - 1720	1720 - 2580

Fonte: Produzida pela autora (2023)

A análise dos dados foi comparativa. A primeira dessas comparações utilizou as deflexões D_0 (deflexões máximas) normalizadas para a carga padrão, de 80 kN ou 280 kN e corrigidas para a temperatura de referência de 25°C. Para cada conjunto de teste — conjunto de valores obtidos por carga em cada *offset* —, a mediana de D_0 determinada para a aplicação das diferentes cargas foi comparada entre os terços da pista, combinando-os em pares para melhor visualização da diferença entre cada um. Assim, os pares de comparação para a mediana de D_0 foram: terços 1 e 2, terços 2 e 3 e, por fim, terços 1 e 3.

Após a agregação dos dados, foram realizados testes estatísticos para que a existência da influência de cada variável nos resultados pudesse ser confirmada ou refutada de forma confiável. Se os dados apresentassem distribuição normal, o Teste T-pareado deveria ser realizado, considerando como hipótese nula a diferença não significativa entre as médias dos terços comparados, enquanto a hipótese alternativa afirmaria que a diferença é significativa. A hipótese nula deveria ser rejeitada quando o valor p do teste fosse igual ou inferior a 0,05.

No caso da não normalidade dos dados, o Teste de Wilcoxon deveria ser utilizado, levando em consideração as medianas como parâmetros representativos dos dados. A segunda análise comparou os MR retroanalizados das camadas do pavimento, por carga e *offset*.

Após a retroanálise, retiraram-se os *outliers* de cada camada por meio da Equação 6. Diferente do que foi feito para as deflexões máximas, a exclusão dos

outliers foi realizada em cada terço separadamente, para cada carregamento e *offset* avaliado. Os MR foram corrigidos para temperatura padrão de 25°C e verificou-se a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk, utilizando as mesmas hipóteses apresentadas anteriormente.

Para cada conjunto testado, a comparação entre os terços da pista envolveu a mediana do MR obtido em cada camada, considerando a aplicação de diferentes cargas. Os terços foram combinados em pares, sendo eles: terços 1 e 2, terços 2 e 3, e por último, terços 1 e 3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados e análises decorrentes da comparação entre as deflexões máximas em cada terço da pista de pouso e decolagem estudada, bem como dos módulos de resiliência das camadas que compõem o pavimento.

4.1 Observações iniciais

Foram coletados dados de 773 pontos, mas com a retirada dos *outliers*, o número de pontos analisados diminuiu para 687. A divisão dos terços ocorreu em função do comprimento total da pista, então após a supressão dos *outliers*, os terços ficaram com números distintos de pontos. Além disso, houve uma diferença de amostra entre os *offsets* e o eixo da pista. Desse modo, essa diferença entre a quantidade de dados de cada terço pode influenciar na análise estatística. A Tabela 4 mostra a quantidade de pontos analisados por terço em cada *offset* e o comprimento total avaliado.

Tabela 4 - Informações de pontos testados e comprimento em cada *offset*

offset	Quantidade de pontos testados			Comprimento total avaliado (m)
	1º Terço	2º Terço	3º Terço	
Eixo+6,00	43	41	36	2.520
Eixo+3,00	43	38	37	2.506
Eixo	76	75	75	2.530
Eixo-3,00	37	37	40	2.525
Eixo-6,00	38	37	34	2.520

Fonte: Produzida pela autora (2023)

Pela observação da divisão dos terços da Tabela 3 e da Figura 14, nota-se que o terceiro terço contemplou uma estrutura diferente dos demais terços, com 8,0 cm a mais de revestimento. Esse fato pode contribuir para diferentes resultados de deflexão e, conseqüentemente, de MR nesse terço, pois as espessuras das camadas influenciam na distribuição das cargas e, portanto, no desempenho do pavimento.

Após a organização dos dados, os testes de Shapiro-Wilk foram conduzidos para verificação da distribuição dos dados. Os testes revelaram que os dados de deflexão do eixo e do *offset* eixo-3 não seguem uma distribuição normal, enquanto os demais possuem a normalidade da distribuição. Entretanto, uma segunda análise foi realizada nos *offsets* eixo+3, eixo+6 e eixo-6 para confirmar se existia a normalidade dos dados, uma vez que é preferível que, para melhor visualização das comparações, o estudo dos dados seja feito a partir de um mesmo parâmetro representativo.

A segunda análise consistiu em um teste gráfico e verificação da diferença entre cada deflexão máxima medida e a média do conjunto de cada terço, assim como a diferença entre a deflexão máxima e a mediana do mesmo conjunto. Graficamente, a partir de histogramas (inclusos nos apêndices A, B e C), buscou-se avaliar se a distribuição dos dados se assemelhava à curva de distribuição normal. A partir dele observou-se que as deflexões possuem a tendência de se concentrar nos valores mais baixos do conjunto. Além disso, os dados dos *offsets* eixo+3, eixo+6 e eixo-6, apresentam maior proximidade com a mediana, ainda que essa proximidade não seja muito maior do que para a média. A Tabela 5 apresenta as porcentagens de valores que se aproximam da média, bem como a porcentagem de valores que se aproximam da mediana em cada *offset* (eixo+3, eixo+6 e eixo-6).

Tabela 5 - % de deflexões que se aproximam da média e da mediana, respectivamente.

Offset	% próxima à média	% próxima à mediana
Eixo+3	48,0	52,0
Eixo+6	49,2	50,8
Eixo-6	49,5	50,5

Fonte: Produzido pela autora (2023)

Dessa forma, assumiu-se que os dados não apresentam distribuição normal e, portanto, foram aplicados testes estatísticos não paramétricos. A ausência de normalidade na distribuição dos dados fundamentou também a preferência pelo uso da mediana na maioria das análises apresentadas, em detrimento da média, uma vez que a mediana é o parâmetro que melhor representa a tendência central dos

conjuntos de dados, isto é, as deflexões máximas em cada *offset* e para cada carregamento aplicado.

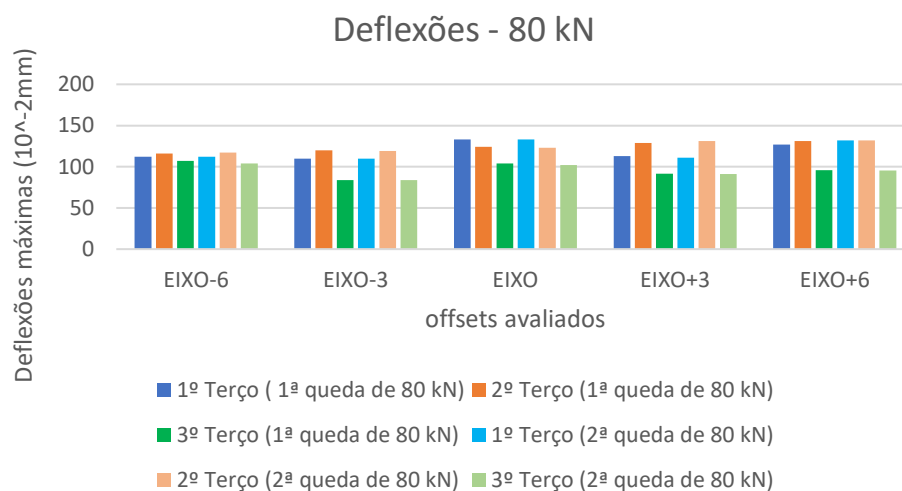
4.2 Análise das deflexões máximas

Considerando que a deflexão máxima reflete a condição geral da estrutura do pavimento, ela é um dos principais indicadores para avaliar seu estado estrutural. À medida que a deflexão máxima aumenta, sugere-se um maior comprometimento da integridade estrutural.

Utilizando a mediana como parâmetro representativo dos dados, os gráficos foram construídos de forma a ser verificado o comportamento estrutural do pavimento. Essa verificação ocorrerá a partir da comparação da mediana das deflexões máximas obtidas em cada terço, para cada carregamento aplicado nos *offsets* definidos.

A Figura 15 ilustra as medianas da deflexão máxima de cada terço, em cada *offset*, obtidas pela aplicação da carga de 80 kN.

Figura 15 - Deflexões máximas obtidas pela aplicação da carga de 80 kN



Fonte: Produzido pela autora (2023)

Na primeira queda de 80 kN, inicialmente observa-se que em todos os *offsets*, o terceiro terço (a partir da cabeceira predominante) é o que possui menores valores de deflexões, indicando assim, que é o terço menos solicitado estruturalmente. Em relação aos dois primeiros terços, vê-se que as deflexões do segundo terço são

maiores em todos os casos, exceto no eixo central, podendo isso ser um indicativo de uma maior solicitação neste terço.

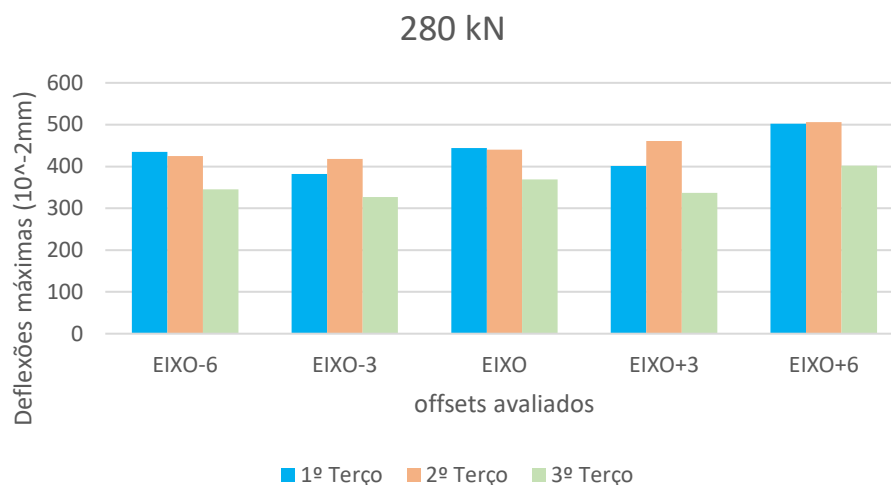
O teste de Wilcoxon verificou que a diferença entre as medianas dos dois primeiros terços só é estatisticamente significativa no eixo e no *offset* eixo+3. No eixo, a mediana das deflexões do segundo terço é 7,3% menor em comparação à mediana das deflexões do primeiro. Contudo, no *offset* eixo+3 a mediana no segundo terço é cerca de 14% maior que a do primeiro terço.

A segunda queda da carga de 80kN verificou comportamento semelhante. As deflexões são menores no terceiro terço e maiores no segundo, com exceção do eixo. O teste de Wilcoxon verificou haver diferença significativa entre os dois primeiros terços apenas no eixo e no *offset* eixo+3. No eixo, a mediana do primeiro terço é 8,1% maior quando comparada à do segundo, porém, no *offset* eixo+3, a mediana do segundo terço é cerca de 18% maior do que no primeiro terço.

De uma queda para outra, a mediana de deflexões máximas foi acrescida em média 0,4% e 0,3% no primeiro e segundo terço, respectivamente. No terceiro terço, houve um decréscimo médio de 1,1% nos valores de mediana. Essa diminuição nas deflexões no terceiro terço pode ser devido à falta de tempo entre a primeira aplicação de carga e a segunda, podendo não ser suficiente para permitir que a estrutura retorne ao seu estado normal, conferindo uma rigidez transitória em algum material da estrutura. Em contrapartida, o acréscimo nas deflexões provenientes da segunda aplicação de 80 kN nos dois primeiros terços pode estar associado a uma condição estrutural mais desfavorável, resultando na dificuldade de recuperação após a aplicação da carga.

Ao ser aplicado o carregamento de 280 kN, o comportamento das medianas é como o apresentado na Figura 16. A aplicação da carga de 280 kN realiza maior mobilização da estrutura quando comparada à carga de 80 kN. Esse fato pode ser observado pelo aumento das medianas, as quais mais do que dobraram em relação aos carregamentos anteriores.

Figura 16 - Deflexões máximas obtidas pela queda de 280 kN



Fonte: Produzido pela autora (2023)

Ainda que tenha havido esse aumento expressivo (cerca de 266%) nas deflexões quando aplicada a carga de 280 kN, percebe-se que o terceiro terço continua sendo o que apresenta menores deflexões. Essa resposta pode estar relacionada ao fato de que o terceiro terço apresenta uma estrutura mais robusta em comparação aos demais, absorvendo melhor os carregamentos impostos, reduzindo o impacto sobre as camadas inferiores.

Avaliando somente o primeiro e segundo terço, vê-se que as medianas são muito próximas entre si, variando em média 3%, salvo o *offset* eixo+3, onde a diferença é de 15% entre os valores. O teste de Wilcoxon também mostra que é somente neste *offset* que a diferença entre as medianas é considerada estatisticamente significativa.

De modo geral, independente do carregamento imposto, o último terço apresentou as menores deflexões. Uma vez que a pista de pouso e decolagem do aeroporto avaliado possui o uso predominante de uma das cabeceiras em relação à outra e, como a medição das deflexões ocorreu em direção à cabeceira menos utilizada, era provável observar-se esse comportamento.

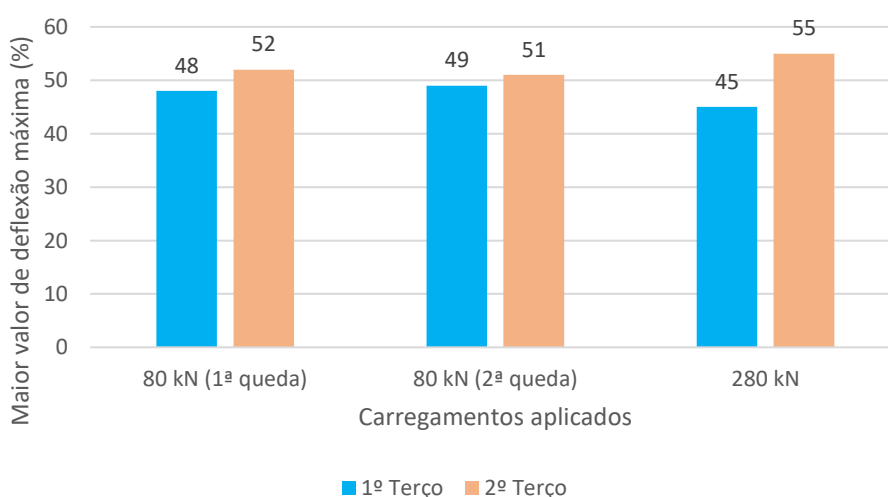
As maiores deflexões ocorreram no eixo e a 3,0 m e 6,0 m à direita dele. No eixo, esse comportamento não era esperado devido ao formato do conjunto de trens de pouso das aeronaves e a consideração feita nas análises estruturais de que, apenas 5% do peso da aeronave é transmitido pelo trem de nariz, o qual atua diretamente sobre o eixo da pista. Entretanto, como comentado anteriormente, os

pontos testados no eixo correspondem a quase 33% do total avaliado neste estudo, o que pode contribuir para esse aumento nos valores das medianas.

As deflexões nos *offsets* eixo+3 e eixo+6 podem ter apresentado valores um pouco superior aos demais *offsets* em consequência do *layout* do aeroporto estudado, onde as *taxiways* de saída da pista encontram-se à direita do eixo da pista de pouso e decolagem. Como existe uma cabeceira predominante, praticamente só uma das *taxiways* é utilizada para acessar os terminais, que também se situam à direita. Ela se encontra a cerca de 2.000 m da cabeceira, comprimento este que se enquadra no início do terceiro terço. Investigando a maior deflexão máxima medida no terceiro terço para cada carregamento aplicado e em cada *offset*, 9 dos 15 valores (3 quedas em 5 *offsets*), encontram-se em pontos anteriores à saída rápida.

Avaliando somente os dois primeiros terços, foi feita a análise das diferenças entre as deflexões máximas dos dois. Ao todo, foram verificados 684 pares de deflexões e 47,2% apresentaram maiores deflexões no primeiro terço, quando comparados ao segundo. Para melhor visualização, a Figura 17 mostra o percentual de deflexões que são maiores no primeiro trecho da pista junto do percentual correspondente às maiores deflexões no segundo terço, para cada carga.

Figura 17 - % de deflexões máximas maiores no primeiro e segundo terço da pista, respectivamente.



Fonte: Produzido pela autora (2023)

Como se observa, embora o segundo terço exiba deflexões superiores em relação ao primeiro terço, a disparidade não é expressivamente ampla. Assim, é

possível suscitar algumas reflexões para esclarecer a proximidade nos resultados de deflexão no primeiro e segundo terço da pista.

O desgaste verificado no primeiro terço pode ser em decorrência das operações de pouso e decolagens. Nas operações de decolagem, a aeronave acessa a pista de pouso e decolagem em velocidade reduzida, o que contribui para o aumento da duração de aplicação da carga, intensificando os deslocamentos e a tensão vertical. Essa operação pode ser dita como a mais crítica ao pavimento em termos de carregamento. Isso porque durante a decolagem a aeronave conta com o peso do combustível, o qual é consumido no decorrer do voo e, portanto, deve ser menor durante o pouso. De fato, dividindo-se o primeiro terço em duas partes iguais, verifica-se que 80% das deflexões no primeiro terço são maiores antes da zona de toque.

No que se refere à velocidade da aeronave, observa-se que o segundo momento em que ela é menor e, portanto, deve contribuir para maior solicitação da estrutura do pavimento, ocorre após o pouso, quando a aeronave desacelera para realizar a manobra para sair da pista. Da mesma forma que foi feito no primeiro terço, o segundo terço foi dividido em duas partes iguais, revelando que 80% das deflexões são superiores nas proximidades da saída de pista.

4.3 Análise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento

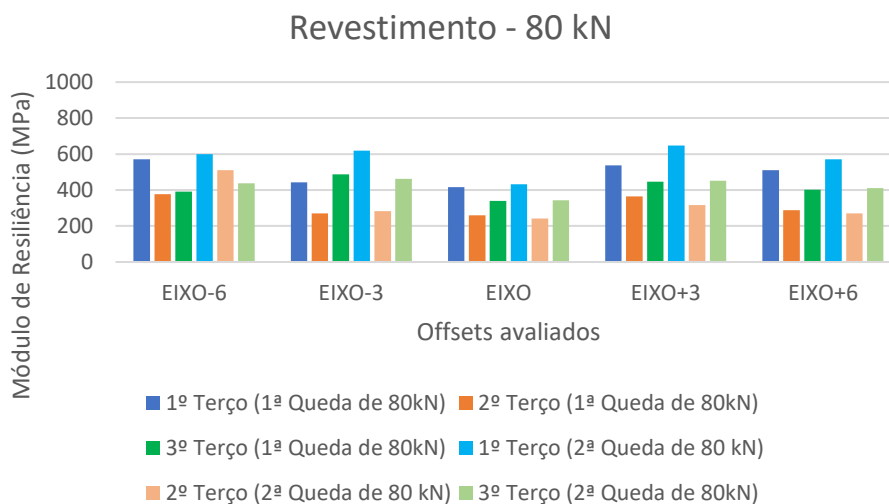
De maneira semelhante ao que foi feito para análise das deflexões máximas, após a obtenção dos módulos de resiliência (MR) por meio dos dados da bacia deflectométrica, retiraram-se os valores considerados *outliers*. Essa eliminação foi feita por terço, em cada camada do pavimento, para cada carregamento aplicado nos *offsets*, resultando assim em terços com quantidades diferentes de dados, podendo influenciar, portanto, nas análises estatísticas.

Os gráficos da Figura 18 à Figura 24 foram elaborados para analisar o comportamento estrutural do pavimento. Isso foi feito mediante comparação das medianas dos MR de cada camada que compõe o pavimento, obtidas em cada terço, para cada carregamento aplicado nos *offsets* definidos.

4.3.1 Módulo de resiliência na camada de revestimento

A Figura 18 ilustra o comportamento do módulo de resiliência na camada de revestimento dos offsets avaliados quando aplicada a carga de 80 kN.

Figura 18 - Módulo de resiliência do revestimento na aplicação da carga de 80 kN



Fonte: Produzido pela autora (2023)

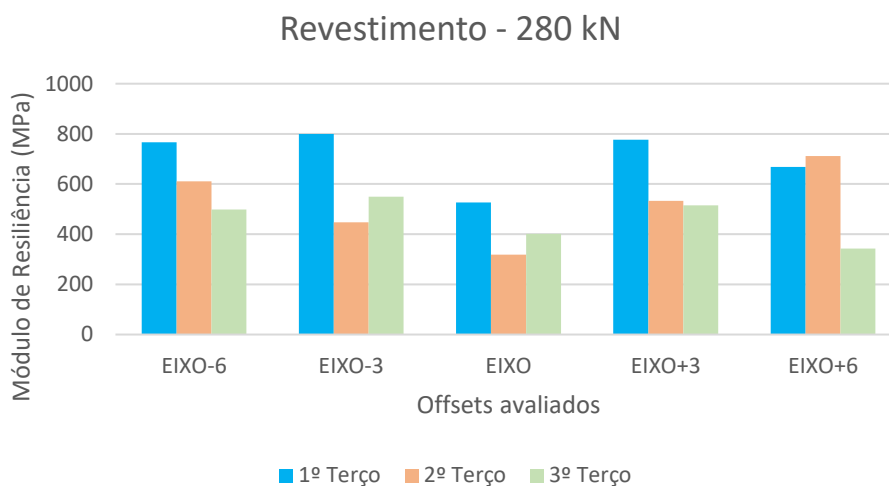
Na primeira queda de 80 kN, o que se percebe inicialmente é que o MR no segundo terço é o menor em todos os *offsets* avaliados. Entretanto, o teste de Wilcoxon verificou que somente no eixo e no *offset* eixo-3 há diferença estatisticamente significativa entre as medianas do segundo e terceiro terço. Já comparando o segundo ao primeiro terço, verifica-se que somente no *offset* eixo+3 não existe diferença significativa.

Para a segunda queda de 80 kN, conforme observado na primeira, o segundo terço apresenta os menores MR, exceto no *offset* eixo-6. Nele, de uma queda para outra, houve um acréscimo de 35,5% no MR do segundo terço, enquanto nos demais, o acréscimo foi da ordem de 5% e 12% para o primeiro e terceiro terço, respectivamente. No entanto, o teste de Wilcoxon revela que não existe diferença estatística entre os 3 terços.

Em certas situações, o aumento da carga aplicada pode resultar em uma maior rigidez do material de revestimento, refletindo-se em um aumento no MR. Com

a aplicação da carga de 280kN (Figura 19), verifica-se um incremento no MR em todos os *offsets*.

Figura 19 - Módulo de resiliência do revestimento quando aplicada a carga de 280 kN



Fonte: Produzido pela autora (2023)

Da mesma forma que notado para a carga de 80 kN, observa-se a tendência de o MR ser mais elevado no primeiro terço, ao passo que o do segundo terço tende a ser o menor. Ao longo do comprimento da pista, o revestimento é a única camada cuja espessura varia. O primeiro e segundo terço contemplam um revestimento de 30 cm, enquanto o terceiro terço, possui uma estrutura cuja camada de revestimento é 8 cm maior. Em se tratando apenas de espessura, um aumento nesta pode contribuir para um aumento no MR, pois uma camada mais espessa pode proporcionar maior rigidez estrutural.

Todavia, o que se observa é que das 15 observações (5 offsets para 3 quedas de carregamento), 13 demonstram maior MR no primeiro terço e somente 1 no segundo e 1 no terceiro. Em geral, quando em condições estruturais adequadas, espera-se que o MR das camadas diminua à medida que o pavimento é mais solicitado, demonstrando maior desgaste. Dessa forma, para o revestimento, há o indicativo de que o segundo terço é o mais solicitado em comparação aos demais.

Comparando os dois primeiros terços, cujas estruturas são semelhantes, em 80% dos pontos, o MR mostrou-se maior no primeiro terço e com diferenças estatisticamente significativas. Isso pode suscitar duas hipóteses: o primeiro terço é menos solicitado que o segundo ou, caso sejam solicitados de forma similar, o menor

MR no segundo terço pode indicar que a estrutura naquele trecho possui pior desempenho estrutural.

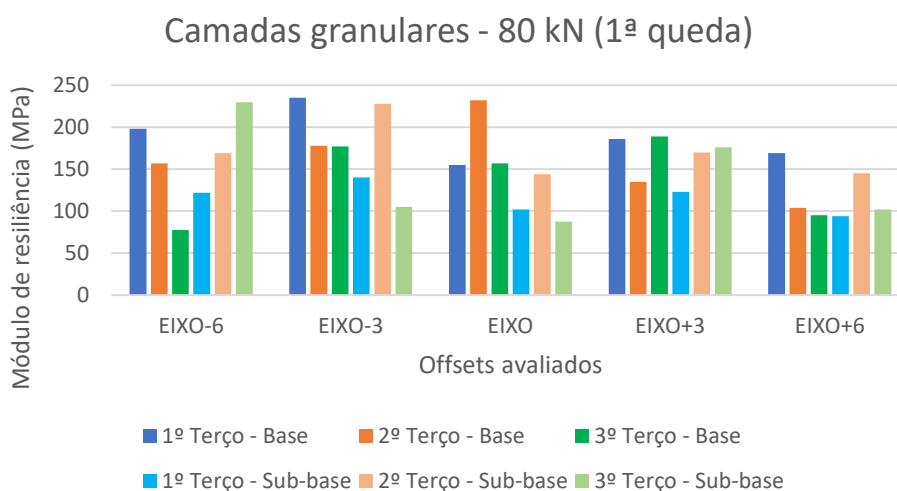
De maneira semelhante, comparando o segundo e terceiro terço, os MR são maiores no último trecho. Isso pode ser tanto pela camada mais espessa de revestimento no terceiro terço, quanto pelo fato de, assumindo o segundo terço como mais solicitado em relação ao terceiro, este possui menor capacidade de recuperação na camada superficial.

Comportamentos estruturais divergentes aos esperados podem estar relacionados à falta de conhecimento sobre o histórico de manutenções e reabilitações no pavimento. Se houver substituição de um material da estrutura ou alterações nas espessuras das camadas do pavimento, os valores de MR serão modificados, destacando assim, a importância de se conhecer as características geotécnicas do pavimento em análise.

4.3.2 Módulo de resiliência nas camadas granulares

A Figura 20 apresenta os MR nas camadas granulares (base e sub-base) nos 3 terços, quando da aplicação da 1ª queda de 80 kN. O MR no primeiro terço diminui da base para a sub-base em mais de 50% em todos os *offsets*, sendo observado que o maior decréscimo ocorreu no *offset* eixo+6.

Figura 20 - Módulo de resiliência nas camadas granulares quando aplicada a primeira queda de 80 kN

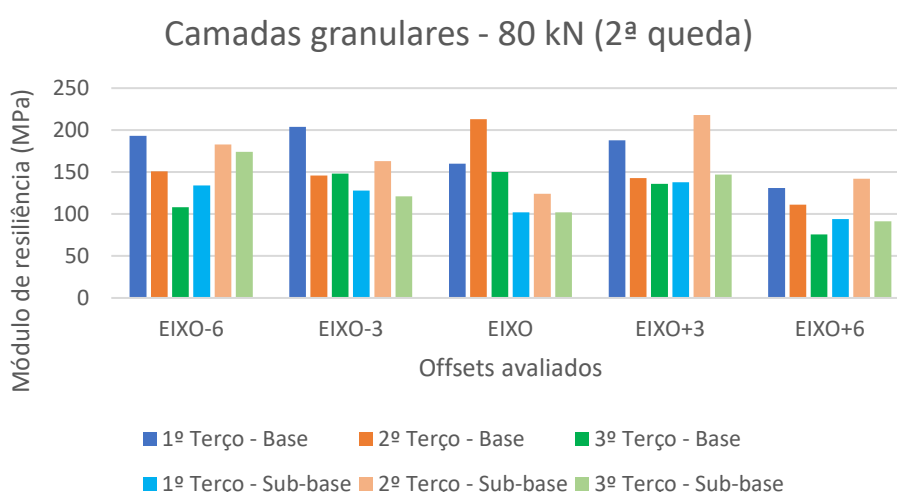


Fonte: Produzido pela autora (2023)

O comportamento do MR no segundo e terceiro terço foi variável. Em alguns *offsets*, observa-se aumento, em outros, diminuição, do MR da camada de base para sub-base, sendo a variação média de 12,6% no segundo terço e 22,4% no terceiro terço. Em geral, o MR da base no primeiro terço é maior, exceto no eixo. Por sua vez na camada de sub-base é no primeiro terço que se encontram os menores MR.

A segunda aplicação da carga de 80 kN (Figura 21) provoca um comportamento semelhante. Assim, como na primeira queda de 80 kN, no primeiro terço há diminuição de cerca 65% no MR da base para sub-base. Com comportamento contrário, existe um aumento médio de 28,3% no MR do segundo terço de uma camada para outra, exceto no eixo central.

Figura 21 - Módulo de resiliência nas camadas granulares quando aplicada a segunda queda de 80 kN



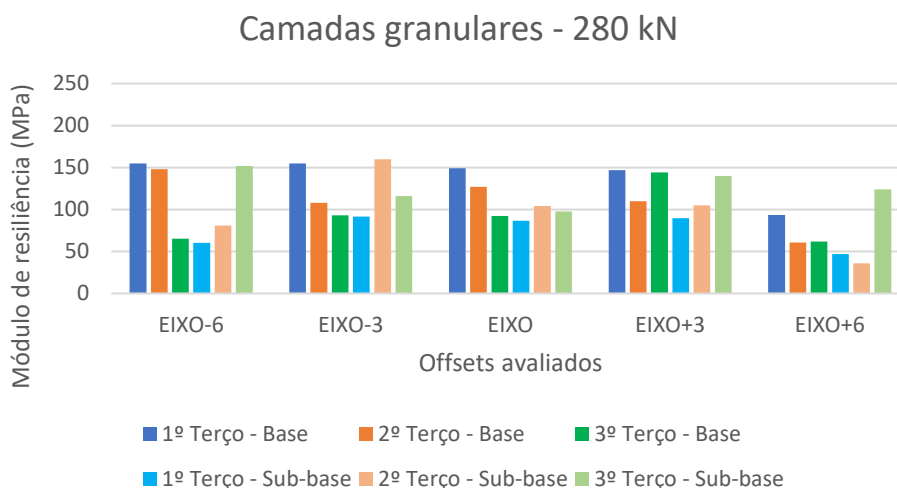
Fonte: Produzido pela autora (2023)

No eixo, há um visível decréscimo no valor do MR de uma camada para outra em todos os terços. Esse decréscimo foi de 36,3% no primeiro terço, 41,8% e 32% no segundo e terceiro terço, respectivamente. O MR da base no primeiro terço é maior quando comparado aos demais, exceto no eixo, no qual o MR do segundo terço é cerca de 33% maior. Quando se avaliam o segundo e terceiro terço, observa-se uma tendência de o MR ser maior no segundo terço em ambas as camadas granulares, principalmente na camada de sub-base.

Quando se aplica a carga de 280 kN (Figura 22), percebe-se um padrão de comportamento no primeiro terço. Há um decréscimo no MR da sub-base em relação

ao da base. Essa diminuição do MR é, em média, de 67,4%, sendo percebida principalmente na aplicação do maior carregamento, o qual solicita mais o pavimento e, portanto, gera menor capacidade de recuperação elástica em camadas abaixo do revestimento, refletindo-se em menores valores de MR.

Figura 22 - Módulos de resiliência nas camadas granulares quando aplicada a carga de 280 kN



Fonte: Produzido pela autora (2023)

Em contrapartida, há variabilidade no comportamento do segundo e do terceiro terço. Quando se comparam esses dois terços, não há uma tendência quanto à resposta estrutural destes, dificultando o apontamento de indícios que comprovem algo relacionado à solicitação ou desgaste da estrutura nesses dois últimos trechos da pista.

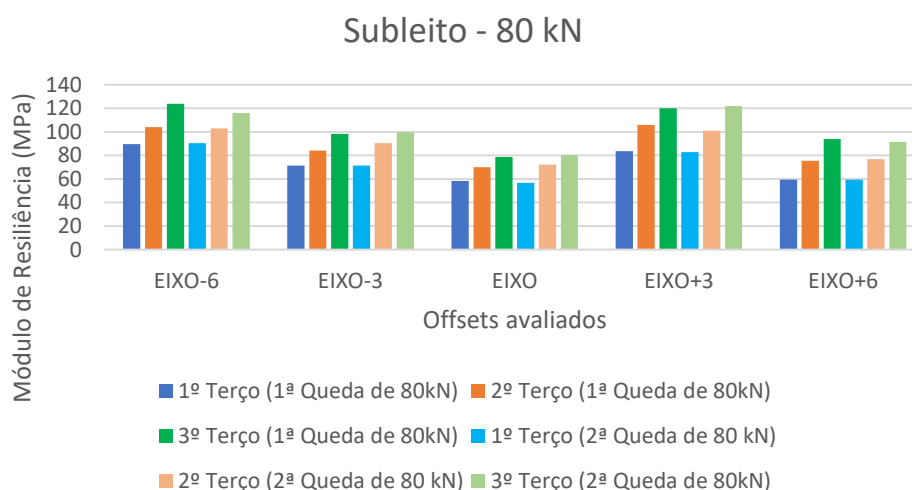
É evidenciada a existência de uma tendência de o MR do primeiro terço ser maior do que os demais na camada de base, porém de ser o menor na camada de sub-base. O que se pode notar é que devido à mudança de comportamento entre uma camada e outra, há a perda de capacidade de suporte neste terço.

A avaliação das camadas granulares torna-se difícil, pois há diversos fatores que influenciam em seu desempenho, como a compactação, umidade e a natureza e condições específicas do material granular. A compactação densifica a camada e proporciona aumento da sua rigidez. Por sua vez, a umidade causa o efeito contrário na rigidez do pavimento, podendo ocasionar queda significativa no MR. O tipo de agregado, tamanho das partículas e distribuição granulométrica condicionam, inclusive, os aspectos supracitados.

4.3.3 Módulo de resiliência no subleito

Devido à estrutura do pavimento ser em camadas e ocorrer a dissipação gradual das cargas com o aumento da profundidade, as camadas granulares são responsáveis por reduzir os esforços sobre o subleito. Assim, as deflexões e, conseqüentemente, os MR retroanalizados, são significativamente menores no subleito em comparação com as camadas superiores. A Figura 23 ilustra os resultados de MR no subleito quando aplicadas as duas quedas de 80 kN.

Figura 23 - Módulos de resiliência no subleito quando aplicada a carga de 80 kN

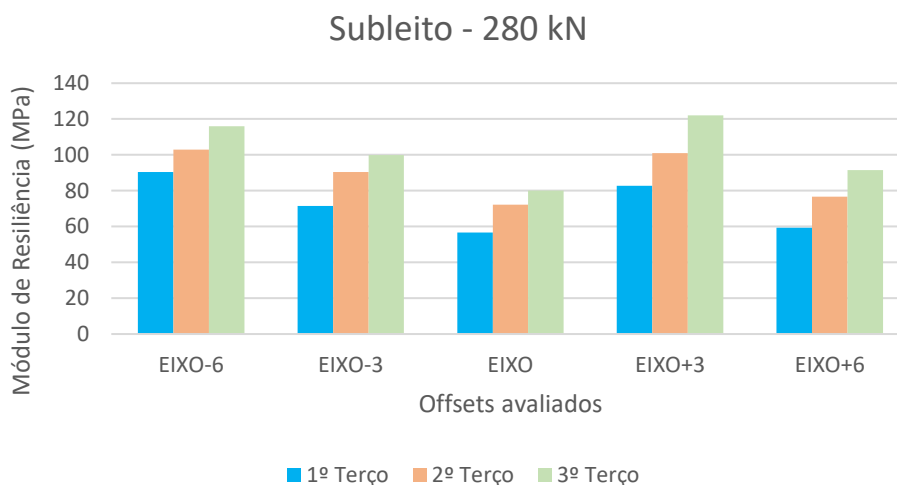


Fonte: Produzida pela autora (2023)

Destaca-se que, ao comparar quedas consecutivas, as variações nos valores de MR foram, em média, de -0,6%, 1,3% e -0,9% para o primeiro, segundo e terceiro terço, respectivamente. Aplicando o carregamento de 280 kN, obtém-se o apresentado na Figura 24.

Nos três carregamentos aplicados, observa-se um padrão de comportamento do MR nos terços, em todos os *offsets*. O primeiro terço é o que possui menor MR, enquanto o terceiro, apresenta maior MR. A diferença entre as medianas do primeiro terço em comparação ao segundo e terceiro, são estatisticamente significantes em todos os casos.

Figura 24 - Módulos de resiliência no subleito quando aplicada a carga de 280 kN



Fonte: Produzida pela autora (2023)

Valores mais baixos de MR no subleito podem indicar que essa camada está experimentando maiores deformações e uma resposta menos elástica sob a carga aplicada. Como comentado anteriormente para as camadas granulares, menores valores de MR podem ser associados a condições como compactação inadequada, umidade excessiva, presença de vazios ou até mesmo falhas estruturais na camada. Essas condições podem impactar negativamente o desempenho e a durabilidade do pavimento.

No que concerne à avaliação dos MR das camadas constituintes do pavimento, é importante destacar a possível presença de incertezas nos dados utilizados no processo de retroanálise. As espessuras das camadas desempenham um papel determinante na obtenção de resultados precisos de MR. A estratigrafia das estruturas analisadas não foi obtida por meio de perfurações e extrações de amostras dos pavimentos, que seriam métodos mais confiáveis para coletar essas informações. Além disso, o processo de construção pode ocasionar variações nas espessuras das camadas ao longo da extensão da estrutura construída, aumentando as incertezas nos dados de entrada e resultando em valores de MR que podem não refletir adequadamente as condições *in situ*.

Para sintetizar os resultados apresentados, as tabelas 6 e 7 expõem, respectivamente, um resumo das medianas das deflexões máximas de cada terço e dos MR de cada camada, expressos também por terço e para os diferentes carregamentos aplicados.

Tabela 6 - Resumo das medianas das deflexões máximas normalizadas em cada terço para os carregamentos impostos (10^{-2} mm)

Carga	Terços		
	1º Terço	2º Terço	3º Terço
80 kN (1ª queda)	123,80	124,70	97,00
80 kN (2ª queda)	123,40	123,90	95,85
280 kN	431,80	447,80	356,45

Fonte: Produzido pela autora (2023)

Tabela 7 - Resumo das medianas dos MR das camadas constituintes do pavimento em cada terço para os carregamentos impostos (MPa)

	Carregamento								
	80 kN (1ª queda)			80 kN (2ª queda)			280 kN		
	1º Terço	2º Terço	3º Terço	1º Terço	2º Terço	3º Terço	1º Terço	2º Terço	3º Terço
Revestimento	496,42	293,18	418,45	556,39	292,62	419,9	621,92	439,6	454,43
Base	179,01	152,14	137,54	166,1	147,77	132,16	143,26	114,03	89,95
Sub-base	116,76	165,24	112,56	111,92	148,33	116,22	84,4	103,28	109,03
Subleito	67,42	86,62	96,42	70,99	89,06	94,39	61,94	74,17	87,18

Fonte: Produzido pela autora (2023)

O que se verifica da Tabela 6 é que as deflexões são menores no terceiro terço, indicando assim, sua menor solicitação em comparação aos outros dois terços. Quando se observam as deflexões do primeiro e segundo terço, não há indicações de diferenças quanto às suas solicitações.

Em relação ao exposto na Tabela 7, percebe-se que os MR da camada de revestimento no último terço são menores que os do primeiro terço, ainda que a espessura seja 8 cm maior. Na camada de base, o MR do terceiro terço se mostrou menor do que nos outros terços. Esse comportamento é, possivelmente, devido à diferença de espessura no revestimento, uma vez que, a espessura da camada influencia na distribuição dos esforços. Nas demais camadas, para a carga de 280 kN – que impõe maiores solicitações na estrutura – observa-se que o MR do terceiro terço é maior em comparação aos dois primeiros. Dessa forma, evidencia-se o fato do terceiro terço ser menos solicitado que os demais e que a estrutura nesse trecho se encontra em condições mais favoráveis.

Os maiores valores de MR no revestimento e na camada de base, referem-se ao primeiro terço, porém, nas demais camadas, o desempenho nesse

trecho reduz, refletido em menores valores de MR. Isso pode indicar que o primeiro terço é mais desgastado que os demais, inclusive pelas diferenças significativas encontradas, principalmente no MR do subleito.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar, por meio da aplicação de diferentes cargas, se existe desempenho estrutural diferencial em regiões distintas de uma pista de pouso e decolagem. A análise dos dados coletados na pista estudada revelou que o local de medição interfere na avaliação estrutural e que o terço mais distante da cabeceira predominante em operações apresenta melhor condição estrutural em função de sua menor solicitação em comparação com os demais terços.

Para tal constatação, foram comprovadas disparidades na resposta estrutural do pavimento nos diferentes trechos avaliados. Os dois primeiros terços (em relação à cabeceira predominante) apresentaram maiores deflexões máximas, evidenciando, assim, sua resposta menos favorável à aplicação de uma mesma intensidade de carga, possivelmente causada por uma pior condição estrutural, resultante de uma maior solicitação estrutural em relação ao terceiro terço.

Ademais, quanto à avaliação dos módulos de resiliência, verificou-se diferença na capacidade de recuperação elástica do pavimento após solicitação. A divergência nos valores do MR de cada camada do pavimento em cada terço demonstrou que estes possuem desempenho estrutural distinto em função das suas condições estruturais

Diante das análises, não foi possível identificar um padrão de comportamento estrutural do pavimento sob as cargas de 80 kN e 280 kN. Apenas em três situações específicas observou-se a ocorrência de um padrão. O primeiro foi observado nas deflexões máximas do terceiro terço, que apresentaram os valores mais baixos em todos os *offsets* e para ambas as cargas aplicadas. O segundo padrão evidenciou-se no comportamento do subleito, para o qual os módulos de resiliência foram menores no primeiro terço, seguido pelo segundo terço e sendo o último terço aquele com maiores valores de MR. Por fim, em todos os *offsets* avaliados notou-se uma redução no desempenho das camadas granulares do primeiro terço independente do carregamento aplicado.

No início desta pesquisa, levantou-se a hipótese de que o primeiro terço da pista seria o mais exigido estruturalmente. Os valores mais elevados do módulo de resiliência na camada de revestimento e, os valores mais baixos de MR no subleito, indicam essa possibilidade. Entretanto, houve incertezas nos MR retroanalisados das camadas granulares. Além disso, as deflexões máximas do primeiro e segundo terço

não apresentaram diferenças significativas. Portanto, não foi possível concluir se o primeiro terço realmente é o mais demandado estruturalmente em comparação ao segundo terço.

Por fim, verificou-se que há desempenho estrutural diferencial. Dessa forma, evidencia-se a importância de se adotarem medidas corretivas específicas para cada terço da pista de pouso e decolagem, auxiliando na otimização do uso dos recursos necessários e evitando custos elevados na aplicação das estratégias de manutenção e reabilitação.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Como sugestões para trabalhos futuros podem-se citar:

- a) comparar os módulos de resiliência dos terço utilizando os dados de laboratório e compatibilizando com as espessuras das camadas por meio de investigação geotécnica no pavimento estudado;
- b) investigar o comportamento estrutural dos diferentes trechos analisando outros parâmetros, como o raio de curvatura e o módulo de rigidez por impulso (*Impulse Stiffness Modulus – ISM*);
- c) quantificar a economia de recursos ao aplicar medidas corretivas específicas a cada trecho da pista.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, F. D. **Avaliação Funcional e Estrutural do Pavimento Flexível no Segmento Monitorado de Itapoá**. 2017. 183 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenheiro Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Alerta aos Operadores de Aeródromos, nº 003/2021**. Brasília/DF, 2021.

_____. **Anuário do Transporte Aéreo 2021**. Brasília, DF: [s. n.], 2022. 18 p.

_____. Agência Nacional de Aviação Civil; COMAER. Comando da Aeronáutica. **Plano Nacional de Segurança Operacional para a Aviação Civil**. 2. ed. [S. l.]: Comitê de Segurança Operacional da Aviação Civil Brasileira, 2023. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/static/uploads/2023/02/PNSO-2023-2025.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2023.

ARGUE, G.H. **Canadian Airfield Pavement: Engineering Reference**. Ottawa, Canadá: [s. n.], 2005. 737 p.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.560p.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P e SOARES. J.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2ª edição. Rio de Janeiro, RJ: Petrobras, ABEDA.2022.

CHAVES, J.W.R.; ARAÚJO, M.J. R; OLIVEIRA F.H.L.de. **A influência do carregamento no módulo de elasticidade de pavimento aeroportuário**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 24., 2022, Bento Gonçalves. Anais [...]. Bento Gonçalves, 2022a. p.842-852. Disponível em:https://www.rapvenacor.com.br/wp-content/uploads/2022/09/Anais-completo_V5.1.pdf. Acesso em: 13 jun. 2023.

CHAVES, J.W.R.; ARAÚJO, M.J. R; OLIVEIRA F.H.L.de. Análise comparativa de módulos de elasticidade retroanalizados em pavimento aeroportuário com distintas cargas de impulso. *In*: CONGRESSO IBERO LATINOAMERICANO DE ASFALTO, 21., 2022, Punta del Este. **Libro técnico de trabajos completos** [...]. [S. l.: s. n.], 2022b. Disponível em: https://cilaxxi.uy/LIBRO_CILA.pdf. Acesso em: 19 set. 2023

CHEN, Dar-Hao; BILYEU, John; LIN, Huang-Hsiung; MURPHY, Mike. Temperature correction of Falling Weight Deflectometer measurements. **Transportation Research Record**, v. 1716, p. 30-39, 2000. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/home/trr>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2005.

DIRENG. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. **Levantamento de Dados de Aeroportos Brasileiros**. Brasília, DF: Ministério da Aeronáutica, 1991.

DNIT a. **IPR 719. Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infraestrutura. Rio Janeiro, RJ. 2006a.

DNIT b. **IPR 720. Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Departamento Nacional de Infraestrutura. Rio Janeiro, RJ. 2006b.

FABRÍCIO, J.M; GONÇALVES, E.A; FABRÍCIO, O.F. **Metodologia Não Destrutiva para Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis Através da Interpretação das Bacias de Deformação**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23., 1988, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: [s. n.], 1988. p. 1415-1446.

FIGUR, N.; VICENTINI, F.D. **Análise de pavimentos flexíveis: efeito da velocidade e pressão dos pneus nas tensões e deflexões**. In: SIMPÓSIO DE TRANSPORTES DO PARANÁ, 1., 2018, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: UFPR, 2018. p. 41-49. Disponível em: <https://eventos.ufpr.br/stpr/1stpr/paper/viewFile/3148/817>. Acesso em: 5 jun. 2023.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION – FAA. **AC 10/5370-11B Use of nondestructive testing in the evaluation of airport pavements**. Washington, DC., USA, 2011.

_____. **BAKFAA** – FAA Backcalculation. Versão 5.2.1.1, mar 2023. Disponível em: < <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/bakfaa-342> > Acesso em: 19 jun. 2023.

GOUVEIA, Bruno Guida *et al.* **Avaliação do efeito da umidade do subleito na análise de ciclo de vida de pavimentos rodoviários**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 35., 2021, Virtual. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2021. p. 1245-1256. Disponível em: <https://www.anpet.org.br/anais35/documentos/2021/Infraestrutura/Solo%20Concreto%20e%20Materiais%20Alternativos/6_266_AC.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2023.

GROGAN, W.P.; FREEMAN, R. B.; ALEXANDER, D.R. Impact of FWD testing variability on pavement evaluations. **Journal of Transportation Engineering**, v. 124, n. 5, p. 437-442, 1998.

HAAS, Ralph. **Modern Pavement Management**. Malabar, Flórida: Krieger Publishing Company, 1994. 302 p.

HORAK, E.; EMERY, S. **Falling Weight Deflectometer Bowl Parameters as Analysis Tool for Pavement Structural Evaluations**. In: ARRB CONFERENCE - RESEARCH INTO PRACTICE, 22., 2006, Canberra, Austrália. **Anais [...]**, 2006. Disponível em: <<http://155.212.5.248/Presto/content/Detail.aspx?ctID=MjE1ZTI4YzctZjc1YS00MzQ4LTkyY2UtMDJmNTgxYjg2ZDA5&rID=NTEw&qrs=RmFsc2U=&ph=VHJ1ZQ==&bckToL=VHJ1ZQ==&rrtc=VHJ1ZQ==>>. Acesso em: 1 set. 2023.

INFRAERO. **Relatório de Informação das Pistas**. Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária. Superintendência de Empreendimentos de Engenharia. Diretoria de Engenharia. Brasília, DF. 2008.

KAKUDA, F. M. **Desenvolvimento e a utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico**. 2010. 290 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.

LIRA, M.N. **The influence of load intensity on structural response of airport pavements assessed by nondestructive evaluation methods**. 2023. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

LOPES, F.M. **Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico - Avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação**. 2012. 402 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MCQUEEN, R. D.; MARSEY, W.; ARZE, J. M. Analysis of nondestructive test data on flexible pavements acquired at the National Airport Pavement Test Facility. **Advancing Airfield Pavements**, p. 267-278, 2001.

NÓBREGA, E.S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 2003. 365 f. Dissertação (Mestrado) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, F. H. L.de. **Proposição de Estratégias de Manutenção de Pavimentos Aeroportuários baseadas na macrotextura e no atrito: Estudo de caso do aeroporto internacional de Fortaleza**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

_____. **Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação**. 2016. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

PINTO, I. E.; DOMINGUES, FAA. A Contribuição ao Estudo de Correlação entre Equipamentos Medidores de Deflexões: Viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer–FWD. In: **Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Paviment and Technological Control**. 2001.

ROCHA FILHO, N. R. **Estudo de técnicas para a avaliação estrutural de pavimentos por meio de levantamentos deflectométricos**. 1996. 185 p. Tese (Mestre em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 1996.

ROCHA, M. L. **Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis**. 2020. 244 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020.

SHAHIN, M. Y. **Pavement Management For Airports, Roads and Parking Lots**. 2. ed. United States of America: Springer, 2005. 591 p.

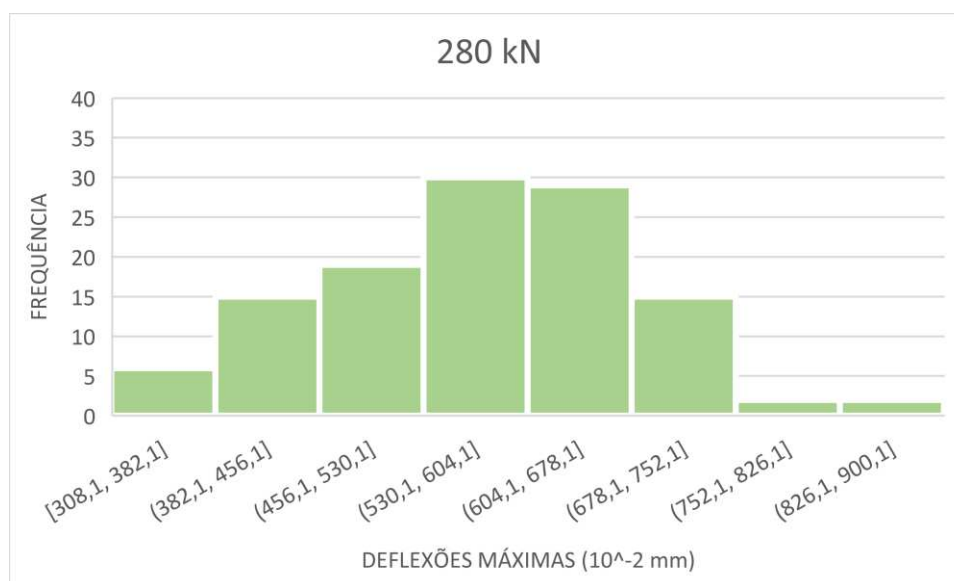
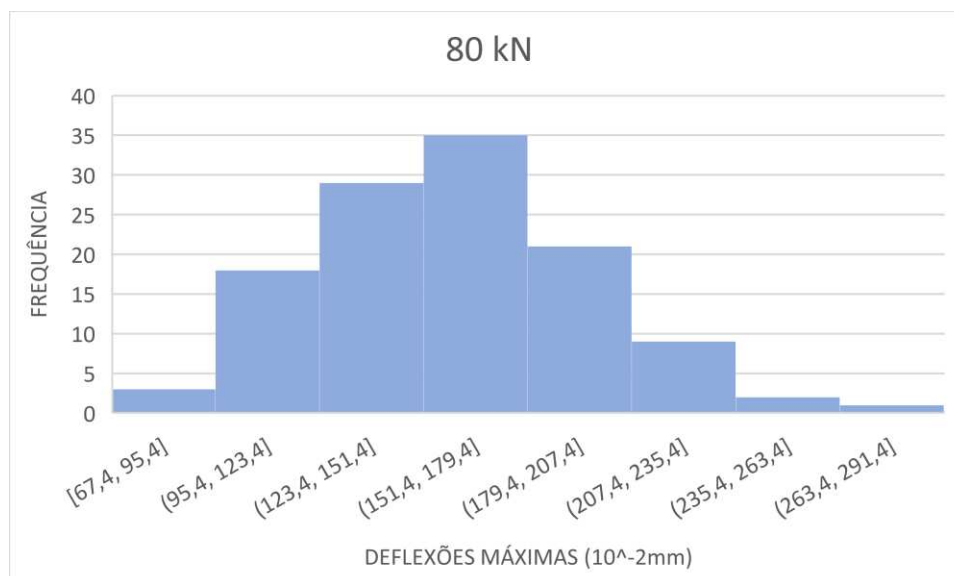
THOM, Nick. **Principles of Pavement Engineering**. London: Thomas Telford Publishing Ltd., 2010.

VELLASCO, B.Q. **Análise crítica do controle construtivo de pavimentos com a viga de Benkelman: aplicação ao caso da ampliação do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro**. 2018. 213 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

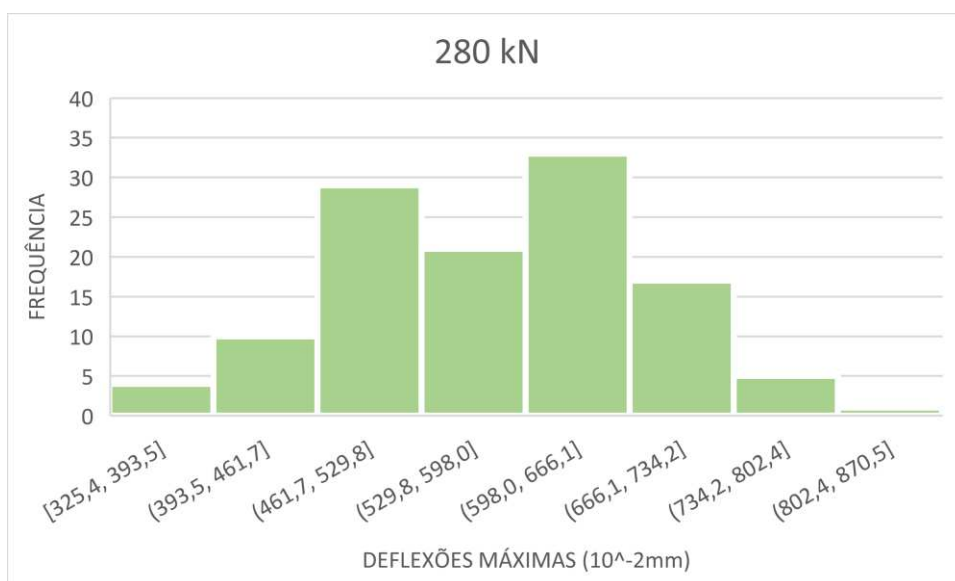
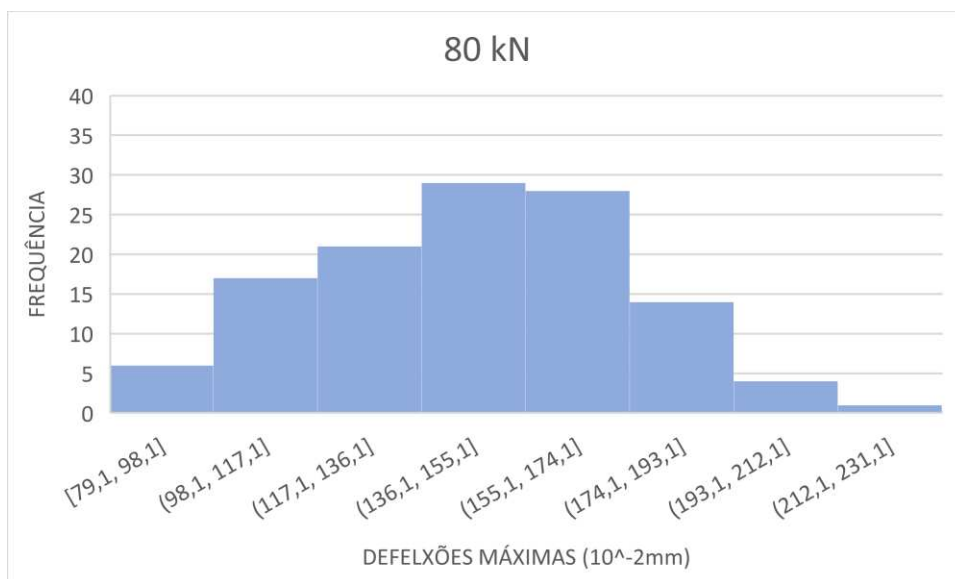
VIEIRA, G. H.V. **Avaliação estrutural de pavimentos urbanos a partir de ensaios de campo e retroanálise**. 2020. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

WELLS, A. T.; YOUNG, S. B. **Airport Planning & Management**. 5th Edition. New York, USA: McGraw-Hill. 2004.

APÊNDICE A – HISTOGRAMA DE DEFLEXÕES MÁXIMAS PARA CARGA DE 80 KN E 280 KN NO OFFSET EIXO+3



APÊNDICE B – HISTOGRAMA DE DEFLEXÕES MÁXIMAS PARA CARGA DE 80 KN E 280 KN NO OFFSET EIXO+6



APÊNDICE C – HISTOGRAMA DE DEFLEXÕES MÁXIMAS PARA CARGA DE 80 KN E 280 KN NO OFFSET EIXO-6

