

LUCAS RODRIGUES DE ANDRADE

**MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS RODOVIÁRIOS EM NÍVEL DE REDE**

SÃO PAULO

2024

LUCAS RODRIGUES DE ANDRADE

**MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS RODOVIÁRIOS EM NÍVEL DE REDE**

Edição Revisada

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

SÃO PAULO

2024

LUCAS RODRIGUES DE ANDRADE

**MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS RODOVIÁRIOS EM NÍVEL DE REDE**

Edição Revisada

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora: Prof. Dra.
Liedi Légi Bariani Bernucci

SÃO PAULO

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Andrade, Lucas Rodrigues de
MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS RODOVIÁRIOS EM NÍVEL DE REDE / L. R. Andrade --
versão corr. -- São Paulo, 2024.
212 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) 2.Bacias de deflexão
3.Avaliação estrutural 4.Machine Learning 5.Big data I.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

*Aos meus pais Edilcy e Reginaldo
por serem meus heróis e fonte de
inspiração*

O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim, terás o que colher.

Cora Coralina

A maioria das pessoas nunca vai longe o suficiente no seu primeiro vento para descobrir que elas terão uma segunda rajada. Dê a seus sonhos tudo o que você tem e você se surpreenderá com a energia que vem de você.

Willian James

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida, saúde, sabedoria, e que permitiu o desenvolvimento desta tese.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Edilcy e Reginaldo, pelo amor, apoio e sacrifícios que fizeram ao longo de toda a minha vida. Sem eles, não teria chegado ao ponto de conclusão dessa tese. À minha irmã, Letícia, que sempre foi fonte de inspiração. E à minha sobrinha, Alice, que lembrar de seu sorriso foi fonte de energia para conclusão desta tese.

A toda a minha Família, que em vários momentos do minha me ajudaram, apoiaram e foram fonte de inspiração.

Aos meus afilhados (por ordem de idade, pois amo todos igualmente), Ana, Cayo, Pedro, Helena e Alice, que me presentearam com seus sorrisos e amor incondicional, mesmo com as ausências e distância, vê-los crescer e desenvolver sempre será uma grande alegria. Aos meus compadres (também por ordem) que me permitiram fazer parte da vida de seus filhos, João Daniel e Ivana, Laianny e Rafael, Jackeline e Luis, Letícia, carregarei suas famílias sempre no meu coração.

À minha namorada, Bruna, que me acompanhou desde o início da trajetória deste doutorado, sempre me apoiando e me incentivando com muito carinho e amor.

À minha Orientadora e fonte de inspiração, professora Dra. Liedi Bernucci, que acreditou em mim desde que eu era um simples aluno de graduação. Muito obrigado por todos os ensinamentos, pelos puxões de orelha e por todo o incentivo. Vou carregar para sempre a senhora como a minha professora.

Aos membros da banca avaliadora deste trabalho que aceitaram e se dedicaram na avaliação deste trabalho.

Às professoras Dra. Kamilla e Dra. Rosangela do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação – LTP, que me acompanharam no dia-a-dia de pesquisa no laboratório. Muito obrigado por contribuírem na minha formação de pesquisador.

Aos técnicos e funcionários do LTP, Diomária, Edson, Erasmo, Robson, Lucas e Vanderlei, que sempre estiveram dispostos a ajudar e proporcionaram um excelente ambiente de trabalho. Um agradecimento especial ao Edson, que nunca mediu nenhum esforço para resolver qualquer problema durante a condução do andamento desta tese.

Aos amigos do LTP (que não vou tentar nomear, para não correr o risco de esquecer alguém), que foram a minha família ao longo dos 8 anos em que residi em São Paulo, que mesmo com a distância foram parceiros para todas as horas. Sempre me alegro e me emociono com cada nova conquista de cada um. Um agradecimento especial para Iuri, Kazuo, Laura, Paulo e André por toda a amizade, apoio e muitas vezes me ouvir desabafar.

Aos colegas de pesquisa da UnB, UFSM, UFPB integrantes do Termo Descentralizado de Pesquisa TED - DNIT, cujas discussões muito contribuíram para o meu crescimento técnico.

Aos colegas de trabalho do banco Next, Concessionária Auto Raposo Tavares – CART, Empresa de Planejamento e Logística – EPL e INFRA S.A. que me acompanharam ao longo da finalização desta tese.

A todos os meus amigos, que são a família que escolhi (impossível eu nomear todos e não cometer a injustiça de esquecer alguém). Nem sempre fui um amigo presente, mas todos os momentos que compartilhamos são coisas que eu nunca vou me esquecer. E lembrar de cada um, sempre me deu forças para continuar.

À Universidade de São Paulo – USP, em especial ao Departamento de Transportes – PTR da Escola Politécnica que proporcionaram a realização da minha formação e a

conclusão desta tese. Aos professores de todas as disciplinas que cursei, palestras que assisti, cursos que participei, todos foram de fundamental importância na minha formação.

À UnB, em especial ao INFRALAB, na pessoa do professor Dr. Marcio Muniz de Farias por proporcionarem a minha participação no Termo de Execução Descentralizada - TED 352/2020. Sempre tive o sonho de estudar na UnB e fazer parte deste projeto fez, de certa forma, com que eu realizasse esse sonho.

À Autopista Fernão Dias do Grupo ARTERIS, principalmente ao apoio dos Eng. José Mario Chaves e Eng. Guilherme Rodrigues Linhares, que, por meio do RDT-ANTT, financiaram parte da pesquisa que resultou no meu trabalho de mestrado e cujos dados também foram usados neste trabalho de doutorado.

Ao DNIT, na pessoa do Dr. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, Diretor de Planejamento e Pesquisa, o qual possibilitou o desenvolvimento do TED, do qual sou integrante, e que possibilitou a utilização dos dados aplicados para o desenvolvimento dos modelos deste trabalho.

À Agência de Transporte do Estado de São Paulo – ARTESP, nas pessoas da Dra. Ana Luiza Aranha da diretoria de investimentos e do Dr. Santi Ferri, Diretor de Operações, por terem disponibilizado os dados da malha rodoviária concedida que são tratados nesta tese, sem os quais esta tese não teria sido concluída.

A CAPES, FDTE e FINATEC pela concessão de bolsas que me subsidiaram durante o desenvolvimento dos meus estudos.

RESUMO

A complexidade das malhas rodoviárias exige por parte dos órgãos gerenciadores o uso de sofisticados Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGPs). Esses sistemas devem ser capazes de obter o melhor retorno possível dos investimentos a serem realizados do ponto de vista de segurança, conforto e economia do usuário. Para que isso ocorra, os SGPs devem possuir modelos de previsão de desempenho calibrados à realidade local da malha viária, além de métodos sistemáticos de avaliação das condições dos pavimentos. Nesse sentido, esta tese propõe um método de classificação estrutural de pavimentos asfálticos rodoviários em nível de rede, por meio de aplicação de parâmetros de bacias de deflexão (DBPs). Dessa forma, são avaliados: (i) um trecho experimental composto por quatro estruturas distintas, que foram monitoradas ao longo de 36 meses; (ii) um banco de dados de monitoramento de 50 unidades amostrais (UA's) da malha rodoviária federal, realizado ao longo de 5 anos; e (iii) um banco de dados de levantamentos deflectométricos em nível de rede, realizados ao longo de 20 anos em rodovias do estado de São Paulo. A fim de se realizar estudo de dados de deflexão ao longo do tempo, foi desenvolvido um método de correção das bacias deflectométricas em função da temperatura para ser representada em uma temperatura de referência, possibilitando comparação entre diferentes trechos e entre períodos diferentes. O procedimento de tratamento e análise exploratória dos dados resultou na estruturação de um banco de dados com as informações coletadas, possibilitando a implementação de modelos analíticos e preditivos nos estudos desenvolvidos. A análise dos DBPs se mostrou capaz de indicar os mecanismos de alterações estruturais dos pavimentos, como a deterioração do revestimento asfáltico e o efeito da cura de materiais da camada de base nas propriedades mecânicas. Adicionalmente, foi desenvolvido modelo de classificação utilizando *machine learning* para 2 diferentes níveis de tráfego (tráfego Moderado e tráfego Alto + Muito Pesado), capaz de realizar inferência do comportamento estrutural dos pavimentos rodoviários em 4 classes distintas: “Muito Rígido” (Very Stiff), “Rígido” (Stiff), “Flexível” (Flexible) e “Muito Flexível” (Very Flexible). Por fim, a aplicação dos modelos desenvolvidos em um banco de dados em nível de rede possibilitou a identificação de segmentos críticos,

para a realização de recuperação de pavimentos e identificação de melhorias na rodovia, devido à realização de campanhas de manutenção periódica anteriores. Os modelos de classificação de estruturas desenvolvidos por meio dos DBPs, aplicando-se técnicas de *machine learning*, representam um grande avanço para os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGPs) asfálticos, seja para estabelecimento de ações de manutenção, seja para avaliação do estado geral do patrimônio, valorando esses sistemas de pavimentos rodoviários asfálticos.

Palavras-Chave: Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), Bacias de deflexão, Avaliação estrutural, Machine Learning, Big data

ABSTRACT

The complexity of road networks requires the deployment of advanced Pavement Management Systems (PMSs) by managing and regulatory authorities. These systems are designed to optimize returns on investment in terms of user safety, comfort, and economic efficiency. For this to happen, PMSs must incorporate performance prediction models calibrated to local reality of the road network, along with systematic pavement condition assessment methods. In this context, this doctoral dissertation proposes a method for structural classification of asphalt road pavements at a network level, through the application of deflection basin parameters (DBPs). Thus, this study evaluated: (i) an experimental section comprising four distinct structures, monitored over a period of 36 months; (ii) a monitoring database of 50 sample units from federal road network, collected along of 5 years; and (iii) a database of network-level deflectometric surveys conducted over 20 years on São Paulo state highways. In order to conduct a study of deflection data over time, a methodology was developed to correct the deflection basins based on temperature corrections to a referential temperature, enabling comparisons between different tracks and at different time. Data processing and exploratory analysis procedure led to the structuring of a database with the collected information, enabling the analytical and predictive models' implementation in the conducted studies. The analysis of DBPs proved capable of indicating mechanisms of structural changes in pavements, such as deterioration processes of surface layer and curing process of base layer materials. Additionally, a classification model using machine learning was developed for two different traffic levels (Moderate Traffic and High and Very Heavy Traffic), capable of inferring the structural behavior of road pavements into four distinct classes: "Very Stiff", "Stiff", "Flexible" and "Very Flexible". Finally, the application of the developed models to a network-level database enabled the identification of critical segments for pavement rehabilitation and the identification of highway improvements, due to previous periodic maintenance campaigns. The structural classification models developed using DBPs, applying machine learning techniques, represent a significant advancement for asphalt PMSs, whether for establishing maintenance actions or

evaluating the overall condition of the asset, thereby enhancing the value of these asphalt road pavement systems.

Keywords: Pavement Management Systems (PMS), Deflection Basin, Structural Analysis, Machine Learning, Big data

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Organização dos estudos realizados nesta tese.....	23
Figura 2 - Evolução de defeitos com o tempo (Paterson, 1987).....	31
Figura 3 - Processo de leitura de dados.....	45
Figura 4 - Processo de pré-tratamento de dados.....	47
Figura 5 - Diagrama do Banco de Dados.....	49
Figura 6 - Fluxograma de cálculo do banco de dados.....	51
Figura 7 - Exemplo de gráfico Q-Q para verificação de normalidade de distribuição.....	54
Figura 8 - Distribuição de registros por variável categórica.....	56
Figura 9 - Histogramas de distribuição de frequências das variáveis do Banco de Dados.....	57
Figura 10 - Histogramas de distribuição de frequências dos DBPs.....	58
Figura 11 - Gráfico box plot para Deflexão Máxima.....	60
Figura 12 - Gráficos de box plot para D0 por trecho e ano.....	61
Figura 13 - Box plot para de deflexão máxima do lote I025 separados por faixa.....	63
Figura 14 - Matriz de correlação de Pearson.....	64
Figura 15 - Variação da temperatura ao longo de 24 horas da superfície de em um pavimento (lat 42°54'25", long 46°21'51") em diferentes datas (RDT-ANTT-Concessionária Arteris Fernão Dias).....	68
Figura 16 - Principais fatores que influenciam na temperatura do pavimento traduzido de Herb <i>et al.</i> (2006).....	69
Figura 17 - Linha de igualdade do modelo MLP para a temperatura do ar.....	75
Figura 18 - Linha de igualdade do modelo MLP para a temperatura do ar para o ano de 2022.....	76
Figura 19 - Série de previsão de temperatura do ar para o ano de 2022.....	77
Figura 20 - Linha de igualdade do modelo MLP para a temperatura da superfície de pavimentos asfálticos.....	78
Figura 21 - Linha de igualdade do modelo MLP para a temperatura do pavimento para os dados de Cargnin (2023).....	79

Figura 22 - Série de previsão de temperatura do pavimento para os dados de (Cargnin, 2023)	80
Figura 23 - Linha de igualdade do modelo de regressão	85
Figura 24 - Exemplo de bacia deflectométrica corrigida para UA48-BR-282	87
Figura 25 - Bacia de deflexão e os respectivos DBPs adaptado de Ferri (2013)	90
Figura 26 - Seções do trecho experimental.....	95
Figura 27 - Evolução da área trincada com relação ao tráfego	98
Figura 28 - Valores de deflexão máxima (D0) anual medidas por FWD	99
Figura 29 - Evolução dos módulos de resiliência das camadas de base com o tempo e tráfego	104
Figura 30 - Evolução dos DBPs com o tempo e tráfego.....	106
Figura 31 - Relação entre os DBPs e os módulos retroanalizados	115
Figura 32 - Execução dos poços de sondagens (DNIT, 2017).....	124
Figura 33 - Zonas climáticas brasileiras segundo IBGE (2010).....	125
Figura 34 - Exemplo de regressão de cálculo do número N	131
Figura 35 - Exemplo de levantamento deflectométrico nas UA's (DNIT, 2017).....	133
Figura 36 - Legenda de tipo de defeitos adotada no LVC (DNIT, 2017)	134
Figura 37 - Deflexões máximas por ano por UA por ano	135
Figura 38 - Distribuição da deflexão média entre as UA's por ano.....	136
Figura 39 - Distribuição de registros por variável categórica.....	137
Figura 40 - Histograma de distribuição das variáveis quantitativas.....	138
Figura 41 - Histograma dos DBPs.....	139
Figura 42 - Evolução dos DBPs com o acúmulo do Tráfego.....	141
Figura 43 - Evolução da área trincada com relação com o tempo e tráfego	143
Figura 44 - Correlação entre a área trincada e os DBPs.....	143
Figura 45 - Correlação entre os coeficientes de regressão “a” e “b”	145
Figura 46 - Correlação entre os coeficientes de Agnesi e os DBPs	146
Figura 47 - Método Cotovelo para determinação do número de <i>clusters</i>	148
Figura 48 - Resultado da classificação por KNN dos DBPs	149
Figura 49 - Matriz de confusão para as previsões do MLP	153
Figura 50 - Localização da SP-384	160

Figura 51 - Localização da SP-280	160
Figura 52 - Localização da SP-021	161
Figura 53 - Deflexão máxima para o ano de 2014 na faixa mais carregada	162
Figura 54 - Estrutura de pavimento semirrígido para o trecho entre os Km 14,00 e 95,00	163
Figura 55 - Estrutura Semirrígida Invertida para o trecho entre os Km 95,00 e 173,00	163
Figura 56 - Deflexão máxima para o ano de 2014 na faixa mais carregada	164
Figura 57 - Estrutura de pavimento semirrígido tipo da rodovia SP-280	164
Figura 58 - Deflexão máxima nos pavimentos asfálticos para o ano de 2013 na faixa mais carregada.....	165
Figura 59 - Estrutura de pavimento asfáltico semirrígido tipo da rodovia SP-021	166
Figura 60 - Valores médios de deflexão máxima dos pavimentos da rodovia SP-348 por levantamento e faixa	168
Figura 61 - Histograma de distribuição das variáveis de levantamentos deflectométricos de levantamentos da rodovia SP-348	169
Figura 62 - Histogramas com sobreposição de efeitos	171
Figura 63 - Valores médios de deflexão máxima da SP-280 por levantamento e faixa	172
Figura 64 - Histograma de distribuição das variáveis de levantamentos deflectométricos de levantamentos da rodovia SP-280	173
Figura 65 - Valores médios de deflexão máxima da SP-021 por levantamento e faixa	175
Figura 66 - Histograma de distribuição das variáveis de levantamentos deflectométricos de levantamentos da rodovia SP-021	175
Figura 67 - Resultados das classificações das estruturas de pavimento	178
Figura 68 - Avaliação das classes estruturais dos pavimentos em nível de rede para a SP-348	180
Figura 69 - Avaliação das classes estruturais dos pavimentos em nível de rede para a SP-280	182
Figura 70 - Avaliação das classes estruturais dos pavimentos em nível de rede para a SP-021	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias padrão de levantamento de FWD exigido pela ARTESP	46
Tabela 2 - Valores únicos do Banco de Dados	50
Tabela 3 - Faixas aplicação de carga do FWD adaptado de FHWA (2000).....	52
Tabela 4 - Variáveis utilizadas para elaboração do modelo	74
Tabela 5 - Variáveis utilizadas para elaboração do modelo	78
Tabela 6 - Amostragens de segmentos rodoviários com pavimentos asfálticos selecionados com localização e clima.....	81
Tabela 7 - Parâmetros adotados na retronálise	83
Tabela 8 - Resultado de avaliação das regressões.....	84
Tabela 9 - Constantes das regressões de correção da temperatura.....	86
Tabela 10 - Resumo dos parâmetros de deflexão.....	90
Tabela 11 - Temperaturas na superfície dos pavimentos medidos ao longo do período de levantamento de FWD.....	101
Tabela 12 - Análise de Variância ANOVA para os dados de módulos retroanalizados	105
Tabela 13 - Análise de Variância ANOVA para os dados de DBPs	113
Tabela 14 - Dados climáticos por zona climática adaptado de DNIT (2017).....	126
Tabela 15 - Informações das 50 UA's selecionadas adaptado de DNIT (2017).....	128
Tabela 16 - Níveis de tráfego para a seleção de soluções de misturas asfálticas adaptado de Ceratti <i>et al.</i> (2015).....	132
Tabela 17 - Balanceamento da classificação	149
Tabela 18 - Classificação conforme tráfego dos pavimentos pela classe de tráfego segundo Ceratti <i>et al.</i> (2015).....	177
Tabela 19 - Distribuição de classificações de estruturas de pavimentos	177

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Objetivo	21
1.2.	Estrutura da tese	22
2.	AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS FUNCIONAL E ESTRUTURAL PARA GESTÃO DE REDES RODOVIÁRIAS.....	26
2.1.	Avaliação em nível de rede	26
2.1.1.	Critério Funcional	28
2.1.2.	Critério de defeitos	30
2.1.3.	Critério deflectométrico.....	31
2.1.4.	Previsão de desempenho.....	35
2.2.	Parâmetros deflectométricos	36
2.3.	Curva de Agnesi.....	37
2.4.	Influência da temperatura.....	38
2.5.	Ciência de dados na Engenharia de Transportes	39
3.	TRATAMENTO E ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS	40
3.1.	Ciência de dados.....	40
3.2.	Aplicação de aprendizagem de máquina.....	41
3.3.	Origem dos dados	43
3.3.1.	Trecho Experimental - BR-381 Fernão Dias USP – dados coletados pelo LTP-PTR-EPUSP	44
3.3.2.	Unidades Amostrais - Malha Federal DNIT - dados coletados sob responsabilidade do IPR-DNIT	44
3.3.3.	Levantamentos de Rede - Malha Concedida do Estado de São Paulo - Dados Coletados pela ARTESP.....	45
3.4.	Organização do banco de dados.....	45
3.4.1.	Leitura dos dados	45
3.4.2.	Classe dos dados	46
3.4.3.	Filtros de pré-análise	47
3.4.4.	Estrutura do banco de dados	48
3.5.	Cálculos no banco de dados	51
3.5.1.	Normalização da deflexão em função da carga	51
3.5.2.	Aplicação do modelo de correção da deflexão em função da temperatura ..	52
3.5.3.	Segmentação dos dados.....	53
3.5.4.	Verificação da normalidade de distribuição dos dados.....	54
3.5.5.	Cálculo dos parâmetros deflectométricos.....	55
3.5.6.	Regressão de Agnesi	55
3.6.	Análise estatística.....	55
3.6.1.	Histograma de distribuição	56
3.6.2.	Box plot de distribuições.....	59
3.6.3.	Matriz de correlações	63
4.	PROCEDIMENTO DE CORREÇÃO DA DEFLEXÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	66
4.1.	Introdução	66

4.2.	Revisão Bibliográfica	67
4.2.1.	Determinação do gradiente térmico no revestimento asfáltico	70
4.2.2.	Correção da deflexão em função da temperatura	72
4.3.	Modelos de previsão de temperaturas dos revestimentos asfálticos.....	73
4.3.1.	Modelo de previsão da temperatura do ar	73
4.3.2.	Previsões do modelo MLP para temperatura do ar	75
4.3.3.	Modelo de previsão da temperatura da superfície do pavimento asfáltico ...	77
4.3.4.	Previsões do modelo MLP para temperatura do pavimento.....	79
4.4.	Correção das deflexões para a temperatura de referência de 25°C.....	80
4.4.1.	Escolha de trechos para retroanálise	80
4.4.2.	Metodologia de retroanálise	82
4.4.3.	Correção dos módulos das camadas asfálticas para a temperatura de referência de 25°C	83
4.4.4.	Calibração de regressão linear para correção das deflexões para a temperatura de 25°C	84
4.4.5.	Resultados do processo de correção das deflexões em função das temperaturas do ar e da superfície.....	86
4.5.	Considerações do Capítulo 4	87
5.	DESEMPENHO ESTRUTURAL UTILIZANDO PARÂMETROS DA BACIA DE DEFLEXÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM DIFERENTES MATERIAIS DE BASE SOB TRÁFEGO PESADO	88
5.1.	Introdução	88
5.2.	Parâmetro da Bacia de Deflexão (DBP) para análise de pavimentos	89
5.2.1.	Raio de Curvatura – RC	91
5.2.2.	AREA.....	91
5.2.3.	SCI, BDI e BCI.....	92
5.3.	Trecho Experimental	94
5.3.1.	Monitoramento de tráfego	96
5.3.2.	Levantamento de defeitos	97
5.3.3.	Avaliação estrutural	98
5.4.	Processo de Retroanálise	100
5.4.1.	Correção da temperatura	100
5.4.2.	Resultados da retroanálise.....	102
5.4.3.	Análise estatística de deflexão	104
5.5.	Cálculo dos Parâmetros de Bacia de Deflexão	106
5.5.1.	Resultados de RC	109
5.5.2.	Resultados de AREA.....	109
5.5.3.	Resultados de SCI, BDI e BCI.....	111
5.5.4.	Análise estatística dos DBPs.....	113
5.6.	Correlação entre DBPs e módulos retroanalizados.....	114
5.7.	Consideração do Capítulo 5	118
6.	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DAS UNIDADES AMOSTRAIS DA PESQUISA DO DNIT PARA HDM-4.....	121
6.1.	Introdução	121
6.2.	Apresentação dos dados do DNIT/HDM4	122
6.2.1.	Escolha das Unidades Amostrais - UAs	122
6.2.1.1.	Materiais e estruturas	123

6.2.1.2.	Climas nacionais das UA's	124
6.2.1.3.	Caracterização de pavimentos quanto à deflexão máxima	127
6.2.1.4.	Unidades Amostrais selecionadas.....	127
6.2.2.	Caracterização do tráfego	130
6.2.3.	Monitoramento.....	133
6.2.3.1.	Levantamento deflectométrico	133
6.2.3.2.	Área trincada	134
6.3.	Estudo dos dados deflectométricos	134
6.3.1.	Tratamento dos dados.....	136
6.3.2.	Avaliações estatísticas	136
6.3.3.	Parâmetros de Bacia de Deflexão (DBPs)	139
6.4.	Estudos de correlações	140
6.4.1.	Correlação dos DBPs com tráfego	140
6.4.2.	Correlação entre DBPs e a área trincada.....	142
6.4.3.	Correlações com os coeficientes de Agnesi.....	145
6.5.	Modelos de classificação de comportamento	147
6.5.1.	Modelo de classificação estrutural.....	147
6.5.2.	Modelo de previsão de classificação	152
6.6.	Considerações sobre o Capítulo 6	153
7.	CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	
	RODOVIÁRIOS EM NÍVEL DE REDE	155
7.1.	Introdução	155
7.2.	Coleta de dados	159
7.2.1.	Fonte de dados.....	159
7.2.2.	SP-348 Rodovia dos Bandeirantes.....	161
7.2.3.	SP-280 Rodovia Castelo Branco	163
7.2.4.	SP-021 Rodoanel Mario Covas Trecho Sul.....	165
7.3.	Tratamento de dados	166
7.3.1.	Estruturação dos dados.....	167
7.3.2.	Correção da temperatura	167
7.4.	Análise de dados	168
7.4.1.	Visualização de dados da SP-348.....	168
7.4.2.	Visualização de dados da SP-280.....	172
7.4.3.	Visualização dos dados da SP-021	174
7.5.	Modelos estatísticos de classificação e previsão de comportamento estrutural de pavimentos asfálticos	177
7.6.	Aplicação das classificações de comportamento estrutural de pavimentos em nível de rede.....	179
7.7.	Considerações do Capítulo 7	184
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	185
8.1.	Continuidade da pesquisa	189
	REFERÊNCIAS.....	190

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Gerência de Pavimento (SGP) é a principal ferramenta para auxiliar a tomada de decisões quanto à manutenção e à reabilitação de pavimentos em nível de rede. De acordo com Haas *et al.* (1994), o SGP pode ser definido como um conjunto de atividades pertinentes ao planejamento, pesquisa, projeto, avaliação e manutenção de pavimentos, com o objetivo de otimizar as tomadas de decisões em um programa de manutenções que garanta o máximo retorno possível. Um SGP com informações atualizadas, modelos calibrados e limites dos parâmetros adequados pode gerar grandes benefícios para os órgãos gestores da infraestrutura rodoviária, como o aumento da eficiência do emprego de recursos, a redução do consumo de materiais e a melhoria das condições globais das rodovias.

Em um horizonte em que os investimentos em infraestrutura têm se mostrado cada vez mais escassos, tanto no âmbito público quanto no privado, a racionalização dos custos para se manter a infraestrutura existente é imprescindível. Como principal vantagem, a adoção de um SGP pode buscar o menor Valor Presente Líquido (VPL) dos investimentos em manutenção da rede viária. Para isso, deve-se realizar a alocação dos recursos necessários e a aplicação das melhores soluções de engenharia disponíveis, visando que o sistema viário atenda de forma global aos parâmetros mínimos de operação.

O atendimento aos parâmetros mínimos de operação como resultado do uso do SGP também proporciona o aumento da sustentabilidade. Os parâmetros adotados como referência (como: Irregularidade Longitudinal – IRI; Afundamento de Trilha de Roda – ATR; Área Trincada - AT etc.), para operação dos sistemas viários, como os apresentados no Programa De Exploração da Rodovia (PER) da Agência Nacional de Transportes Terrestre (ANTT) e os exigidos pelo “Anexo 6 – Serviços Correspondentes às Funções de Conservação” do Edital de Concorrência Internacional de concessão da Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP), visam garantir os padrões mínimos de trafegabilidade das vias aos usuários. Estes parâmetros têm por objetivo: (i)

garantir a redução do consumo de combustível, pneus, lubrificantes, dentre outros recursos dos usuários; (ii) aumentar a segurança e a trafegabilidade e, conseqüentemente, reduzir os níveis de acidentes; e (iii) assegurar a qualidade do patrimônio público administrado pelas concessionárias.

A aplicação de um robusto SGP também pode contribuir para o atingimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015). O SGP pode aumentar a eficiência das estruturas e propiciar, a realização das soluções de engenharia no momento mais apropriado, aumentando a vida útil dos pavimentos, otimizando o uso de recursos e reduzindo emissões. Dessa forma, o SGP colabora diretamente com os objetivos: (i) “12 - Consumo e produção responsáveis”, com a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais e a redução substancial da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso; (ii) “9 - Indústria, inovação e infraestrutura”, por meio do desenvolvimento de infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente; (iii) “11 - Cidades e comunidades sustentáveis”, proporcionando acesso aos sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível, melhorando a segurança rodoviária; (iv) “15 - Vida terrestre”, por meio do uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce.

Os pavimentos, quando bem dimensionados, bem executados e compostos por materiais de boa qualidade, não sofrem rupturas frágeis ou súbitas, ou em curto prazo, porém eles sofrem degradação contínua e acumulativa em função da aplicação de cargas devido ao tráfego e à atuação do clima. Assim, os SGPs se baseiam em avaliações contínuas de pavimentos, que fornecem informações sobre o estado de conservação, monitorando critérios funcionais e a ocorrência de defeitos e parâmetros estruturais, que estão associados aos danos ligados à capacidade de carga do pavimento (Haas *et al.*, 1994).

Várias informações são consideradas dentro de um SGP, como tipo de frota veicular e solicitações de carga, cadastro das estruturas existentes (tipo de estruturas, espessuras

e materiais das camadas), condição funcional, condição estrutural etc. Em geral as condições estruturais são avaliadas por meio de ensaios não destrutivos, sendo o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) o equipamento mais utilizado para essas finalidades, sendo que a Viga Benkelman ainda é bastante usada.

O FWD foi trazido ao Brasil no final da década de 1980 pela *Dynatest*, com uso registrado em publicações desde 1994 (DNIT, 2006). Recentemente outro equipamento para realizar o registro de deflexões tem sido aplicado, o *High Speed Deflectometer* (HSD). Esse equipamento registra as deflexões de forma contínua ao transitar normalmente pela rodovia, evitando fechamentos temporários da via. Vários trabalhos têm estudado a aplicação desse equipamento (Arora *et al.*, 2006; Flintsch *et al.*, 2012; S. Katicha *et al.*, 2022; Muller e Roberts, 2013; Salt *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2023) e o HSD já conta com normatização nacional DNIT 440/2023 - PRO.

O FWD é um equipamento de medição de deslocamentos de toda a estrutura do pavimento e parte do subleito, obtidos na superfície do pavimento, mediante a atuação de uma carga de impacto aplicada à superfície pela queda de um peso sobre um prato que simula a carga de um semi-eixo de veículo comercial. Esses deslocamentos são chamados de deflexões do pavimento. O FWD geralmente registra as deflexões por meio de sensores em sete pontos posicionados longitudinalmente à faixa de tráfego. Comumente os sensores têm as distâncias em relação ao centro de carga aplicada distribuídas desta forma: D0 – 0,00m (deflexão no centro de aplicação da carga), D1 – 0,20m, D2 – 0,30m, D3 – 0,45m, D4 – 0,60m, D5 – 0,90m e D6 – 1,20m. No entanto, outras configurações de distâncias e equipamentos com mais sensores podem ser encontrados no manual de execução de FWD do *Long-Term Pavement Performance* (LTPP) (Schmalzer, 2006).

O uso do FWD é bastante difundido devido à capacidade de realização *in-situ*, registrando assim a resposta real da estrutura do pavimento, de forma relativamente barata, sem impactar seriamente o tráfego da via e com alta produtividade. O FWD tem entre as suas principais aplicações: (i) a avaliação das condições estruturais dos

pavimentos por meio de retroanálise; (ii) a verificação em campo das condições de projeto quanto às propriedades dos materiais e as respostas estruturais; e (iii) avaliação deflectométrica visando focar no diagnóstico do problema de um determinado segmento a fim de restauração de pavimentos. Por meio de campanhas sazonais, anuais e/ou avaliações periódicas, o FWD possibilita a verificação de efeitos das condições ambientais, efeitos das degradações dos pavimentos, efeitos da cura dos materiais etc.

A execução de retroanálise para todas as bacias deflectométricas de um SGP demandaria um alto custo técnico e computacional, por possuir, geralmente, uma grande quantidade de dados. Isso faz com que os SGPs geralmente só avaliem as deflexões máximas (D0). Por exemplo, o método de determinação de segmentos homogêneos da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 1993) ou a adoção de parâmetros como o raio de curvatura para determinar a recomposição de camadas adotado na DNER 011/1979 – PRO. Uma tendência é a adoção dos parâmetros de bacia de deflexão (*Deflection Basin Parameters - DBPs*) para a inferência do comportamento estrutural dos pavimentos, nos casos em que não se tenha o rigor da realização de retroanálise que um projeto necessita.

Com modelos de desempenho baseados em DBPs calibrados, pode-se adotar os limites ou patamares como indicadores que inferem o comportamento estrutural dos pavimentos. Dessa forma, permite-se que o desempenho estrutural seja verificado de forma assertiva com base nos resultados de ensaio de FWD dos pavimentos gerenciados, estando assim calibrados para as condições de construção, manutenção, operação, condições climáticas etc., da rede avaliada.

Para os órgãos rodoviários, agências reguladoras, projetistas, construtoras, concessionárias de rodovias, entre outros agentes a necessidade de melhoria da avaliação de pavimentos em nível de rede para diversas finalidades, a melhora da análise de grandes bancos de dados deflectométricos, e o aumento de sua confiabilidade, têm uma relevante importância. Pois muitos desses dados são usados

para alimentar os SGPs, programar as manutenções necessárias ao longo do tempo, avaliar o patrimônio existente e investimentos necessários. Dado que, a realização de retroanálise de todos os dados de um SGP é inviável, pois demandaria alto custo e tempo computacional, sendo empregada geralmente só para projetos, pesquisas ou controle de seções. Para melhorar a eficiência de um SGP, devem-se ampliar modelos de avaliação de desempenho calibrados para uma análise global e mais assertiva das estruturas dos pavimentos, escopo desta tese.

1.1. Objetivo

Essa tese tem por objetivo de desenvolver um método de análise de banco de dados de bacias deflectométricas, para ser aplicado no âmbito de SGPs em nível de rede, com enfoque de análise estrutural usando parâmetros de bacias deflectométricas para a identificação e a classificação das condições estruturais dos pavimentos asfálticos rodoviários.

Dessa forma, para a obtenção do objetivo principal, nesta tese concebeu-se um procedimento de análise em três diferentes universos de bancos de dados deflectométricos de pavimentos rodoviários, de magnitudes e complexidade crescentes. O trabalho foi iniciado concebendo-se um método de análise de dados deflectométricos de um trecho experimental, com quatro diferentes segmentos com estruturas de pavimentos diferentes, de uma rodovia concessionada federal, de tráfego muito pesado. Um segundo banco de dados foi então analisado aplicando-se e ampliando-se o método inicialmente concebido, envolvendo 50 Unidades Amostrais (UA's) avaliadas nos sentidos crescente e decrescente de um estudo originalmente realizado pelo DNIT, em diversas regiões do Brasil, com pavimentos de estruturas diferentes e sob ação de tráfego também mais ampla. Finalmente, com base na experiência exitosa da aplicação do método e sua ampliação na segunda fase do estudo, aumentaram-se a complexidade e magnitude do banco de dados, empregando-se dados deflectométricos de várias rodovias concessionadas de tráfego pesado e muito pesado, pertencentes a uma agência reguladora de transportes. Com essas experiências e a concepção de

modelos compostos por resultados de levantamentos de FWD, cálculo de parâmetros de bacia deflectométrica (DBPs), dados climáticos, dados de projetos de manutenção da infraestrutura rodoviária, foi possível avaliar a condição estrutural em nível de rede, realizando-se uma classificação das estruturas com base no desempenho estrutural dos pavimentos rodoviários.

Os objetivos específicos desta tese são:

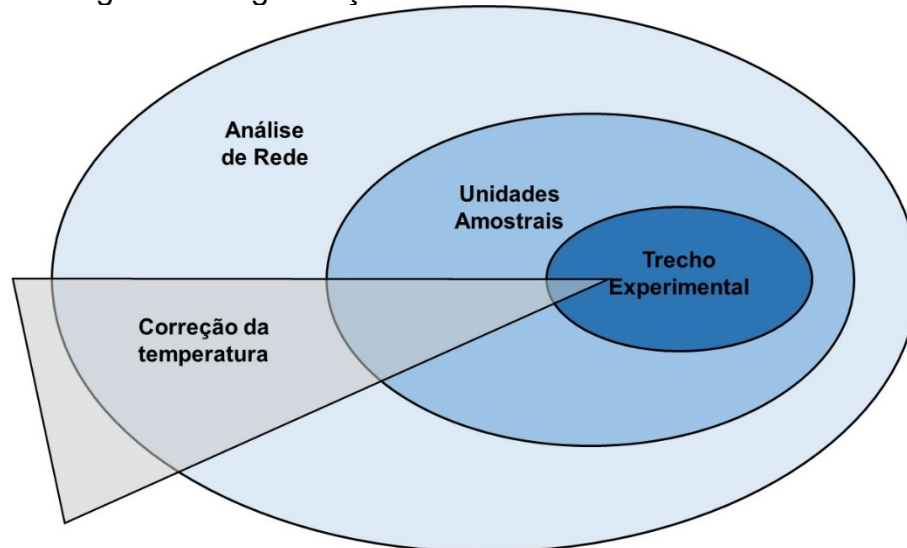
- Desenvolvimento de procedimento para organização, tratamento e análise de dados históricos de deflexão;
- Elaboração de procedimento para estabelecer correlações e comparações dos dados de deflexão ao longo do tempo, por meio de metodologia de realização de correção da bacia deflectométrica em função da temperatura de execução do ensaio de FWD para temperatura de referência de 25°C;
- Desenvolvimento de estudo de análise de desempenho estrutural de pavimentos asfálticos aplicando parâmetros de bacias deflectométricas (DBPs);
- Elaboração de método estatístico de classificação de estruturas a partir de parâmetros de bacias deflectométricas (DBPs) para aplicação em avaliações estruturais de pavimentos; e
- Aplicação dos métodos desenvolvidos em um complexo banco de dados de uma agência reguladora de transportes composto por resultados de levantamentos de FWD e projetos de manutenção da infraestrutura, com o objetivo de realizar análise da condição estrutural em nível de rede aplicando o cálculo de parâmetros de bacias deflectométricas (DBPs), com base na verificação do desempenho das estruturas rodoviárias.

1.2. Estrutura da tese

Esta tese é composta por três estudos realizados com dados deflectométricos com o objetivo de se compreender a evolução estrutural de pavimentos asfálticos. Sendo que a tese é composta por 8 capítulos, sendo: Introdução, Revisão sobre avaliação de pavimentos, Tratamento e Análise Exploratória de Dados, Procedimento de Correção

da Deflexão, Análise de Desempenho Estrutural, Modelo de Classificação das Estruturas, Classificação das Estruturas em Nível de Rede e Conclusões. A Figura 1 exemplifica a organização dos três estudos que compõem a tese. Para tanto, foi necessária a elaboração do procedimento de correção das deflexões em função da temperatura que se aplica aos demais. O primeiro estudo baseia-se na concepção metodológica de análise estrutural de um trecho experimental. No segundo, aperfeiçoou-se o procedimento a partir de Unidades Amostrais nacionais. E no terceiro, ampliou-se mais uma vez a complexidade e a magnitude dos dados para vários pavimentos de diferentes rodovias Nível de Rede para demonstrar a robustez metodológica e possibilidade de identificação e classificação em classes de condições estruturais dos diferentes pavimentos analisados.

Figura 1 - Organização dos estudos realizados nesta tese



Fonte: Andrade (2024)

O primeiro capítulo destina-se à introdução do tema a ser abordado pela pesquisa e sua relevância, e à definição dos principais objetivos a serem alcançados, além de apresentar a organização da tese.

No segundo capítulo, é realizada a revisão bibliográfica sobre os temas que são discutidos ao longo da tese, como estudos que abordaram a avaliação em nível de rede do ponto de vista estrutural, estudos que exploraram os parâmetros de bacia para

inferência estrutural dos pavimentos, a influência da temperatura nas bacias deflectométricas, e exemplos de aplicações de aprendizagem de máquinas na engenharia de transportes.

No terceiro capítulo, é descrita a origem dos dados utilizados, bem como o tratamento de dados realizado, a estruturação e organização do banco de dados. Também é apresentada a análise exploratória de dados.

O quarto capítulo contempla a descrição do processo de correção das bacias deflectométricas em função da temperatura, que consiste nos modelos de: (i) previsão de temperatura do ar, (ii) temperatura do pavimento e (iii) correção das deflexões. Estes modelos são aplicados no tratamento do banco de dados utilizado nos demais estudos que compõem esta tese. Uma versão preliminar deste capítulo foi publicada nos anais do congresso ANPET 2023.

O quinto capítulo é composto pela versão em português do artigo publicado pela revista científica "*International Journal of Pavement Research and Technology*" em 2023, em que é aplicado o procedimento de análise de dados do trecho experimental de pavimento asfáltico construído na rodovia Fernão Dias BR-381, com quatro diferentes materiais que compõem a camada de base. Esse trecho foi monitorado ao longo de 36 meses, por meio de avaliações periódicas estruturais e funcionais. Os dados foram usados para a aplicação dos parâmetros de bacias de deflexão e para a verificação estrutural dos fenômenos: (i) de fadiga da camada asfáltica de um pavimento flexível; (ii) estabilidade quanto às solicitações do tráfego de um pavimento semirrígido; e (iii) efeito da cura dos materiais reciclados compostos por RAP+Emulsão Asfáltica e RAP+Espuma de Asfalto.

No sexto capítulo, é desenvolvida a avaliação da aplicação dos DBPs para classificação das estruturas. São utilizados os dados deflectométricos de unidades de amostrais de rodovias da malha federal sob administração do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Neste estudo são usados parâmetros de bacia de

deflexão, tráfego e evolução da área trincada para se determinarem modelos estatísticos de classificação de pavimentos, e dessa forma realizar a inferência do comportamento estrutural dos pavimentos, com o objetivo de aplicação em SGP para análise em nível de rede.

O sétimo capítulo apresenta o estudo de aplicação de metodologia para incorporar técnicas usadas para interpretar e avaliar dados de deflexão para aplicações de SGP em nível de rede. É usado um grande banco de dados de rodovias paulistas integrantes do Programa de Concessões Rodoviárias do Estado de São Paulo, sob responsabilidade da Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP). A aplicação do modelo de classificação das estruturas resultou na identificação de processos de deterioração dos pavimentos bem como dos efeitos de realização de manutenções periódicas nas estruturas. Com este estudo, foi possível demonstrar a robustez do procedimento de análise concebido nesta tese, podendo ser empregado em SGP em nível de rede.

No oitavo capítulo, são expostas as considerações finais acerca dos temas abordados, bem como as conclusões obtidas e as recomendações para as próximas pesquisas.

2. AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS FUNCIONAL E ESTRUTURAL PARA GESTÃO DE REDES RODOVIÁRIAS

Os pavimentos rodoviários são estruturas de longas extensões, de pequenas espessuras (em geral menor que um metro de espessura total), com sua superfície exposta diretamente às ações climáticas e à solicitação pelos pneus dos veículos. Para auxiliar na administração destas estruturas, é necessária a implantação de Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGPs), que devem ser alimentados com dados de projeto e dados atualizados coletados em campo periodicamente, possuir modelos de desempenho calibrados e limites dos parâmetros adequados. Para isso os Parâmetros de Bacias de Deflexões (DBPs) podem ser aplicados para inferência dos comportamentos estruturais. Entretanto, os pavimentos estão sujeitos a diversas condições climáticas, por isso a correção das bacias de deflexão em função da temperatura é de extrema importância, para que o SGP seja alimentado corretamente. Por se tratar de grandes bancos de dados, métodos estatísticos de análise, classificação e modelagem podem ser aplicados dentro dos SGP. Dessa forma, nesta revisão bibliográfica buscou-se realizar uma introdução sobre os temas que serão abordados ao longo desta tese, como estudos que realizaram avaliação em nível de rede com critérios de avaliação e modelos de previsão de desempenho, estudos que abordaram os parâmetros de bacia para inferência estrutural dos pavimentos, a influência da temperatura nas bacias deflectométricas, e exemplos de aplicação e aprendizagem de máquinas na engenharia de transportes. Os estudos subsidiaram o desenvolvimento dos capítulos desta tese.

2.1. Avaliação em nível de rede

Os objetivos primordiais dos SGPs são identificar, planejar e precificar as intervenções prioritárias da malha rodoviária. O SGP se baseia em informações resumidas (valores médios, índices paramétricos etc.) para subsidiar a tomada de decisão quanto aos serviços de manutenção e reabilitação das estruturas. O estudo da malha rodoviária de forma global, com a identificação dos segmentos prioritários, a definição de soluções

aplicáveis e a estimativa dos volumes orçamentários necessários é chamada de avaliação em nível de rede (DNIT, 2011).

Segundo Haas *et al.* (1994), a gerência de pavimentos pode ser subdividida em três níveis de hierarquia: (i) o primeiro é chamado de “Nível Administrativo” e corresponde à visão orçamentária da gerência de pavimentos, na qual são determinados os montantes destinados para cada disciplina da manutenção rodoviária (como recuperação de sinalização, serviços em obra de arte especial, e manutenção de pavimentos); (ii) o segundo se trata do “Nível de Rede”, em que estratégias de manutenção são determinadas para o sistema rodoviário por segmentos que apresentem características técnicas semelhantes (projeto, tráfego, desempenho etc.), com o objetivo de otimizar os recursos disponíveis; e (iii) o terceiro é o “Nível de Projeto”, em que as intervenções na malha rodoviária são consideradas com o maior rigor e detalhamento possível, resultando em soluções de engenharia precisas.

Para avaliação adequada em nível de rede de um SGP, é necessário que o sistema esteja alimentado com informações confiáveis. A estruturação do banco de dados costuma ser o momento de maior consumo de esforços. O banco de dados deve conter informações como: (i) estrutura do pavimento (Idades, espessuras das camadas, materiais utilizados etc.); (ii) o histórico de intervenções; (iii) os dados de tráfego (pesagem, distribuição da frota, contagens e taxas de crescimento); e (iv) cadastros do estado do pavimento, como dados de defeitos (buraco, afundamento e área trincada), irregularidade longitudinal (IRI) e resultados deflectométricos (Duran, 2016). Os parâmetros de análise devem ser coletados de forma sistemática, seguindo os mesmos critérios e devem ser organizados segundo os padrões estabelecidos no banco de dados.

As aplicações das análises em nível de rede nos SGPs têm o objetivo de: (i) identificar os segmentos passíveis de manutenção e reabilitação considerando a condição dos pavimentos, a existência de defeitos etc.; (ii) priorizar os segmentos de acordo com o desempenho das estruturas, níveis de tráfego, custos envolvidos etc.; (iii) quantificar as

necessidades orçamentárias ao longo do tempo; e (iv) avaliar a condição do sistema rodoviário e prever as condições futuras considerando diferentes cenários de manutenção e reabilitação dos pavimentos (Paterson, 1987).

As previsões das condições futuras da rodovia, bem como os efeitos das intervenções realizadas são resultados dos modelos integrantes do SGP. Dessa forma, as avaliações devem ser realizadas a partir de modelos de previsão de desempenho calibrados e que reflitam a realidade da malha analisada. Somente assim o SGP pode garantir bons resultados quanto à eficiência no emprego de recursos, consumo consciente de matérias primas e melhoria das condições globais das rodovias (Duran, 2016).

Os SGPs podem ser estruturados a partir de modelos de desempenho com foco funcional, defeitos e/ou estrutural. Os modelos de desempenho funcionais são aqueles com avaliação e previsão de parâmetros funcionais dos pavimentos (irregularidade, serventia). Os modelos de previsão de defeitos são aqueles baseados em dados como Panela, Área Trincada, Afundamento de Trilha de Roda etc. Os modelos estruturais são fundamentados em dados de deflexão e propriedade das camadas.

2.1.1. Critério Funcional

O conceito de serventia foi definido por Carey Jr e Irick (1960) durante o experimento da *AASHO Road Test*, para ser utilizado em levantamentos subjetivos da condição dos pavimentos. A serventia representa a habilidade do pavimento em garantir a trafegabilidade de veículos e caminhões em grandes volumes e altas velocidades. O método proposto pelos autores resultou no desenvolvimento do *Present Serviceability Index* (PSI), um dos conceitos mais utilizados na avaliação de pavimentos. As condições de conforto ao rolamento, ou o PSI, decrescem ao longo do tempo e ocorrência do tráfego, devido à ocorrência de deterioração dos pavimentos, resultando na determinação ao menor nível de qualidade dos pavimentos, prejudicando a trafegabilidade dos veículos com conforto e segurança. Esse parâmetro ajuda a identificar o momento oportuno de realização de intervenções nas estruturas, para retornar, dessa forma, ao nível de qualidade próximo ao inicial.

Os estudos conduzidos por Carey Jr e Irick (1960) indicaram que a irregularidade longitudinal (IRI) é a variável mais apropriada para a avaliação da condição funcional dos pavimentos. Essa variável exerce uma influência significativa nos custos operacionais dos veículos, afeta a segurança, o conforto e a velocidade.

Segundo a norma DNIT 442/2023-PRO, o IRI é definido como sendo “Somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal de projeto geométrico que afeta a dinâmica do veículo, o efeito dinâmico das cargas, a qualidade ao rolamento e a drenagem superficial da via”. Os levantamentos da irregularidade longitudinal devem atender as normas DNER 173/1986-ES, DNER 182/1994-PRO ou DNIT 442/2023-PRO.

A norma DNER 173/1986-ES determina a realização de levantamento das irregularidades dos pavimentos utilizando nível e mira. Essa norma é aplicada para calibração de equipamentos medidores de irregularidade do tipo resposta, como o normatizado pela DNER 182/1994-PRO. Já a norma DNIT 442/2023-PRO estabelece o procedimento para realização de levantamento de irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial, no qual o perfil longitudinal é medido por meio de sensores de deslocamento vertical sem contato, do tipo *laser*, acelerômetros e hidrômetros. Internacionalmente os equipamentos do tipo perfilômetro inercial são os mais empregados devido à rapidez de execução, processamento das leituras automatizadas e assertividade nos levantamentos.

Os desvios da superfície ou simplesmente irregularidades são resultantes do processo construtivo e evoluem com as solicitações do tráfego e exposição ao clima ao longo do tempo, devido à ocorrência de defeitos nos pavimentos, como trincamentos, deformações permanentes, desagaste etc. O IRI influencia na qualidade ao rolamento gerando uma aceleração vertical e/ou lateral no veículo. Essa aceleração causa deslocamentos laterais e/ou verticais, que são responsáveis pelo desconforto do usuário e a geração de cargas dinâmicas dos veículos sobre as estruturas dos pavimentos (Haas *et al.*, 1994). As cargas dinâmicas influenciam na segurança à

trafegabilidade, quando essas forças são transmitidas aos pneus, esses deformam em um sistema massa mola, causando alterações nas forças de atrito entre pneu e pavimento, o que favorece a ocorrência de deslizamentos, alteração de velocidades, perda de controle etc.

2.1.2. Critério de defeitos

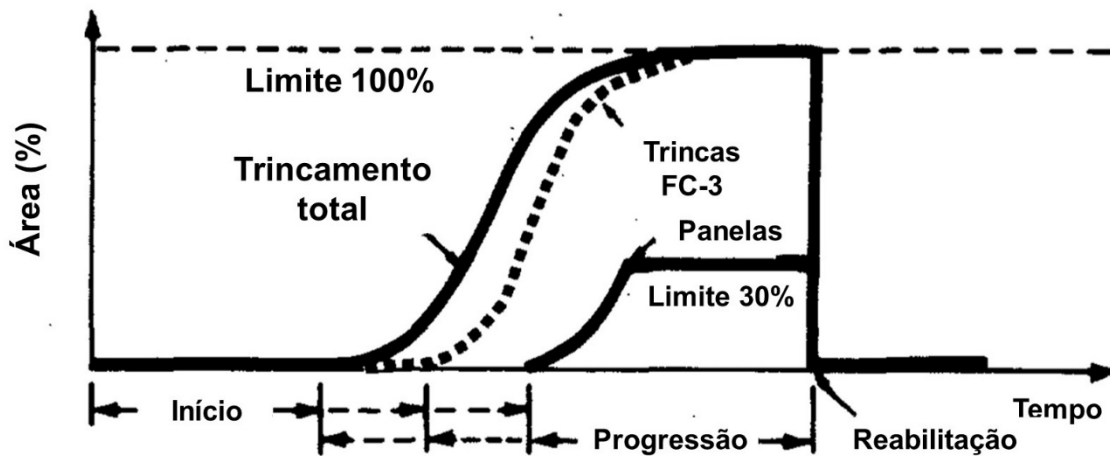
Os defeitos de pavimento são os maiores indicadores de deterioração das estruturas. Defeitos como trincamentos, afundamentos de trilha de roda e panelas afetam a serventia e comprometem a capacidade estrutural dos pavimentos. Os defeitos ocorrem ao longo do tempo e da ocorrência do tráfego. Os defeitos só ocorrem precocemente quando causados por problemas construtivos, subdimensionamentos de projetos, ou materiais inapropriados. Os defeitos são indicadores dos processos de fadiga do revestimento asfáltico ou das camadas estabilizadas quimicamente, consolidações ou cisalhamentos por falhas estruturais ou perda das propriedades mecânicas dos materiais.

Nacionalmente a norma DNIT 005/2003-TER apresenta as definições e os termos técnicos empregados para classificar os defeitos ocorrentes nos pavimentos asfálticos flexíveis e semirrígidos. Os levantamentos podem ser realizados por inspeção visual DNIT 006/2003-PRO, DNIT 007/2003-PRO e DNIT 433/2021-PRO, podem ser realizados de forma contínua DNIT 008/2003-PRO, por critério subjetivo DNIT 009/2003-PRO, e por meio de equipamento de identificação por imagens dos defeitos DNIT 440/2023-PRO. As normas apresentam metodologias para realização dos levantamentos de defeitos, os equipamentos necessários, os métodos para identificar, quantificar e determinar a severidade dos defeitos.

Paterson (1987) divide os defeitos em três grupos por modalidade: (i) trincamentos; (ii) desgastes; e (iii) deformações, e indica os defeitos mais apropriados para tomada de decisão como sendo: trincas, desgaste, panelas, escorregamento, deformação permanente e irregularidade longitudinal. O autor correlaciona a evolução dos defeitos ao longo do tempo e ocorrência do tráfego, categorizando a evolução em duas etapas:

inicial - a partir da construção da estrutura até o momento de surgimento dos primeiros defeitos; e progressão - como sendo o período de evolução dos defeitos, com acréscimo da severidade e extensão, até o momento de realização de intervenção no pavimento. O autor também correlaciona o surgimento de panelas com a evolução de trincas severas, Figura 2.

Figura 2 - Evolução de defeitos com o tempo (Paterson, 1987)



Fonte: Adaptado de Paterson (1987)

2.1.3. Critério deflectométrico

O ensaio de FWD é um método não destrutivo, sendo atualmente o mais usado para realização de avaliações estruturais de pavimentos, nas quais são medidos os deslocamentos verticais da superfície do pavimento, chamados de deflexões, decorrentes da ação de carga de roda. A deflexão é medida de um deslocamento em um dado ponto na superfície do pavimento, que representa a soma de todos os deslocamentos sofridos pelas diferentes camadas do pavimento e do subleito, devido à aplicação de uma carga. A mensuração é realizada por meio de geofones ou acelerômetros instalados em uma viga do equipamento FWD, paralela à superfície do pavimento, onde estão instalados os dispositivos de mensuração, dispostos em distância padrão do ponto de aplicação de carga. A curva formada pelas deflexões medidas ao longo da distância do ponto de aplicação da carga é chamada de Bacia de Deflexão. Ver Figura 25 - Bacia de deflexão e os respectivos DBPs adaptado de Ferri

(2013) apresentada no Capítulo 5 (p.88). “DESEMPENHO ESTRUTURAL UTILIZANDO PARÂMETROS DA BACIA DE DEFLEXÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM DIFERENTES MATERIAIS DE BASE SOB TRÁFEGO PESADO” (p. 88).

As bacias de deflexões dos pavimentos são geralmente partes constituintes dos bancos de dados dos SGPs (Wimsatt, 1998) e, em alguns sistemas, as bacias de deflexões são resultantes de diferentes níveis de carga (40kN, 60kN ou 80kN) (Alam *et al.*, 2007). Geralmente somente as deflexões máximas são avaliadas, principalmente quando se utiliza a viga de Benkelman, equipamento dos anos 1950, onde há a medida do deslocamento do pavimento no ponto de centro de carga, entre os dois pneus de um caminhão, com 40 kN em seu semo-eixo. Vários estudos buscaram desenvolver métodos de avaliação estrutural dos pavimentos usando os parâmetros de deflexões para aplicação em avaliações em nível de rede.

Damnjanovic e Zhang (2006) desenvolveram metodologia para determinação da frequência mínima de execução do FWD para avaliação em nível de rede. Alam *et al.* (2007) recomendam a realização de 3 ensaios a cada milha para alimentação de um SGP, que seria um ensaio de FWD para a cada 500 metros aproximadamente. Matini *et al.* (2018) avaliaram a diferença em se realizar análises em nível de rede de levantamentos realizados a cada 200m, 400m, 600m e 800m, e chegaram à conclusão de que aumentando o espaçamento de coleta de 200 para 600 metros, aumenta em 55% a produtividade e causa uma variação de até 2% dos parâmetros avaliados. Essas métricas podem não ser aplicadas para a realidade nacional devido à grande variação dos materiais e espessuras das diferentes camadas de pavimentos das rodovias brasileiras, alteração muitas vezes do próprio subleito, e a falta de histórico de intervenções dos pavimentos e mesmo diferenças construtivas.

Avaliação em nível de rede pode ser realizada aplicando o *Structural Number* (SN) da AASHTO (1993). Rohde (1994) desenvolveu técnica de determinação do SN através da bacia de deflexão. Para isso realizou a avaliação em nível de rede de 62 seções de pavimentos com diversas idades, diferentes condições estruturais, diversos materiais e

espessuras. O estudo resultou em uma boa correlação entre o SN e o módulo retroanalisado das camadas dos pavimentos asfálticos. O estudo indica possibilidade de aplicação deste parâmetro na avaliação em nível de rede de forma vantajosa, pois não necessitaria da utilização de ferramentas de análises mecanicistas.

Wimsatt (1998) desenvolveu método para avaliação da estrutura dos pavimentos em nível de rede para aplicação no SGP do *Texas Department of Transportation* (TxDOT) com base nos dados deflexão de FWD. Aplicando a razão entre a deflexão do primeiro geofone (abaixo da carga aplicada) e do último (distante, tendo como resultante em geral apenas o deslocamento do subleito sob efeito da carga aplicada), demonstrou correlação entre o módulo global do pavimento e o módulo do subleito. Esse indicador se mostrou razoável para identificação da condição estrutural do pavimento e pode ser aplicado para identificação de defeitos na estrutura do pavimento.

Usando a técnica da árvore de decisão baseada em parâmetros estruturais de pavimentos flexíveis, como SN e módulo do subleito, Chowdhury *et al.* (2012) determinaram uma árvore para tomada de decisão de estratégias de manutenção para o SGP do *Virginia Department of Transportation* (Virginia DOT). Este SGP adota o parâmetro AREA somente para pavimentos rígidos.

Bryce *et al.* (2013) estabeleceram estudo de correlação entre parâmetros estruturais e parâmetros funcionais. Usando um parâmetro que relaciona o SN efetivo (calculado a partir da diferença entre as deflexões) e o SN requerido, o estudo demonstrou uma correspondência entre o parâmetro estrutural e as manutenções realizadas em nível de rede.

Os parâmetros AREA e AREA normalizada foram propostos por Saleh (2016a) como meios de se avaliar a condição estrutural dos pavimentos flexíveis em nível de rede. Os parâmetros foram usados para determinação de segmentos homogêneos do ponto de vista estrutural. A AREA normalizada apresentou uma alta correlação com as condições encontradas através dos levantamentos visuais realizados nos pavimentos, o que pode

sustentar decisões do ponto de vista de manutenção e reabilitação com base nos resultados de um SGP. Saleh (2016b) desenvolveu quatro diferentes escalas para avaliação do parâmetro AREA normalizada a depender do tipo de estrutura. Foram consideradas as estruturas como sendo: pavimento flexível com tratamento superficial; pavimento flexível com revestimento asfáltico de até 5cm de espessura; pavimento flexível com mais de 5cm de espessura de revestimento asfáltico; e pavimento com revestimento asfáltico e base estabilizada com cimento. Dessa forma pode-se classificar os pavimentos dentro das classes de estrutura quanto a sua resposta estrutural e assim melhorar as análises do SGP em nível de rede.

Buscando um parâmetro que representasse toda a bacia deflectométrica, Loganathan *et al.* (2019) encontraram 4 índices que apresentaram boa correlação com o desempenho quanto à área trincada devido à fadiga do revestimento. Esses autores desenvolveram classificação para ser implementada em SGP, com esses índices, que podem auxiliar nas tomadas de decisão acerca de estratégias de manutenção e reabilitação.

Usando uma abordagem estatística, Fuentes *et al.* (2020) identificaram as camadas do pavimento mais propensas a apresentarem falhas estruturais. Desenvolveram limites de análises dos parâmetros de bacia associados à probabilidade de falha das camadas mais significantes para cada parâmetro.

Para o estudo dos limites de análise dos DBPs, Rabbi e Mishra (2021) realizaram modelagem em elementos finitos da estrutura de um pavimento asfáltico composta por 3 camadas. Assim simularam 216 combinações da estrutura, alterando os módulos das camadas. Para cada simulação, determinaram as bacias de deflexão e os DBPs. Os valores dos módulos foram comparados com os limites de análises dos DBPs comumente adotados na literatura, e assim correlacionaram-se as faixas de módulos das camadas que resultariam nas classificações dos pavimentos. Adicionalmente, foram realizadas análises de 4 seções de pavimento, comparando os dados de DBPs com os limites de análise e os indicadores de condições da superfície, e dessa forma o

trabalho indica a adoção dos DBPs, bem como seus limites de análise para avaliações em nível de rede.

2.1.4. Previsão de desempenho

O desempenho de um pavimento, pode ser definido como sendo a capacidade da estrutura de atender adequadamente ao tráfego ao longo do tempo, podendo ser compreendida como a alteração na sua eficácia ao longo do tempo e ocorrência do tráfego. Os modelos de previsão de desempenho são modelos matemáticos ou probabilísticos, nos quais as variáveis dependentes, parâmetros de pavimento (trincas, deformações permanentes, panelas, irregularidade longitudinal, etc), em função de variáveis explicativas (tráfego, estruturas, clima, etc) são aplicados para prever a evolução dos defeitos ou perda de serventia dos pavimentos.

Os modelos de previsão de desempenho podem ser classificados matematicamente em determinísticos, ou probabilísticos. Os modelos determinísticos são, em geral, regressões numéricas que realizam previsões de um único parâmetro. Já os modelos probabilísticos se baseiam em matrizes de probabilidades e retornam a faixa de alcance das variáveis dependentes, resultando na probabilidade dos pavimentos de se alterarem em função do tempo.

Segundo Haas *et al.* (1994), os modelos de desempenho podem ser subdivididos quanto à natureza em quatro categorias: (i) puramente mecanístico ou mecanicista, aplicado para previsão de respostas estruturais, como tensão, deformação ou deflexão; (ii) empírico-mecanístico (ou empírico-mecanicista), que correlaciona as respostas estruturais com a deterioração estrutural ou funcional dos pavimentos; (iii) empírico, em que as variáveis dependentes de deterioração estrutural ou funcional são relacionadas com uma ou mais variáveis relativas às estruturas dos pavimentos; e (iv) Subjetivo, em que os modelos são determinados com base na experiência de profissionais.

O desenvolvimento dos modelos deve atender a quatro premissas básicas: (i) obtenção de dados condizentes com a realidade que se deseje modelar; (ii) determinação de

variáveis relevantes ao modelo; (iii) elaboração de formulações matemáticas adequadas à natureza dos dados; e (iv) validação estatística dos resultados obtidos.

Ao longo do tempo, pesquisadores brasileiros desenvolveram importantes modelos de desempenho, entre eles os modelos desenvolvidos por Queiroz (1981) e Paterson (1987) com dados nacionais, esses estudos foram incorporados pelo Banco Mundial ao *software* HDM-3. Alguns pesquisadores realizaram modelos para os cenários regionais como Marcon (1996) para o estado de Santa Catarina, Lerch (2002) para o Rio Grande do Sul, Yshiba (2003) para o Paraná, Albuquerque (2007) para o Nordeste, Soncim (2011) para a Bahia, Espindola, (2014) para o Rio de Janeiro. Outros para pavimentos urbanos, Bertollo (1997) para a cidade de São Carlos – São Paulo, Zerbini (1999) para a cidade de Araraquara – São Paulo e Benevides (2006) para a cidade de Fortaleza – Ceará. Modelos de desempenho também foram estabelecidos considerando simuladores de tráfego (Gonçalves, 2002).

Recentemente, após grande esforço da comunidade academia brasileira, novos modelos de desempenho têm sido estabelecidos a partir dos dados da rede temática de asfaltos (Bueno, 2019; Franco e Motta, 2020; Fritzen, 2016; Nascimento, 2015). Como resultado dessas pesquisas, desenvolveu-se o novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos brasileiros, nomeado Método de Dimensionamento Nacional, *software* MeDiNa, nome em homenagem ao reconhecido Prof. Medina, da COPPE da UFRJ, que formou, a partir da década de 1980, uma nova geração de engenheiros que analisam projetos de pavimentação empregando a análise mecanicista das estruturas, e envolvendo métodos probabilísticos. O *software* MeDiNa realiza o dimensionamento de estruturas asfálticas considerando o desempenho dos pavimentos quanto à progressão de trincamento e de afundamento de trilha de roda (Franco e Motta, 2020).

2.2. Parâmetros deflectométricos

Diversos Parâmetros de Bacia Deflectométrica (*Deflection Basin Parameters* - DBPs) foram desenvolvidos ao longo do tempo (Horak, 1987). Genericamente os DBPs são

relações geométricas que descrevem a curva da bacia de deflexão. Os DBPs são ferramentas poderosas para uma análise abrangente dos dados do FWD.

Numerosos trabalhos correlacionaram os DBPs com comportamento dos pavimentos. Em geral, os valores dos DBPs são obtidos para facilitar análises estruturais e proporcionar uma compreensão melhor do comportamento do pavimento. Estudos têm aplicado DBPs para entender o comportamento estrutural de pavimentos em nível de rede (Kim *et al.*, 2000; Loganathan *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2005; Rabbi e Mishra, 2021; Saleh, 2016a, 2016b). Uma revisão completa sobre o tema é realizada no Capítulo 5 (p.88) deste documento.

2.3. Curva de Agnesi

Há diversos métodos matemáticos que descrevem a curva das bacias deflectométricas (Primusz *et al.*, 2015). A curva de Agnesi descreve com proximidade o formato da bacia de deflexão (Szentpéteri, 2013) e, como demonstrado por Andrade (2017), apresenta boa correlação para bacias deflectométricas de pavimentos asfálticos compostos por diferentes materiais de base. Em uma das aplicações da curva de Agnesi, Pitangui (2022) aplicou a equação de Agnesi para corrigir bacias deflectométricas obtidas por meio de Viga Benkeman.

A Curva de Agnesi ficou assim conhecida após Maria Gaetana Agnesi (1718–1799) descrever uma curva proposta por Pierre de Fermat e Guido Grandi em seu livro *Instituzioni Analitiche ad uso Della Gioventu Italiana (Analytical Institutions for the Use of Italian Youth)*, publicado por sua própria família em italiano em 1748 (Dumbaugh, 2019; Magnaghi-Delfino *et al.*, 2020).

A Equação 1 descreve genericamente a equação de Agnesi, descrevendo a curva de Agnesi pelos coeficientes “a” e “b” obtidos por uma regressão logarítmica da bacia de deflexão, sendo respectivamente, o intercepto e o coeficiente angular da regressão. A

equação é dependente da deflexão máxima D_0 e descreve a deflexão ao longo da distância de aplicação de carga d_i .

$$D_i = \frac{D_0}{1 + 10^a \times d_i^b} \quad \text{Equação 1}$$

onde D_i : deflexão calculada na distância i (10^{-2} mm)

D_0 : deflexão máxima (10^{-2} mm)

d_i : distância i do ponto de aplicação da carga (cm)

a e b: coeficientes da regressão

A equação de Agnesi foi aplicada em diversos momentos nesta tese, nos Capítulos 3 (p.40), 5 (p.88), 6 (p.121) e 7 (p.155): (i) para realizar a complementação do banco de dados realizando o cálculo de valores de deflexões para os casos em que havia falta de dados deflectométricos de alguns geofones; (ii) para a determinação do D25 necessário para o cálculo do Raio de curvatura (Equação 6, Capítulo 5 (p.88), na Tabela 10); e (iii) como parâmetro de bacia de deflexão, buscando-se entender o comportamento estrutural dos pavimentos.

2.4. Influência da temperatura

O pavimento das rodovias brasileiras, em sua maioria, é composto por camadas flexíveis, sendo em sua maioria composta por revestimento asfáltico. Com mais de 200 mil quilômetros de malha viária pavimentada no país, as rodovias brasileiras enfrentam condições climáticas extremas, dada a diversidade climática do país.

Herb *et al.* (2006) destacam que a temperatura média do pavimento afeta as propriedades mecânicas do pavimento, influenciando os níveis de tensão e deformação. Os autores citam a radiação solar, a emissividade e a condutividade do pavimento, a incidência de ventos e precipitações como os principais fatores que alteram a temperatura do pavimento. Além disso, o gradiente térmico que ocorre no revestimento asfáltico causa tensões no interior da camada. A amplitude térmica ao longo do dia impacta na vida de fadiga da camada asfáltica, enquanto a taxa de

mudança de temperatura modifica a fluência da mistura asfáltica, alterando a resposta em relação à tensão e deformação. Uma revisão completa sobre o tema é realizada no Capítulo 4. “PROCEDIMENTO DE CORREÇÃO DA DEFLEXÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA” (p.66) deste documento.

2.5. Ciência de dados na Engenharia de Transportes

A partir dos 1950, grandes avanços na área de Ciência de Dados ocorreram de forma intensa. A revolução tecnológica das últimas décadas tem contribuído para a redução dos custos de processamento e armazenamento de dados, tornando a análise de dados mais acessível, rápida e precisa. A Ciência de Dados tem sido aplicada nas mais diversas áreas. Por ser uma forma eficiente de tratamento de dados, proporcionar rápida aplicação de diversas técnicas estatísticas e possibilitar a realização de aprendizado de máquina, a Ciência de Dados tem sido bastante aplicada em dados da engenharia de transportes. Uma revisão sobre os trabalhos que aplicaram Ciência de Dados na engenharia de transportes é realizada no Capítulo 3. “TRATAMENTO E ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS” (p. 40) desta tese.

3. TRATAMENTO E ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS

A revolução tecnológica das últimas décadas proporcionou grandes avanços na programação computacional, levando à redução no custo de processamento e armazenamento de dados. Isso fez com que a aplicação de análise de dados seja executada de forma mais rápida, precisa e menos onerosa. Dessa forma, várias técnicas estatísticas de aprendizagem de máquinas têm sido aplicadas na análise de dados em diversas áreas, inclusive na engenharia de transportes. Neste capítulo é realizado o tratamento e análise exploratória dos dados que serão usados neste trabalho. Um banco de dados é estruturado com as informações e dados coletados, a fim de se viabilizar as aplicações de modelos preditivos e analíticos dos estudos dos demais capítulos. Uma avaliação dos parâmetros estatísticos é realizada para identificar alguns fenômenos que são explorados nos demais capítulos.

3.1. Ciência de dados

A Ciência de Dados é a disciplina interdisciplinar que utiliza conceitos e ferramentas da estatística, matemática e programação para coletar, preparar, analisar e realizar avaliações de dados, e dessa forma realizar extrações de informações, conhecimentos e *insights*. As teorias das probabilidades foram estabelecidas nos séculos XVII e XIX com os trabalhos de Thomas Bayes, Pierre-Simon Laplace e Carl Gauss. Já a estatística moderna foi desenvolvida por Francis Galton e Karl Pearson e R. A. Fisher no final do século XIX e Início do século XX (Bruce e Bruce, 2019).

Os anos 1950 foram de grandes avanços na área de Ciência de Dados. O modelo de Perceptron foi desenvolvido por Rosenblatt (1958), e é a base dos modelos de rede neural artificial. Bellman (1952) definiu os conceitos do algoritmo de aprendizado por reforço, que permite com que as máquinas tomem decisões se baseando em recompensas e punições. O termo *machine learning* foi usado pela primeira vez em 1959 por Arthur Samuel para se referir à capacidade das máquinas de “raciocinarem”. Baseando-se nos trabalhos de Gödel (1931), Turing (1937) e Shannon (1948), Samuel (1959) desenvolveu um jogo de damas em que o programa aprendia a cada rodada do

jogo. Em 1962, John W. Tukey lançou os fundamentos da Ciência de Dados, a partir de uma reformulação da estatística clássica e do estabelecimento de processos de transformação e exploração de dados (Donoho, 2017). Com o avanço da computação e o advento da internet das últimas décadas, viabilizou-se a aplicação desses modelos, desenvolvendo-se assim, campos de aplicações de ciência de dados e *machine learning*.

O grande desafio da ciência de dados é processar uma quantidade gigantesca de dados e transformá-los em conhecimento. Para isso, são necessários manipulação, processamento e estruturação de dados a fim de se possibilitar a aplicação de técnicas estatísticas, e só assim garantir o entendimento dos dados. Neste sentido, o avanço da computação tem contribuído fortemente. Com o avanço dos semicondutores seguindo a lei de Moore, na qual o número de transistores em um chip aumenta 100% a cada 2 anos (Moore, 2006), o aumento da capacidade de armazenamento de dados e da velocidade de processamento permitiu o desenvolvimento de novas aplicações a partir da Ciência de Dados.

3.2. Aplicação de aprendizagem de máquina

A revolução tecnológica dos últimos anos proporcionou a redução no custo de processamento e armazenamento de dados e execução de análises de forma mais rápida e precisa. Dessa forma, várias são as técnicas estatísticas de aprendizagem de máquinas que têm sido aplicadas na análise de dados de engenharia de transportes.

O método *Árvore de Decisão* foi usado por Bosso *et al.* (2020) para a identificação de excesso de carga de caminhões e padrões de deslocamento. Usando dados de balança do tipo *Weigh-in-Motion* (WIM), o estudo identificou o tipo de veículo e o horário em que os caminhões trafegam com excesso de peso.

A técnica de *Floresta Aleatória* (*Random Forests* ou *Random Decision Forests*) foi aplicada por diversos autores. Gong *et al.* (2018) desenvolveram um modelo de

regressão de floresta aleatória para previsão do *International Roughness Index* (IRI) para pavimentos asfálticos flexíveis usando dados do LTPP. Também usando os dados do LTPP, Gong *et al.* (2019) aplicaram a Floresta Aleatória para identificação dos parâmetros de propriedades de misturas asfálticas que são mais determinantes no desenvolvimento de defeitos do pavimento. Marcelino *et al.* (2021) desenvolveram um modelo utilizando o algoritmo de Floresta Aleatória para previsão do IRI no intervalo entre 5 e 10 anos visando a aplicação em avaliação em nível de rede de Sistema de Gerência de Pavimento (SGP).

Há na literatura a tendência de desenvolvimento de modelos de aprendizagem estatísticos utilizando o método de Rede Neural. Esse método simula o funcionamento de uma rede de neurônios que “aprendem” determinados comportamentos com base em uma série de dados e replicam esse conhecimento para demais dados. Entre as aplicações utilizando rede neural se destacam previsões quanto à propriedade dos materiais, como: determinação de módulo das camadas de revestimento com incorporação de RAP (Leiva-Villacorta *et al.*, 2017); incorporação de RAP em misturas asfálticas (Botella *et al.*, 2022); obtenção de curva mestre de mistura asfáltica a partir de dados de FWD (Hamim *et al.*, 2020); realização de retroanálises de bacias de deflexão de pavimentos asfálticos utilizando conceitos de viscoelasticidade e parâmetros não lineares (Dantas Neto *et al.*, 2004; M. Li e Wang, 2019; Specht e Khatchatourian, 2014; H. Wang *et al.*, 2019, 2020); avaliação do comportamento não linear dos materiais granulares (Kim *et al.*, 2000); previsão da irregularidade longitudinal (Souza *et al.*, 2006) previsão de afundamento em trilha de rodas (Gong, Sun, Mei, *et al.*, 2018; Karlaftis e Badr, 2015); e previsão de desempenho de pavimentos (Fakhri e Shahni Dezfoulian, 2019; Sollazzo *et al.*, 2017; Vyas *et al.*, 2020).

Uma avaliação de três algoritmos de *machine learning* foi realizada por Aranha (2022). A autora avaliou *Support Vector Machine* (SVM), Floresta Aleatória (RF), e Rede Neural Artificial (RNA) para realizar previsão de desempenho de pavimentos asfálticos através dos parâmetros de deflexão máxima (D0) e irregularidade longitudinal (IRI) de

pavimentos. A autora indicou que o RNA é a técnica mais precisa para previsão dos parâmetros avaliados.

3.3. Origem dos dados

Os dados utilizados para realização desta tese foram obtidos por meio de disponibilização de informações pertencentes a: (i) Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-EP-USP); (ii) Instituto de Pesquisas em Transportes (Antigo Instituto de Pesquisas Rodoviárias) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (IPR-DNIT); e (iii) Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP).

Os dados apresentados no Capítulo 5 (p.88) foram coletados pela equipe do LTP-PTR-EPUSP entre os anos de 2014 e 2018 no trecho experimental construído na Rodovia Fernão Dias - BR-381, em um projeto de pesquisa financiado pelo Recurso de Desenvolvimento Tecnológico da Agência Nacional de Transportes Terrestres (RDT-ANTT), através da Concessionária Arteris Fernão Dias. Já os dados explorados no Capítulo 6 (p.121) foram cedidos pelo DNIT, e consistem em informações de 50 Unidades Amostrais (UA's) da malha rodoviária federal monitoradas entre os anos de 2013 e 2017. Já os dados utilizados no Capítulo 7 (p.155) foram fornecidos pela ARTESP e fazem parte do banco de dados das campanhas de monitoramento do programa de concessões da agência, tendo sido disponibilizados pela Dra. Ana Luisa Aranha, que empregou um banco de dados para sua tese de doutoramento (Aranha, 2022).

As informações disponibilizadas são referentes a levantamentos deflectométricos, levantamentos funcionais, informações de projeto, contagens de tráfego etc. Com esses dados foram realizados tratamentos para garantir a impessoalidade das informações, não sendo identificadas informações referentes a pessoas físicas ou informações pessoais que possam ferir a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD), constantes em Brasil (2019).

Foram contabilizados 278.713 resultados de ensaios de FWD. Esses dados são distribuídos da seguinte forma: (i) 8.043 fornecidos pelo LTP/EPUSP do monitoramento realizado na BR-381 - Fernão Dias; (ii) 7.612 registros do banco de dados de UA's do DNIT; e (iii) 233.059 registros de rodovias pertencentes ao programa de concessões da ARTESP, sendo eles 139.329 dados provenientes da SP-348, 71.799 dados da SP-280 e 21.931 dados da SP-021.

3.3.1. Trecho Experimental - BR-381 Fernão Dias USP – dados coletados pelo LTP-PTR-EPUSP

O banco de dados referente ao trecho experimental construído na rodovia BR-381 - Fernão Dias foi disponibilizado pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-EP-USP). Os dados são correspondentes ao monitoramento realizado ao longo de 3 anos no trecho experimental que foi construído em novembro de 2014.

O trecho experimental é composto por 4 estruturas distintas, que foram concebidas com a aplicação de diferentes materiais de base sobre um mesmo subleito e estrutura remanescente, e com uma mesma mistura asfáltica como revestimento. Diversos trabalhos são decorrentes deste trecho experimental (Andrade, 2017; Bessa, 2018; Bosso, 2018; Kuchiishi, 2019).

3.3.2. Unidades Amostrais - Malha Federal DNIT - dados coletados sob responsabilidade do IPR-DNIT

O banco de dados das Unidades Amostrais da malha federal do DNIT foi estruturado a partir do “Projeto de Calibração e Aferição do Modelo HDM-4 para as condições da rede de rodovias do Brasil”, realizado entre o período de 2013 e 2017 (DNIT, 2017). Esse projeto monitorou 50 Unidades Amostrais (UAs), cada uma com 1,0 km de extensão, ao longo de 5 anos. E resultou na calibração das curvas de desempenho do HDM-4 para a realidade da malha rodoviária nacional. Alguns trabalhos são decorrentes desse banco de dados (Albuquerque *et al.*, 2019; Arango, 2018; Pipicano e Vieira, 2018; Rodrigues, 2023).

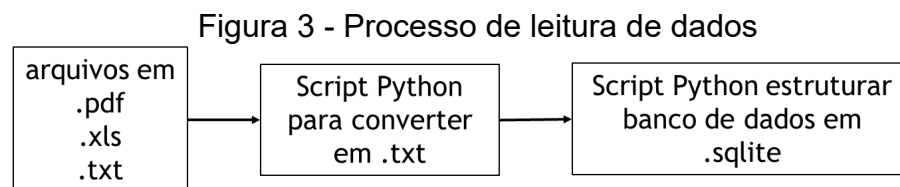
3.3.3. Levantamentos de Rede - Malha Concedida do Estado de São Paulo - Dados Coletados pela ARTESP

Os dados de rodovias que integram a malha de rodovias do Estado de São Paulo foram disponibilizados por meio da Diretoria de Investimentos da ARTESP, que gerência as rodovias sob contratos de concessão e exploração à iniciativa privada. Os monitoramentos funcionais e estruturais são em geral obrigações contratuais e devem ser realizados ao longo de todo o período de concessão, seguindo o previsto no edital de concessão Anexo 6 (ARTESP, 2010; DER-SP, 1997, 1999). Os dados disponibilizados correspondem a campanhas de monitoramento de levantamento deflectométrico e informações contidas nos projetos de recuperação estrutural, referentes às rodovias (i) SP-348 Rodovia dos Bandeirantes, (ii) SP-280 Rodovia Castelo Branco, e (iii) SP-020 Rodoanel Mário Covas trechos sul e leste.

3.4. Organização do banco de dados

3.4.1. Leitura dos dados

Os dados foram fornecidos em vários formatos (.txt, .xls, pdf etc.). Para viabilizar a utilização dos dados, foi preciso desenvolver um *script* em python para realizar a leitura, tratamento e armazenamento dos dados em formato sqlite. O *script* desenvolvido é usado para realizar a leitura dos dados, organizá-los em .txt e estruturar o banco de dados em formato sqlite, conforme Figura 3. Esse formato de compilação de dados permite a organização otimizada das informações, fácil configuração, rápido acesso e pode ser compartilhado junto com os códigos de leitura.



Fonte: Andrade (2024)

3.4.2. Classe dos dados

Em geral os dados podem ser classificados como: (i) contínuos, (ii) discretos, (iii) categóricos, (iv) binários e (v) ordinários. Os dados contínuos são variáveis numéricas, nos dados de FWD tem-se as seguintes variáveis contínuas: força, deflexão temperatura do ar e temperatura do pavimento. Os valores discretos são variáveis numéricas que possuem um número contável de valores. Para o ensaio de FWD tem-se os valores de quilometragem, número de faixas, data e hora. As variáveis categóricas contêm um número finito de categorias, o que possibilita a formação de grupos distintos.

Nos levantamentos de FWD há as seguintes categorias: Lote, Rodovia, Local, Pista e Sentido de tráfego. As variáveis binárias possuem somente duas opções (sim ou não, 0 ou 1, positivo ou negativo), no levantamento de FWD não ocorrem essas variáveis. Os dados ordinários são dados categóricos que possuem uma ordem natural; no ensaio de FWD também não ocorre esse tipo de variável. Na Tabela 1 mostra-se o padrão de apresentação de ensaios de FWD exigidos pela agência (ARTESP, 2010; DER-SP, 1997, 1999)¹, o que embasou o a estruturação/organização do banco de dados.

Tabela 1 - Categorias padrão de levantamento de FWD exigido pela ARTESP

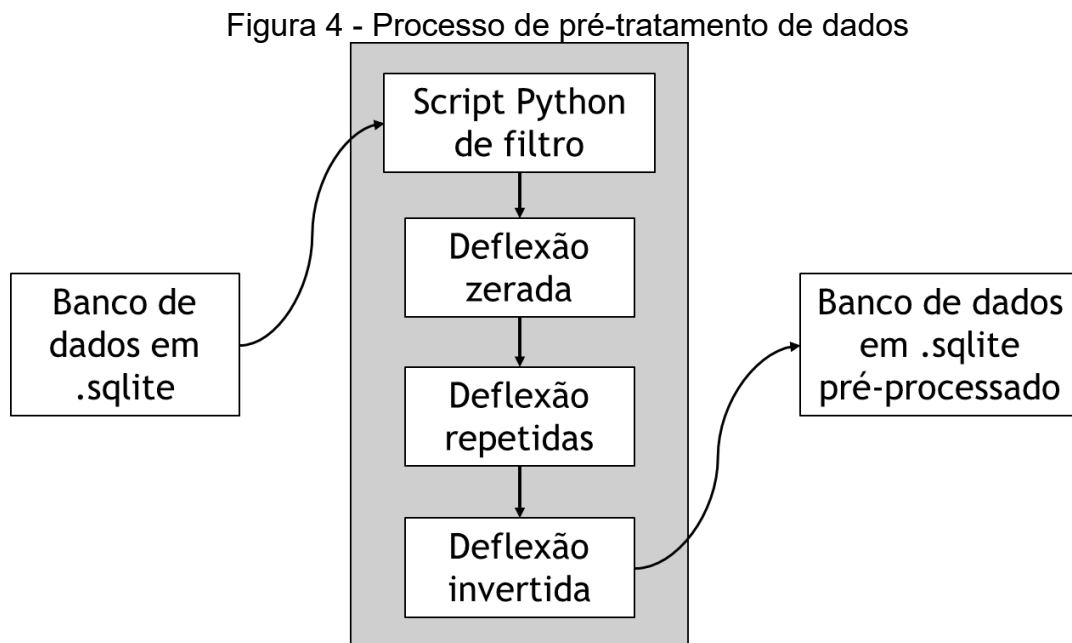
Lote	Rodovia	Local	Pista	Sentido tráfego (quilometragem)	km de referência (caso de dispositivos)	Nomenclatura de Alça/Ramo (quando necessário)	Faixa	km	Força (KN)	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	T_AR (°C)	T_PAV (°C)	Data	Hora	Observações
------	---------	-------	-------	---------------------------------	-----------------------------------------	-----------------------------------------------	-------	----	------------	----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----------	------------	------	------	-------------

¹ Consulta realizada no dia 18/01/2024 ao Santi Ferri, Diretoria de Operações (DOP) da ARTESP, sobre a padronização de entrega de dados de FWD, que informou que a entrega dos monitoramentos de pavimento realizados pelas concessionárias é prevista pelo Anexo 06 do contrato de concessão, que deve ser realizado em formato digital dentro do padrão estabelecido pela ARTESP.

3.4.3. Filtros de pré-análise

A partir do banco de dados estruturado, foi possível a realização das consultas e manipulação das informações. Um *script* de filtro foi aplicado no banco de dados para eliminar os registros de dados que possam induzir a erros no tratamento. A Figura 4 ilustra esse procedimento, sendo que os filtros identificadores aplicados para a eliminação das bacias foram:

- Deflexões zeradas: ocorrência de algum erro de leitura no acelerômetro do FWD resultando em dado igual a zero (ex.: $D60 = 0$);
- Deflexões repetidas: ocorrência que, durante a leitura, por imperfeição na superfície de contato dos acelerômetros com o pavimento, resulta com que dois ou mais registros de deflexões dentro de uma mesma bacia possam ter valores coincidentes (ex.: $D60 = D90$); e
- Deflexões invertidas: ocorrência durante a leitura por imperfeição na superfície de contato dos acelerômetros com o pavimento, resultando com que a deflexão registrada possa ter valores invertidos (ex.: $D90 > D60$).



Fonte: Andrade (2024)

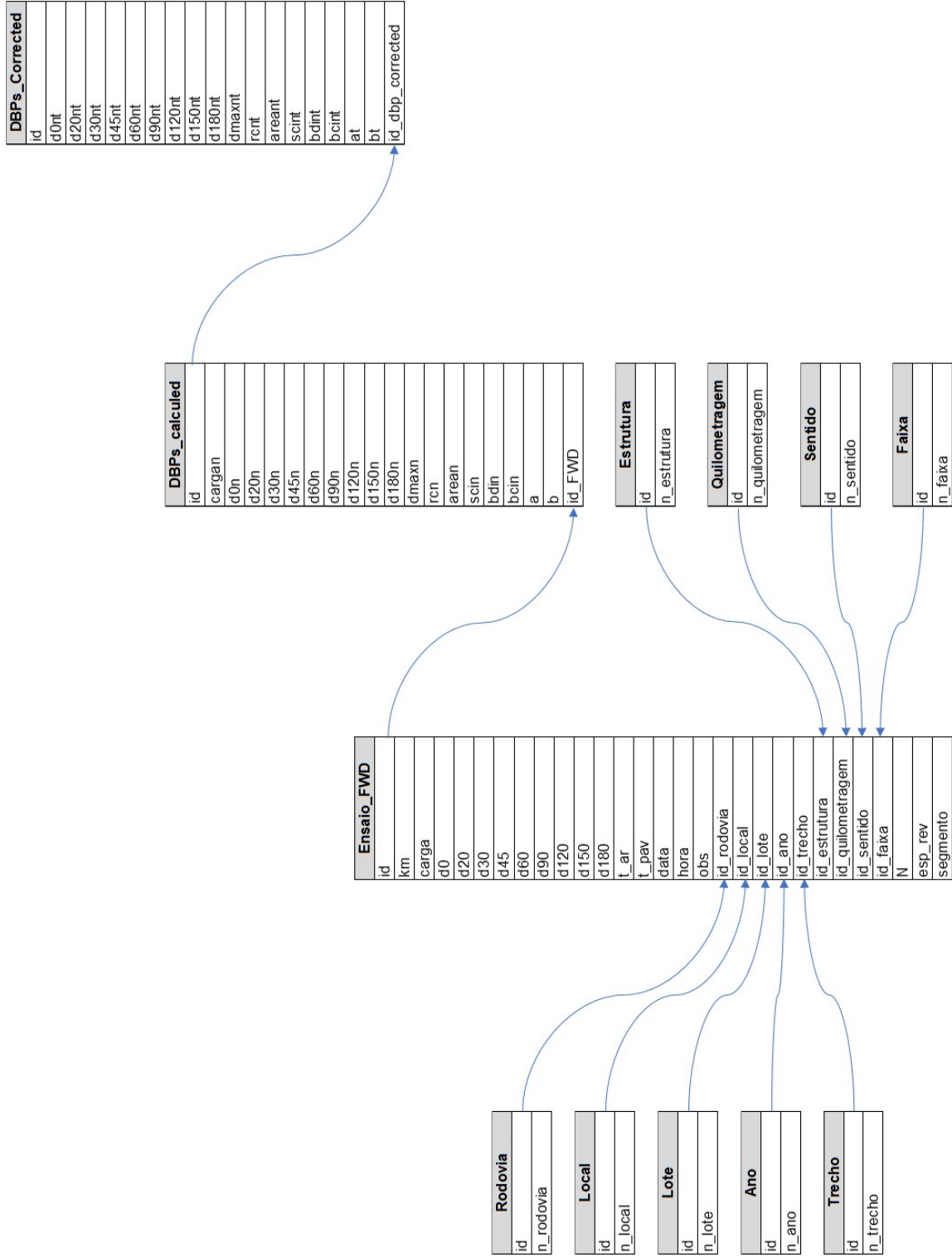
Com a aplicação dessa rotina, verificou-se que o banco de dados era composto por 248.713 registros de deflexões, e sua aplicação demandou 03,29 minutos, e foram encontrados um total de 26.632 erros, o que representa aproximadamente 10%. Os erros estavam distribuídos nas seguintes proporções:

- 6.276 erros de deflexão zerada;
- 18.724 erros de deflexão constante ou repetida; e
- 1.632 erros de deflexão invertida.

3.4.4. Estrutura do banco de dados

Para leitura, organização e processamento desses arquivos foi desenvolvido um *script* em python que lê os dados presentes em cada um dos arquivos, separando-o nas categorias de Rodovia, Local, Lote, Ano, Trecho, Estrutura, Quilometragem, Sentido e Faixa em um arquivo de banco de dados em formato sqlite. A organização do banco de dados foi realizada segundo o diagrama da Figura 5. O diagrama demonstra a relação entre as tabelas de variáveis que compõem o banco de dados. A organização do banco de dados otimiza o agrupamento das informações e a realização de consultas específicas.

Figura 5 - Diagrama do Banco de Dados



Fonte: Andrade (2024)

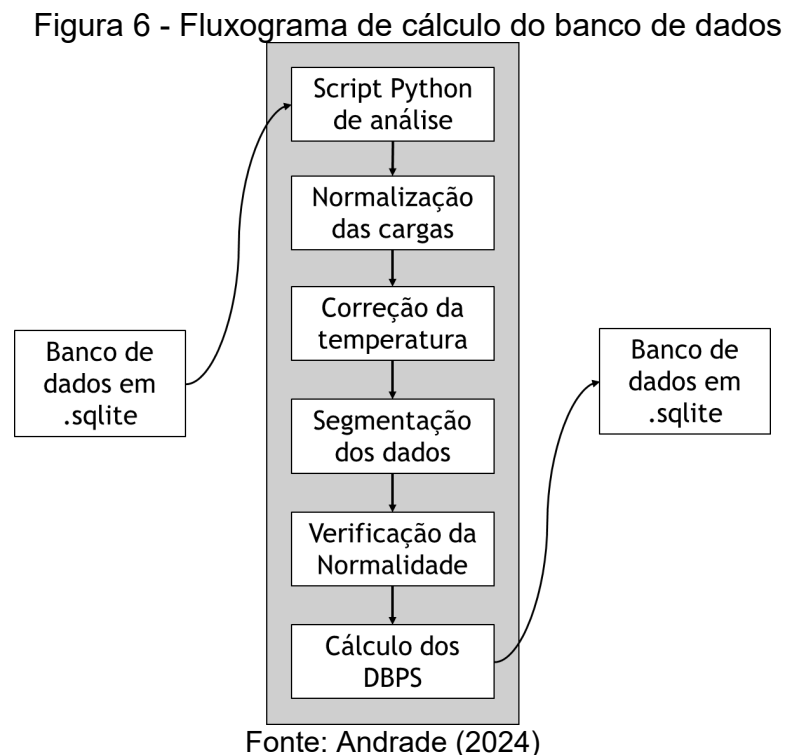
A organização do banco de dados possibilita a realização de consultas no banco de dados retornando 222.081 linhas em um tempo de 1044 ms. A Tabela 2 apresenta a quantidade de variáveis, quantidades de valores únicos e parâmetros estatísticos.

Tabela 2 - Valores únicos do Banco de Dados

Id'	Coluna	Valores Únicos	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Q1	Q3
1	id	162785	1	248713	126210.63	127658	53797	201974
2	km	29364	0	949.18	155.73	133.1	70.32	204.38
3	carga	3666	24.03	109.92	41.53	40.9	40.247	41.6
4	d0nt	7034	1.76	189.53	16.54	13.9	10.4	18.45
5	d20nt	5057	1.51	134.98	11.83	10.21	7.75	13.33
6	d30nt	4322	1.37	105.11	9.82	8.49	6.69	10.88
7	d45nt	3313	0.78	70.28	7.69	6.73	5.49	8.51
8	d60nt	2598	0.39	48.81	6.03	5.39	4.44	6.69
9	d90nt	1679	0.2	34.78	4.17	3.75	3.02	4.79
10	d120nt	1280	0.09	21.19	3.12	2.86	2.17	3.68
11	d150nt	1135	0.05	15.73	2.48	2.21	1.64	3
12	d180nt	1005	0.03	14.54	2.06	1.81	1.3	2.54
13	dmaxnt	7034	1.76	189.53	16.54	13.9	10.4	18.45
14	rcnt	105745	27.31	518819.56	1007.53	734.62	478.89	1165.41
15	areant	5484	13.89	84.84	50.08	49.67	43.82	56.05
16	scint	3896	0.18	127.81	6.72	5.12	3.26	7.86
17	bdint	2702	0.18	62.67	3.79	2.98	1.81	4.51
18	bcint	1619	-2.61	30.16	1.86	1.62	1.12	2.24
19	at	577	-7.24	0.63	-2.26	-2.26	-2.59	-1.93
20	bt	324	-0.08	3.97	1.37	1.37	1.16	1.57
21	t_ar	404	1	98	25.01	24	20	29
22	t_pav	446	10	65	32.56	32	25	39.3
23	data	608	-	-	-	-	-	-
24	hora	26706	-	-	-	-	-	-
25	n_ano	14	2002	2020	2012.07	2012	2009	2014
26	n_estrutura	7	-	-	-	-	-	-
27	esp_rev	22	2	37	14.97	15	11	18
28	N	75	3.3E+04	6.3E+07	1.4E+07	1.1E+07	5.8E+06	2.0E+07
29	segmento	190	1	249	45.74	38	23	63
30	n_faixa	6	0.8	4	1.83	2	1	2
31	n_local	11	-	-	-	-	-	-
32	n_lote	53	-	-	-	-	-	-
33	n_quilom.	2	-	-	-	-	-	-
34	n_rodovia	24	-	-	-	-	-	-
35	n_sentido	11	-	-	-	-	-	-
36	n_trecho	55	-	-	-	-	-	-

3.5. Cálculos no banco de dados

A organização dos dados em formato sqlite permite a acessibilidade dos dados e a exportação para formatos como dataframe e excel. Dessa forma, possibilita a realização de técnicas de Ciência de Dados, como testes estatísticos nas amostras, com a obtenção de média e desvio padrão, a verificação de normalidade da distribuição de dados e a determinação de *outliers*. A Figura 6 mostra o fluxograma de realização dos cálculos do banco de dados, sendo que esses processos são detalhados neste item.



3.5.1. Normalização da deflexão em função da carga

Como a aplicação de carga durante a execução do ensaio do FWD advém de um peso que cai de uma determinada altura, pode haver uma variação na carga aplicada. A mensuração da carga aplicada é realizada por uma célula de carga instalada no prato do FWD.

Para que seja possível trabalhar com os resultados da deflexão provenientes do FWD, é necessário que seja realizada a padronização da carga. Esse procedimento é tecnicamente chamado de “normalização da carga”. A Tabela 3 apresenta na norma de faixa de carga aceitável para execução de FWD pelo *Long-Term Pavement Performance* – LTPP (FHWA, 2000) para alvos de cargas em diferentes níveis.

Tabela 3 - Faixas aplicação de carga do FWD adaptado de FHWA (2000)

Carga Alvo (kN)	Faixa Aceitável (kN)
26.7	24.0 - 29.4
40.0	36.0 - 44.0
53.4	48.1 - 58.7
71.2	64.1 - 78.3
80.0*	72.0 - 88.0**
100.0*	90.0 - 110.0**

*Valor de Carga Alvo acrescentado

**Valores calculados para a respectiva Carga Alvo

Assumindo-se que a relação de aplicação de carga e a deflexão são proporcionais, foi realizada a normalização da deflexão em função da carga para os diferentes níveis de execução do ensaio aplicando a Equação 2 em todo o banco de dados. As 14.028 deflexões que estavam fora das faixas aceitáveis da Tabela 3 foram excluídas.

$$D_{xn} = \frac{D_{xc} \times C_n}{C_e} \quad \text{Equação 2}$$

onde D_{xn} : deflexão na distância x com carga normalizada para C_n [10^{-2} mm];

D_{xc} : deflexão na distância x na carga “C” [10^{-2} mm];

C_n : carga alvo de normalização do FWD [kN].

C_e : carga de execução do FWD [kN].

3.5.2. Aplicação do modelo de correção da deflexão em função da temperatura

Como será abordado no Capítulo 4 (p.66), o ensaio de FWD é realizado no campo em condições ambiente, com a temperatura do ar e da superfície do pavimento se alterando com o passar do tempo e com as condições ambientais. Dessa forma é

necessário que as deflexões registradas pelo FWD sejam corrigidas para uma temperatura padrão. No Capítulo 4 (p.66) é desenvolvido o procedimento de correção para o banco de dados deste trabalho. Esse procedimento foi aplicado em todo o banco de dados afim de permitir a realização das análises deste trabalho.

3.5.3. Segmentação dos dados

Os dados utilizados têm origens e naturezas distintas e são aplicados em três diferentes análises. Dessa forma os dados foram segmentados segundo 3 critérios distintos.

No Capítulo 5 (p.88) são empregados os dados oriundos do trecho experimental construído na rodovia Fernão Dias BR-381. Nesse trecho os dados foram segmentados segundo a estrutura construída, detalhes podem ser conferidos em Andrade (2017). Dessa forma, os dados foram divididos em 4 segmentos com 100 metros de extensão.

Os dados do Capítulo 6 (p.121) foram segmentados seguindo a organização dos levantamentos, assim foi possível obter segmentos distintos para o sentido, com a quilometragem crescente e decrescente das rodovias. Resultando assim em 100 segmentos de 1,0 km cada, sendo 2 por rodovias.

Por se tratar de uma análise de rede, no Capítulo 7 (p.155) os dados foram segmentados de forma diferente dos anteriores. Como não havia uma separação natural nos levantamentos, os dados foram segmentados segundo as rodovias, os dados de contagens veiculares, registros das estruturas levantadas por meio sondagens apresentadas em diversos projetos, por faixa de levantamento, sentido, e por último os segmentos foram divididos em uma extensão máxima de 1,0 km, por ser a extensão usual nos SGPs. Essa divisão resultou em 318 segmentos para SP-381, 420 para a SP-280 e 92 para a SP-021.

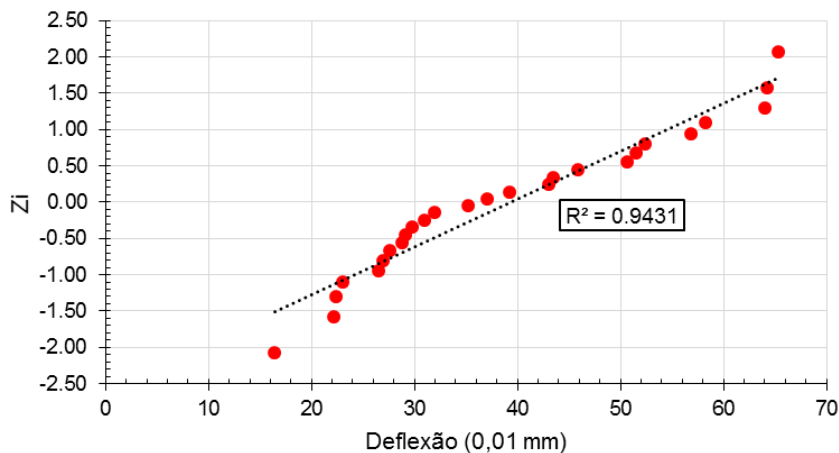
Com essa segmentação, o banco de dados foi dividido em 934 segmentos.

3.5.4. Verificação da normalidade de distribuição dos dados.

A realização da normalização da deflexão em função da carga e da correção da deflexão em função da temperatura permitiu que se realizasse a verificação se a distribuição dos dados de deflexão se aproximasse de uma distribuição normal. A constatação de que os dados apresentam uma distribuição normal permite a aplicação estatística clássica, trabalhar com a média e desvio padrão, aplicar testes de hipóteses, análises de regressão, inferências estatísticas e previsões matemáticas.

A Figura 7 ilustra o teste de normalidade dos dados de deflexão máxima para uma das segmentações de dados realizada. O teste Q-Q compara a distribuição de dados com uma distribuição normal padrão. Quanto mais próximos os dados da amostra da reta, mais a distribuição de dados se comporta como uma distribuição normal.

Figura 7 - Exemplo de gráfico Q-Q para verificação de normalidade de distribuição



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

A normalidade verificada para a deflexão máxima permite com que os dados sejam tratados de forma estatística. Assim, pode-se considerar que o intervalo entre a média mais um desvio padrão e a média menos um desvio padrão representa uma confiabilidade estatística de 68% nas retroanálises realizadas nos Capítulos 4 (p.66) e 5 (p.88).

3.5.5. Cálculo dos parâmetros deflectométricos

Há na literatura vários parâmetros deflectométricos (*Deflection Basin Parameters - DBPs*) que podem ser obtidos a partir dos dados de bacias de deflexão. No banco de dados foram aplicados os seguintes DBPs: (i) raio de curvatura (RC), (ii) AREA, (iii) índice de curvatura estrutural (SCI), (iv) índice de dano na base (BDI), e (v) índice de curvatura na base (BCI). Todas as equações, bem como uma revisão bibliográfica detalhada são apresentados no Capítulo 5 (p.88), na Tabela 10 e na Figura 25.

3.5.6. Regressão de Agnesi

Em seguida foi feita a compatibilização das leituras para a configuração usual brasileira. Pois os levantamentos deflectométricos realizados nas UA's do DNIT foram realizados utilizando a configuração do FWD com distâncias dos geofones em relação ao centro de aplicação de carga de 0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 cm. Dessa forma compatibilizou-se as leituras de deflexões com as distâncias usuais no Brasil (distâncias de 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm), utilizando-se a equação de Agnesi (Equação 1).

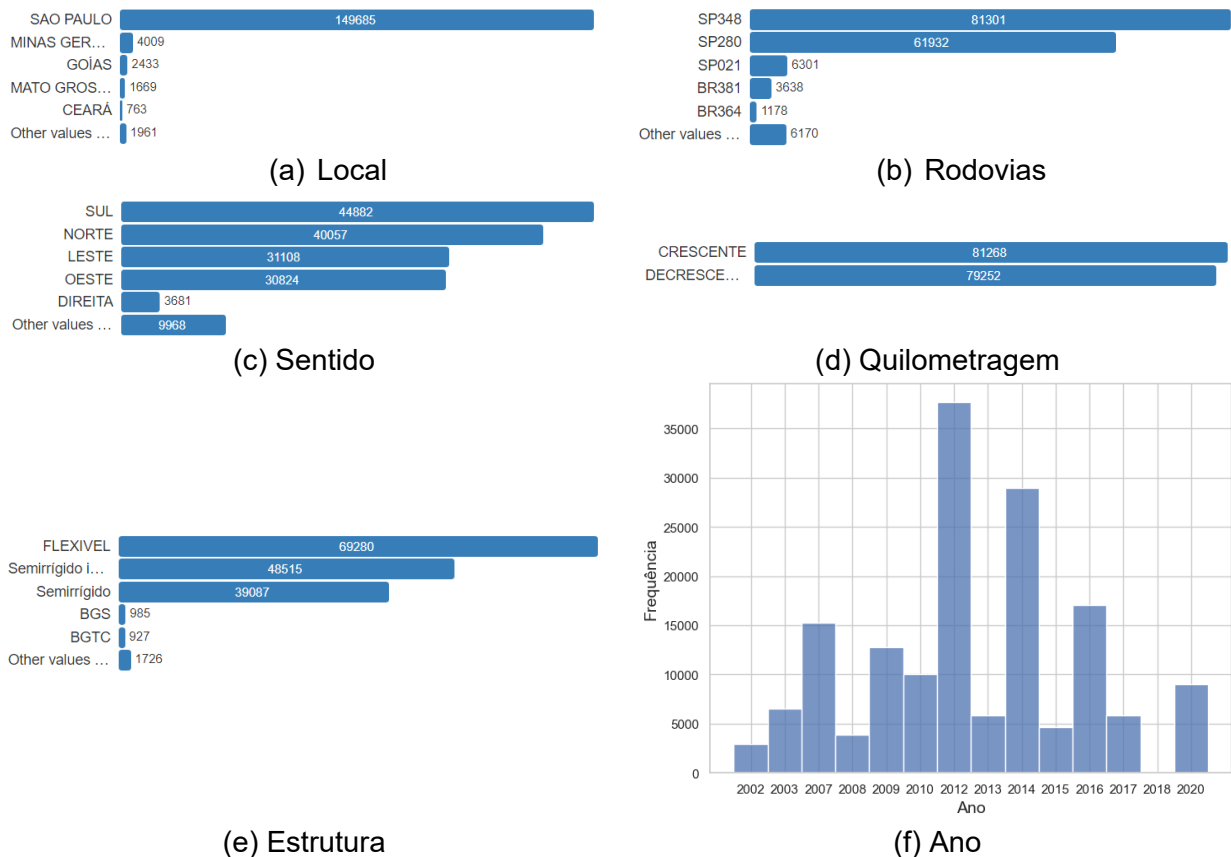
3.6. Análise estatística

A análise exploratória dos dados foi realizada com a consulta do banco de dados apresentada na Figura 3, que resultou em 160.520 registros de deflexões no banco de dados, distribuídos em 36 variáveis: 27 numéricas, 5 categóricas e 4 textos. Variáveis numéricas: 'id', 'km', 'carga', 'd0nt', 'd20nt', 'd30nt', 'd45nt', 'd60nt', 'd90nt', 'd20nt', 'd50nt', 'd80nt', 'dmaxnt', 'rcnt', 'areant', 'scint', 'bdint', 'bcint', 'at', 'bt', 't_ar', 't_pav', 'n_ano', 'esp_rev', 'N', 'segmento' e 'n_faixa'. Variáveis categóricas: 'n_estrutura', 'n_local', 'n_quilometragem', 'n_rodovia' e 'n_sentido'. Variáveis textuais: 'data', 'hora', 'n_lote' e 'n_trecho'.

Todo o banco de dados pode ser separado e organizado conforme as variáveis utilizadas na estruturação, a Figura 8 mostra algumas separações possíveis. Na Figura 8 (a), a variável local agrupa os dados de acordo com a unidade federativa em que se

realizou o FWD. Na Figura 8 (b), a categoria rodovia agrupa os dados pelo nome da rodovia. A variável “Sentido”, Figura 8 (c), indica a direção de execução do FWD. A Figura 8 (d) mostra a divisão de execução do FWD nas pistas com quilometragem crescente ou decrescente. Na Figura 8 (e), os dados são organizados pelo tipo de estrutura do pavimento. Já na Figura 8 (f), os dados foram agrupados pelo ano de execução do FWD.

Figura 8 - Distribuição de registros por variável categórica



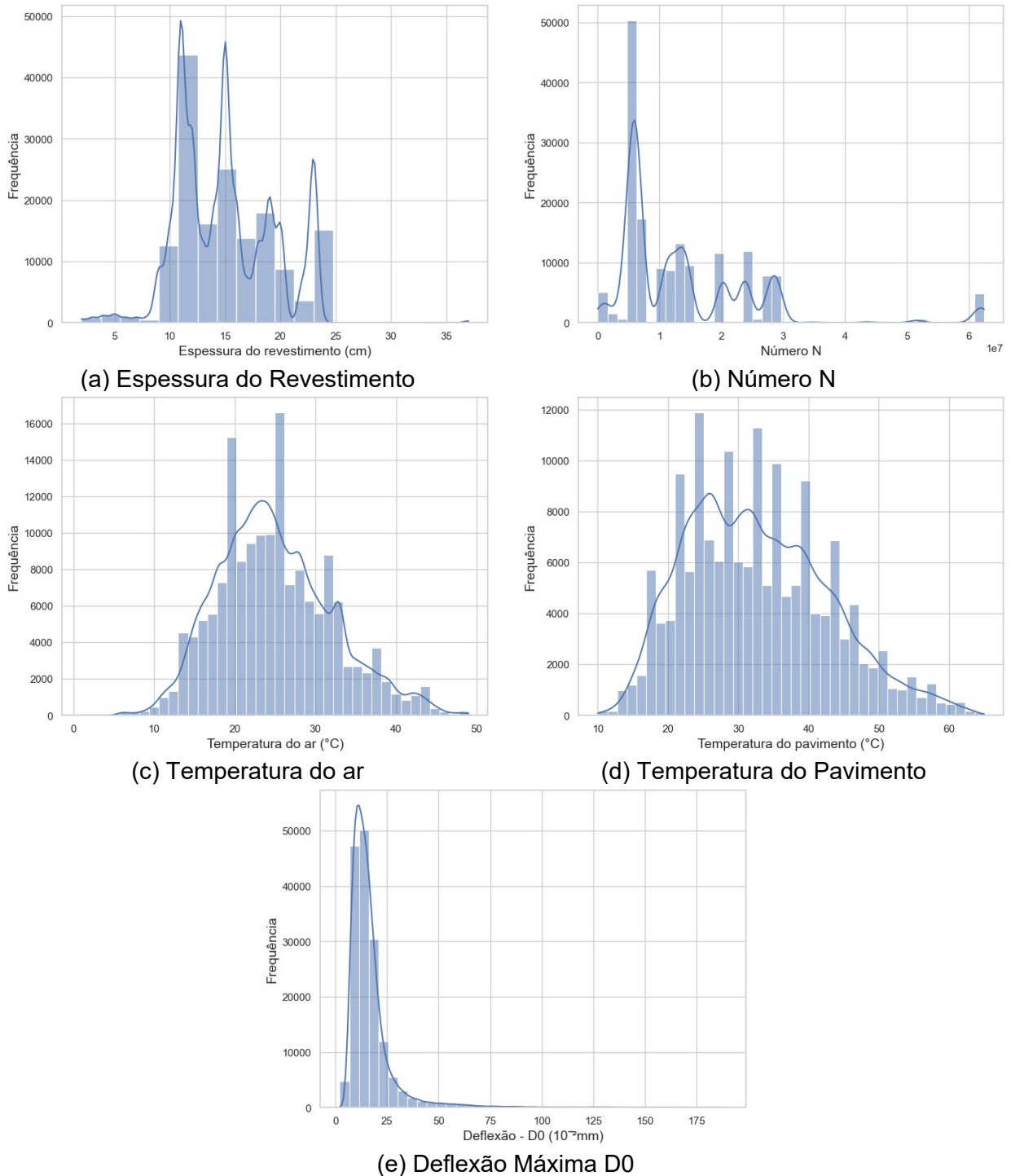
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Andrade (2024), DNIT (2007) e ARTESP (2020)

3.6.1. Histograma de distribuição

A variáveis numéricas podem ser visualizadas nos histogramas, conforme mostra a Figura 9. As espessuras das camadas de revestimento, Figura 9 (a) e (b), variam entre 2 e 37cm e não apresentam um padrão de distribuição estatístico. As temperaturas do

ar e do pavimento apresentam distribuições próximas à distribuição normal, Figura 9 (c) e (d). Já as deflexões D0, Figura 9 (e), apresentam distribuição lognormal ou Weibull.

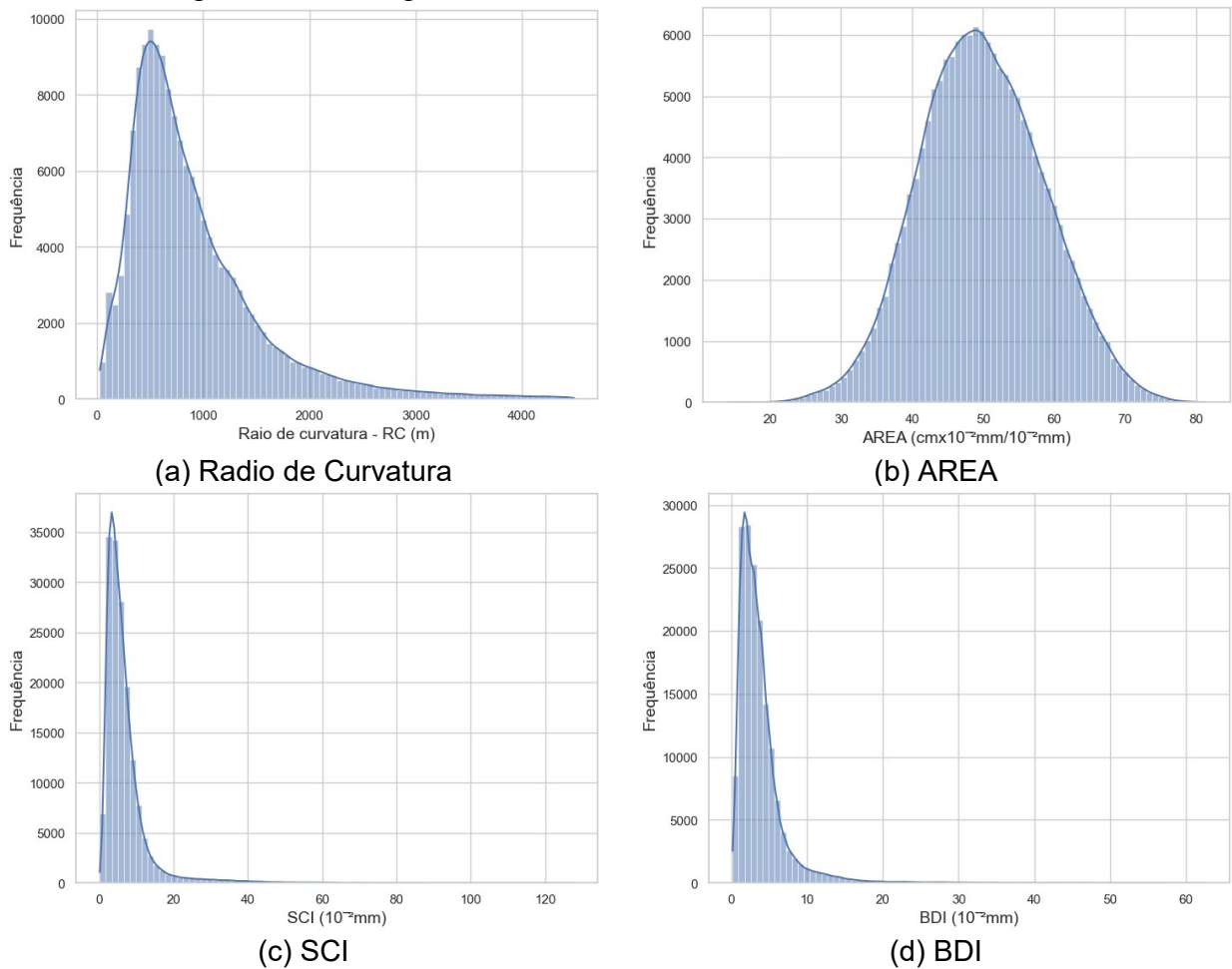
Figura 9 - Histogramas de distribuição de frequências das variáveis do Banco de Dados

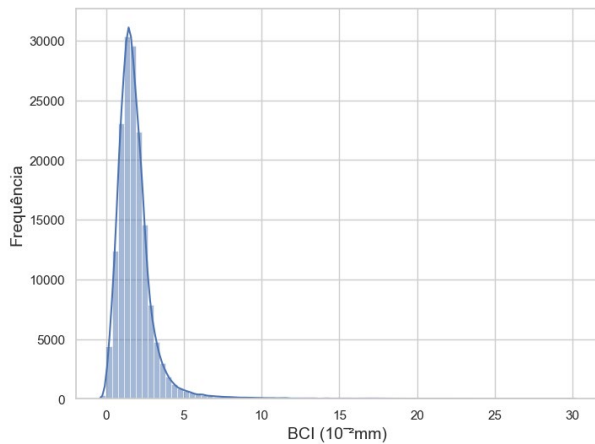


Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Andrade (2024), DNIT (2007) e ARTESP (2020)

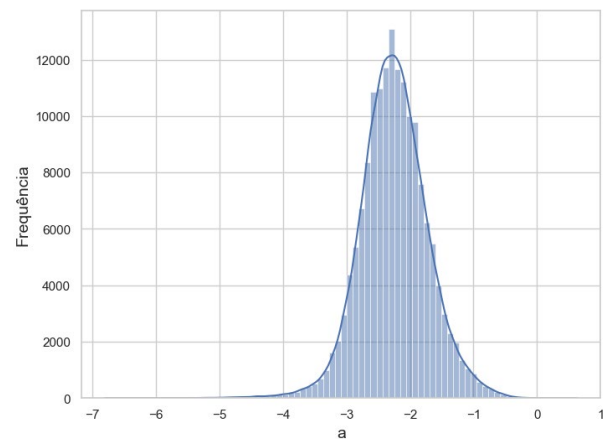
Algumas variáveis, como ‘id’, ‘km’ e ‘segmento’ são igualmente distribuídas em ordem crescente e não são relevantes do ponto de vista de análise estatística. Os histogramas dos DBPs são apresentados pela Figura 10. As distribuições dos parâmetros AREA, Figura 10 (b), e os parâmetros de Agnesi “a” e “b”, Figura 10 (f) e (g), apresentam distribuição similar à normal. Os Demais parâmetros, RC, SCI, BDI e BCI, Figura 10 (a), (c), (d) e (e), apresentam a distribuição com assimetria à esquerda.

Figura 10 - Histogramas de distribuição de frequências dos DBPs

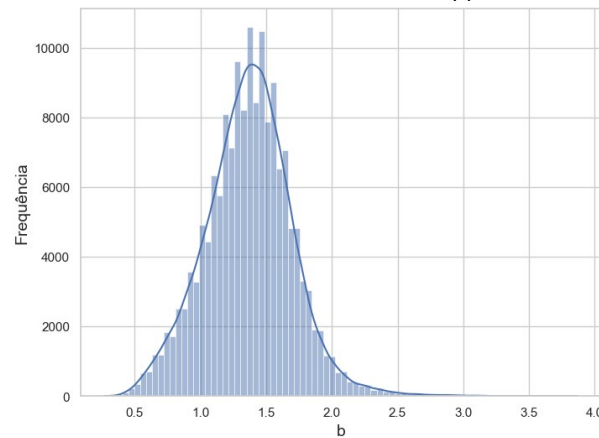




(e) BCI



(f) Parâmetro de Agnesi "a"



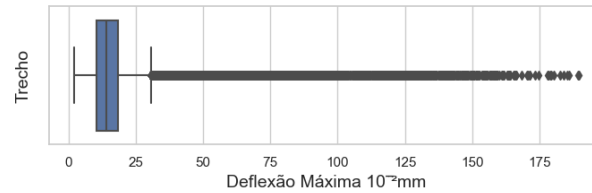
(g) Parâmetro de Agnesi "b"

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Andrade (2024), DNIT (2007) e ARTESP (2020)

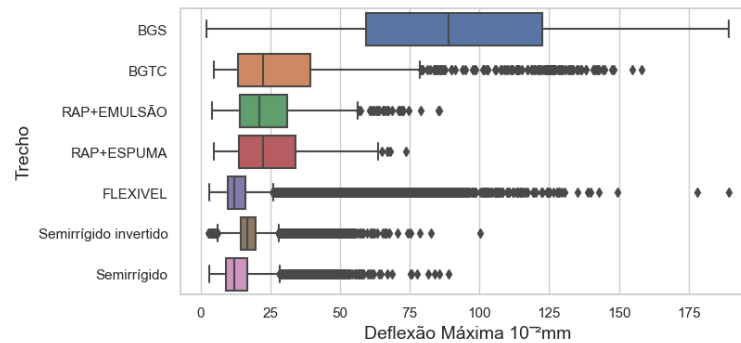
3.6.2. Box plot de distribuições

Os gráficos box plot podem ser usados para a visualização gráfica dos parâmetros estatísticos como a mediana (Q2), os quartis (Q1 e Q3), as extensões dos dados e os possíveis *outliers*. A Figura 11 (a) mostra o gráfico de box plot para o parâmetro de Deflexão Máxima (D0); nela pode-se perceber que a assimetria verificada na Figura 9 (e) é causada por possíveis *outliers*. Entretanto, quando se faz o agrupamento desta variável com outros parâmetros, essa assimetria pode ser avaliada por outros critérios, Figura 11 (b) e (c).

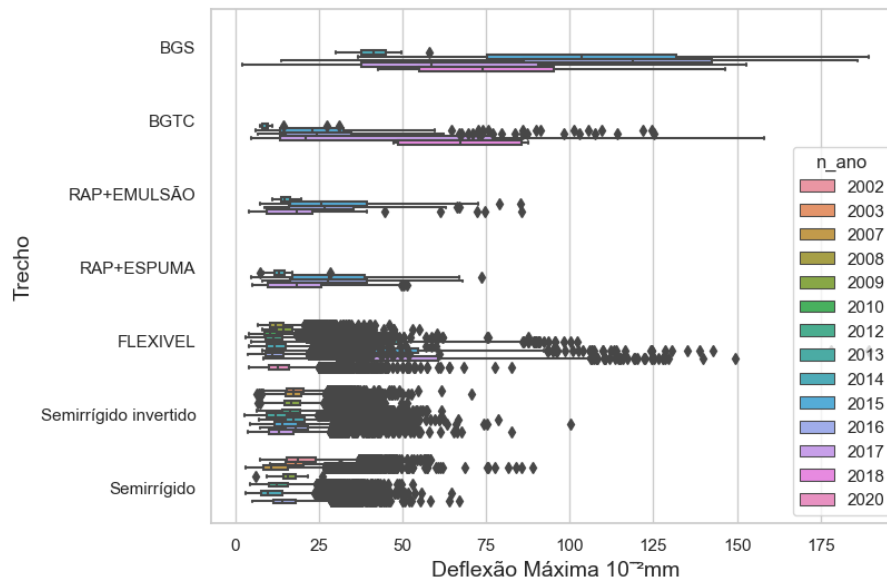
Figura 11 - Gráfico box plot para Deflexão Máxima



(a) Box plot para Deflexão Máxima (D0)



(b) Box plot para D0 com separação por estrutura de pavimento

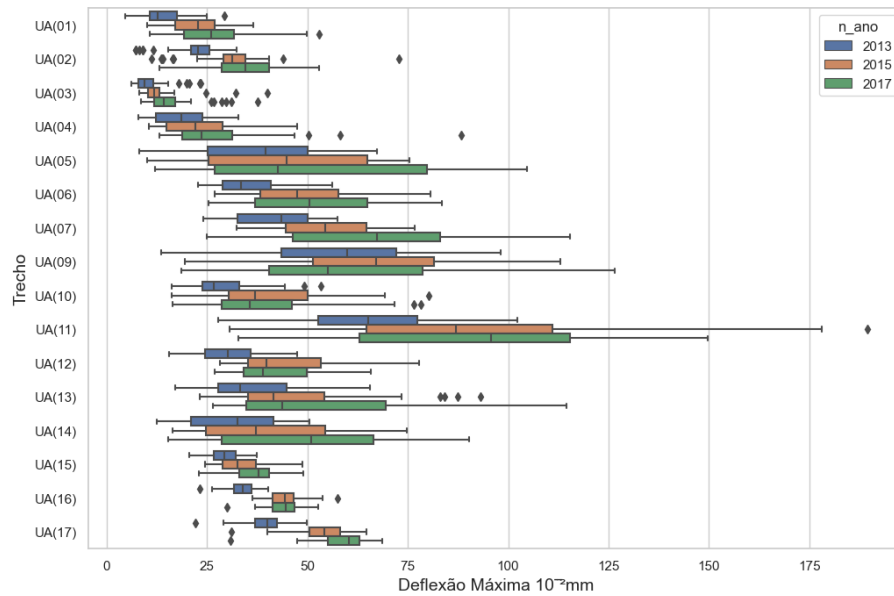


(c) Box plot para D0 com separação por estrutura de pavimento e ano

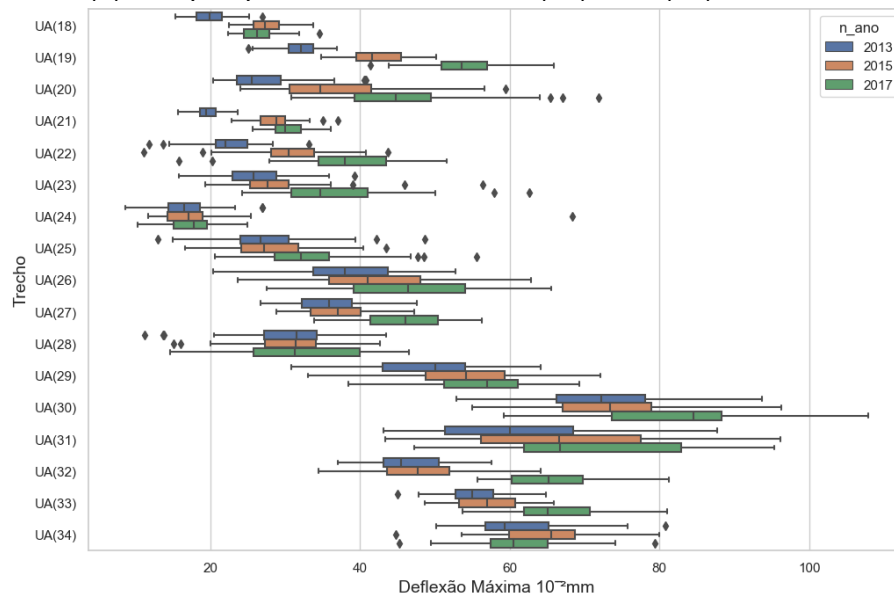
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Andrade (2024), DNIT (2007) e ARTESP (2020)

Um novo agrupamento dos dados por lote da rodovia foi realizado, Figura 12. A grande quantidade de *outliers* identificáveis na Figura 11 (c), principalmente para os pavimentos com estrutura “FLEXIVEL”, “Semirrígido invertido” e “Semirrígido”, agora pode ser analisada por rodovia. O detalhamento evidencia que para muitas rodovias o box plot é simétrico, revelando características de distribuição normal e a diminuição dos pontos visíveis de *outliers*.

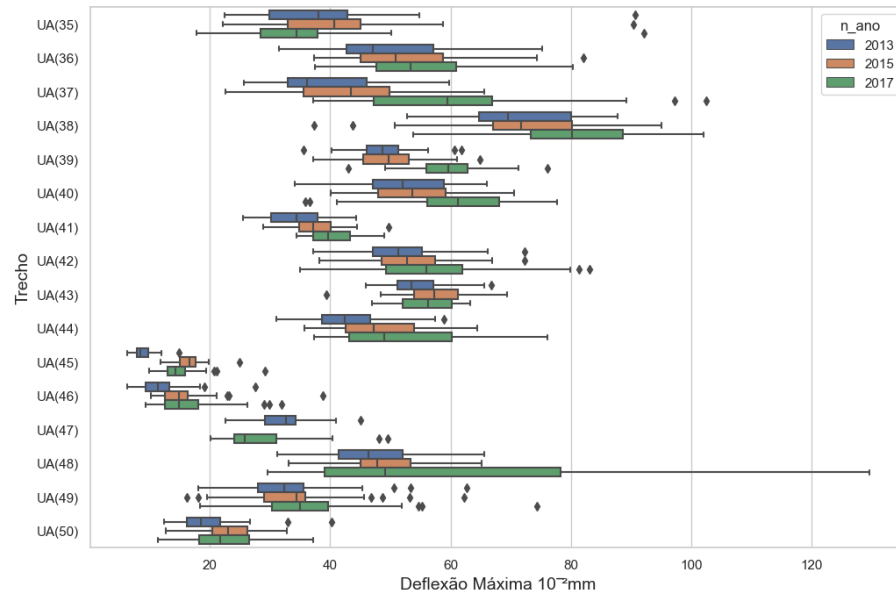
Figura 12 - Gráficos de box plot para D0 por trecho e ano



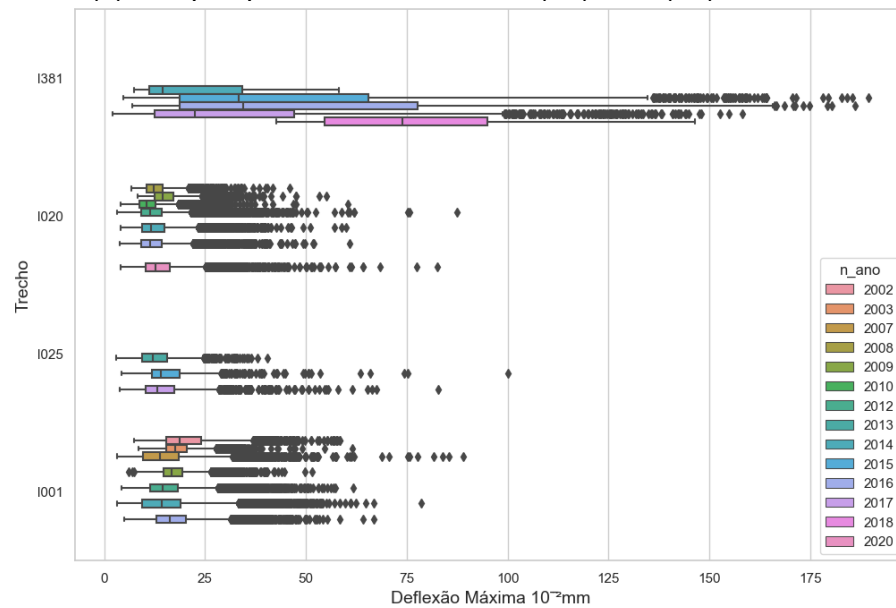
(a) Box plot para os lotes entre UA(01) e UA(17) do DNIT



(b) Box plot para os lotes entre UA(18) e UA(34) do DNIT



(c) Box plot para os lotes entre UA(35) e UA(50) do DNIT

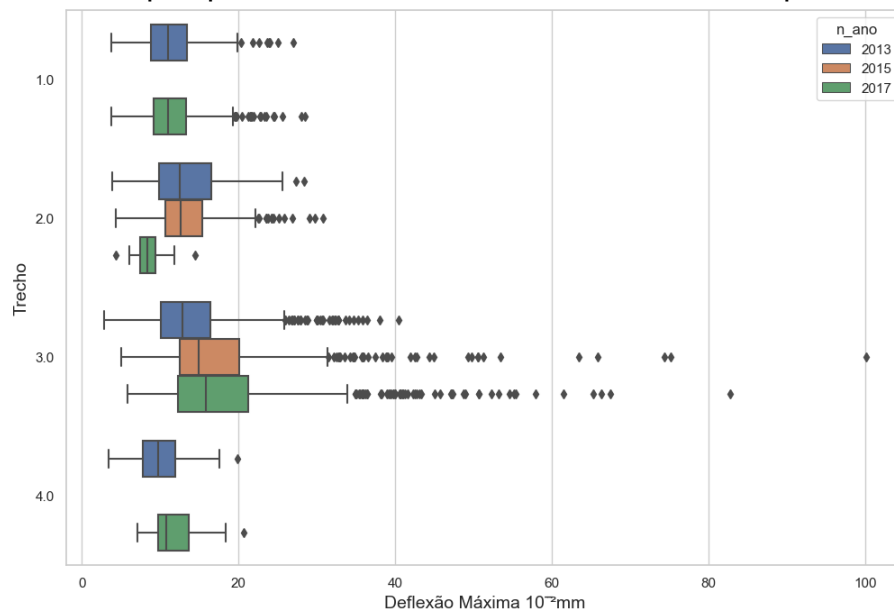


(d) Box plot para os lotes 381 da Fernão Dias, e 001, 020 e 025 da ARTESTP, Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Andrade (2024), DNIT (2007) e ARTESTP (2020)

Outra análise que a separação das deflexões por lote revela é a tendência de evolução das deflexões entre os anos para os lotes do DNIT, que será explorada no Capítulo 6 (p.121). Essa tendência não é claramente observada para o lote da Fernão Dias, pelos motivos que serão discutidos no Capítulo 5 (p.88). E nos lotes fiscalizados pela ARTESTP, I020, I025 e I001, a tendência é de manutenção dos valores médios, sendo que essa discussão será tratada no Capítulo 7 (p.155).

Uma nova análise é apresentada na Figura 13. A separação foi realizada somente para a rodovia do lote I025, que se trata da SP-021 Rodoanel Mário Covas. Foi elaborada a segregação por faixa de rolamento de realização do ensaio de FWD, que revelou que a maior parte dos *outliers* se refere a deflexões da faixa 03, e que a quantidade de *outliers* aumenta para os levantamentos mais recentes, indicando dano no pavimento, pois a faixa 03 é submetida ao maior volume de tráfego dos veículos comerciais pesados.

Figura 13 - Box plot para de deflexão máxima do lote I025 separados por faixa



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Andrade (2024), DNIT (2007) e ARTESP (2020)

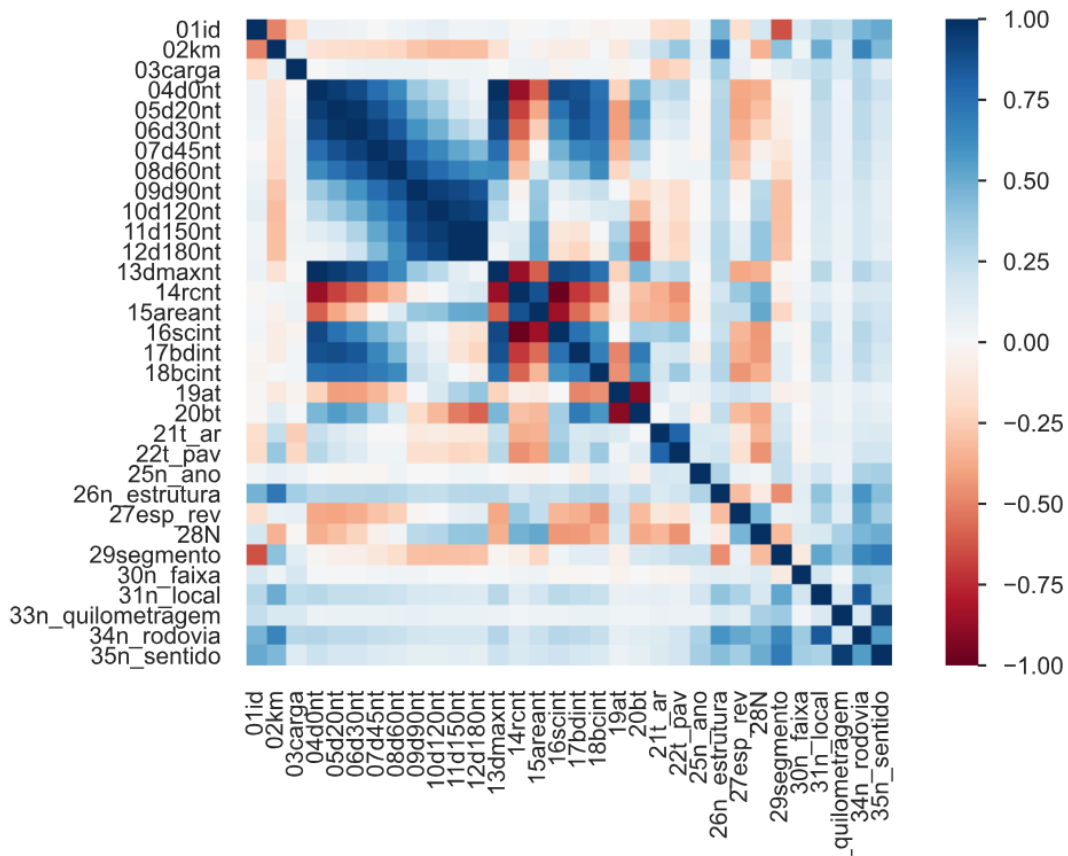
Maiores detalhamentos e análises mais profundas podem ser realizadas devido à estruturação do banco de dados. As mesmas avaliações podem ser realizadas para todas as variáveis do banco de dados.

3.6.3. Matriz de correlações

A matriz de correlação de Pearson é uma avaliação estatística que estabelece o grau de relação entre as variáveis. Sua utilização permite avaliar a força e a direção de relações lineares entre as variáveis numéricas. Os valores variam entre 1 e -1, sendo

que os valores positivos indicam relação proporcional entre as variáveis, quando uma variável aumenta a outra também aumenta. Os valores negativos indicam uma relação inversamente proporcional, quando uma variável aumenta a outra diminui. Já valores próximos a zero indicam que as variáveis não apresentam uma relação linear. A Figura 14 mostra a análise de correlação de Pearson entre as variáveis do banco de dados.

Figura 14 - Matriz de correlação de Pearson



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Andrade (2024), DNIT (2007) e ARTESP (2020)

Como esperado, as correlações mais fortes são as das próprias deflexões, D0 ao D180, sendo positivas e próximas de 1. Isso se reflete nas fortes correlações entre SCI, BDI e BCI também. Já alguns parâmetros, como o AREA e o RC, apresentam correlação negativa com as deflexões e os parâmetros SCI, BDI e BCI.

As distribuições constantes, como ID, Carga e Ano apresentam valores próximos a 0 para todas as variáveis estudadas, o que indica que não há correlação entre essa

variável dentro do banco de dados. A Carga não apresenta correlação, pois os dados de deflexão foram normalizados para cargas padrões. O mesmo efeito ocorre para as temperaturas do ar e do pavimento, que apresentam valores de correspondência próximos a zero para as variáveis.

4. PROCEDIMENTO DE CORREÇÃO DA DEFLEXÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

O ensaio defletoométrico realizado pelo equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é realizado em temperatura ambiente, que costuma ser registrada pelo próprio equipamento, além do registro da temperatura na superfície da camada do pavimento testado. A temperatura na superfície do pavimento pode apresentar uma amplitude superior a 40°C, a depender do dia e do horário de realização do ensaio. Diversos são os estudos que demonstram a influência da temperatura no comportamento da camada asfáltica. Neste trabalho são elaborados modelos de determinação da temperatura do ar e da temperatura da superfície do pavimento com o objetivo de auxiliar a complementar essas informações em banco de dados defletoométricos. Também é desenvolvido um modelo de correção da deflexão em função da temperatura, para ser aplicado em um banco de dados, dessa forma permitindo a realização de avaliação de levantamentos defletoométricos em séries históricas e o cálculo de módulos equivalentes em temperaturas iguais. Os modelos obtidos apresentam acurácia que permitem, para o universo de dados estudados, realizar aplicação para análises em nível de rede.

4.1. Introdução

As rodovias brasileiras são compostas em sua maioria por pavimentos asfálticos. Isto é, as camadas de revestimento são compostas por misturas asfálticas usinadas ou mesmo tratamentos superficiais. Dentre as misturas asfálticas usinadas, a mais utilizada no país é o Concreto Asfáltico (CA ou CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente), que é nomeado assim pois a sua composição é realizada pela mistura de material sólido de origem pétreo, em geral britado, fíler e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). As camadas subjacentes são constituídas em geral por materiais granulares e solos, podendo conter materiais estabilizantes, como cimento, cal, emulsão asfáltica, espuma de asfalto etc. Estas camadas são projetadas para suportar as cargas provenientes do tráfego e transmitir às camadas inferiores, protegendo o subleito de esforços cisalhantes.

O estado brasileiro possui uma malha rodoviária pavimentada com mais de 200 mil quilômetros presentes nas 5 regiões do país. A maior parte do território brasileiro é localizado geograficamente entre a linha do equador e o trópico de capricórnio, região dita tropical, com uma parcela menor abaixo do Trópico de Capricórnio, caracterizada por temperada. O país possui, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), cinco macro climas: (i) Equatorial; (ii) Tropical Zona Equatorial; (iii) Tropical Nordeste Oriental; (iv) Tropical Brasil Central; (v) Temperado. As rodovias brasileiras estão sob condições climáticas em geral de intenso calor, com altas temperaturas, e diferentes das condições normalmente presentes em países de clima frio ou mesmo temperado, onde a maior parte das pesquisas e estudos de pavimentação asfáltica são tradicionalmente publicados.

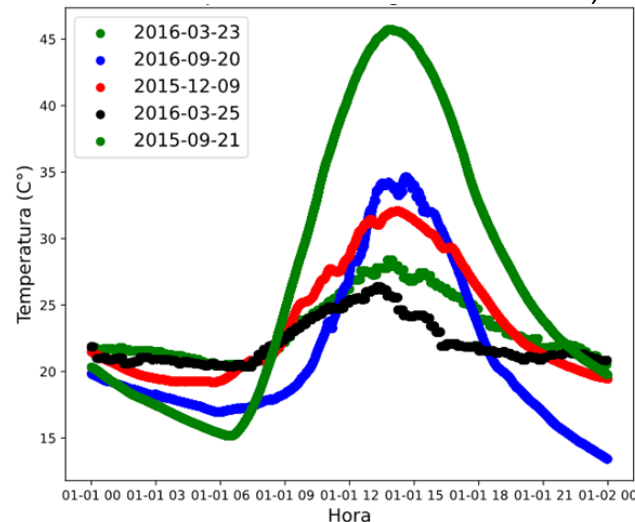
Para facilitar a gestão de um sistema rodoviário tão complexo quanto o brasileiro, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta para correção de resultados de deflexão em pavimentos asfálticos em função da temperatura do pavimento. Desta forma, foram desenvolvidos modelos utilizando *machine learning* para estimar, de forma expedita, as temperaturas do ar e do pavimento no momento de realização do ensaio de *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Também foi elaborado um procedimento de correção da deflexão em função da temperatura de realização do FWD que retorna à deflexão na temperatura padrão de referência. Esses modelos visam a aplicação em avaliação de séries históricas de levantamentos deflectométricos, como os bancos de dados existentes em agências de fiscalização, concessionárias do setor rodoviário, projetistas, órgãos rodoviários e reguladores.

4.2. Revisão Bibliográfica

Os efeitos climáticos alteram o comportamento dos materiais dos pavimentos, influenciando suas respostas mecânicas e, portanto, sua vida útil, assim como as solicitações do tráfego causam danos aos materiais dos pavimentos, alterando as respostas mecânicas dos mesmos, e reduzindo sua vida útil. Quanto aos efeitos climáticos, há duas condições que mais influenciam a temperatura dos pavimentos

asfálticos: as mudanças sazonais e as diárias. Com a mudança das estações climáticas ao longo do ano, ocorrem mudanças dos níveis de temperaturas máximas e mínimas que os pavimentos alcançam. Essas mudanças ocorrem devido à variação da inclinação do sol em relação à superfície da Terra, alterando a quantidade de radiação solar recebida pelo pavimento. Já as mudanças diárias de temperatura ocorrem em função da exposição solar, dos ventos e das incidências de precipitações. Assim, a temperatura tende a aumentar com a exposição ao sol com o passar das horas do dia, atingindo a temperatura máxima logo após o apogeu do sol. A partir deste momento a temperatura começa a diminuir com a dissipação do calor para o ambiente. Na Figura 15 mostra-se o resultado de monitoramento de temperatura ao longo de 24 horas em dias de diferentes estações climáticas do ano, e mostra-se a influência da radiação solar na elevação da temperatura do pavimento localizado na BR-381 município de Extrema-MG (lat 42°54'25", long 46°21'51"), dados do RDT-ANTT da Concessionária Arteris Fernão Dias.

Figura 15 - Variação da temperatura ao longo de 24 horas da superfície de em um pavimento (lat 42°54'25", long 46°21'51") em diferentes datas (RDT-ANTT-Concessionária Arteris Fernão Dias)



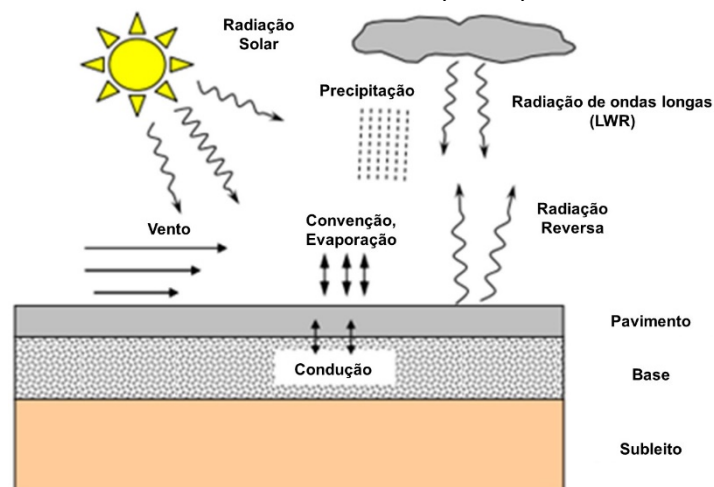
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de RDT (2017)

Enquanto a radiação solar causa a elevação da temperatura do pavimento asfáltico, a emissividade e a condutividade contribuem para a redução da temperatura na superfície. Enquanto o efeito da emissividade causa a perda de energia térmica da

superfície para o ambiente, a condutividade transmite a energia térmica da superfície do pavimento para a profundidade. Esse fenômeno causa um gradiente térmico ao longo da espessura do pavimento que se altera ao longo do dia. Na maior parte do dia, a temperatura na superfície do pavimento é superior à do fundo da camada asfáltica. Com a diminuição da incidência solar, esse gradiente térmico pode se alterar, com a temperatura na superfície do pavimento podendo se tornar inferior à do fundo do revestimento, dependendo da época do ano, espessuras de revestimento asfálticos e temperatura do ar.

Herb *et al.* (2006) desenvolveram modelo unidimensional em elementos finitos para simular a temperatura do pavimento. Com o modelo foram demonstrados importantes pontos conforme ilustrado na Figura 16: (i) a emissividade é o fator que mais influencia na queda de temperatura na superfície do pavimento; (ii) a influência do vento é a mais difícil de se quantificar e de se prever em um modelo; (iii) a diferença da irradiação solar prevista e medida se deve a diversos fatores, entre eles a existência de nuvens que bloqueiam a incidência da radiação solar sobre a superfície do pavimento; (iv) as precipitações de chuvas fazem com que a temperatura do pavimento caia “instantaneamente”; e (v) há uma defasagem entre a irradiação máxima e a temperatura máxima da superfície dos revestimentos asfálticos.

Figura 16 - Principais fatores que influenciam na temperatura do pavimento traduzido de Herb *et al.* (2006)



Fonte: Adaptado de Herb *et al.* (2006)

Vários trabalhos demonstram que a temperatura dos pavimentos tende a aumentar ao nascer do sol, e que há um gradiente térmico positivo nas camadas de pavimentos, com o calor sendo transmitido do topo para o interior da camada asfáltica (Blass *et al.*, 2021, 2013). Ao anoitecer, ocorre um gradiente térmico negativo, com o calor fluindo do interior para a superfície do pavimento.

Dentre algumas observações de Herb *et al.* (2006), destacam-se: (i) a temperatura média dos revestimentos asfálticos influenciará nas propriedades mecânicas do pavimento e assim nos níveis de respostas quanto à tensão e à deformação; (ii) o gradiente térmico é grande gerador de tensões asfálticas; (iii) a amplitude térmica ao longo do dia irá influenciar na vida de fadiga da camada asfáltica; e (iv) a taxa de mudança de temperatura altera a fluência da mistura asfáltica, mudando a resposta quanto às tensões e às deformações.

Muitos são os trabalhos que demonstram a influência da temperatura na rigidez dos pavimentos (Akbarzadeh *et al.*, 2012; Y. Li *et al.*, 2018; Luo *et al.*, 2023; Sivagnanasuntharam *et al.*, 2023; Specht *et al.*, 2017; Vestena *et al.*, 2021) e nas deflexões (SHRP, 1993; Southgate, 1969; Szentpéteri, 2013). Alguns trabalhos desenvolveram métodos para padronização das deflexões em função da temperatura (Adwan *et al.*, 2021; Southgate e Deen, 1968). Há trabalhos que realizam a mudança do módulo retroanalísado da camada para a temperatura de referência (Chen *et al.*, 2000; Fernando e Liu, 2001; Kim *et al.*, 2000). Dentre os trabalhos, alguns utilizam a temperatura na superfície (Motta, 1991), outros no meio da camada asfáltica (SHRP, 1993; Southgate, 1969). Ou seja, é de grande interesse compreender e prever o comportamento mecânico dos revestimentos asfálticos em função da temperatura e do gradiente térmico, e suas influências nas respostas mecânicas dos pavimentos, avaliadas por meio das deflexões.

4.2.1. Determinação do gradiente térmico no revestimento asfáltico

Em pesquisa desenvolvida em pista do MnDOT (Herb *et al.*, 2006, 2009), constatou-se que a temperatura na superfície do pavimento pode chegar a 65°C nas condições

prevalentes no estado de Minnesota, Estados Unidos, enquanto a temperatura do ar chega a 35°C, e que o gradiente térmico pode exceder 5°C/cm e 40°C/hora. Constatou-se ainda a ocorrência de gradientes de temperatura negativos (topo do pavimento com temperatura menor que a fibra inferior do revestimento asfáltico) durante precipitações e períodos noturnos e que estes podem causar tensão de tração na superfície do pavimento.

Motta (1979) realizou as primeiras investigações de gradiente térmico em pavimentos brasileiros, no Estado do Rio de Janeiro, em sua capital, utilizando termopares instalados ao longo de 20cm de profundidade. Foi possível avaliar as mudanças sazonais e diárias que ocorrem ao longo da espessura do revestimento asfáltico. O gradiente térmico ocorrente no revestimento asfáltico causa mudanças na rigidez do material asfáltico ao longo do revestimento (Motta, 1991). Macedo (1996), utilizando a equação desenvolvida por Regis Martins, apresentada por Motta (1991), para calcular o gradiente térmico ao longo da camada asfáltica, realizou retroanálise do pavimento corrigindo o módulo resiliência do revestimento asfáltico em função da temperatura.

Uma das primeiras equações de cálculo do gradiente térmico foi desenvolvido por Witczak para o instituto do asfalto dos EUA (Pinto e Preussler, 2002). O estudo de Mohseni (1998), a partir de dados extraídos do grande banco de dados norte-americano de pavimentos, para o programa do *Long Term Pavement Performance* (LTPP), constatou uma diferença entre as temperaturas previstas pelos modelos do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e as temperaturas registradas pelo *Seasonal Monitoring Program* (SMP). Dessa forma, o trabalho desenvolveu modelos capazes de determinar a temperatura na superfície e nas profundidades dos pavimentos para a América do Norte, melhorando os modelos adotados pelo Superpave. As equações BELLS2 e BELLS3 são aplicadas atualmente pelo protocolo de execução de testes de FWD usado no programa LTPP (Lukanen *et al.*, 2000).

4.2.2. Correção da deflexão em função da temperatura

Há na literatura numerosos métodos para correção da deflexão em função da temperatura. Southgate (1969) enumerou dois modelos adotados à época. O primeiro era incrementar um valor de deflexão correspondente a cada grau de diferença de temperatura entre a temperatura do pavimento e a temperatura de referência. Essa metodologia acabou caindo em desuso, e não se encontra referências atuais que relatam essa aplicação. Já a segunda, consiste em utilizar um fator multiplicativo adimensional com relação a uma temperatura referencial a ser aplicado a uma deflexão medida na temperatura ambiente. Nesse caso, há bastantes aplicações e vários projetos nacionais adotam a metodologia da IP-DE-P00/003 do DER-SP (2006).

Em estudo na famosa pista da AASHO (atualmente denominada AASHTO), Benkelman *et al.* (1962) constataram a influência da temperatura nos níveis de deflexão. Nesse experimento eles perceberam que, na temperatura de 26,66°C as deflexões tendiam a ser constantes. Southgate e Deen (1968), observando os dados da pista da AASHO, propuseram uma equação de quarto grau capaz de determinar o perfil da temperatura do pavimento ao longo do dia. Usando um sistema de duas camadas, Southgate e Deen (1968) demonstraram a relação entre deflexão e temperatura, e a influência da camada subjacente na temperatura e na deflexão. Husain e George (1985) aplicaram os fatores de correção de temperatura desenvolvidos por Southgate e Deen (1968) para implementar o *software* IDM, desenvolvido em seu trabalho, para ajustar as deflexões resultantes de FWD em um processo de retroanálise.

Chen *et al.* (2000), usando dados de temperatura, propuseram uma equação para correção do módulo retroanalizado do revestimento asfáltico para a temperatura de referência. Os resultados foram comparados com os modelos de Kim *et al.* (1995) e do TxDOT de Fernando e Liu (2001). As equações chegam em resultados próximos para as temperaturas abaixo dos 33°C no meio da camada de revestimento asfáltico, apresentando alta dispersão para temperaturas superiores.

4.3. Modelos de previsão de temperaturas dos revestimentos asfálticos

Os modelos de previsão de temperaturas em revestimentos asfálticos de pavimentos desenvolvidos são complementares entre si e visam o preenchimento de informações dos bancos de dados. Dentro de bancos de dados de ensaios de FWD, embora sejam informações imprescindíveis, é comum que haja informações de temperatura faltantes, tanto temperatura do ar, quanto temperatura do pavimento. Dessa forma, os modelos desenvolvidos visam completar estas lacunas e viabilizar a utilização destes dados para realização de análises de rede.

Para desenvolvimento dos modelos de previsão de temperatura, foram utilizados alguns bancos de dados: para o modelo de previsão de temperatura do ar foi usado o banco de dados do INMET (2023); já para o modelo de determinação da temperatura na superfície do pavimento asfáltico foi utilizado o banco de dados brasileiro do DNIT, elaborado para realização da calibração do *software* HDM-4 DNIT (2017), e levantamentos de temperatura realizados por Moraes (2015).

4.3.1. Modelo de previsão da temperatura do ar

O banco de dados do INMET (2023) apresenta resultados da série histórica de 2000 a 2023 de estações meteorológicas automáticas distribuídas no território nacional. O banco de dados apresenta registros horários das condições climáticas em 615 estações.

Para o desenvolvimento do modelo de previsão de temperatura de forma expedita, seguiram-se algumas premissas simplificadoras do banco de dados, pois os dados de FWD não apresentam grandes descrições e nem sempre são disponíveis os dados meteorológicos da região para o período do levantamento de FWD. Por esta razão, o tratamento do banco de dados do INMET seguiu as premissas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis utilizadas para elaboração do modelo

VARIÁVEIS INMET	VARIÁVEIS MODELO	VALORES
DATA	ESTACÃO_ANO	PRI/VER/OUT/INV
HORA	DIA_NOITE	DIA/NOITE
	HORA	NUMÉRICO
PRECIPITAÇÃO	CHUVA	NÃO/SIM
RADIAÇÃO	SOL	ENSOLARADO/NUBLADO
TEMPERATURA AR	TEMP_AR	NUMÉRICA
ESTACAO		
REGIÃO	REGIÃO	CE/NT/ND/SD/SL
STAGE		
CITY_STATION		
LATITUDE	LAT	NUMÉRICO
LONGITUDE	LON	NUMÉRICO
ELEVAÇÃO	LVL	NUMÉRICO

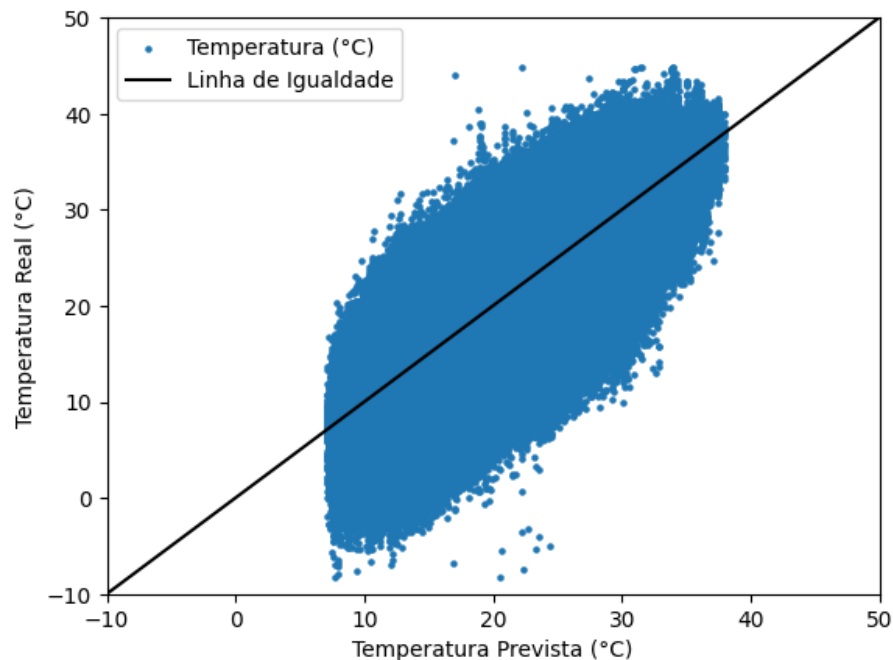
O Banco de dados do INMET (2023) foi utilizado para obtenção de valores expeditos, conforme apresentado na Tabela 4. A variável “DATA” foi usada para declaração da estação do ano. A variável HORA foi aplicada para determinar duas variáveis usadas no modelo: a categoria de “DIA” ou “NOITE” e o valor numérico da hora. Os dados de precipitação foram empregados para determinar se no dia houve chuva: “SIM” ou “NÃO”. Os valores de Radiação Solar foram adotados para categorizar se o dia foi ensolarado ou nublado. Dados de localidade, nome da estação, região, estado e cidade foram usados para se determinar a região dos registros. O emprego dessas variáveis expeditas no modelo permite que o usuário estime a temperatura do ar, usando informações de fácil determinação.

A preparação do banco de dados para a realização do treinamento foi realizada com a separação dos dados de 2011 a 2020, que resulta em 38.710.600 registros de condições climáticas. Esse banco de dados foi dividido aleatoriamente na proporção de 2:3 e 1:3, entre banco de dados de treinamento e teste, respectivamente. Para garantir a precisão do modelo, foram aplicadas as técnicas de “*One Hot Encoder*” para transformação de variáveis categóricas (Data, Hora, Dia_Noite, Ano_Estação, Chuva,

Região e Sol) em numéricas e o Escalonamento das variáveis numéricas (Hora, Latitude, Longitude e Elevação).

O modelo foi desenvolvido aplicando-se a técnica de *Multi Layer Perceptor* (MLP) com três camadas ocultas, com 100, 50 e 50 neurônios respectivamente, com função de ativação “*relu*”. O modelo foi treinado com 200 interações, aplicando-se o algoritmo Adam (“*adam*”) para redução da função de perda durante o processo de aprendizagem. Ao final do treinamento, obteve-se Coeficiente de Determinação (R2) de 0,79, Erro Quadrático Médio (MSE) de 6,45, e Raiz Quadrática do Erro-Médio (RMSE) de 2,54. Na Figura 17 apresenta-se a linha de igualdade resultante do modelo para as previsões realizadas na proporção de teste do banco de dados.

Figura 17 - Linha de igualdade do modelo MLP para a temperatura do ar



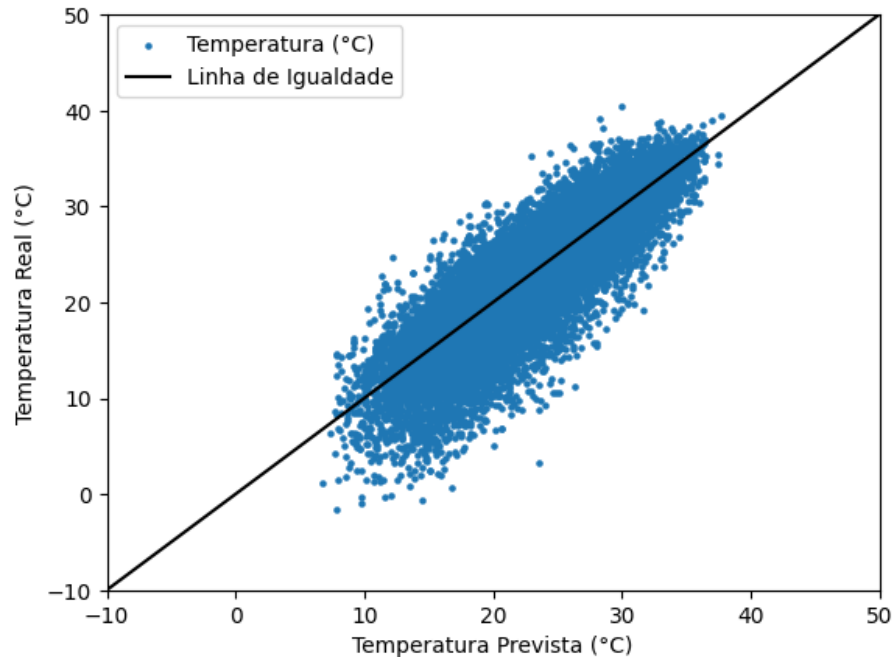
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de INMET (2023)

4.3.2. Previsões do modelo MLP para temperatura do ar

Para validação do modelo, foi realizada a aplicação do modelo desenvolvido para realizar previsões de temperatura para o ano de 2022. O banco de dados do INMET (2023) conta com 2.636.883 registros de condições climáticas para esse ano. Os dados

passaram pelos mesmos tratamentos de “*One Hot Encoder*” e escalonamento que os dados utilizados para treinamento. A Figura 18 apresenta a linha de igualdade entre as temperaturas reais e as previstas.

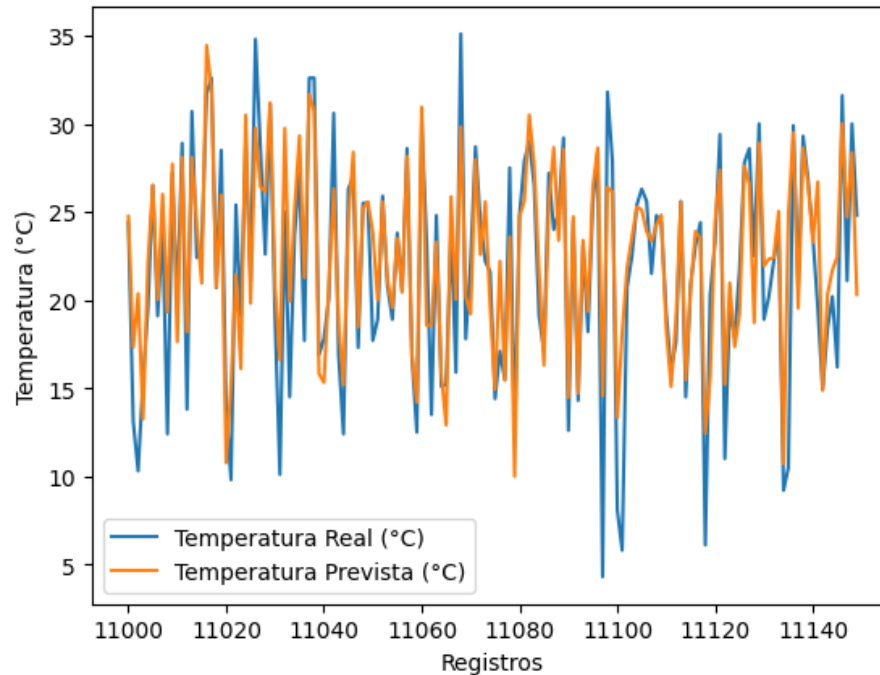
Figura 18 - Linha de igualdade do modelo MLP para a temperatura do ar para o ano de 2022



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de INMET (2023)

Com relação aos dados de validação, foi constatada uma pequena variação entre os parâmetros estatísticos de avaliação, sendo que foi calculado o Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,74, Erro Quadrático Médio (MSE) de 8,68 e Raiz Quadrática do Erro-Médio (RMSE) de 2,95. Essa variação pode ser explicada pois o modelo irá prever dados médios com base em séries históricas e não será capaz de prever mudanças sazonais entre os anos. A Figura 19 mostra um recorte na série de previsões para mostrar a tendência de assertividade do modelo.

Figura 19 - Série de previsão de temperatura do ar para o ano de 2022



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de INMET (2023)

4.3.3. Modelo de previsão da temperatura da superfície do pavimento asfáltico

Para desenvolvimento do modelo de previsão da temperatura do pavimento foram utilizadas duas fontes de dados. A primeira foi o banco de dados elaborado para calibração do HDM-4 realizado pelo DNIT (2017), e a segunda foram resultados de levantamento de temperatura realizados por Moraes (2015).

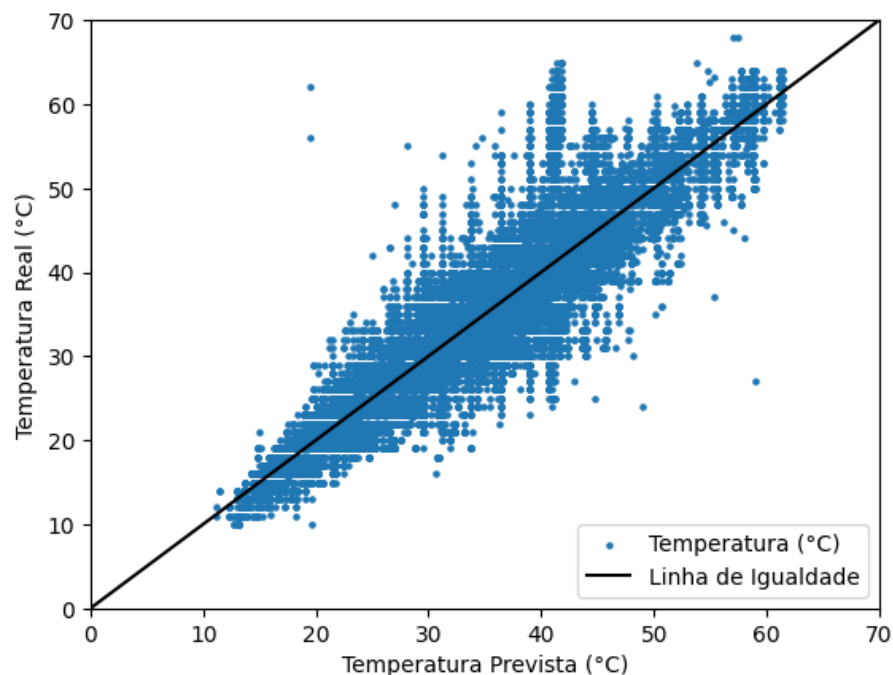
O banco de dados de calibração do HDM-4 compreende resultados de ensaios de FWD realizados nos anos de 2013, 2015 e 2017 em 50 unidades amostrais distribuídas ao longo do território brasileiro, conforme abordado no Capítulo 6 (p.121) desta tese. Os dados de temperatura de Moraes (2015) são determinações de temperatura registradas continuamente ao longo de 36 horas, realizadas na UFRJ (Ilha do Fundão), cidade do Rio de Janeiro, entre os dias 16 e 17/12/2014. O banco de dados resultante da junção dessas duas fontes de dados possui 175.870 registros distribuídos entre as variáveis apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis utilizadas para elaboração do modelo

DADOS	VARIÁVEIS MODELO	VALORES
TEMPERATURA DO AR	T_AR	NUMÉRICO
TEMPERATURA DO PAVIMENTO	T_PAV	NUMÉRICO
LATITUDE	LAT	NUMÉRICO
LONGITUDE	LON	NUMÉRICO
MÊS	MÊS	NUMÉRICO
HORA	HORA	NUMÉRICO

Para o treinamento do modelo de previsão da temperatura da superfície do pavimento asfáltico, foi realizado o fracionamento aleatório na proporção de 2:3 para treinamento e 1:3 para teste. Foi desenvolvido um modelo MLP com 100 e 500 camadas de neurônios ocultas e função de ativação e convergência “*relu*” e “*adam*”, respectivamente. O modelo resultou R^2 de 0,88, com MSE de 12,80 e RMSE de 3,58. Na Figura 20 apresenta-se a linha de igualdade para os dados de teste.

Figura 20 - Linha de igualdade do modelo MLP para a temperatura da superfície de pavimentos asfálticos

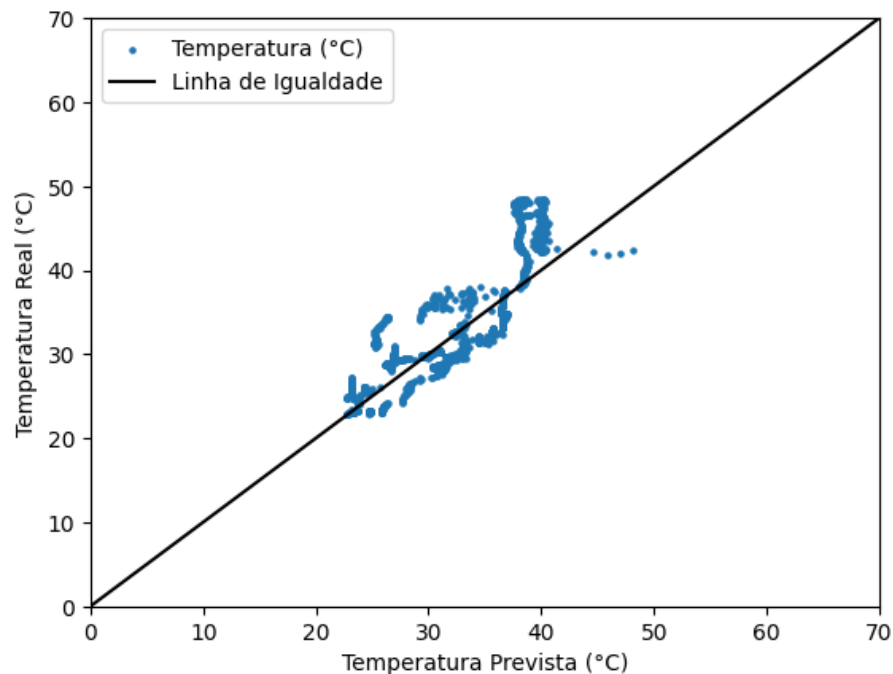


Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Moraes (2015) e DNIT (2007)

4.3.4. Previsões do modelo MLP para temperatura do pavimento

A validação do modelo de previsão do pavimento foi realizada em dados de registro de temperatura de pavimento asfáltico da pista experimental construída na USP por Cargnin (2023). Foram utilizados registros realizados entre os dias 04 e 05 de setembro de 2023 ao longo de 29 horas. A Figura 21 apresenta a linha de igualdade entre as temperaturas reais e as previstas.

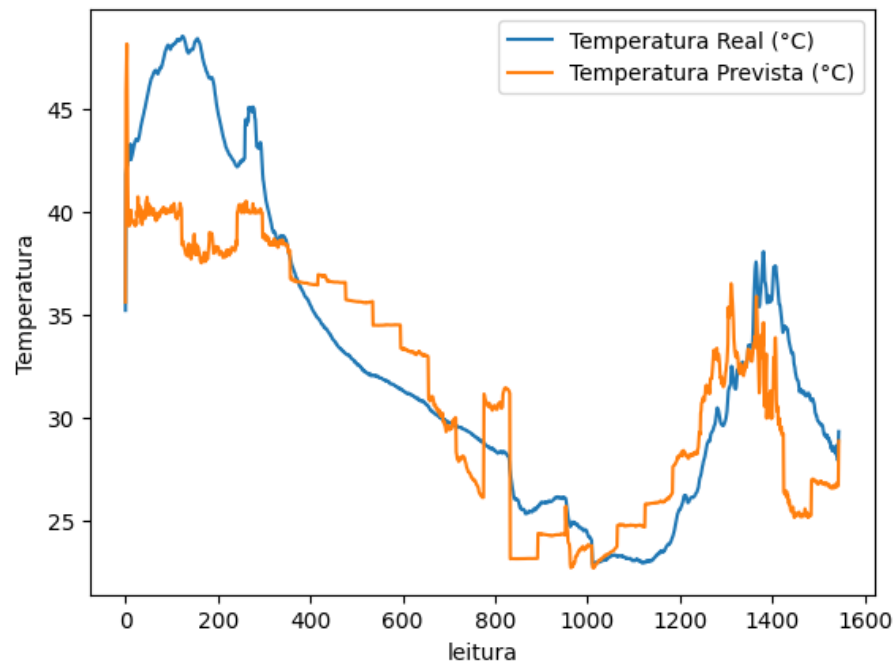
Figura 21 - Linha de igualdade do modelo MLP para a temperatura do pavimento para os dados de Cargnin (2023)



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Cargnin (2023)

Os coeficientes estatísticos obtidos demonstram a perda de acurácia do modelo, com os valores de Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,73, Erro Quadrático Médio (MSE) de 14,79 e Raiz Quadrática do Erro-Médio (RMSE) de 3,85. Na Figura 22 percebe-se que a série apresenta dificuldade de previsão do primeiro pico de aquecimento, mas esta demonstra a tendência de assertividade do modelo, com previsões de aquecimento e resfriamento da camada do pavimento.

Figura 22 - Série de previsão de temperatura do pavimento para os dados de (Cargnin, 2023)



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Cargnin (2023)

4.4. Correção das deflexões para a temperatura de referência de 25°C

O procedimento de correção das deflexões em função da temperatura foi elaborado aplicando-se o banco de dados de calibração do HDM-4 (DNIT, 2017), e consistiu na seleção dos trechos para teste, realização de retroanálise, correção dos módulos retroanalizados, cálculo das bacias deflectométricas na temperatura padrão e treinamento dos modelos de regressão.

4.4.1. Escolha de trechos para retroanálise

Para elaboração do modelo de correção da temperatura foi realizada amostragem de três fontes de dados: (i) 10 Unidades Amostrais (UA's) do DNIT, dados do projeto de calibração do HDM-4 (DNIT, 2017); (ii) 4 segmentos do Trecho Experimental - BR-381 Fernão Dias USP, dados do RDT-ANTT-Concessionária Arteris Fernão Dias; e (iii) 4 amostragens da SP-348, dados sob responsabilidade da Concessionária do Sistema

Anhanguera Bandeirantes S.A. - AutoBAn, cedidos pela ARTESP. A seleção contemplou trechos com revestimento composto por misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), sendo que trechos com revestimentos esbeltos do tipo Tratamento Duplo Superficial (TSD) foram desconsiderados pois as retroanálises dessas camadas refletem em módulos irrealistas e a pequena espessura do revestimento apresenta menor influência da temperatura, estes pontos elevariam a imprecisão do modelo. Dessa forma, foram selecionadas as amostragens apresentadas na Tabela 6. Essa seleção buscou contemplar a maior abrangência do território nacional, para que as diversas condições climáticas fossem representadas.

Tabela 6 - Amostragens de segmentos rodoviários com pavimentos asfálticos selecionados com localização e clima

Unidade de Amostragem	Estado	Município	Clima
UA01-BR101	Bahia	Cruz das Almas	Tropical Nordeste
UA10-BR116	Ceará	Icó	Tropical Equatorial
UA13-BR020	Ceará	Boa Viagem	Tropical Equatorial
UA18-BR364	Mato Grosso	Cuiabá	Tropical Brasil Central
UA19-BR364	Mato Grosso	Cáceres	Tropical Brasil Central
UA21-BR364	Mato Grosso	Cáceres	Tropical Brasil Central
UA22-BR364	Mato Grosso	Cáceres	Tropical Brasil Central
UA41-BR020	Distrito Federal	Distrito Federal	Tropical Brasil Central
UA48-BR282	Santa Catarina	Joaçaba	Temperado
UA49-BR282	Santa Catarina	Joaçaba	Temperado
BGS	Minas Gerais	Extrema	Tropical Brasil Central
BGTC	Minas Gerais	Extrema	Tropical Brasil Central
RAP-EMU	Minas Gerais	Extrema	Tropical Brasil Central
RAP-ESP	Minas Gerais	Extrema	Tropical Brasil Central
SP348-C79	São Paulo	Vinhedo	Tropical Brasil Central
SP348-D79	São Paulo	Vinhedo	Tropical Brasil Central
SP348-C108	São Paulo	Hortolândia	Tropical Brasil Central
SP348-D108	São Paulo	Hortolândia	Tropical Brasil Central

4.4.2. Metodologia de retroanálise

Os dados do banco de dados do DNIT foram separados por UA, considerando o sentido da quilometragem da rodovia (crescente/decrescente) e ano do levantamento. Foram efetuados os cálculos da bacia média (BM), bacia média somada com o desvio padrão (BM+DP) e a bacia média subtraída pelo desvio padrão (BM-DP). Para cada caso foi realizado tratamento estatístico com verificação de normalidade da deflexão máxima (D0). As bacias BM, BM+DP e BM-DP referentes ao levantamento de 2013 foram comparadas com a bacia defletoométrica mais próxima do ponto em que se havia dados de sondagens de pavimentos para cada uma das UAs. Em todos os casos estudados, a bacia da sondagem ficou dentro do intervalo entre as bacias BM+DP e a BM-DP. Essa seleção resultou em um universo de 298 bacias para realização das retroanálises.

Os dados dos 4 segmentos do Trecho Experimental da Rodovia Fernão Dias (RDT-ANTT-Concessionária Arteris Fernão Dias) foram tratados por segmento de construção para todos os levantamentos presentes no banco de dados, da mesma forma que foi realizado o mesmo tratamento dos dados do DNIT, resultando em 18 bacias. Já para os dados da Rodovia dos Bandeirantes, SP-348, com dados da Concessionária do Sistema Anhanguera Bandeirantes S.A. - AutoBAN fornecidos pela ARTESP, foi selecionada uma amostragem de bacias próximas a pontos de sondagens, e foram realizadas retroanálises de todas as bacias presentes no banco de dados, resultando em 29 bacias.

O processo de retroanálise foi realizado aplicando-se o *software* BackMedina, mediante os parâmetros apresentados na Tabela 7, considerando-se um sistema de três camadas de um pavimento flexível, no qual se realizou simplificação das estruturas com a junção de camadas com materiais semelhantes, resultando em uma configuração composta por revestimento, base e subleito, na qual foram adotadas as espessuras das camadas encontradas nos registros de sondagens.

Tabela 7 - Parâmetros adotados na retronálise

Camada/Material		Espessura (cm)	Coefficiente Poisson	Aderência
Revestimento	CBUQ	Sondagem	0,30	Não Aderido
Base ou Sub-base	Solo	Sondagem	0,40	Não Aderido
	Solo-CIM	Sondagem	0,30	Não Aderido
	BGS	Sondagem	0,40	Não Aderido
	BGTC	Sondagem	0,20	Não Aderido
	RAP-EMU	Sondagem	0,35	Não Aderido
	RAP-ESP	Sondagem	0,35	Não Aderido
	Subleito	Solo	Infinita	0,45

4.4.3. Correção dos módulos das camadas asfálticas para a temperatura de referência de 25°C

Foi aplicado o processo de correção da temperatura apresentado por Andrade *et al.* (2023), que consiste em: (i) realizar a retroanálise das bacias nas temperaturas originais de levantamento usando o *software* BackMeDiNa; (ii) calcular o gradiente térmico na espessura do revestimento asfáltico, empregando a Equação 3 da SHRP (Mohseni, 1998) para o cálculo da temperatura em profundidade intermediária, e no fundo da camada, possibilitando com a leitura superficial o cálculo do gradiente térmico; (iii) proceder a correção do módulo das duas subcamadas (superior e de fundo) pela Equação 4 do TxDOT (Fernando e Liu, 2001) para a temperatura de referência de 25°C. Ressalta-se que todas as variáveis são convertidas das unidades do Sistema Internacional (SI) para as unidades de aplicação das equações e, posteriormente, são revertidas para as unidades do SI.

$$T_d = T_{surf} \times (1 - 0,063 \times d + 0,007 \times d^2 - 0,0004 \times d^3) \quad \text{Equação 3}$$

onde T_d : temperatura na profundidade d [° Fahrenheit];

T_{surf} : temperatura na superfície [° Fahrenheit];

d : profundidade [polegadas].

$$E' = \frac{E_t \times T^{2,81}}{185,000} \quad \text{Equação 4}$$

onde E' : módulo retroanalísado [psi];

E_t : módulo retroanalísado na temperatura ambiente T [psi];

T : temperatura ambiente [° Fahrenheit].

Com a obtenção dos módulos das camadas asfálticas corrigidas, foi possível, usando o *software* AEMC (MeDiNa), determinar a bacia deflectométrica na temperatura padrão de 25°C.

4.4.4. Calibração de regressão linear para correção das deflexões para a temperatura de 25°C

Para elaboração do modelo de correção das bacias deflectométricas, elaboraram-se regressões lineares de variáveis múltiplas. Para isso avaliou-se a aplicação de combinação das variáveis explicativas: Deflexão máxima na temperatura ambiente, Temperatura do pavimento, Temperatura do ar, Hora de execução do ensaio e espessura do revestimento. A variável resposta é a deflexão corrigida na temperatura de referência de 25°C, conforme apresentado na Tabela 8. O treinamento do modelo utilizou todos os resultados do processo de retroanálise e as bacias corrigidas para a temperatura de referência de 25°C. Os modelos das regressões resultantes foram avaliados quanto ao R², RMS e RMSE, entre a deflexão corrigida e a prevista pelo modelo. Dessa forma, realizou-se o treinamento com as 6 configurações de variáveis.

Variáveis	R ²	RMS	RMSE
D ₀ +tpav+hora+Hrev	0.9722	584.51	646.08
D ₀ +tpav+Hrev	0.9721	587.65	646.99
D ₀ +tpav+tar+Hrev	0.9744	539.63	567.53
D ₀ +tpav+tar+hora+Hrev	0.9744	538.92	562.42
D ₀ +tpav	0.9708	613.55	652.38
D ₀ +tpav+tar	0.9730	568.53	594.95

A terceira e a quarta configurações de variáveis tiveram o maior R², e os menores valores de RMS e RMSE. Dessa forma, optou-se por aplicar a terceira regressão, pois o incremento de uma quinta variável ao modelo não alterou significativamente o resultado a ponto de ser atrativo aumentar a complexidade do modelo. A equação resultante da regressão foi determinada no modelo genérico representado pela Equação 5.

$$D_{i25} = k_1 + k_2 \times D_{iamb} + k_3 \times T_{pav} + k_4 \times T_{ar} + k_5 \times H_{rev} \quad \text{Equação 5}$$

onde D_{i25} : Deflexão na distância i corrigida a 25°C [10^{-2} mm];

k_1 : constante de calibração do modelo;

k_2 : constante de calibração do modelo;

D_{iamb} : Deflexão na distância i na temperatura ambiente [10^{-2} mm];

k_3 : constante de calibração do modelo;

T_{pav} : Temperatura na superfície do pavimento asfáltico [°C];

k_4 : constante de calibração do modelo;

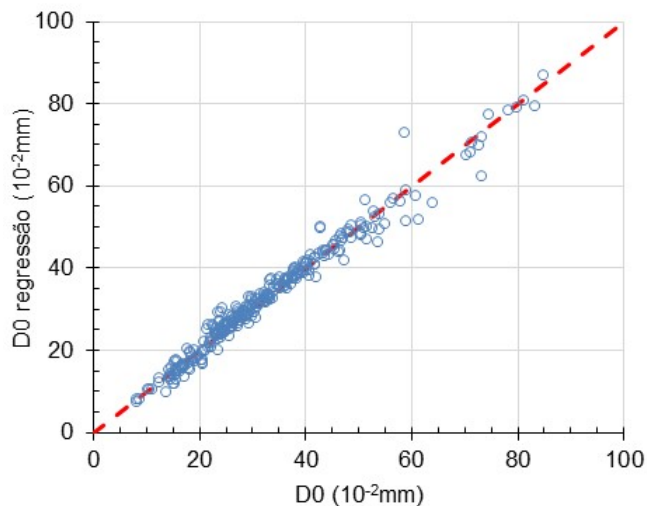
T_{ar} : Temperatura do ar [°C];

k_5 : constante de calibração do modelo;

H_{rev} : Espessura do revestimento asfáltico [cm].

Na Figura 23 mostra-se a linha de igualdade entre as deflexões registradas e previstas pelo modelo. Percebe-se que, para deflexões elevadas, há uma maior dispersão dos resultados, pois o modelo perde um pouco a sensibilidade de correlação entre o registrado e o previsto. Entretanto, para a faixa de deflexão máxima majoritária presente no banco de dados (entre 10 e 50×10⁻²mm), o modelo apresenta ajuste satisfatório.

Figura 23 - Linha de igualdade do modelo de regressão



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de Andrade (2024), DNIT (2007) e ARTESP (2020)

A partir da Equação 5 genérica, treinaram-se os demais modelos para a correção da deflexão D_{20} , D_{30} , D_{45} e D_{60} , as demais deflexões (D_{90} , D_{120} , D_{150} e D_{180}) não apresentaram variações significativas com relação à correção em função da temperatura, e assim não foram desenvolvidas nem aplicadas as regressões para estas deflexões a partir de D_{90} . A Tabela 9 apresenta as constantes dos modelos desenvolvidos, para as respectivas deflexões.

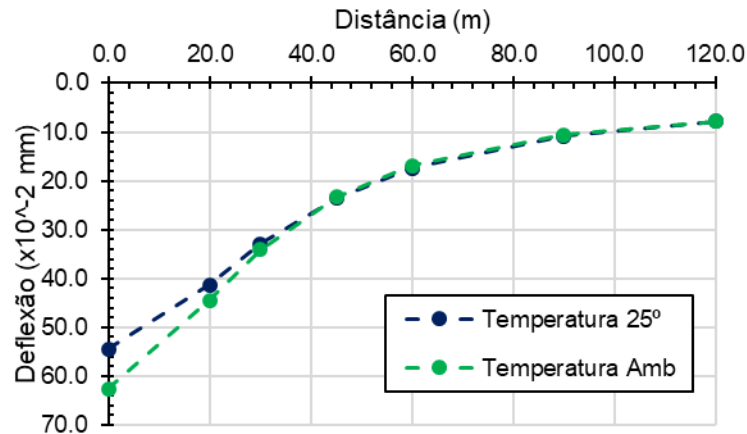
Tabela 9 - Constantes das regressões de correção da temperatura

Deflexão	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
D_0	21.7724	0.8967	-0.3532	-0.1968	-0.1381
D_{20}	9.8754	0.9612	-0.1678	-0.0119	-0.1914
D_{30}	4.5002	0.9308	-0.0957	-0.0272	0.0147
D_{45}	1.8522	0.9603	0.0005	-0.0461	-0.0024
D_{60}	0.7921	0.9533	0.0516	-0.0434	-0.0544

4.4.5. Resultados do processo de correção das deflexões em função das temperaturas do ar e da superfície

Para exemplificação do resultado do processo de correção da deflexão em função das temperaturas do ar e da superfície, foi elaborada uma comparação de uma bacia na temperatura ambiente com a bacia corrigida para a UA48 do DNIT, localizada na BR-282, no município de Joaçada-SC. Pode-se observar na Figura 24 que as deflexões mais afetadas são as D_0 , D_{20} e D_{30} , e que, com o processo adotado, não se provoca uma descontinuidade na bacia corrigida. As deflexões corrigidas se conectam suavemente com as deflexões originais.

Figura 24 - Exemplo de bacia deflectométrica corrigida para UA48-BR-282



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

4.5. Considerações do Capítulo 4

Neste trabalho buscou-se evidenciar a relação da temperatura do ar com aquela dos pavimentos asfálticos, e desta com o comportamento deflectométrico dos pavimentos asfálticos. Os modelos de estimativa de temperatura do ar e da superfície do pavimento podem ser aplicados para viabilizar a utilização de dados deflectométricos que não contenham essas informações. A implementação do modelo de correção das bacias deflectométricas em função da temperatura do ar e do pavimento permite que as bacias de um banco de dados sejam comparáveis entre si. Dessa forma, é possível estabelecer uma mesma referência e padronizar as análises deflectométricas, de comportamento estrutural, de tempo de vida das estruturas, de consumo de fadiga do revestimento asfáltico e das camadas cimentadas. O aprimoramento desse procedimento e a calibração dos modelos podem melhorar as análises de rede de rodas pelas agências reguladoras, pelas concessionárias do setor rodoviário e pelos projetistas.

5. DESEMPENHO ESTRUTURAL UTILIZANDO PARÂMETROS DA BACIA DE DEFLEXÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM DIFERENTES MATERIAIS DE BASE SOB TRÁFEGO PESADO

As deflexões de pavimentos geralmente são obtidas por meio de ensaios de *Falling Weight Deflectometer* (FWD), que fornecem uma avaliação do comportamento estrutural das estruturas rodoviárias e indicam a evolução dos danos no pavimento ao longo do tempo. Este estudo avaliou dados do FWD, módulos retroanalizados e parâmetros da bacia de deflexão (*Deflection Basin Parameters* - DBPs) (Raio de Curvatura - RC, AREA, *Structural Curvature Index* - SCI, *Base Damage Index* - BDI e *Base Curvature Index* - BCI) para analisar o desempenho estrutural de um trecho experimental de pavimento rodoviário com quatro segmentos com estruturas asfálticas diferentes. Os segmentos são compostos por diferentes materiais de camada de base, uma estrutura composta por um pavimento flexível com camada granular de Brita Graduada Simples (BGS), uma estrutura semirrígida com base estabilizada composta por Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), um pavimento reciclado com base asfáltica constituída de material fresado estabilizado com emulsão asfáltica (RAP+Emulsão), e outra estrutura reciclada com base asfáltica constituída de material fresado estabilizado com espuma de asfalto (RAP+Espuma). O monitoramento de campo foi realizado com 8 levantamentos que incluíram a avaliação de defeitos superficiais e medições de deflexão ao longo de três anos de estudo. Os módulos retroanalizados das camadas de revestimento, base e remanescente apresentaram uma correlação satisfatória com os DBPs avaliados.

5.1. Introdução

O comportamento estrutural do pavimento é frequentemente avaliado por meio de ensaios não destrutivos, comumente realizado usando o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). A deflexão do pavimento ocorre quando a estrutura é submetida à aplicação de carga e a sua variação é dependente da rigidez e espessura das camadas do pavimento. Agências reguladoras rodoviárias e projetistas de pavimentos geralmente consideram apenas os valores máximos de deflexão (D0) para fins de uma análise

simples da capacidade estrutural do pavimento, a fim de: (i) atender a critérios de projeto pré-estabelecidos, que normalmente são observados nos requisitos de métodos de projeto, e (ii) determinar a vida útil remanescente das estruturas de pavimento (Gedafa *et al.*, 2010; SANRAL, 2014) nos níveis de rede e de projeto. No entanto, esse parâmetro é um indicador da rigidez do pavimento, em vez de um índice de camada. Alguns autores o utilizaram apenas para identificar problemas de drenagem (Saleh, 2016a, 2016b) e analisar o módulo equivalente dos materiais (Isola *et al.*, 2013; Pérez *et al.*, 2013), uma vez que pode ser uma boa indicação de rigidez para todas as camadas subjacentes.

Estudos têm mostrado que uma análise completa requer a avaliação de toda a bacia de deflexão. Para esse fim, mais de um valor da bacia de deflexão deve ser utilizado, e o mais utilizado para compreender o comportamento do pavimento é a utilização dos parâmetros da bacia de deflexão (*Deflection Basin Parameters* - DBPs), que se baseiam em relações matemáticas entre os valores de deflexão e descrevem a forma da bacia de deflexão. A principal vantagem do cálculo dos DBPs é que eles são relações matemáticas simples e não exigem muitos recursos, tais como: (i) *software* complexo; (ii) processamento computacional demorado; e (iii) sondagens pontuais para determinação dos materiais e das espessuras das camadas, resultando assim em uma fácil aplicação em análises em nível de rede.

5.2. Parâmetro da Bacia de Deflexão (DBP) para análise de pavimentos

Nos últimos anos, muitos tipos de DBPs têm sido estudados, e muitas correlações foram propostas usando diferentes dispositivos de medição e equações (Horak, 1987). Os DBPs mais comumente aplicados são: (i) raio de curvatura (*Radius Curvature* - RC), Equação 6, (ii) AREA, Equação 7, (iii) Índice de Curvatura da Superfície (*Surface Curvature Index* - SCI), Equação 8, (iv) Índice de Danos na Base (*Base Damage Index* - BDI), Equação 9, e (v) Índice de Curvatura da Base (*Base Curvature Index* - BCI), Equação 10. Todas essas equações estão resumidas na Tabela 10 e os parâmetros são mostrados na Figura 25.

Tabela 10 - Resumo dos parâmetros de deflexão

Raio de Curvatura (RC)	$RC = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})}$	Equação 6	(Dehlen, 1962)
AREA	$AREA = 10 \times \left(1 + 1,5 \times \frac{D_{20}}{D_0} + 1,25 \times \frac{D_{30}}{D_0} + 1,5 \times \frac{D_{45}}{D_0} + 2,25 \times \frac{D_{60}}{D_0} + 1,5 \frac{D_{90}}{D_0} \right)$	Equação 7	(Hoffman e Thompson, 1981)
Índice de Curvatura da Superfície (SCI)	$SCI = D_0 - D_{30}$	Equação 8	(Anderson, 1977)
Índice de Danos na Base (BDI)	$BDI = D_{30} - D_{60}$	Equação 9	(Kilareski e Anani, 1982)
Índice de Curvatura da Base (BCI)	$BCI = D_{60} - D_{90}$	Equação 10	(Kilareski e Anani, 1982)

onde D_0 : deflexão no centro do prato de aplicação da carga [10^{-2} mm];

D_{20} : deflexão a 200 mm do centro do prato de aplicação da carga [10^{-2} mm];

D_{25} : deflexão a 250 mm do centro do prato de aplicação da carga [10^{-2} mm];

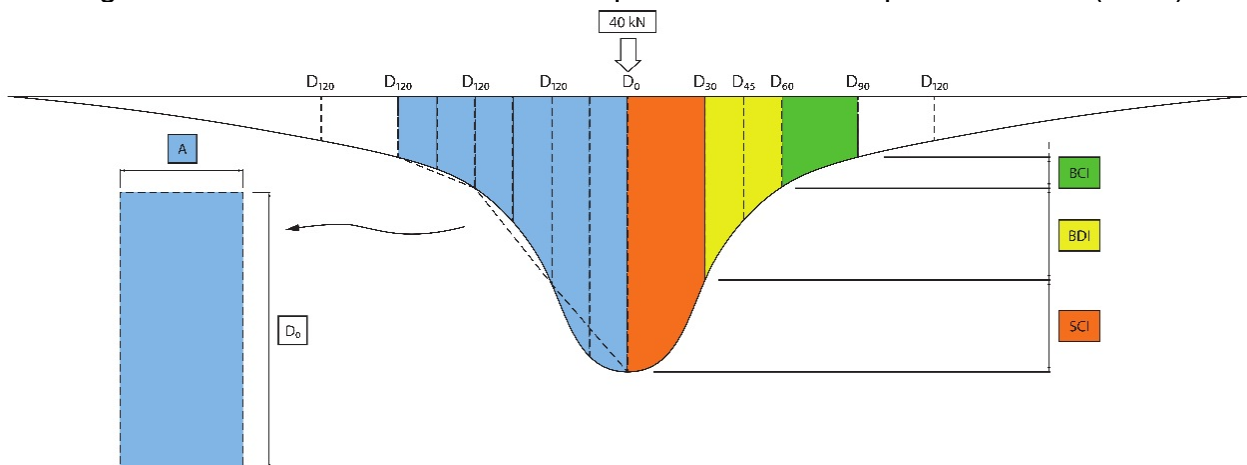
D_{30} : deflexão a 300 mm do centro do prato de aplicação da carga [10^{-2} mm];

D_{45} : deflexão a 450 mm do centro do prato de aplicação da carga [10^{-2} mm];

D_{60} : deflexão a 600 mm do centro do prato de aplicação da carga [10^{-2} mm];

D_{90} : deflexão a 900 mm do centro do prato de aplicação da carga [10^{-2} mm];

Figura 25 - Bacia de deflexão e os respectivos DBPs adaptado de Ferri (2013)



Fonte: Adaptado de Ferri (2013)

5.2.1. Raio de Curvatura – RC

O conceito de raio de curvatura (RC) foi desenvolvido por Dehlen (1962) e tem sido aplicado em muitos estudos. Jung (1988) utilizou RC para estabelecer uma correlação com a deformação à tração na parte inferior da camada superficial de pavimentos flexíveis, considerando resultados obtidos a partir de *softwares* de análise estrutural, como Chevron e Elsym5. Horak (1987) demonstrou que o parâmetro RC é influenciado pelo acúmulo de tráfego, o que causa a diminuição de seu valor.

Além disso, o RC também foi utilizado: (i) para aprimorar a correlação entre deflexões medidas e calculadas após o processo de retroanálise (Mehta e Roque, 2003); (ii) para estimar a deformação na fibra inferior de um pavimento flexível (Primusz *et al.*, 2015); (iii) para indicar a presença de defeitos, como uma trinca interna na estrutura do pavimento (Simonin *et al.*, 2015); e (iv) para acompanhar o processo de cura em uma camada de base reciclado estabilizada com asfalto (Guatimosim *et al.*, 2017). O valor de RC é influenciado pela variação de temperatura na estrutura do pavimento da mesma maneira que as deflexões e a bacia de deflexão (Szentpéteri, 2013).

5.2.2. AREA

O parâmetro AREA foi proposto por Hoffman e Thompson (1981) como um bom indicador para caracterizar toda a estrutura do pavimento. O parâmetro está relacionado à razão entre o módulo da superfície e o módulo da base (E_1/E_2). O parâmetro AREA pode ser utilizado para avaliar a condição estrutural do pavimento - flexível ou rígido (Loganathan *et al.*, 2019), e para determinar o número estrutural efetivo - S_{Neff} (Livneh, 2010), conforme também é largamente empregado pelo manual de dimensionamento da AASHTO (1993).

O AREA tem sido aplicado para analisar estruturas de pavimentos rígidos (Hall *et al.*, 1997; Long e Shatnawi, 2000), utilizando o parâmetro AREA para estimar os módulos de reação ou valor k no topo da camada do subleito e compará-lo com os valores do módulo de resiliência retroanalisado.

5.2.3. SCI, BDI e BCI

O parâmetro SCI foi desenvolvido por Anderson (1977), e os parâmetros BDI e BCI foram desenvolvidos por Kilareski e Anani (1982). Em pesquisa realizada por Horak (1987), diferentes tipos de pavimentos na África do Sul foram avaliados por meio do *Road Surface Deflectometer* (RSD), juntamente com resultados de *Heavy Vehicle Simulators* (HVSs), sendo que os resultados foram comparados aos valores de DBPs devido ao tráfego. Os resultados mostraram como os DBPs mudam com o acúmulo de tráfego, entretanto, apenas o SCI, BDI e BCI mostraram uma relação entre a rigidez da camada e o valor do parâmetro.

Para melhorar o processo de retroanálise, Lee *et al.* (1998) propuseram o uso do BDI para determinar o módulo do subleito. Os autores também recomendaram o uso dos valores de deflexão máxima e do parâmetro AREA para estimar o módulo da camada superficial. Esse processo foi utilizado para desenvolver uma rede neural artificial para aprimorar o procedimento de retroanálise, e forneceu boas estimativas para o módulo do subleito.

Os estudos desenvolvidos por Kim *et al.* (2000) e Park *et al.* (2005) utilizaram o Abaqus e o Datapave 2.0 para gerar um banco de dados sistemático de pavimentos, que foi usado no desenvolvimento de modelos de resposta de pavimentos. Esses modelos estabeleceram correlações entre os DBPs (SCI, BDI e BCI) e as deformações de tração na fibra inferior da camada de concreto asfáltico para prever a resistência a trincas por fadiga e deformação permanente.

Thyagarajan *et al.* (2011) aplicaram o parâmetro SCI para estimar a deformação de tração na camada asfáltica e encontraram uma forte correlação entre os valores medidos em uma seção de teste. Salour e Erlingsson (2013) demonstraram que os parâmetros SCI, BDI e BCI são influenciados por mudanças no comportamento mecânico do subleito. Têm sido verificadas mudanças nos parâmetros que ocorrem entre os períodos de inverno e primavera, já que esses parâmetros foram substancialmente influenciados pelo período de degelo do subleito. Os DBPs (D0, SCI e

BDI) também foram usados para estabelecer uma relação entre as bacias de deflexão dos dados do FWD e o *Traffic Speed Deflectometer* (TSD) (S. W. Katicha *et al.*, 2014; Muller e Roberts, 2013).

Park *et al.* (2013) utilizaram o banco de dados *Long Term Pavement Performance* (LTPP) para estudar correlações entre os parâmetros BDI e BCI e o comportamento do subleito. Neste estudo, apenas o BCI foi um bom parâmetro para analisar o subleito, enquanto os modelos que incluíam o BDI não foram bons indicadores para avaliar as características de rigidez do subleito. O SCI e o BDI foram usados por Isola *et al.* (2013) para analisar a influência da temperatura em misturas recicladas com cimento. Os valores foram semelhantes aos das misturas que não continham conteúdo de RAP, o que foi explicado pelos autores devido à presença de cimento.

Lopes *et al.* (2013) consideraram os DBPs em um estudo paramétrico de pavimentos flexíveis para propor correlações com modelos simplificados para estimar a vida útil restante das estruturas de pavimentos. Guatimosim *et al.* (2017) analisaram o processo de cura de uma camada de base com materiais reciclados em uma seção de teste experimental, e os autores mostraram que o aumento de rigidez pode ser indicado pela evolução dos DBPs. Santos *et al.* (2011) estabeleceram uma correlação entre o número estrutural modificado (SNC) e os parâmetros AREA e RC para pavimentos flexíveis. Ferri *et al.* (2011) desenvolveram equações usando RC e BDI para aprimorar os processos de retroanálise para pavimentos semirrígidos.

SANRAL (2014) recomenda os parâmetros RC, SCI, BDI e BCI para avaliar pavimentos, utilizando os critérios desenvolvidos por Horak (2008), nos quais o pavimento é classificado com base no *benchmarking* de pavimentos da África do Sul. A classificação sugere categorias para avaliar o pavimento de acordo com o tipo de base do pavimento e os valores dos DBPs. Chang *et al.* (2014) aplicaram o sistema de informações de gerenciamento de pavimentos DPBs no TxDOT para apoiar estratégias de manutenção. O WSDOT (2005) utilizou o AREA para avaliar a condição do pavimento e apresentar valores para classificar os pavimentos. Os pavimentos de

asfalto podem ser classificados em diferentes categorias: (i) Pavimento Asfáltico Espesso, (ii) Pavimento Asfáltico Delgado; e (iii) Pavimento Flexível Fraco. A classificação não se refere apenas à espessura das camadas, mas à resposta estrutural completa do pavimento.

Os DBPs são ferramentas poderosas para uma análise abrangente dos dados do FWD. Em geral, os valores dos DBPs são obtidos para facilitar análises estruturais e proporcionar uma compreensão melhor do comportamento do pavimento. Estudos têm aplicado os DBPs para entender o comportamento estrutural de pavimentos em nível de rede (Kim *et al.*, 2000; Loganathan *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2005; Rabbi e Mishra, 2021; Saleh, 2016a, 2016b). Portanto, o principal objetivo deste capítulo é estabelecer correlações entre DBPs e o desempenho estrutural do pavimento usando um banco de dados de três anos proveniente do monitoramento de um trecho experimental com diferentes tipos de estruturas de pavimento asfáltico.

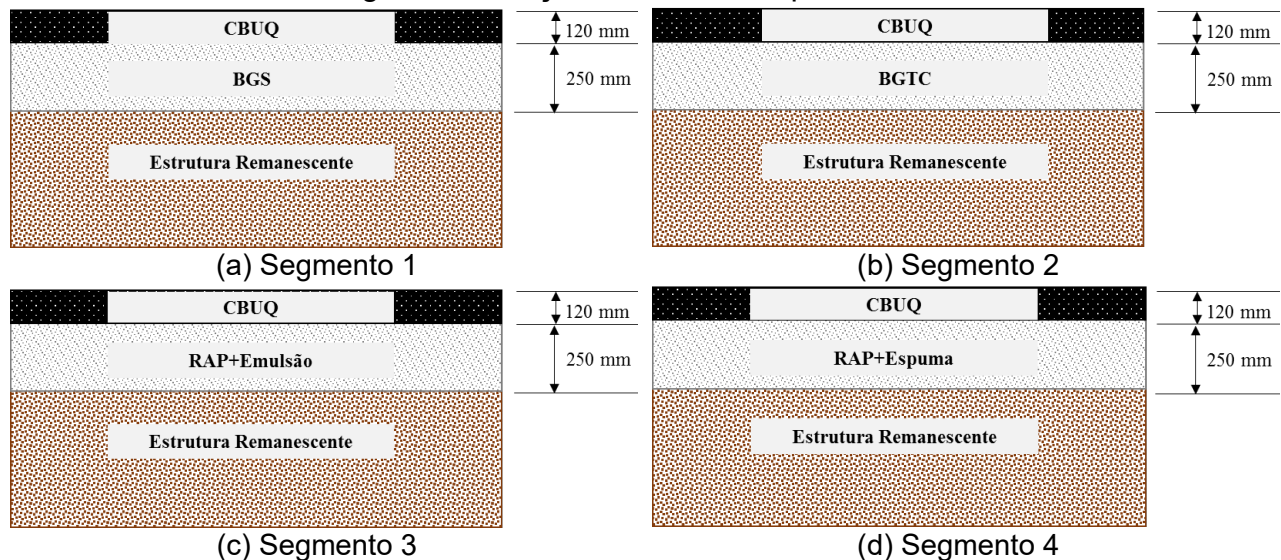
Este estudo avalia dados do FWD, parâmetros da bacia de deflexão (DBPs) (Raio de Curvatura - RC, AREA, Índice de Curvatura da Superfície - SCI, Índice de Danos na Base - BDI, e Índice de Curvatura da Base - BCI) e módulos retroanalizados para analisar o desempenho estrutural de trecho experimental rodoviário com quatro segmentos de pavimento asfáltico diferentes, que variavam apenas no material da camada de base: (i) granular; (ii) granular tratada com cimento; (iii) camada de mistura asfáltica reciclada a frio estabilizada com emulsão asfáltica; e (iv) camada de mistura asfáltica reciclada a frio estabilizada com espuma de asfalto. Nessas quatro estruturas de pavimentos asfálticos analisadas, apenas o material de base foi alterado, mantendo-se espessuras similares, as demais características e espessuras das demais camadas foram todas mantidas.

5.3. Trecho Experimental

Este estudo foi conduzido com base nos dados coletados no trecho experimental construído em dezembro de 2014 na Rodovia Fernão Dias (BR-381), que conecta duas

grandes áreas metropolitanas no Brasil: São Paulo e Belo Horizonte. O trecho possui quatro segmentos de 100 metros, e a estrutura do pavimento é composta por uma camada de revestimento asfáltico com 120 mm de espessura (CBUQ ou CA cujo diâmetro nominal é de 19,0 mm, construído em 2 camadas iguais de 60mm cada), uma camada de base com 250 mm de espessura (quatro materiais diferentes em cada segmento, construídas em camada única) e uma estrutura remanescente do pavimento existente, constituído de solo. O Segmento 1 foi executado com camada granular de Brita Graduada Simples (BGS), o Segmento 2 com base estabilizada composta por Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), o Segmento 3 com base asfáltica constituída de material fresado estabilizado com emulsão asfáltica (RAP+Emulsão), e o Segmento 4 com base asfáltica constituída de material fresado estabilizado com espuma de asfalto (RAP+Espuma). O trecho experimental foi construído conforme representado na Figura 26, sobre uma infraestrutura remanescente obtida após a fresagem da parte superior do pavimento de asfalto antigo e deteriorado. Os quatro segmentos (com diferentes camadas de base) não foram dimensionados para o mesmo tráfego rodoviário (número N), pois o objetivo era verificar a diferença de desempenho (anos até o aparecimento dos principais defeitos - trincas por fadiga e deformação permanente) quando apenas o material da camada de base era alterado.

Figura 26 - Seções do trecho experimental



Fonte: Adaptado de Andrade (2023)

A estrutura remanescente do pavimento antigo é homogênea, apresenta as mesmas características de perfil ao longo da faixa de tráfego fresada e é constituída por solo. Testes com *Light Weight Deflectometer* (LWD) foram realizados nessa camada e os resultados mostraram uma condição estrutural globalmente homogênea do ponto de vista da engenharia de pavimentação (valor médio de 118 MPa e desvio padrão de 47 MPa). Além disso, a infraestrutura remanescente não apresentava nenhum problema de drenagem na inspeção visual.

Os segmentos do trecho experimental foram projetados considerando a mesma espessura das camadas, com diferentes períodos de projeto para cada estrutura. Como a espessura disponível para fresagem era a mesma ao longo de toda a seção de teste, não foi possível alterar a espessura das novas bases, apenas o material. Dada as condições de campo, a pesquisa visou ter estruturas diferentes do ponto de vista de resposta mecânica para estudar a melhor solução para tráfego muito pesado, com maior benefício em termos de investimentos e durabilidade. As obras foram executadas na faixa de tráfego pesado, em pista com duas faixas de tráfego, no sentido Belo Horizonte - São Paulo, entre os km 948,800 e 949,200, nas proximidades da cidade de Extrema. A espessura e o material da mistura asfáltica utilizada para a camada revestimento foram as mesmas para todos os segmentos, e foram executadas todas no mesmo dia, nos quatro segmentos, sem emendas entre os segmentos.

5.3.1. Monitoramento de tráfego

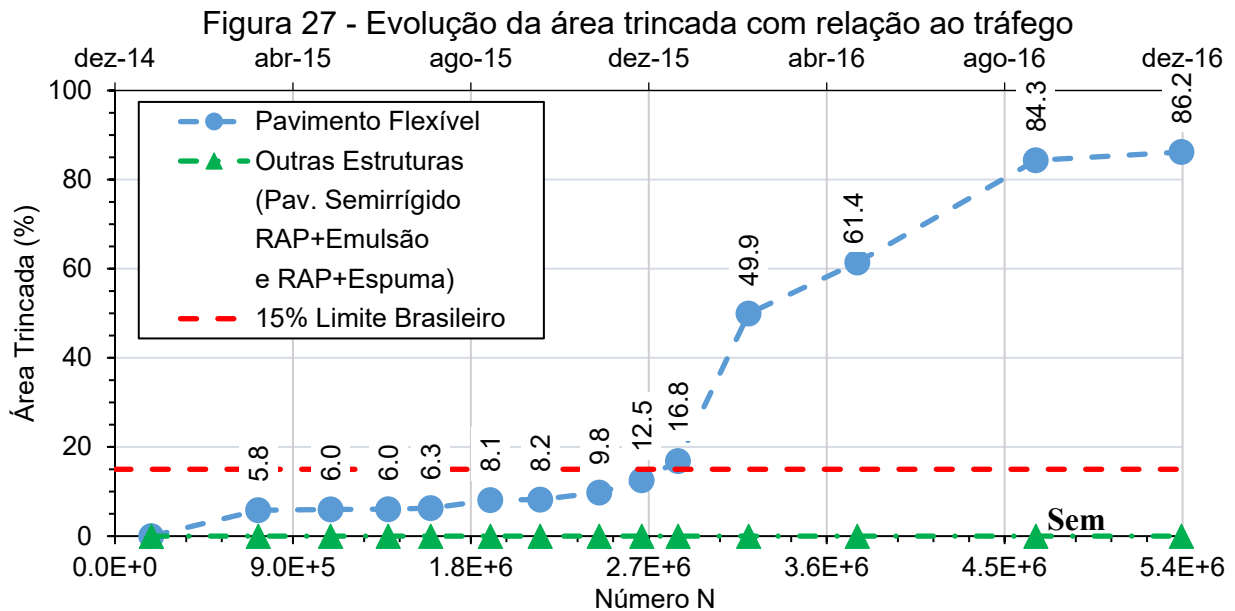
O monitoramento de tráfego foi realizado por meio de um sistema de pesagem em movimento (WIM) instalado a 50 metros anterior aos segmentos do trecho experimental, cobrindo a pesagem nas duas faixas de tráfego, de maneira segregada. O sistema foi capaz de registrar o número de caminhões, número de eixos e seus pesos, por faixa de tráfego. Esses dados foram usados para calcular o número real de carga equivalente de eixo simples (ESALs) com base nos fatores de equivalência de carga da AASHTO. O sistema registrou uma média de $2,09 \times 10^5$ ESALs por mês. Mais informações sobre o sistema WIM, sobre a distribuição de tráfego, bem como sobre a distribuição de carga por eixo de cada veículo, podem ser encontradas em Bosso *et al.* (2016).

5.3.2. Levantamento de defeitos

O trecho experimental foi monitorado por 36 meses por meio do levantamento visual contínuo realizado *in loco*. O levantamento seguiu os defeitos descritos pela norma DNIT 005-2003 - TER. Nesse período, observou-se a incidência de trincas interligadas tipo FC-2, o que indica a ocorrência do processo de trincamento por fadiga. As medições foram realizadas calculando-se a proporção entre a área total trincada e a área total do segmento do pavimento.

Embora o mesmo revestimento asfáltico tenha sido executado nos 4 segmentos do trecho experimental, o comportamento estrutural foi distinto para cada um dos segmentos, o que teve influência direta no desempenho com relação à fadiga do revestimento asfáltico. O pavimento flexível (segmento 1) teve um crescimento acelerado de defeitos, conforme mostrado na Figura 27, que apresenta a relação entre a área trincada e o número acumulado de ESALs. A área trincada se refere à área real de trincamento seguindo metodologia de contabilização da DNIT 007-2003 – PRO, mas realizada de forma contínua em toda a extensão avaliada, obtendo-se a área trincada total e não à frequência de trincamento como preconizado no *software* MeDiNa². Por outro lado, as demais estruturas permaneceram sem a ocorrência de trincamento durante os 36 meses de monitoramento.

² O *software* MeDiNa foi calibrado com dados obtidos por meio do método de levantamento de área trincada da Rede Temática de Asfaltos, presente em Nascimento (2015) e Fritzen (2016), e que veio a ser normatizado pela DNIT 433-2021 - PRO. Essa norma realiza o levantamento de frequência de trincamento, que é obtida pela razão entre o número de células trincadas e o número total de células avaliadas. Dessa forma, não se trata de área trincada propriamente dita.



Durante o período de monitoramento, a área trincada no segmento 1 (pavimento flexível) atingiu o limite brasileiro de 15%, comumente exigido pelos contratos de concessão (ANTT, 2008; ARTESP, 2022). Após 24 meses, o segmento 1 alcançou 86,2% da área trincada, sendo reconstruído. Por essa razão, os resultados do segmento 1 são mostrados apenas até o 24º mês, enquanto para os outros segmentos foram analisados até o 36º mês. Mais informações sobre a observação e previsão do processo de deterioração podem ser encontradas em Bessa *et al.* (2023).

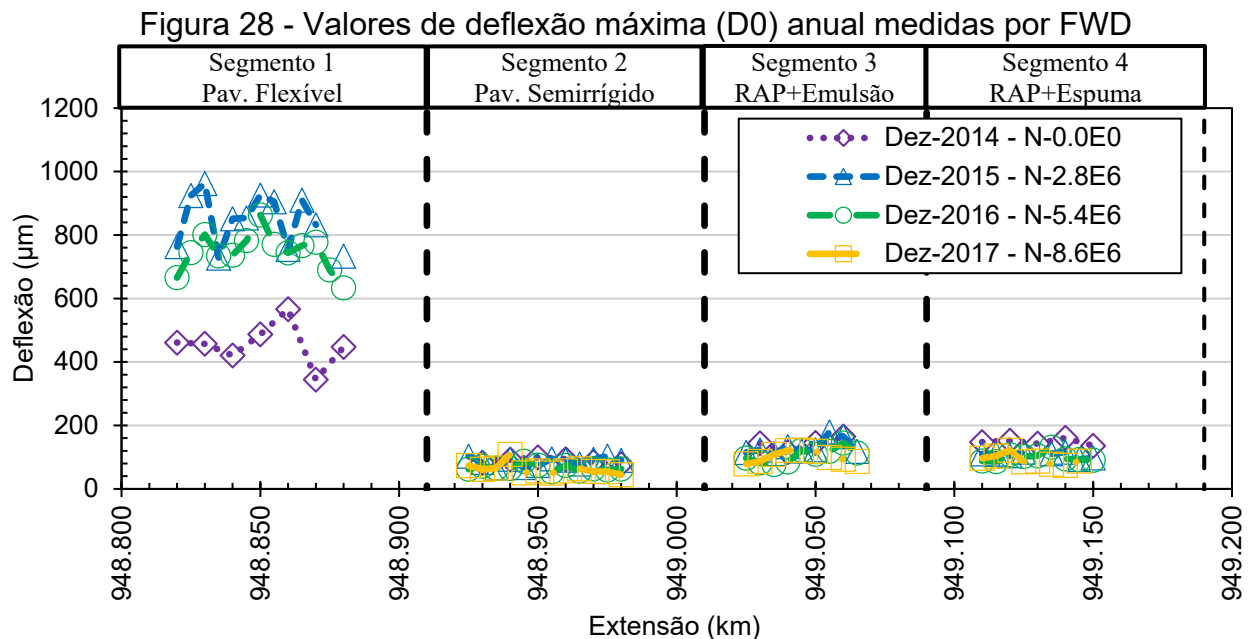
5.3.3. Avaliação estrutural

A avaliação estrutural foi feita com ensaios de FWD realizados a cada 5,0 metros, nas trilhas de roda, ao longo dos quatro segmentos, utilizando a carga de 40 k e prato com diâmetro de 200mm. Foi adotado o manual FWD do *Long-Term Pavement Performance* - LTPP (FHWA, 2000), em acordo com a norma DNER-PRO 273/1996. O equipamento utilizado foi um *Dynatest 8000 Falling Weight Deflectometer*.

Um total de 8 campanhas de FWD foi realizado no período de 36 meses. A primeira campanha foi realizada 7 dias após a construção do segmento de BGTC, 5 dias da conclusão do segmento de camada reciclada estabilizada com emulsão asfáltica e 4

dias do fim da execução do segmento composto pela camada reciclada estabilizada com espuma de asfalto. No entanto, as estruturas foram abertas ao tráfego ao mesmo tempo. Esse período foi o adequado para que a camada cimentada alcançasse o valor adequado de rigidez para a abertura ao tráfego da rodovia.

Os levantamentos seguintes foram realizados nos períodos de 3, 6, 9, 12, 15, 24 e 36 meses após a construção. A Figura 28 mostra os valores anuais de deflexão máxima (D0) para a trilha de roda externa. Além disso, o teste de Grubbs (1969) foi utilizado com o objetivo de identificar e excluir os *outliers*. Para eliminar possíveis efeitos de borda, os resultados de deflexão obtidos na zona de transição entre os diferentes segmentos não foram considerados nesta análise.



Fonte: Adaptado de Andrade (2023)

Os resultados de deflexão do segmento de pavimento flexível no primeiro levantamento são habituais para essa estrutura, e apresentaram um aumento progressivo até 12 meses. Embora o valor de D0 corresponda à evolução do trincamento por fadiga do segmento 1 após o primeiro ano, entre o levantamento de “Dez-2015” e “Dez-2016” não houve diferença significativa para esse parâmetro até a idade de 24 meses. A análise somente do D0 pode não refletir todos os mecanismos que estão ocorrendo na

estrutura, como a variação da temperatura ao longo da espessura do revestimento asfáltico e a ocorrência da tensão de sucção na infraestrutura de solo remanescente.

O valor de D0 da estrutura semirrígida é semelhante ao valor relatado por Pérez *et al.* (2013) em um estudo realizado na Espanha, em que uma mistura de BGTC também foi empregada como camada de base. Os níveis de deflexão dos segmentos reciclados indicaram o fenômeno de cura, resultando em valores decrescentes de D0 com o tempo e o tráfego durante o primeiro ano de monitoramento, como também foi encontrado anteriormente por Godenzoni *et al.* (2018); Guatimosim *et al.* (2017 e 2018) e Loizos e Papavasiliou (2006).

5.4. Processo de Retroanálise

5.4.1. Correção da temperatura

Os ensaios de FWD foram realizados ao longo de 36 meses, dessa forma, foram realizados em diferentes condições climáticas. Considerando que as misturas asfálticas são materiais dependentes da temperatura, seus valores de tensão, deformação e deflexão mudam com a temperatura na superfície, mas também sofrem influência das diferentes temperaturas ao longo da profundidade, denominadas gradiente de temperatura. Essa dependência de temperatura pode causar uma variação de quase 3,5 vezes nos valores de D0, de acordo com a AASHTO (1993). Durante a pesquisa, foi observada uma variação de até 15°C na temperatura da camada superficial em uma mesma campanha de levantamento.

A correção de temperatura pode ser realizada aplicando-se fatores de correção (Akbarzadeh *et al.*, 2012; Chang *et al.*, 2002; Simonin *et al.*, 2015). De acordo com Chang *et al.* (2002), os modelos de correção apresentam um ponto de imprecisão para temperaturas superiores a 33°C, acima do qual não é confiável corrigir os valores de deflexão por meio da variação de temperatura. Além disso, Simonin *et al.* (2015) afirmam que é necessário ter cuidado quando um pavimento asfáltico apresenta altos gradientes de temperatura. Climas tropicais e subtropicais normalmente estão expostos

a altas temperaturas, mas não constantes ao longo da estação e de um ano para outro (considerando-se a mesma estação). A faixa de temperatura entre as campanhas variou de 26°C em dezembro de 2016 a 61°C em dezembro de 2017 na superfície do pavimento. A Tabela 11 mostra a faixa de temperatura na superfície do asfalto para cada segmento da seção de teste quando o ensaio de FWD foi realizado.

Tabela 11 - Temperaturas na superfície dos pavimentos medidos ao longo do período de levantamento de FWD

Data	Segmento	Segmento 1 - Pav. Flexível (°C)	Segmento 2 - Pav. Semirrígido (°C)	Segmento 3 - RAP+Emulsão (°C)	Segmento 4 - RAP+Espuma (°C)
Dez - 14		33-35	34-35	35-36	36-38
Mar - 14		37-38	36-38	35-37	36-38
Jun - 15		38-41	45-47	37-46	43-47
Set - 15		53-58	43-56	42-52	54-52
Dez - 15		34-35	35-35	35-35	36-37
Mar - 16		48-49	49-50	41-48	50-52
Dez - 16		26-29	31-34	34-34	34-37
Dez - 17		-	38-39	39-40	41-42

Para se considerar a variação de temperatura, a correção das bacias de deflexão em função da temperatura foi realizada da seguinte forma: (i) realização da retroanálise na temperatura original (em que se encontrava o pavimento) usando o *software* BAKFAA 2.0 (minimizando a raiz quadrada média, RMS, entre os valores reais de deflexão e os valores simulados de deflexão); (ii) cálculo das temperaturas em diferentes profundidades ao longo da camada de revestimento usando a equação SHRP (Mohseni, 1998), dividindo a camada superficial em duas subcamadas, de modo que as temperaturas no topo, no meio e na parte inferior da camada de revestimento fossem calculadas; (iii) correção dos módulos retroanalizados para uma temperatura de referência usando as três temperaturas, aplicando a equação apresentada por Chen *et al.* (2000), adotada pelo TxDOT (Fernando e Liu, 2001), sendo que essa equação foi aplicada para converter os módulos retroanalizados na temperatura original (item (i)) para a temperatura de referência de 25°C; e (iv) simulação das bacias de deflexão na temperatura de referência no *software* BAFFAA 2.0, usando os módulos retroanalizados corrigidos da camada superficial, sendo que esse processo apresentou uma precisão

satisfatória para temperaturas de teste (originais) inferiores a 50°C na superfície do pavimento. Com esse método, é possível obter as bacias de deflexão em temperatura de referência e poder não apenas comparar as bacias de deflexão de diferentes segmentos para comparação em um determinado tempo, mas também observar a evolução da bacia de deflexão ao longo do tempo, em diferentes estações do ano e em diferentes anos, de um mesmo segmento, e, assim, analisar a progressão de danos e suas consequências na capacidade estrutural dos pavimentos que foram solicitados pelo tráfego e pelas ações climáticas.

5.4.2. Resultados da retroanálise

Todas as deflexões da bacia de deflexão foram utilizadas na retroanálise (realizada por meio do *software* BAKFAA 2.0) para estimar a rigidez das seguintes camadas: (i) revestimento asfáltico; (ii) base; e (iii) infraestrutura remanescente, para cada um dos segmentos estudados. Foram considerados os procedimentos de retroanálise para camadas elásticas conforme apresentados pela Administração Federal de Aviação (FAA, 2011).

A retroanálise da camada de revestimento asfáltico foi feita após a correção de temperatura para cada pesquisa de teste e cada segmento. O módulo médio observado para a camada não danificada foi de 5.000 MPa, com pequena variação ao longo do tempo devido à imprecisão das equações usadas para corrigir o efeito da temperatura. Para a estrutura flexível, que apresentou processo de fadiga do revestimento asfáltico, o módulo retroanalizado diminuiu com o tempo e o tráfego, reduzindo de 5.000 MPa no primeiro mês para 1.400 MPa após $5,4 \times 10^6$ ESALs acumulados em dois anos. A queda observada nos valores de módulos do revestimento asfáltico deve-se a danos acumulados nessa camada asfáltica, fenômeno também observado por Mehta e Roque (2003), no qual o módulo do revestimento foi 2,5 vezes menor na seção deteriorada por trincamento por fadiga em comparação com a seção não deteriorada.

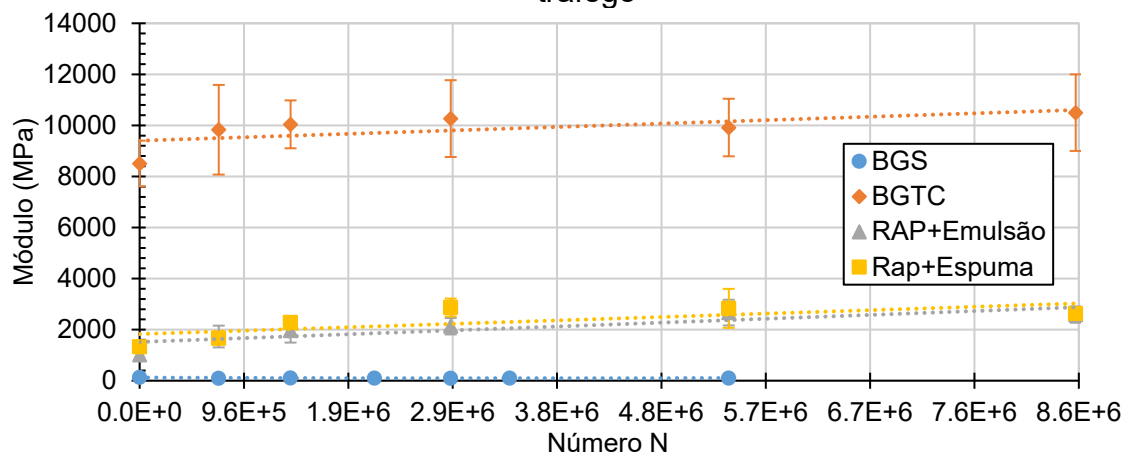
A Figura 29 mostra os resultados médios e as barras de erro (desvio padrão) dos módulos retroanalizados das camadas de base. Como a BGS (segmento 1) é um

material granular e seu comportamento é dependente do confinamento, o módulo retroanalizado para essa camada foi baixo (115 MPa no primeiro mês). Deve-se observar a dificuldade construtiva da BGS, com deficiência no processo de compactação, o que resultou em baixo módulo dessa camada.

O módulo retroanalizado médio para a camada de BGTC (segmento 2) foi de 10.000 MPa, e essa camada não apresentou danos durante as campanhas de monitoramento. Aqui observa-se que a BGTC foi dosada com 4% de cimento Portland CII 32-F. Esses valores são semelhantes ao que foi encontrado em trabalhos anteriores em análises de laboratório (Grilli *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017) e em duas seções de rodovias (Zang *et al.*, 2018).

O módulo retroanalizado da camada reciclada com RAP estabilizado com emulsão asfáltica (segmento 3) foi próximo ao valor encontrado por Mehranfar e Modarres (2018) para camadas de material estabilizado por betume (BSM). O aumento no módulo da camada de base é devido ao processo de cura, evidenciado pelo aumento do módulo retroanalizado da camada ao longo do tempo. A mesma tendência foi observada para a camada de RAP com espuma (segmento 4), já que o fenômeno de cura é tipicamente observado também para esse material (Godenzoni *et al.*, 2018; Guatimosim *et al.*, 2017, 2018; Mehranfar e Modarres, 2018; Papavasiliou e Loizos, 2013). A variação observada no módulo retroanalizado ao longo do tempo é atribuída à imprecisão das equações usadas para corrigir o efeito da temperatura, especialmente para temperaturas mais altas (Akbarzadeh *et al.*, 2012; Cerni *et al.*, 2012; Simonin *et al.*, 2015).

Figura 29 - Evolução dos módulos de resiliência das camadas de base com o tempo e tráfego



Fonte: Adaptado de Andrade (2023)

O módulo da infraestrutura remanescente obtido no trecho experimental variou de 150 MPa a 400 MPa, embora fosse composta pelo mesmo material ao longo de todos os segmentos. O módulo no segmento flexível foi de 150 MPa, enquanto nas outras estruturas o valor médio foi de 400 MPa. Isso pode estar relacionado ao tipo de solo argiloso do subleito, que possui o comportamento não-linear com relação às tensões desvio (Saleh, 2019). Os níveis de tensões verticais devido ao tráfego, ocorrentes no subleito são diferentes a depender do tipo de estrutura de pavimento assente sobre o subleito, sendo que os valores dessas tensões no subleito em estrutura de pavimentos semirrígida são inferiores em comparação com as tensões no subleito em estrutura de pavimentos flexível, o que gera, neste último caso, menores módulos, embora a natureza do material do subleito seja a mesma.

5.4.3. Análise estatística de deflexão

A Análise de Variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar estatisticamente os dados ao longo do tempo. Primeiramente, a análise estatística foi realizada para os dados dos módulos retroanalizados. A ANOVA foi conduzida com um intervalo de confiança de 95%, então, se o P-Valor for menor que o valor crítico de P-Teste ($\alpha=0,05$), a variável é considerada significativa. Os resultados da ANOVA estão apresentadas na Tabela 12, com os valores de F e o P-Valor. P-Valor menor que α e o valor de F maior que o valor

F Críticos demonstram que os módulos retroanalizados variaram significativamente ao longo do tempo.

Tabela 12 - Análise de Variância ANOVA para os dados de módulos retroanalizados

Segmento	Camada	F	F Crítico	P-Valor	P-Teste - α
Segmento 1 Pav. Flexível	Revestimento	17.45	2.85	9.2E-06	0.05
	Base	1.59	2.85	2.2E-01	0.05
	Remanescente	4.07	2.85	1.4E-02	0.05
Segmento 2 Pav. Semirrígido	Revestimento	0.22	3.48	9.2E-01	0.05
	Base	1.23	3.48	3.6E-01	0.05
	Remanescente	3.42	3.48	5.2E-02	0.05
Segmento 3 RAP+Emulsão	Revestimento	0.14	3.11	9.8E-01	0.05
	Base	7.32	3.11	2.3E-03	0.05
	Remanescente	0.34	3.11	8.8E-01	0.05
Segmento 4 RAP+Espuma	Revestimento	0.60	3.11	7.0E-01	0.05
	Base	8.46	3.11	1.2E-03	0.05
	Remanescente	3.02	3.11	5.4E-02	0.05

As análises estatísticas dos módulos das camadas de revestimento asfáltico demonstraram que houve variação apenas para o segmento 1, devido à base granular de baixo módulo e elevado volume de tráfego.

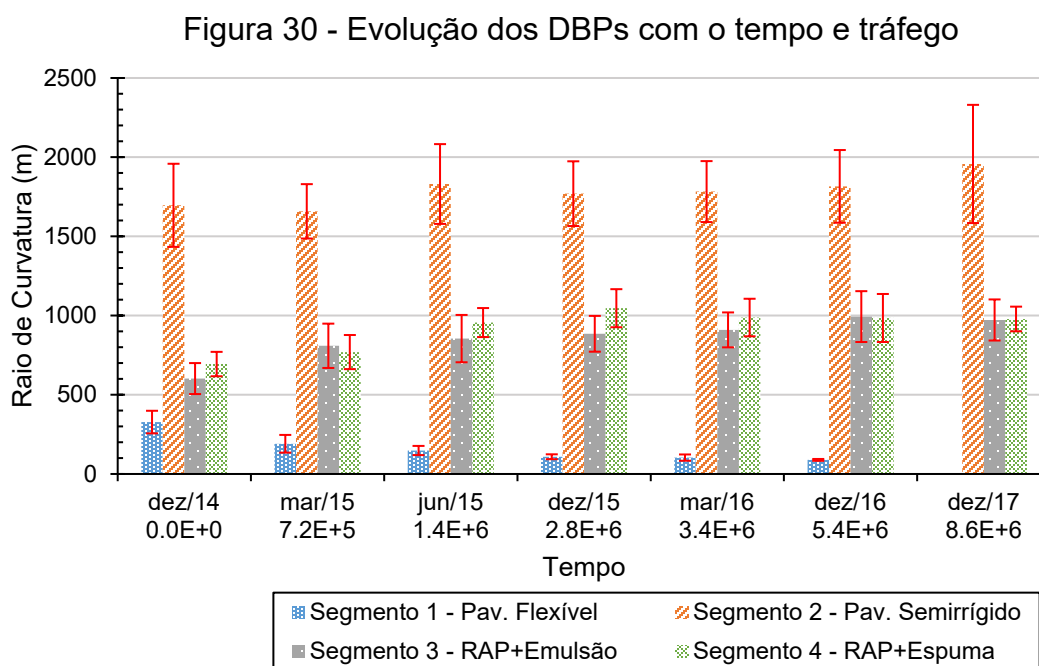
Os módulos das camadas de base, tanto granular (BGS) como tratados com cimento (BGTC) não apresentaram variação ao longo do tempo, mesmo que a BGTC tenha sofrido uma leve variação positiva com a cura, porém o tempo de cura desse tipo de base é reduzido, explicando que a análise estatística não aponta, portanto, como significativa essa variação.

A mudança dos módulos devido ao processo de cura nas camadas de RAP com Emulsão e com Espuma é evidenciado pelo valor de p menor que 0,05 e pelo F maior que o F crítico. A análise estatística comprova o aumento de módulo dessas camadas ao longo de um período de cerca de um ano ou até mais, evidenciando o longo prazo de cura das mesmas.

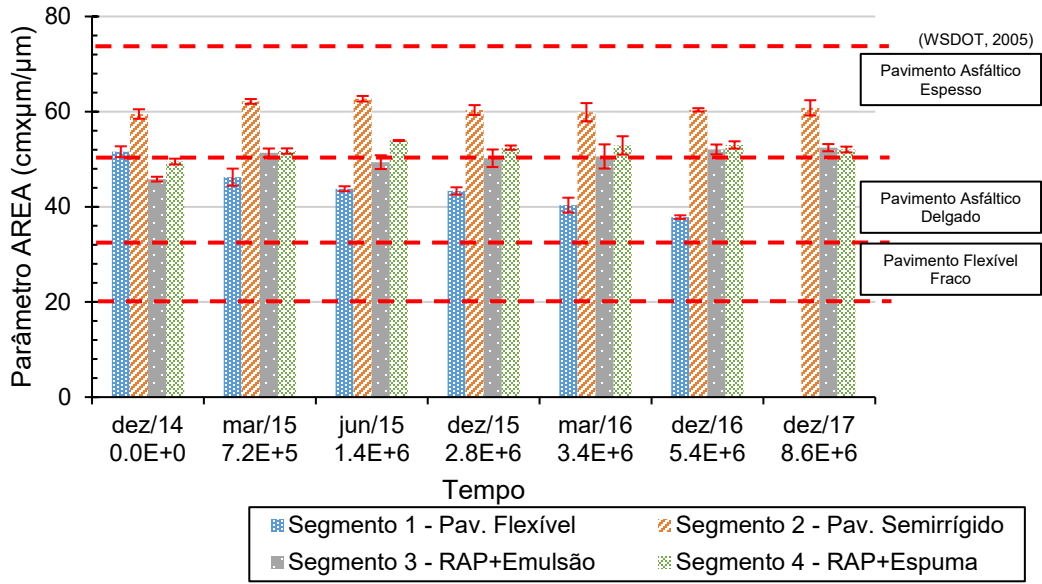
As análises dos módulos do remanescente indicaram variação ao longo do tempo somente para o segmento 1, o que pode ser explicado pelo comportamento coesivo do solo. Nesse segmento, a análise estatística mostra a alteração do módulo do subleito como significativo, uma vez que, ao reduzir o módulo do revestimento asfáltico devido ao trincamento do mesmo, as tensões-desvio no subleito aumentam e, por consequência, há redução do módulo do subleito.

5.5. Cálculo dos Parâmetros de Bacia de Deflexão

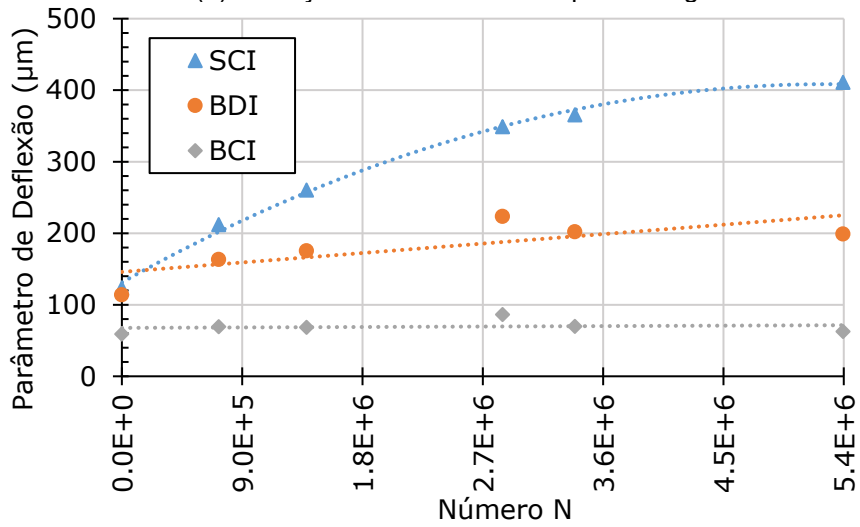
Os dados de deflexão obtidos no monitoramento nas temperaturas apresentadas na Tabela 11 foram ajustados para a temperatura de 25°C e foram utilizados para estimar os Parâmetros da Bacia Deflectométrica (DBPs) aplicando as equações apresentadas na Tabela 10. A Figura 30 mostra os resultados ao longo do tempo e do tráfego para os quatro segmentos da seção experimental de teste.



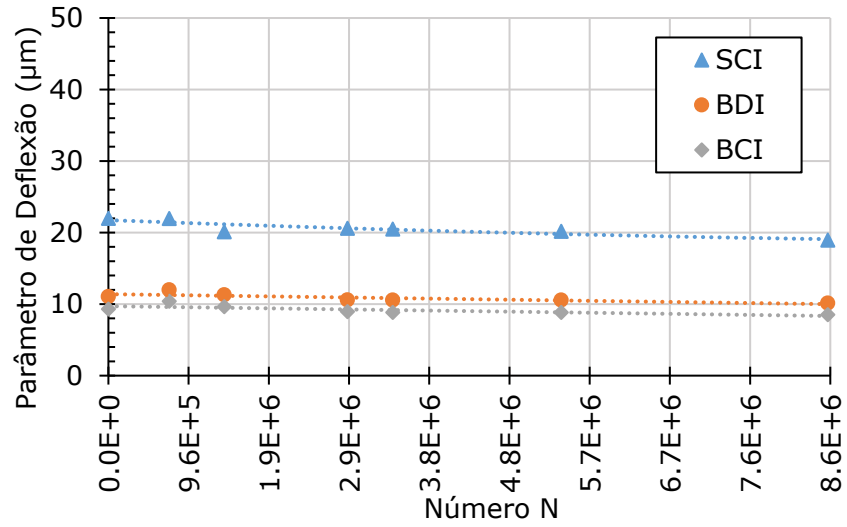
(a) Evolução do RC com tempo e tráfego



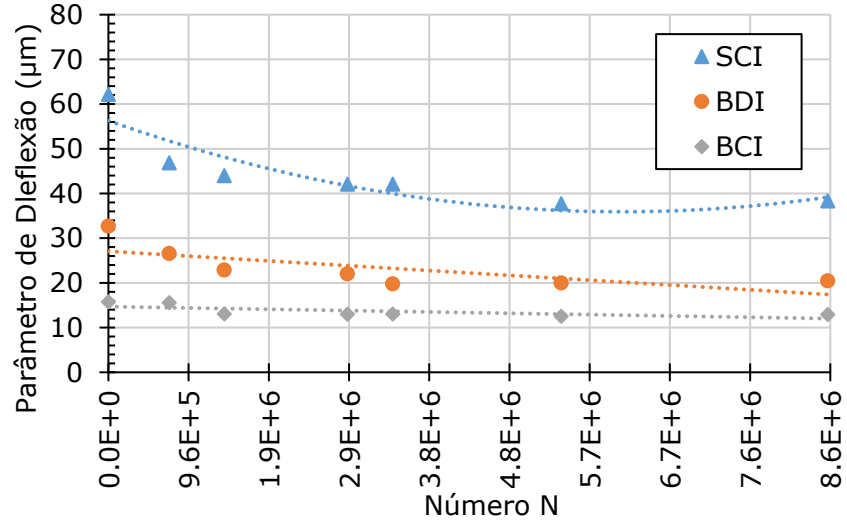
(b) Evolução do AREA com tempo e tráfego



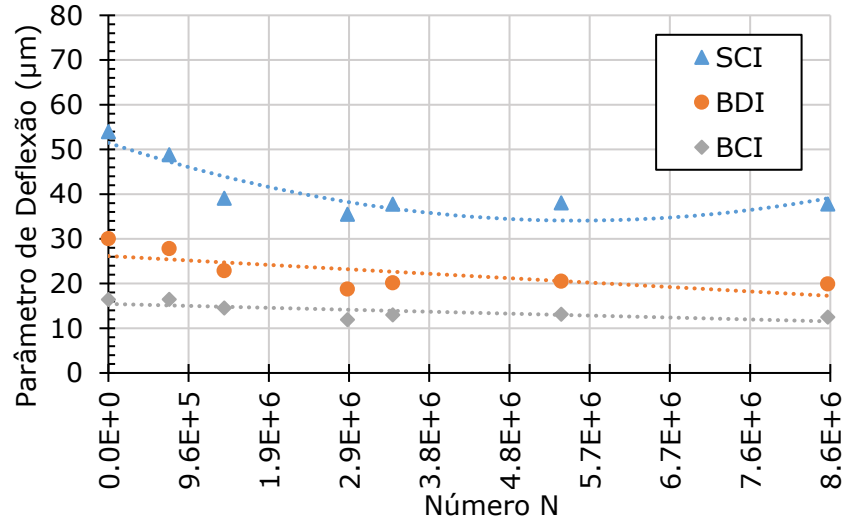
(c) Evolução do SCI, BDI e BCI para o Pavimento Flexível com tempo e tráfego



(d) Evolução do SCI, BDI e BCI para o Pavimento Semirrígido com tempo e tráfego



(e) Evolução do SCI, BDI e BCI para o pavimento com base de RAP+Emulsão com tempo e tráfego



(f) Evolução do SCI, BDI e BCI para o pavimento com base de RAP+Espuma com tempo e tráfego

Fonte: Adaptado de Andrade (2023)

5.5.1. Resultados de RC

A Figura 30 (a) compara os valores de RC para os quatro segmentos. Com o uso da Equação 6, o valor de D25 foi calculado por meio da equação de Agnesi (Primusz *et al.*, 2015), pois os dados do FWD forneceram apenas os valores de D20 e D30. Os resultados para o segmento de pavimento flexível indicaram a ocorrência de danos por fadiga na camada de revestimento asfáltico desse segmento. O valor de RC atingindo 100 m em 12 meses, o que indica a necessidade de manutenção do pavimento segundo a norma DNER-PRO 011/1979. A diminuição do valor de RC também foi observada por Horak (1987), mas essa se deu pela redução dos valores de módulo de resiliência da base e do subleito. No presente estudo, o valor de RC diminuiu devido ao processo de trincamento por fadiga da camada asfáltica, como pode ser visto na Figura 27, com a diminuição do módulo retroanalísado da camada de revestimento.

Quanto aos outros segmentos do trecho experimental, os valores de RC foram mais altos do que os do segmento de pavimento flexível. No segmento 2, devido à presença de base cimentada (BGTC), o RC foi 10 vezes maior do que o valor do segmento 1 na primeira campanha, e nenhuma variação foi observada ao longo do tempo (mesma tendência dos módulos retroanalísados). Esse resultado é compatível com o estudo estatístico apresentado anteriormente.

Para as camadas de base recicladas, segmentos 3 e 4, com base de RAP com emulsão e RAP com espuma, respectivamente, o valor de RC teve um pequeno aumento ao longo dos primeiros 2 anos, o que ocorreu devido aos processos de cura da camada de base, conforme observado por Guatimosim *et al.* (2017), embora essa alteração de módulo da base reciclada tenha mostrado pouco impacto nas bacias de deflexão dessas estruturas.

5.5.2. Resultados de AREA

Os resultados do parâmetro AREA são mostrados na Figura 30 (b). Esse parâmetro resulta da combinação de todas as deflexões medidas na bacia (Hoffman e Thompson,

1981), e é baseado na área compreendida pela linha ou bacia de deflexão e normalizado com a deflexão média aplicando a regra de Simpson. O parâmetro AREA é influenciado por: (i) a relação entre os módulos superior e inferior (E_1/E_2), (ii) a razão de Poisson (ν_1/ν_2) e (iii) as espessuras das camadas. Na Equação 7, o cálculo original foi modificado para considerar medidas em metros e para os sistemas FWD utilizados no Brasil. Com base no parâmetro AREA, as estruturas da seção de teste foram classificadas em termos estruturais segundo o *Washington State Department of Transportation* (WSDOT, 2005), como mostrado na Figura 30 (b).

O parâmetro AREA indica que, para o segmento 1, ocorreu o efeito do trincamento por fadiga na camada asfáltica. O parâmetro diminuiu ao longo do tempo, saindo da parte inferior dos pavimentos asfálticos considerados “Pavimentos Espessos” para, em 3 meses, ser considerado “Pavimento Delgado”. Ao cabo de 2 anos, os dados mostram que o pavimento asfáltico estava atingindo praticamente a classe de “Pavimento Flexível Fraco”, com 60% de área trincada. Esse dado realçou a necessidade de se usar outra “escala” de robustez das estruturas para tráfego muito elevado, como é o caso daqueles estudados na Rodovia Fernão Dias.

O pavimento semirrígido permaneceu classificado como “Pavimento Asfáltico Espesso” em todas as pesquisas, corroborando o observado em campo.

Na primeira campanha de monitoramento, as estruturas de camada de base reciclada foram classificadas como “Pavimento Asfáltico Delgado”. Mesmo com essas estruturas apresentando aumento de rigidez devido ao processo de cura, os pavimentos permaneceram na mesma classificação.

Embora todos os segmentos tenham as mesmas espessuras de camadas (camada superficial de asfalto com 120mm de espessura e camada de base com 250mm de espessura), a classificação foi diferente para o segmento 2 devido à sua maior rigidez e possivelmente melhor desempenho. Além disso, a classificação mencionada foi desenvolvida com base em condições norte-americanas, com período de projeto

maiores, condições climáticas e outros fatores diferentes dos prevalecente no Brasil, e pode não se aplicar às típicas estruturas de pavimento brasileiras, onde os projetos são realizados para o período de apenas 10 anos e com 50% de confiabilidade em condições climáticas tropicais e subtropicais.

5.5.3. Resultados de SCI, BDI e BCI

A evolução dos parâmetros SCI, BDI e BCI foram calculados usando a Equação 8, Equação 9 e Equação 10, respectivamente, e são mostrados na Figura 30 (c) para o segmento 1 flexível, (d) para o segmento 2 semirrígido, (e) para o segmento 3 reciclado estabilizado com emulsão asfáltica e (f) para o segmento 4 reciclado estabilizado com espuma de asfalto.

Os valores de SCI podem ser usados para avaliar a condição da superfície. Para o segmento pavimento flexível (segmento 1), esse parâmetro aumentou com o tempo, indicando um processo de dano por fadiga na camada de concreto asfáltico e podendo ser correlacionado com o aumento da área trincada apresentado na Figura 27. Observação semelhante foi feita por Rabbi e Mishra (2021). Para o pavimento semirrígido (segmento 2), os valores foram mais baixos e permaneceram constantes com o acúmulo de tráfego, demonstrando que o revestimento permaneceu sem danos.

Para os segmentos reciclados com base de RAP com emulsão e com RAP com espuma (segmentos 3 e 4, respectivamente), os valores de SCI diminuíram inicialmente e atingiram um valor constante após 12 meses, demonstrando o processo de cura da base e refletindo em maior “proteção” à fadiga do revestimento asfáltico.

De acordo com os limites propostos por SANRAL (2014), o segmento 1 foi classificado como uma estrutura "rígida" e, após um ano, a classificação mudou para uma estrutura "flexível". Após 24 meses, o pavimento acumulou $5,6 \times 10^6$ ESALs (24 meses) e esse segmento específico foi reconstruído. O pavimento semirrígido (segmento 2) foi classificado como uma estrutura "estado inicial de laje" ao longo dos 36 meses de pesquisa. Os segmentos 3 e 4 foram classificados como estruturas "rígidas" nos

levantamentos iniciais e, após o processo de cura, esses segmentos foram classificados como estruturas "muito rígidas".

O parâmetro BDI é indicado para analisar as camadas de base e sub-base. O valor obtido para o segmento de pavimento flexível é maior do que o do segmento semirrígido, destacando as diferenças entre a BGS, BGTC e as misturas recicladas. De acordo com a classificação de SANRAL (2014), o segmento 1 foi inicialmente classificado como uma estrutura "rígida", e passou a ser classificado como estrutura "flexível" após 6 meses. O segmento 2 foi classificado como "estado inicial de laje" durante todo o período de monitoramento. As misturas recicladas (segmentos 3 e 4) foram classificados como estruturas "rígidas" nos primeiros 6 meses e depois foram classificados como estruturas "muito rígidas" com a diminuição do BDI durante o processo de cura

O parâmetro BCI é mais indicado para caracterizar o subleito. Na presente pesquisa, esse parâmetro permaneceu constante ao longo do tempo. No segmento 1 (pavimento flexível), a infraestrutura remanescente foi classificada como uma estrutura "rígida", no segmento 2 (pavimento semirrígido) a camada foi inicialmente classificada como "estado inicial de laje", e os outros segmentos (3 e 4) foram classificados como estruturas "muito rígidas". Isso pode ocorrer porque o solo argiloso na infraestrutura remanescente apresenta um comportamento coesivo dependente das tensões atuantes. Portanto, é possível concluir que a infraestrutura remanescente é adequada para essas estruturas de pavimento. A pequena variação do BCI ao longo do tempo pode estar associada a uma possível variação da umidade da camada remanescente ao longo do tempo. Deve-se observar que o subleito (ou remanescente) é de elevado valor de módulo para os padrões de países em clima frio ou temperado, assim, são classificados como pelo menos para estruturas "rígidas", o que demonstra que nessas condições o remanescente não pode ser julgado como fonte de possíveis problemas estruturais ou danos nas estruturas de pavimento analisados.

5.5.4. Análise estatística dos DBPs

A análise de variância estatística foi realizada com os resultados de DBPs da mesma forma como foi feita para os módulos retroanalisados, no item 5.4.3. Foi aplicada a análise de variância (ANOVA) e verificado se os resultados mudam ao longo do tempo. A Tabela 13 mostra os resultados da ANOVA, F e P-Valor, para cada um dos DBPs calculados. Quando o P-Valor for menor que α e o valor de F for maior que o valor F Crítico, os DBPs serão estatisticamente diferentes ao longo da série estudada.

Tabela 13 - Análise de Variância ANOVA para os dados de DBPs

DBPs	Segmento	F	F Crítico	P-Valor	P-teste - α
D0	Pav. Flexível	9.06	3.11	0.00	0.05
	Pav. Semirrígido	1.23	3.11	3.5E-01	0.05
	RAP+Emulsão	1.59	3.11	2.4E-01	0.05
	RAP+Espuma	5.19	3.11	9.1E-03	0.05
RC	Pav. Flexível	14.84	3.11	8.8E-05	0.05
	Pav. Semirrígido	0.52	3.11	7.6E-01	0.05
	RAP+Emulsão	3.36	3.11	4.0E-02	0.05
	RAP+Espuma	5.04	3.11	1.0E-02	0.05
AREA	Pav. Flexível	27.35	3.11	3.6E-06	0.05
	Pav. Semirrígido	4.97	3.11	1.1E-02	0.05
	RAP+Emulsão	12.91	3.11	1.8E-04	0.05
	RAP+Espuma	21.47	3.11	1.3E-05	0.05
SCI	Pav. Flexível	14.70	3.11	9.2E-05	0.05
	Pav. Semirrígido	0.46	3.11	8.0E-01	0.05
	RAP+Emulsão	4.78	3.11	1.2E-02	0.05
	RAP+Espuma	6.37	3.11	4.1E-03	0.05
BDI	Pav. Flexível	7.59	3.11	2.0E-03	0.05
	Pav. Semirrígido	0.83	3.11	5.5E-01	0.05
	RAP+Emulsão	3.22	3.11	4.5E-02	0.05
	RAP+Espuma	9.04	3.11	9.3E-04	0.05
BCI	Pav. Flexível	4.00	3.11	2.3E-02	0.05
	Pav. Semirrígido	1.07	3.11	4.2E-01	0.05
	RAP+Emulsão	0.82	3.11	5.6E-01	0.05
	RAP+Espuma	4.97	3.11	1.1E-02	0.05

O D0 foi avaliado, e o resultado mostrou variância significativa para os segmentos 1 e 4. Ou seja, o aumento significativo da deflexão do segmento 1 com pavimento flexível

evidenciou uma vez mais o dano no revestimento. No segmento 4, a redução significativa da deflexão demonstra que, para a base reciclada com espuma, a alteração de módulo é mais sensível e, portanto, a variação da rigidez do conjunto é significativa.

A avaliação do RC identificou variância nos segmentos 1, 3 e 4, explicada pelas mudanças estruturais dessas estruturas ao longo do tempo. Este parâmetro confirma mais uma vez que a cura da BGTC é muito mais rápida e as alterações ao longo do tempo não são significativas. Importante realçar que, no período de testes de campo, de 36 meses, não houve alterações significativas.

O AREA mostrou variância para os quatro segmentos ao longo do tempo, embora para o segmento 2, com base de BGTC, as alterações se mostram pouco significativas (embora F seja um pouco superior ao F crítico, p-valor é menor que α). O parâmetro AREA relata a mudança de classe estrutural nos segmentos 1, 3 e 4, sendo que no segmento 1 é alteração negativa de robustez estrutural, enquanto nos segmentos 3 e 4 tem-se o contrário.

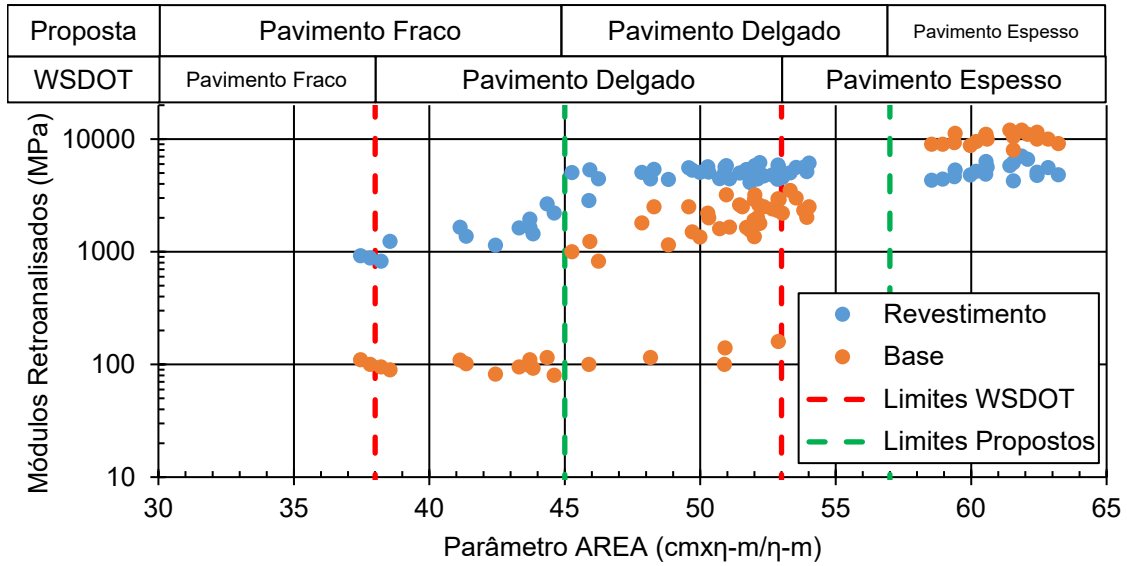
A ANOVA para os parâmetros SCI, BDI e BCI mostrou variância significativa para o segmento 1 (pavimento flexível), indicando uma influência relevante do processo de fadiga que ocorreu na camada de revestimento. Para o segmento 2 (pavimento semirrígido), os resultados não indicaram variância estatística. As análises para os pavimentos reciclados demonstraram variância no SCI e BCI para ambos os segmentos (3 e 4) como consequência do processo de cura da base. O BDI mostrou variância apenas para os segmentos 1 e 4 (RAP com Espuma) corroborando o que se observou para o parâmetro D0.

5.6. Correlação entre DBPs e módulos retroanalizados

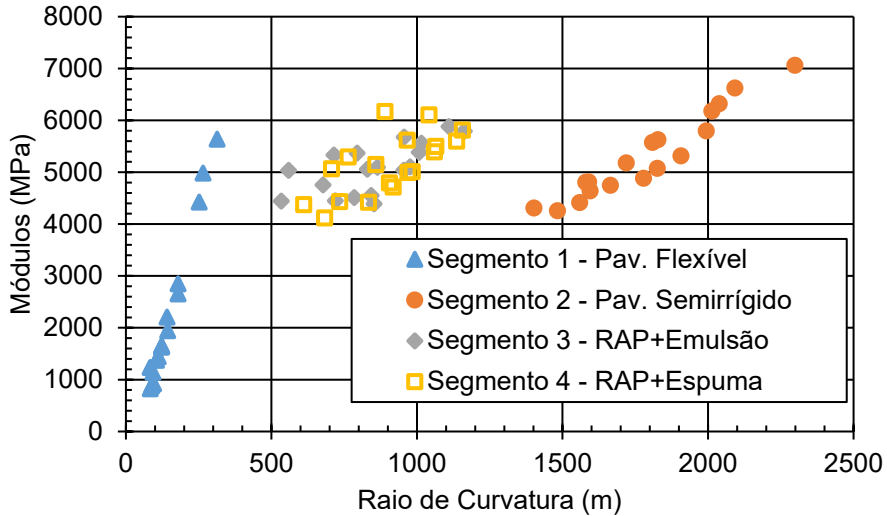
As correlações entre os resultados dos Parâmetros de Deflexão (DBPs) e os módulos retroanalizados das camadas foram realizadas considerando as relações estatísticas.

Um trabalho anterior, de Lee *et al.* (1998), não encontrou relação entre um único parâmetro e a rigidez para representar todas as condições do pavimento. A Figura 31 mostra as correlações entre os DBPs e os módulos retroanalizados.

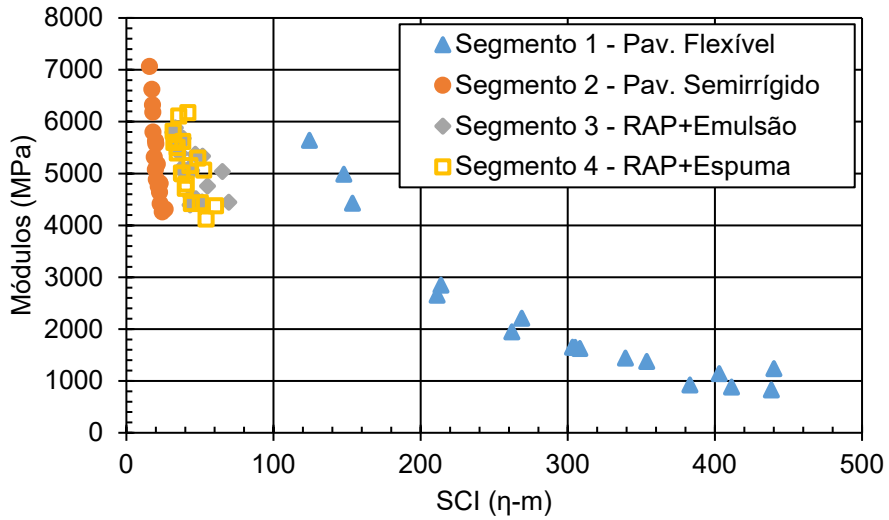
Figura 31 - Relação entre os DBPs e os módulos retroanalizados



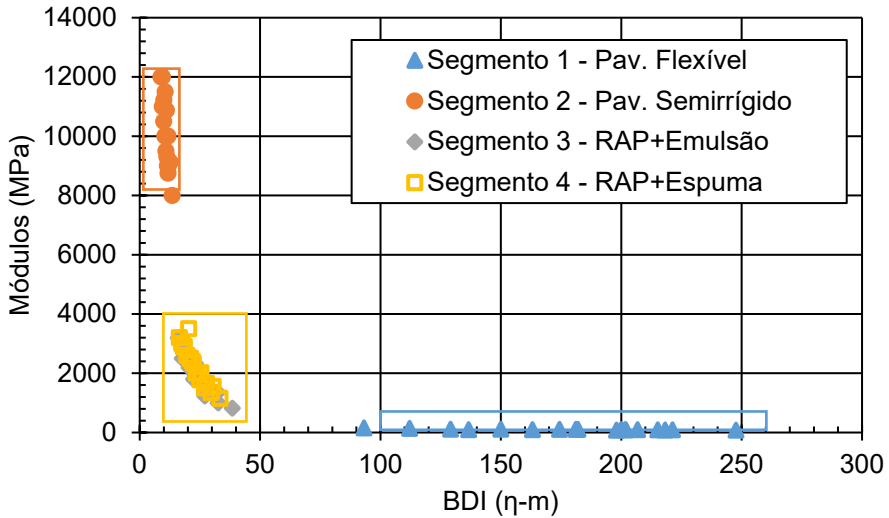
(a) Relação entre o AREA e os módulos retroanalizados do revestimento e base e uma proposta de classificação da robustez do pavimento para tráfego muito pesado



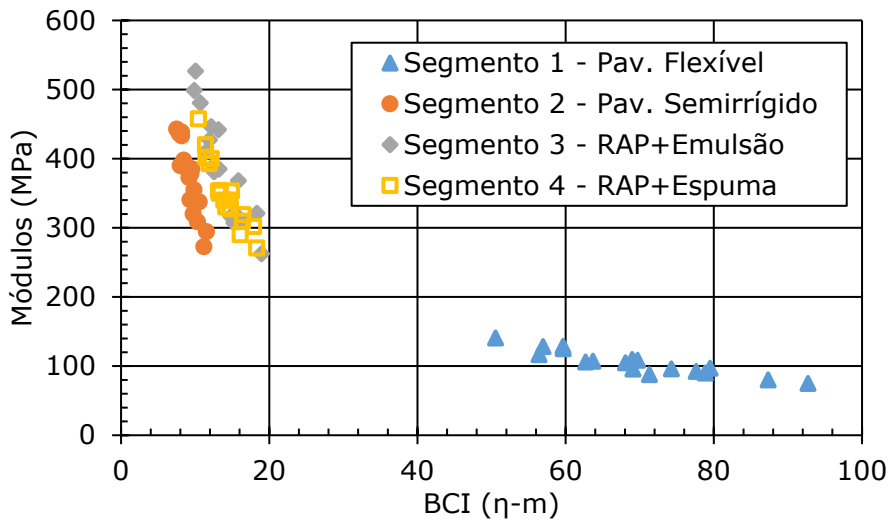
(b) Relação entre RC e os módulos retroanalizados do revestimento



(c) Relação entre o SCI e os módulos retroanalizados do revestimento



(d) Relação entre o BDI e os módulos retroanalizados da base



(e) Relação entre o BCI e os módulos retroanalizados do subleito

Fonte: Adaptado de Andrade (2023)

O parâmetro AREA é um bom indicador da condição do pavimento; no entanto, não houve uma boa correlação entre ele e os módulos retroanalizados de uma única camada, como mostrado na Figura 31 (a), onde esse parâmetro foi plotado com os módulos retroanalizados de cada camada. Isso indica que o parâmetro AREA é um indicador que representa o comportamento da estrutura como um todo, não apenas de uma única camada. Em alguns países, quando a espessura da camada superficial asfáltica é pequena (devido a restrições financeiras), é comum usar camadas de base mais rígidas como alternativa para suportar volumes de tráfego mais altos. Por esse motivo, os limites do parâmetro AREA devem classificar toda a estrutura. Portanto, como mostrado na Figura 31 (a), há uma tendência de ocorrer valores de rigidez constantes, que não são consistentes com os limites adotados por WSDOT (2005), indicando que esses limites podem ser alterados de acordo com o patamar identificado para representar cada estrutura. Dessa forma o presente estudo propõe a calibração dos limites propostos na Figura 31 (a) para os dados estudados para classificar as estruturas de pavimento para tráfego muito pesado.

O parâmetro RC é influenciado pelo comportamento estrutural do pavimento. Por esse motivo, o RC não está apenas relacionado ao módulo superficial, pois diferentes valores de RC estão relacionados aos mesmos valores de módulos superficiais, como mostrado na Figura 31 (b). Contudo, parâmetro pode ser usado para distinguir uma estrutura de pavimento flexível de uma estrutura semirrígida e de estruturas com camadas de base recicladas. Como demonstrado anteriormente por Primusz *et al.* (2015) e Simonin *et al.* (2015), o RC é fortemente afetado pelo módulo das camadas inferiores. Além disso, para o segmento de pavimento flexível, o RC indicou a ocorrência do dano por fadiga na camada de asfáltica.

Como os valores de módulo no segmento 1 mudaram ao longo do tempo de monitoramento, foi encontrada uma boa correlação entre o SCI e o valor do módulo da camada superficial usando uma regressão linear, como mostrado na Figura 31 (c). Para algumas estruturas, os valores de módulo não mudaram com o tempo. No entanto, para o segmento 1, há evolução do dano por fadiga na camada de concreto asfáltico, e,

portanto, a rigidez diminui. Esse comportamento é modelado por uma regressão linear. Para esse caso específico, a equação do SCI foi capaz de prever o processo de fadiga da camada de revestimento asfáltico.

A relação entre o parâmetro BDI e os valores de módulos retroanalizados é capaz de identificar diferenças entre as camadas de base (BGS, BGTC, RAP com Emulsão e RAP com Espuma), como mostrado na Figura 31 (d). Cada camada individual possui diferentes valores módulos retroanalizados, que são inversamente proporcionais aos valores de BDI. Isso pode ser usado para identificar a faixa de rigidez correspondente a cada tipo de camada de base. Os dados usados neste estudo são limitados para identificar os limites reais dessas faixas.

O parâmetro BCI foi capaz de identificar a diferença entre as camadas remanescentes em cada segmento de teste, e sua relação com os módulos retroanalizados é mostrada na Figura 31 (e). Os dois níveis de módulo são identificados e correlacionados com o parâmetro.

5.7. Consideração do Capítulo 5

A presente pesquisa focou na avaliação dos dados do *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e dos Parâmetros de Deflexão (DBPs). O desempenho de um trecho experimental de pavimentos asfálticos em rodovia de tráfego muito pesado foi avaliado, sendo o trecho composto por quatro segmentos, cada qual com um tipo diferente de material de base: um com estrutura flexível com base granular (BGS) - segmento 1; um com estrutura semirrígida com base estabilizada (BGTC) - segmento 2; um pavimento com material de base reciclado estabilizado com emulsão asfáltica (RAP+Emulsão) - segmento 3; e outro com estrutura com camada de base de material reciclado estabilizado com espuma de asfalto (RAP+Espuma) - segmento 4.

O módulo retroanalizado da camada de revestimento asfáltico foi obtido por meio de um processo de correção de temperatura, e a evolução do módulo retroanalizado foi avaliada ao longo do tempo e do acúmulo de tráfego.

Embora a camada de revestimento asfáltico construída fosse a mesma em todos os segmentos do trecho experimental, o desempenho da camada asfáltica foi diferente para cada segmento ao longo do tempo, o que se deu devido à mudança no material da camada de base. Os módulos retroanalizados das camadas dos pavimentos foram correlacionados com os DBPs, mostrando boa correlação com o comportamento estrutural do pavimento.

Os DBPs usados neste estudo foram capazes de identificar as diferenças entre as camadas de base e a evolução de área trincada devido ao processo de fadiga que ocorreu na camada de revestimento asfáltico construída no segmento 1, constituído por pavimento flexível. Os DBPs também foram capazes de mostrar o comportamento estável do segmento de pavimento semirrígido e identificar o processo de cura das camadas de base recicladas estabilizadas, o que demonstra o aumento do módulo dessas camadas com o tempo. O uso de DBPs pode aprimorar o processo de retroanálise, bem como o processo de gerenciamento de pavimentos, melhorando a avaliação das condições estruturais dos pavimentos.

O parâmetro AREA não apresentou uma boa correlação com os módulos retroanalizados das camadas individualmente; no entanto, mostrou uma influência consistente de toda a estrutura em cada um dos segmentos. Por outro lado, a correlação entre o módulo do revestimento e o RC foi capaz de identificar o processo de fadiga na estrutura flexível do segmento 1. Em relação às outras estruturas avaliadas, esse parâmetro não mostrou boa correlação. Além disso, *Structural Curvature Index* (SCI), *Base Damage Index* (BDI) e *Base Curvature Index* (BCI) são bons indicadores dos módulos retroanalizados da camada de revestimento asfáltico, da camada de base e da infraestrutura remanescente.

Em geral, o parâmetro AREA mostrou ser um bom indicador para avaliar o comportamento geral da estrutura do pavimento. Esse também é um bom parâmetro para classificar a estrutura como "Pavimento Fraco", "Pavimento Delgado" ou "Pavimento Espesso", conforme orientação do WSDOT, porém este estudo propôs limites diferentes (em comparação com o WsDOT) para estruturas de pavimentos sujeitas a tráfego muito pesado, o que pode ser útil para aplicações de gerenciamento de pavimentos. Com relação aos diferentes materiais de base investigados, o parâmetro SCI mostrou ser um bom indicador para avaliar o processo de cura das misturas de recicladas estabilizadas.

6. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DAS UNIDADES AMOSTRAIS DA PESQUISA DO DNIT PARA HDM-4

Neste capítulo é desenvolvido o estudo relativo a dados deflectométricos de Unidades Amostrais (UA's) da malha rodoviária federal sob administração do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Essas UA's foram monitoradas ao longo de 5 anos por empresa especializada e contratada pelo DNIT para este fim específico de realizar a calibração dos modelos de desempenho do sistema *Highway Development and Management* (HDM-4) para a realidade das rodovias do referido órgão. Os dados coletados pela empresa foram disponibilizados pelo órgão gestor através do “Termo de Execução Descentralizada - TED 352/2020”, cuja Universidade coordenadora é a Universidade de Brasília (UnB), com a parceria de outras universidades, dentre as quais a USP, universidade onde este autor é doutorando e integrante do projeto de pesquisa. Os dados foram tratados estatisticamente e estruturados em banco de dados pelo autor desta tese. Neste estudo são usados os dados de avaliação estrutural, tráfego e evolução da área trincada, para se determinarem modelos estatísticos de categorização, K-Vizinho Próximo (*K-Nearest Neighbors* - KNN), para se realizar a classificação estrutural de pavimentos quanto à resposta deflectométrica. A classificação possibilita a realização de inferência do comportamento estrutural a partir de Parâmetros de Bacia de Deflexão (DBPs). Os modelos desenvolvidos possibilitam aplicação em sistemas de gerência de pavimentos para realização de análises em nível de rede.

6.1. Introdução

O *software Highway Development and Management* (HDM-4) foi desenvolvido e é mantido pelo Banco Mundial para auxiliar governos e administradoras de rodovias na tomada de decisão quanto à gestão da conservação e a reabilitação de pavimentos rodoviários. O HDM-4 possui diversos modelos de previsão de desempenho dos pavimentos, custos de operação, efetividade de manutenções etc., que podem ser calibrados para diferentes estruturas de pavimentos, materiais, processos construtivos, configurações de tráfego e condições ambientais (World Bank, 2007).

Atualmente o Departamento Nacional de Transportes (DNIT) possui duas ferramentas para realizar o gerenciamento da malha federal construída e mantida pelo órgão (DNIT, 2011): o Sistema de Gerência de Pavimentos – SGP/DNIT e o HDM-4. Visando otimizar recursos e analisar melhores soluções e alternativas para pavimentos, o DNIT conduziu, entre os anos de 2013 e 2017, pesquisa de calibração dos modelos de previsão de desempenho do HDM-4. Foi realizado o monitoramento de 50 unidades amostrais (UA's) ao longo de 5 anos (DNIT, 2017). A metodologia de coleta de dados foi apresentada por Pipicano e Vieira (2018) e por Arango (2018). Esse banco de dados é uma rica fonte de informações a respeito da malha de pavimentos rodoviários brasileiros. Albuquerque *et al.* (2019) já utilizaram parte desse banco de dados para estudar o efeito do aumento de carga nos modelos de previsão de desempenho e Rodrigues (2023) usou os dados de 8 UA's para realizar avaliação das previsões do *software* MeDiNa.

Este capítulo tem o objetivo de realizar a avaliação da condição estrutural das UA's aplicando o cálculo de parâmetros de bacia deflectométrica (DBPs), determinando modelos de classificação para qualificar os pavimentos quanto a sua condição estrutural. Para isso é utilizado o banco de dados da malha federal, com pavimentos localizados em diferentes regiões, condições climáticas, e solicitações de tráfego. São analisados os dados de avaliação estrutural, tráfego e evolução da área trincada para determinar modelos de análise estrutural utilizando parâmetros deflectométricos.

6.2. Apresentação dos dados do DNIT/HDM4

6.2.1. Escolha das Unidades Amostrais - UAs

Para a realização da calibração do HDM-4, foram selecionadas 50 unidades de amostragem de rodovias da malha federal. As UA's foram selecionadas por meio de critérios estatísticos baseados em: (i) histórico do pavimento; (ii) manutenções realizadas; (iii) datas de construção; (iv) clima regional; e (v) níveis de tráfego. As UA's constituíam trechos com um quilômetro de extensão, e foram monitoradas ao longo de 5 anos, como citado anteriormente.

As UA's selecionadas foram classificadas quanto a: (i) tipo da superfície do pavimento; (ii) zona climática da localização da rodovia; e (iii) deflexão máxima do trecho selecionado. Essas variáveis foram consideradas exógenas e sem viés de simultaneidade. Dessa forma, essas variáveis podem ser amostradas e aplicadas em regressões e análises.

Essa seleção contemplou pavimentos compostos por revestimento em: CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente ou Concreto Asfáltico - CA); TSD (Tratamento Superficial Duplo); Microrrevestimento Asfáltico a Frio; Lama Asfáltica; e reciclagem dos mais diversos tipos. Os trechos em questão estão localizados nas 5 condições climáticas brasileiras: Equatorial; Temperado; Tropical Brasil Central; Tropical Equatorial; e Tropical Nordeste.

6.2.1.1. Materiais e estruturas

Como as rodovias brasileiras têm uma idade relativamente alta, é possível que, ao se escolher um segmento, várias intervenções já tenham sido feitas, e diversas podem ser as camadas de revestimento encontradas. Durante a investigação de seleção das UA's, foram encontradas diferentes configurações de sobreposição de camadas (CBUQ + TSD, CBUQ + Lama Asfáltica, CBUQ + Microrrevestimento asfáltico a frio, CBUQ + TSD, TSD + Microrrevestimento asfáltico a frio, TSD + Lama Asfáltica, TSD + CBUQ + Microrrevestimento asfáltico a frio etc.).

Entretanto, para calibração do HDM-4, somente uma camada de revestimento pode ser considerada, assim determinou-se que o pavimento responderia de acordo com o comportamento da camada predominante. Dessa forma os pavimentos foram divididos em dois grupos: um em que o CBUQ apresentava maior importância e outro em que o TSD demonstrava a maior relevância devido às espessuras predominantes.

A malha rodoviária federal é composta predominantemente por revestimento asfáltico com base granular, caracterizando pavimentos flexíveis. Com isso, determinou-se que,

das 50 UA's, 34 deveriam ser em concreto asfáltico e 16 deveriam ser compostas por Tratamento Superficial Duplo (TSD).

Na campanha de monitoramento de 2014, foi realizada investigação dos materiais e espessuras de camadas que compunham os pavimentos das UA's monitoradas. Os poços de sondagens foram sempre executados no centro da UA's (a 500 metros de distância do início e 500 metros de distância do final da UA's), no bordo externo da faixa de rolamento, com profundidade entre 1,00 m e 1,50 m para se encontrar o material original e subleito. A Figura 32 mostra um exemplo da realização dos poços de sondagens executados.

Figura 32 - Execução dos poços de sondagens (DNIT, 2017)

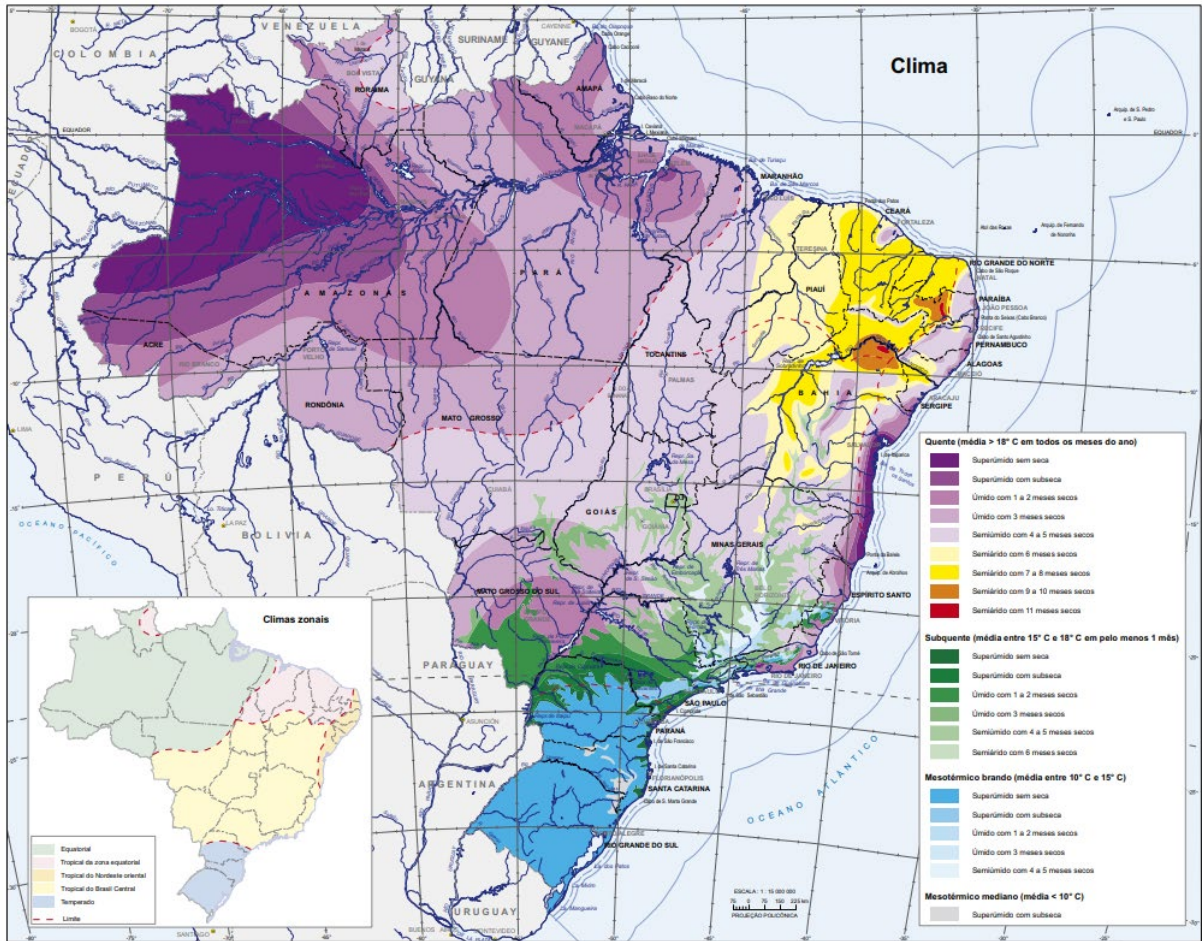


Fonte: DNIT (2017)

6.2.1.2. Climas nacionais das UA's

A condição climática é um importante parâmetro no desempenho dos pavimentos asfálticos. A temperatura da superfície do pavimento é fortemente influenciada pela incidência solar, temperatura do ar, precipitações, entre outros fatores. Essas condições se alteram com a localização geográfica e estação do ano. Nesse sentido, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no território brasileiro há a ocorrência de 5 zonas climáticas principais, conforme mostra a Figura 33.

Figura 33 - Zonas climáticas brasileiras segundo IBGE (2010)



Quente (média > 18° C em todos os meses do ano)

- Superúmido sem seca
- Superúmido com subseca
- Úmido com 1 a 2 meses secos
- Úmido com 3 meses secos
- Semiúmido com 4 a 5 meses secos
- Semiárido com 6 meses secos
- Semiárido com 7 a 8 meses secos
- Semiárido com 9 a 10 meses secos
- Semiárido com 11 meses secos

Subquente (média entre 15° C e 18° C em pelo menos 1 mês)

- Superúmido sem seca
- Superúmido com subseca
- Úmido com 1 a 2 meses secos
- Úmido com 3 meses secos
- Semiúmido com 4 a 5 meses secos
- Semiárido com 6 meses secos

Mesotérmico brando (média entre 10° C e 15° C)

- Superúmido sem seca
- Superúmido com subseca
- Úmido com 1 a 2 meses secos
- Úmido com 3 meses secos
- Semiúmido com 4 a 5 meses secos

Mesotérmico mediano (média < 10° C)

- Superúmido com subseca

Fonte: Adaptado de IBGE (2010)

Os dados climáticos foram obtidos por meio do portal do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisas (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os anos entre 2013 e 2017. Esse portal disponibiliza os dados de 262 estações meteorológicas localizadas ao longo de todo o território brasileiro. A Tabela 14 mostra os dados climáticos que caracterizam cada uma das zonas climáticas.

Tabela 14 - Dados climáticos por zona climática adaptado de DNIT (2017)

Descrição	Equatorial	Tropical Zona Equatorial	Tropical Nordeste Oriental	Tropical Brasil Central	Temperado
Classificação de Umidade	Úmido	Úmido	Úmido	Úmido	Úmido
Índice de Umidade	83,0	68,4	75,9	69,7	78,9
Duração da estação seca em meses	3,0	3,5	3,0	3,5	1,5
Precipitação Média Mensal (mm)	204,4	81,4	72,9	95,2	153,6
Classificação da Temperatura	Tropical	Tropical	Tropical	Sub-tropical – quente	Sub-tropical - frio
Temperatura Média Anual (°C)	27,8	27,7	26,3	24,7	20,0
Faixa de Temperatura Ambiente Média Mensal (°C)	9,5	11,0	8,9	11,9	10,0
Temperatura excede a 32°C	177,0	186,0	79,0	87,0	28,0

A distribuição populacional das rodovias brasileiras indica que a maior parte das rodovias brasileiras estão localizadas na zona climática Brasil Tropical Central, com 64% da extensão da malha. Em seguida tem-se a zona Tropical Equatorial com 18% da malha rodoviária e a zona Tropical Nordeste Oriental com 10%. Nas seguintes posições, tem-se a zona de clima Temperado com 5% das rodovias brasileiras e, com menor representatividade, tem-se a zona Equatorial com 4% da malha brasileira.

Seguindo essa distribuição, estabeleceu-se que, entre as 50 UA's, tem-se: 2 UA's para cada uma das zonas Temperada e Equatorial, 5 UA's para a zona Tropical Nordeste Oriental, 9 UA's para a Equatorial e 32 UA's localizadas na zona Brasil Tropical Central.

6.2.1.3. Caracterização de pavimentos quanto à deflexão máxima

O uso da deflexão máxima para classificação dos pavimentos foi feito no estudo original por ser bastante usado na realidade nacional. Para a seleção das UA's foram adotados três níveis de deflexão: "Baixa", com deflexão menor que $50 \times 10^{-2} \text{mm}$, que corresponde a 55% da malha brasileira; "Média", com D0 entre $50 \times 10^{-2} \text{mm}$ e $70 \times 10^{-2} \text{mm}$, que caracteriza 13% das rodovias; e "Alta", com deflexão máxima superior a $70 \times 10^{-2} \text{mm}$, que representa 9% das vias. Entretanto, outra classe foi identificada, 27% da malha federal não possuía registros de deflexão.

Assim, 4 classes foram usadas na seleção das UA's. Com isso, selecionaram-se 28 trechos caracterizado como deflexão baixa, 10 UA's como média, 3 segmentos como alta, e 9 trechos foram selecionados sem informações de deflexão prévias. Como iria se realizar o monitoramento deflectométrico nessas UA's, a inexistência de informações sobre as deflexões não impactaria na calibração do HDM-4.

6.2.1.4. Unidades Amostrais selecionadas

A seleção das UA's resultou em uma amostragem de 50 segmentos de 1,0 km de extensão que representam estatisticamente a malha rodoviária brasileira sob administração do DNIT. A seleção é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 - Informações das 50 UA's selecionadas adaptado de DNIT (2017)

Nº UA	Rodovia	Unidade Federal	Revestimento	Clima	Deflexão
1	BR-101	BA	CBUQ	Tropical Nordeste	Baixo
2	BR-324	BA	CBUQ	Tropical Brasil Central	Sem Info
3	BR-110	BA	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Equatorial	Baixo
4	BR-110	BA	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Equatorial	Baixo
5	BR-424	PE	TSD	Tropical Equatorial	Sem Info
6	BR-104	PE	TSD	Tropical Nordeste	Sem Info
7	BR-230	PB	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Equatorial	Baixo
8	BR-230	PB	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Equatorial	Alto
9	BR-230	PB	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Equatorial	Baixo
10	BR-116	CE	CBUQ	Tropical Equatorial	Alto
11	BR-230	CE	TSD	Tropical Equatorial	Médio
12	BR-226	CE	TSD	Tropical Equatorial	Médio
13	BR-020	CE	CBUQ	Tropical Equatorial	Médio
14	BR-020	CE	CBUQ	Tropical Equatorial	Baixo
15	BR-230	TO	TSD +Lama Asfáltica	Equatorial	Baixo
16	BR-364	MT	CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
17	BR-364	MT	CBUQ	Tropical Brasil Central	Sem Info
18	BR-364	MT	CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
19	BR-364	MT	CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
20	BR-364	MT	CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
21	BR-364	MT	CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
22	BR-364	MT	CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
23	BR-174	MT	TSD +Microrevestimento	Equatorial	Sem Info
24	BR-070	MT	TSD+CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
25	BR-070	MT	TSD+CBUQ	Tropical Brasil Central	Sem Info
26	BR-070	MT	TSD	Tropical Brasil Central	Sem Info
27	BR-364	GO	Reciclagem+CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
28	BR-364	GO	Reciclagem+CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
29	BR-158	GO	TSD +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Alto

Nº UA	Rodovia	Unidade Federal	Revestimento	Clima	Deflexão
30	BR-158	GO	TSD +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Médio
31	BR-158	GO	TSD +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Médio
32	BR-158	GO	TSD	Tropical Brasil Central	Médio
33	BR-070	GO	TSD	Tropical Brasil Central	Baixo
34	BR-414	GO	TSD +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Baixo
35	BR-153	GO	TSD+CBUQ	Tropical Brasil Central	Baixo
36	BR-414	GO	TSD +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Baixo
37	BR-414	GO	TSD +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Baixo
38	BR-070	GO	TSD	Tropical Brasil Central	Médio
39	BR-080	GO	TSD+CBUQ	Tropical Brasil Central	Médio
40	BR-080	GO	TSD+CBUQ	Tropical Brasil Central	Médio
41	BR-020	DF	CBUQ	Tropical Brasil Central	Sem Info
42	BR-251	DF	TSD+CBUQ +Microrevestime	Tropical Brasil Central	Baixo
43	BR-251	GO	CBUQ +Lama Asfáltica	Tropical Brasil Central	Baixo
44	BR-251	GO	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Médio
45	BR-365	MG	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Baixo
46	BR-365	MG	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Baixo
47	BR-365	MG	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Baixo
48	BR-282	SC	CBUQ	Temperado	Baixo
49	BR-282	SC	CBUQ	Temperado	Sem Info
50	BR-116	SP	CBUQ +Microrevestimento	Tropical Brasil Central	Baixo

onde CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente (também denominado mais recentemente por CA – Concreto Asfáltico);

TSD: Tratamento Superficial Duplo;

Microrrevestimento: Microrrevestimento asfáltico a frio;

Reciclagem: Pavimento com algum tipo de reciclagem;

6.2.2. Caracterização do tráfego

Para calibrar os modelos presentes no HDM-4, a pesquisa original categorizou o tráfego ao longo das 50 UA's monitoradas. Para isso, foram realizadas campanhas de contagens manuais, contagens automáticas e pesagens de veículos, no ano de 2014, e somente de contagens de veículos nos anos de 2016 e 2017.

A contagem manual foi realizada seguindo o Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006). Assim, foi realizado o registro dos veículos manualmente em fichas padrão, em intervalos de 15 min, com as classificações de cada tipo de veículo reconhecida pelo técnico. O levantamento foi realizado independentemente para os dois sentidos de tráfego da rodovia em dois dias, em um período total de 8 horas.

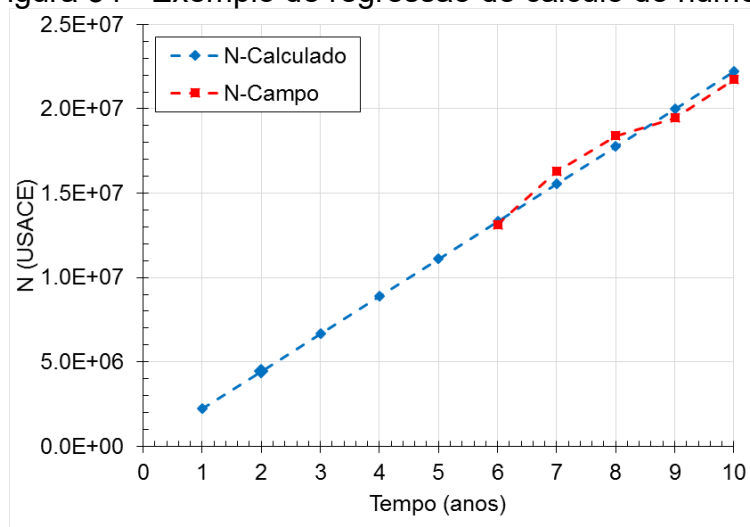
A contagem automática foi realizada usando um equipamento contendo sensores eletromagnéticos instalados no eixo da rodovia que registrava continuamente por 7 dias consecutivos os veículos que trafegaram pela via no período de 24 horas.

Usando uma balança de baixa velocidade do tipo esteira, foram realizadas as pesagens em todas as UA's. A pesagem foi realizada em um sentido por UA's em um dia, em um período de 8 horas, registrando todos os veículos e pesos por eixo.

Os resultados das contagens manuais foram usados para se determinar o fator de sentido das UA's. Com os dados de contagens automáticas, determinaram-se as distribuições de tráfegos horárias e diárias, e calculou-se o Valor Diário Médio (VDM). Os resultados das pesagens foram utilizados para os cálculos das cargas por eixo, assim viabilizando o cálculo do Fator Equivalente de Carga (FEC). Dessa forma, determinou-se o Número N (Número de repetições equivalentes ao eixo padrão) anual por três metodologias, USACE, AASHTO e ESALF para os anos em que houve as campanhas de contagem e pesagem. Dessa forma o banco de dados do DNIT contava somente com os números N para os anos 2014, 2016 e 2017.

O número N para os anos em que não houve contagem foi determinado por meio de extrapolação dos dados, por este estudo, assim se determinou o número N em 2015, considerando-se a média entre os anos de 2014 e 2016. Para se determinar o número N acumulado no primeiro ano do projeto, este estudo realizou uma regressão linear para encontrar o N no primeiro ano do pavimento. Dessa forma foi possível calcular o número N acumulado ao longo do período de monitoramento do projeto e a vida útil da estrutura, que foi entre os anos zero, 2013 a 2017. Na Figura 13, tem-se o exemplo do cálculo do número N para a UA48, sendo em vermelho o número N acumulado no período de monitoramento e em azul o resultado da regressão para determinação do N no primeiro ano.

Figura 34 - Exemplo de regressão de cálculo do número N



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

O número N anual foi adicionado ao banco de dados, considerando a média dos números N anuais determinados pelas campanhas de contagens. Para categorização das rodovias, foram aplicadas as categorias de tráfego apresentadas por Ceratti *et al.* (2015) para seleção de soluções de pavimentação e escolha dos tipos de misturas asfálticas, Tabela 16.

Tabela 16 - Níveis de tráfego para a seleção de soluções de misturas asfálticas adaptado de Ceratti *et al.* (2015)

Designação segundo o nível de tráfego	Número N de repetições equivalentes de carga do eixo-padrão de 80kN ou 8,2tf	Rodovias e vias típicas nesta categoria
B: Baixo volume de tráfego	$N \leq 10^6$	Vias de tráfego local, estradas vicinais, rodovias com tráfego de algumas dezenas ou poucas centenas de veículos comerciais diários, vias urbanas de pequena solicitação por tráfego comercial etc.
M: Moderado volume de tráfego	$10^6 < N \leq 10^7$	Vias e rodovias coletoras, rodovias de pista simples ou dupla, rodovias com centenas de veículos comerciais diários, acessos rodoviários etc.
A: Alto volume de tráfego	$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Rodovias e vias urbanas em geral com pista dupla, com 2 ou mais faixas por sentido, rodovias com tráfego de várias centenas até um ou dois milhares de veículos comerciais diários, implantação de terceiras faixas para caminhões lentos em pistas simples, faixas de ônibus urbanos etc.
MP: Muito pesado – volume muito alto de tráfego e vias especiais	$N > 5 \times 10^7$	Rodovias e vias de tráfego muito pesado, com 2 ou mais faixas por sentido, com grande participação de veículos comerciais, rodovias que ultrapassem em geral 2.000 veículos comerciais diários, corredores de ônibus tipo BRT com elevada solicitação, acessos a terminais de carga etc.

Para realização da categorização, o número N anual do banco de dados foi multiplicado por 10, por se considerar o período de projeto de 10 anos como usual. Não foi aplicado fator de crescimento de tráfego, pois o valor do número N do banco de dados é uma média, e assim, fatores como o do crescimento já teriam sido computados.

A categorização resultou em dois grupos de UA's: com UA's em rodovias de tráfego "Moderado – M" e UA's em rodovias com tráfego "Alto – A" mais "Muito Pesado – MP", que foram agrupados para se ter uma amostragem representativa para aplicação do modelo no estudo do Capítulo 7 (p.155). As rodovias de tráfego "Baixo – B" foram desconsideradas para não se poluir os dados de treinamento dos modelos.

6.2.3. Monitoramento

Os monitoramentos das UA's foram realizados entre os anos de 2013 e 2017, totalizando 5 campanhas. As atividades realizadas abrangiam avaliação funcional, realizada em todos os anos, e avaliação estrutural, feita bianualmente, contagem e pesagem de veículos, e atividades de manutenção, como pintura de macros, placas e inspeção de dispositivos de drenagem.

Para execução dos levantamentos, procurou-se realizar os levantamentos sempre na estação seca da região (sem chuvas), para assim, evitar mudanças climáticas nos levantamentos. Buscou-se espaçar um ano entre os levantamentos consecutivos em cada uma das UA's.

6.2.3.1. Levantamento deflectométrico

O levantamento deflectométrico foi realizado usando o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) nas campanhas dos anos 2013, 2015 e 2017. O FWD utilizado foi configurado seguindo o padrão de dados solicitados pelo HDM-4, sendo: diâmetro do prato de aplicação de carga de 300mm, carga padrão de 40kN e distância entre os sensores (geofones) de 0, 300, 600, 900, 1200, 1500 e 1800 mm, conforme ilustrado pela Figura 35. O ensaio foi realizado com espaçamento de 40,0 metros entre os pontos de aplicação de carga nos dois sentidos da rodovia. Durante a realização do ensaio, foram registradas a temperatura do ar e a temperatura da superfície do pavimento.

Figura 35 - Exemplo de levantamento deflectométrico nas UA's (DNIT, 2017)





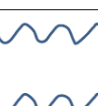


Fonte: DNIT (2017)

6.2.3.2. Área trincada

Na pesquisa de calibração do HDM-4 realizou-se Levantamento Visual Detalhado (LVD) para avaliação detalhada da superfície do pavimento, por meio de vídeo registro e *software* de contagem de ocorrências. Esse levantamento não possui uma norma regulamentada no DNIT, entretanto as patologias levantadas seguiram os preceitos da norma DNIT 005/2003 - TER. A Figura 36 mostra a legenda dos defeitos adotados.

Figura 36 - Legenda de tipo de defeitos adotada no LVC (DNIT, 2017)

LEGENDA ADOTADA			
	TRINCAS ISOLADAS (TTC-TTL) (TLC-TLL)		TRINCAS INTERLIGADAS (TIG)
	PANELAS (P)		JACARÉ (J)
	AFUNDAMENTO (ALP)		REMENDO SUPERFICIAL (RS)
	DESGASTE (D)		EXSUDAÇÃO (EX)

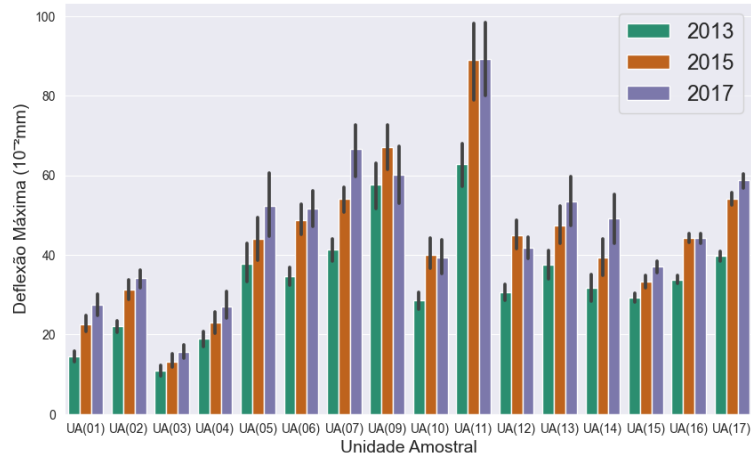
Fonte: DNIT (2017)

6.3. Estudo dos dados deflectométricos

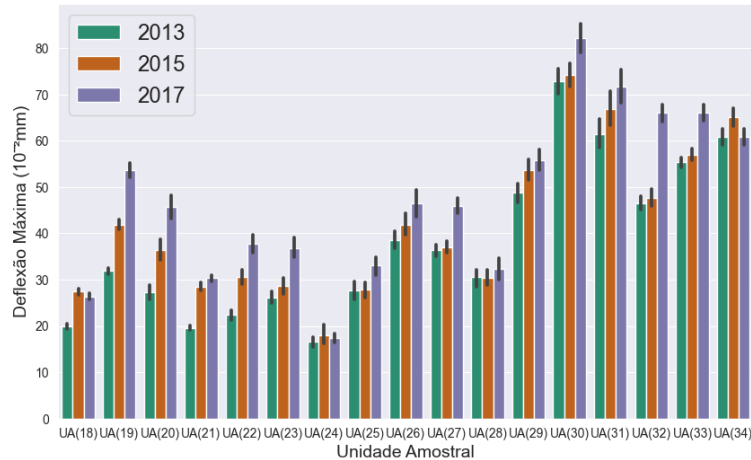
Os resultados de deflexões foram tratados e estruturados em banco de dados como demonstrado e apresentado no Capítulo 3 (p.40). Dessa forma foi possível trabalhar com os dados sem maiores dificuldades. A Figura 37 mostra os resultados de deflexão máxima média por UA para cada um dos levantamentos. Consegue-se perceber que na grande maioria das UA's há a tendência de incremento de deflexões máximas, o que demonstra o efeito danoso estrutural do tráfego ocorrente acumulado com o passar do tempo. Entretanto, em alguns casos, essa tendência não se confirma, como foi identificado nas unidades UA08 e UA47, em que há uma redução da deflexão máxima entre o período monitorado. Não se têm maiores informações sobre pluviometria, ou

obras de manutenção, que possam ter influenciado nesses resultados, portanto estas UA's foram excluídas das análises deste estudo.

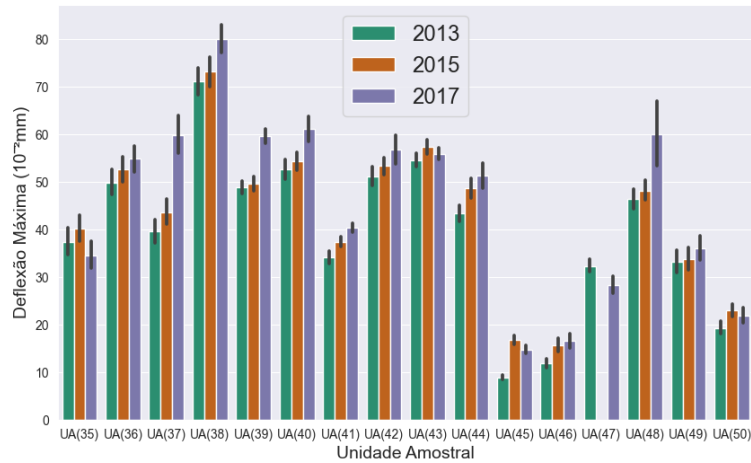
Figura 37 - Deflexões máximas por ano por UA por ano



(a) Resultados para UA de 01 - 17



(b) Resultados para UA's de 18 - 34

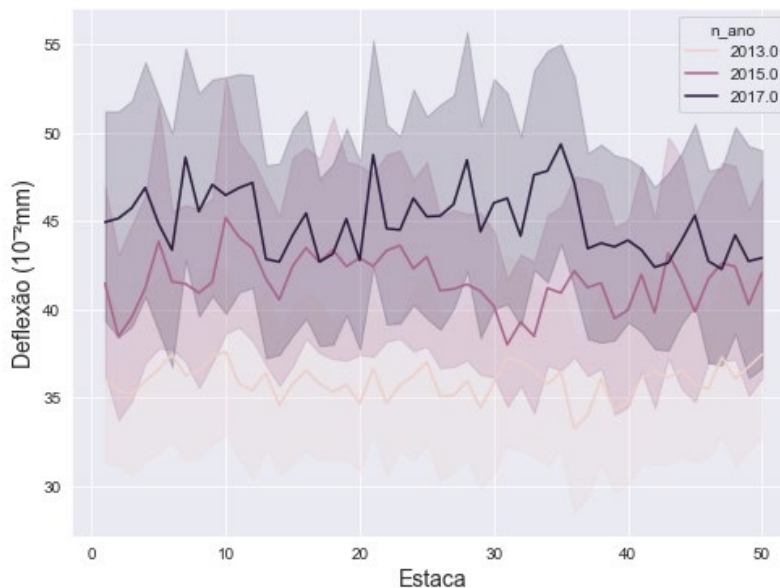


(c) Resultados para UA's de 35 - 50

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

A Figura 38 mostra a evolução dos valores médios de deflexão ao longo da extensão das UA's por ano. Importante notar que as deflexões médias ficam próximas a $40 \times 10^{-2} \text{mm}$, e que, apesar da dispersão, os valores indicam o incremento com o passar dos anos, assim como verificado na Figura 37.

Figura 38 - Distribuição da deflexão média entre as UA's por ano



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

6.3.1. Tratamento dos dados

Os dados foram tratados estatisticamente e, conforme apresentado no Capítulo 3 (p.40), foram estruturados em banco de dados. Foram feitas as “limpezas” dos que apresentavam alguma inconsistência, normalização das deflexões em função da carga, correção das deflexões em função da temperatura e cálculos dos DBPs (RC, AREA, SCI, BDI, BCI, e os coeficientes de Agnesi “a” e “b”). Os dados então foram selecionados e trabalhados para a realização dos estudos deste capítulo.

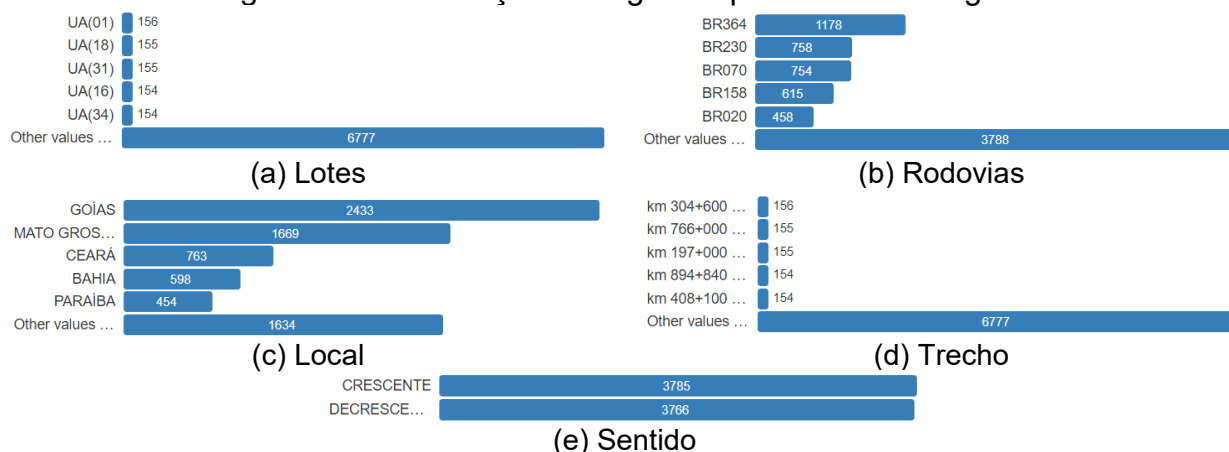
6.3.2. Avaliações estatísticas

A análise exploratória dos dados relevou a existência de 7.551 registros de deflexões no banco de dados, distribuídos em 35 variáveis: 12 categóricas e 22 numéricas. Entre as variáveis categóricas, têm-se: tipo da estrutura, lote, rodovia, local, trecho, sentido,

faixa e quilometragem. Dentre as variáveis numéricas, têm-se: identificador, ano, quilometragem, Número N, espessura do revestimento, carga, D0, D20, D30, D45, D60, D90, D120, D150, D180, Dmax, RC, AREA, SCI, BDI, BCI, “a” e “b”, temperatura do ar, temperatura do pavimento, data e hora.

Todo o banco de dados pode ser separado segundo as variáveis classificatórias. A Figura 39 mostra as categorizações do banco de dados. Os registros estão separados por lote, que é o código da UA (ex.: UA(01) para a primeira UA), tendo em média 156 registros para cada um dos lotes. Na categoria rodovia, têm-se a separação pelo nome da rodovia, em alguns casos têm-se até três UA’s em uma mesma rodovia. A variável local indica a unidade federativa em que se localiza a UA. A variável trecho indica a extensão da UA e possui a mesma quantidade de registros. Os sentidos das rodovias separam o banco de dados em duas categorias: crescente ou decrescente. Distribuem-se as variáveis temporais em data e hora, e são arquivadas no banco de dados como texto e dependem de um tratamento para aplicação em séries temporais.

Figura 39 - Distribuição de registros por variável categórica

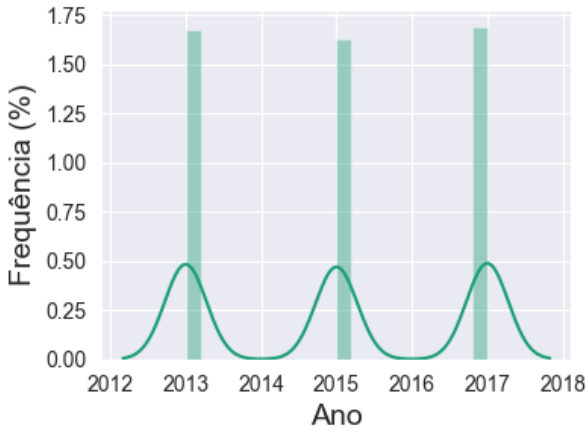


Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

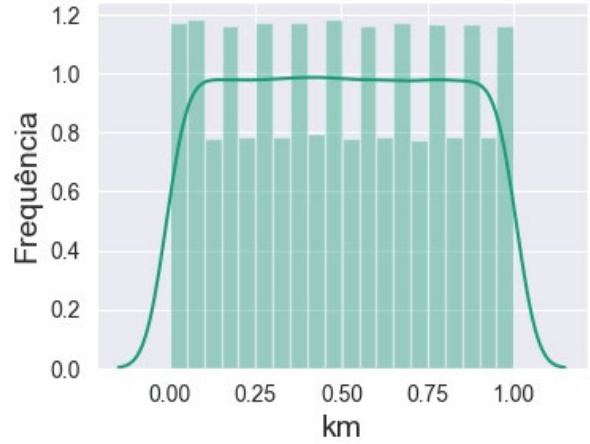
A variáveis numéricas podem ser visualizadas através de histogramas de frequência, apresentados na Figura 40. A variável ano tem somente três valores que se referem às campanhas de levantamento realizadas. A variável km é igualmente distribuída ao longo dos levantamentos dentro da extensão dos segmentos. A espessura do revestimento varia entre 2 e 37cm e não apresenta um padrão estatístico. A carga aplicada pelo FWD foi normalizada e somente apresenta o valor de 40kN. As deflexões,

os parâmetros e as temperaturas apresentam distribuições próximas à distribuição normal.

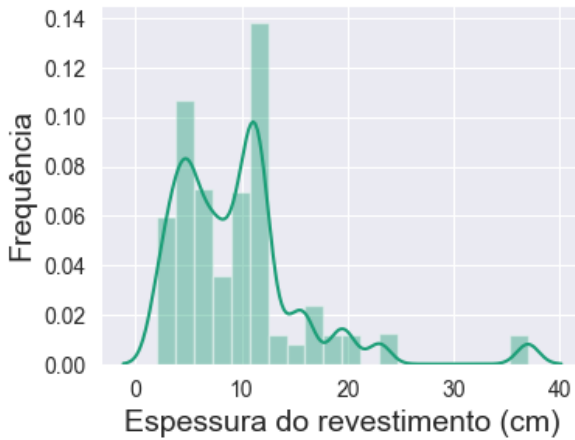
Figura 40 - Histograma de distribuição das variáveis quantitativas



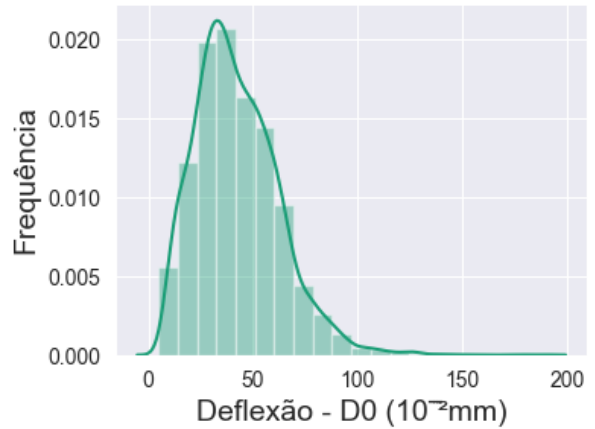
(a) Ano



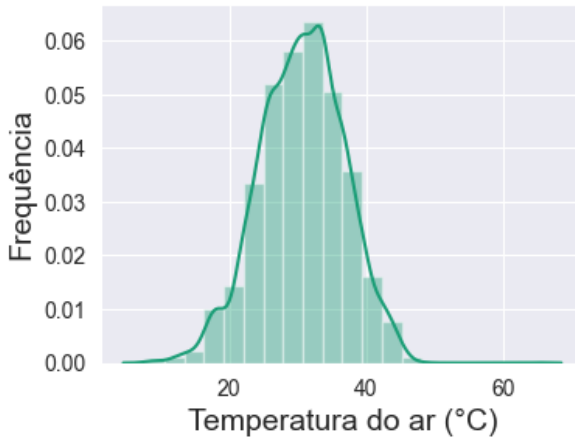
(b) km



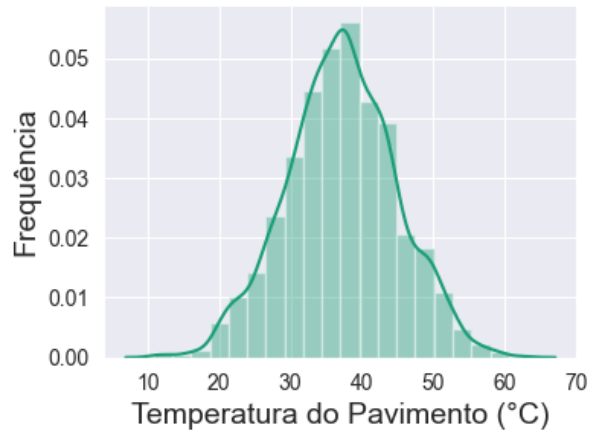
(c) Espessura do Revestimento



(d) Deflexão D0



(e) Temperatura do Ar



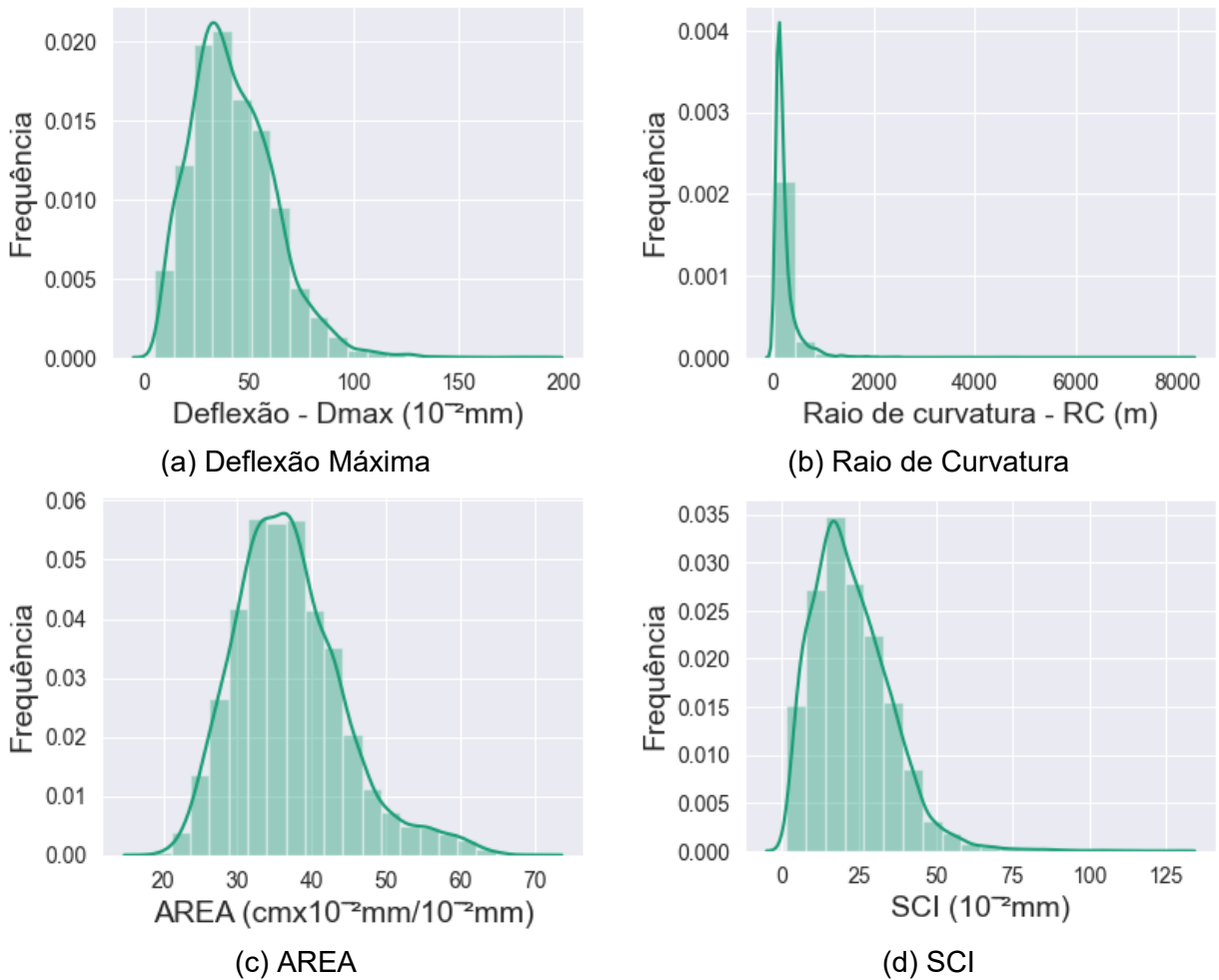
(f) Temperatura do Pavimento

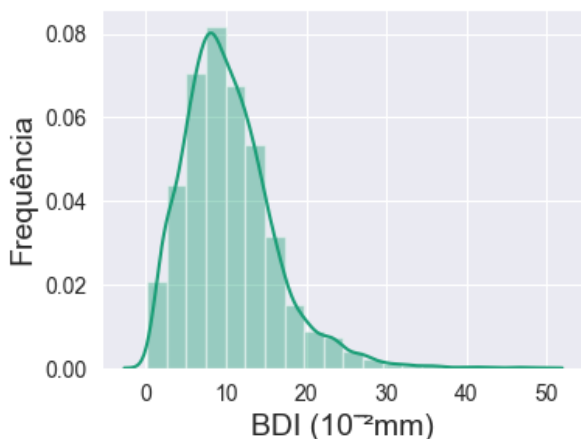
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

6.3.3. Parâmetros de Bacia de Deflexão (DBPs)

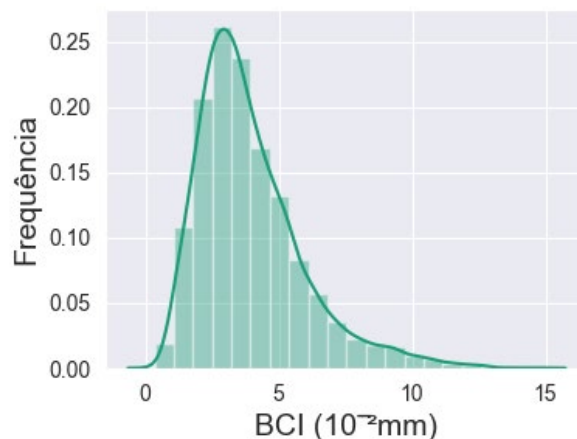
A normalização da bacia de deflexões em função da carga e a correção da temperatura possibilitou realizar comparações entre os levantamentos. As distribuições das frequências dos DBPs podem ser vistas na Figura 41. As curvas se comportam como distribuição normal, lognormal ou Weibull.

Figura 41 - Histograma dos DBPs

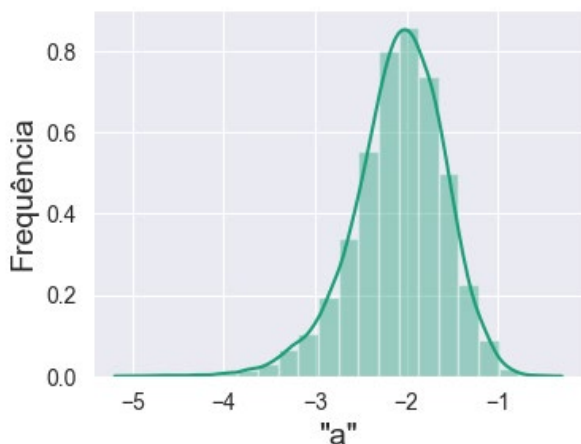




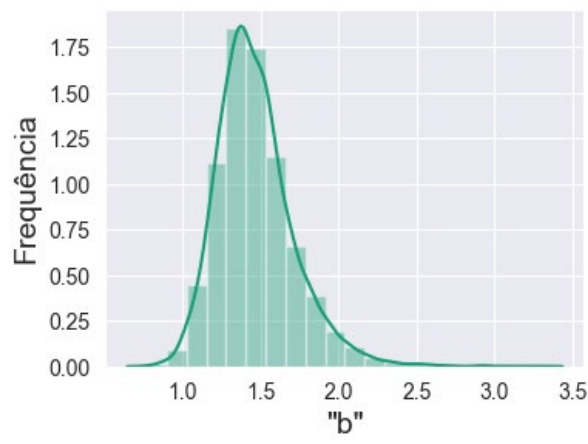
(e) BDI



(f) BCI



(g) "a"



(h) "b"

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

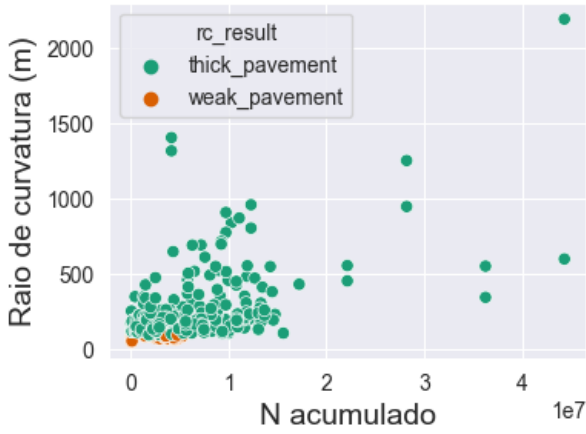
6.4. Estudos de correlações

6.4.1. Correlação dos DBPs com tráfego

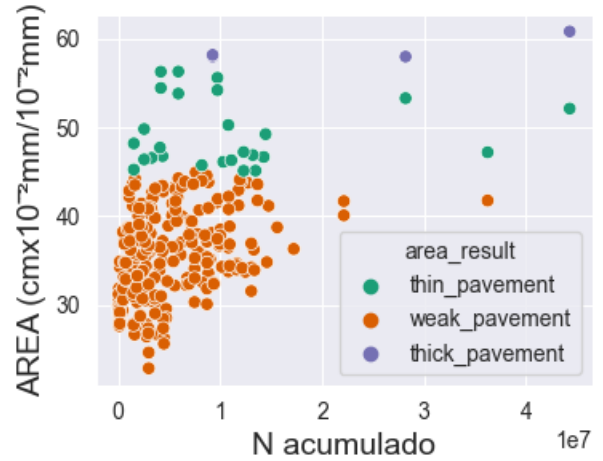
O comportamento esperado para a estrutura é o acúmulo do dano com o passar do tempo e acúmulos de solicitações de tráfego, dessa forma há um incremento das deflexões com o acúmulo do tráfego. Com isso, verificou-se a correlação do incremento dos DBPs com o acúmulo do tráfego (número N USACE), conforme pode ser verificado na Figura 42. Os parâmetros foram classificados quanto aos limites do DNER-PRO 011/1979 para o raio de curvatura, os limites estipulados apresentados por WSDOT (2005) para a AREA, os limites para pavimento flexível de SANRAL (2014) para os

parâmetros SCI, BDI e BCI, e são apresentados os valores dos parâmetros de Agnesi “a” e “b”.

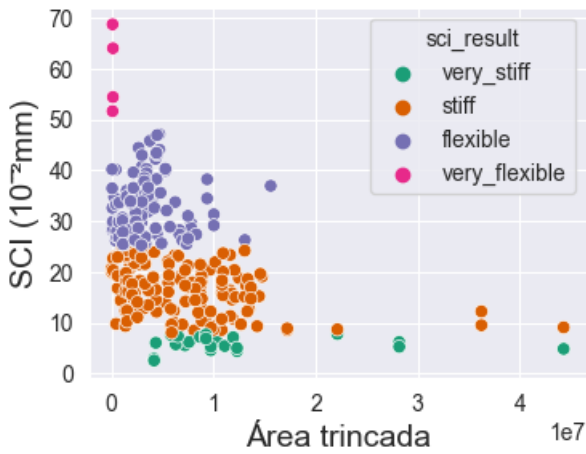
Figura 42 - Evolução dos DBPs com o acúmulo do Tráfego



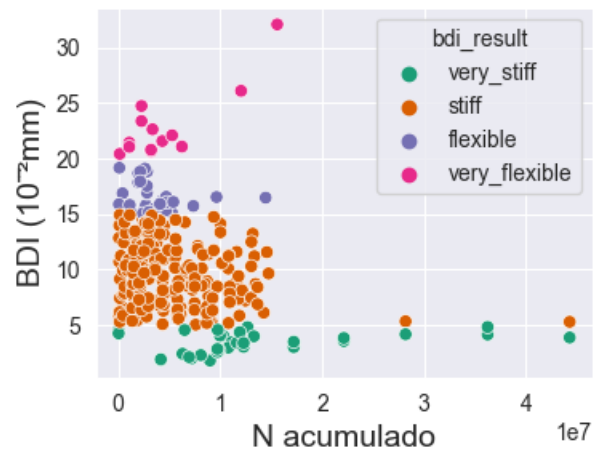
(a) RC x Número N



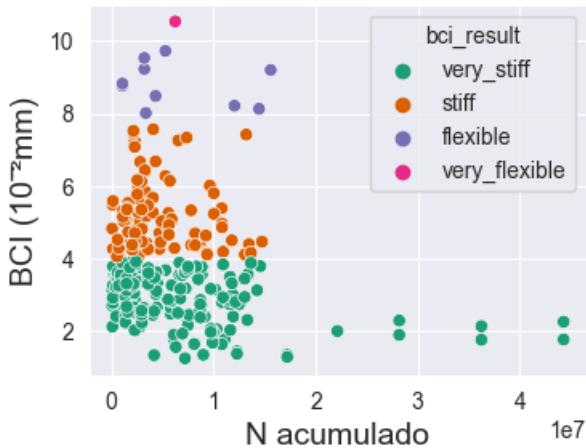
(b) AREA x Número N



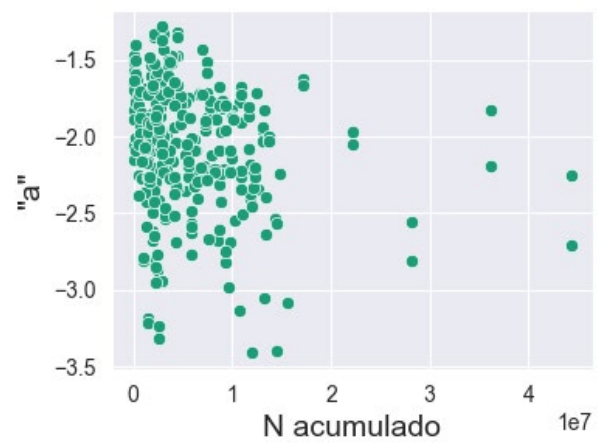
(c) SCI x Número N



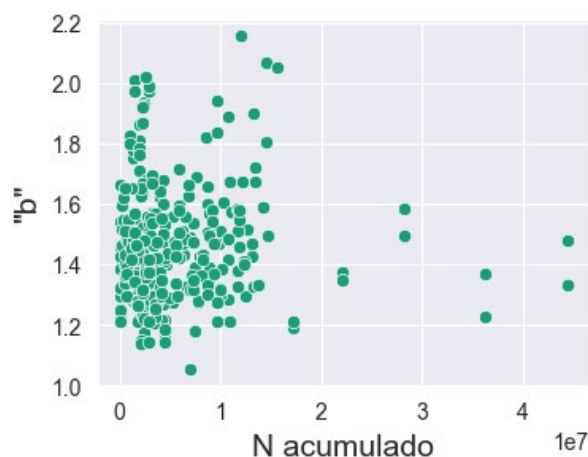
(d) BDI x Número N



(e) BCI x Número N



(f) “a” x Número N



(g) "b" x Número N

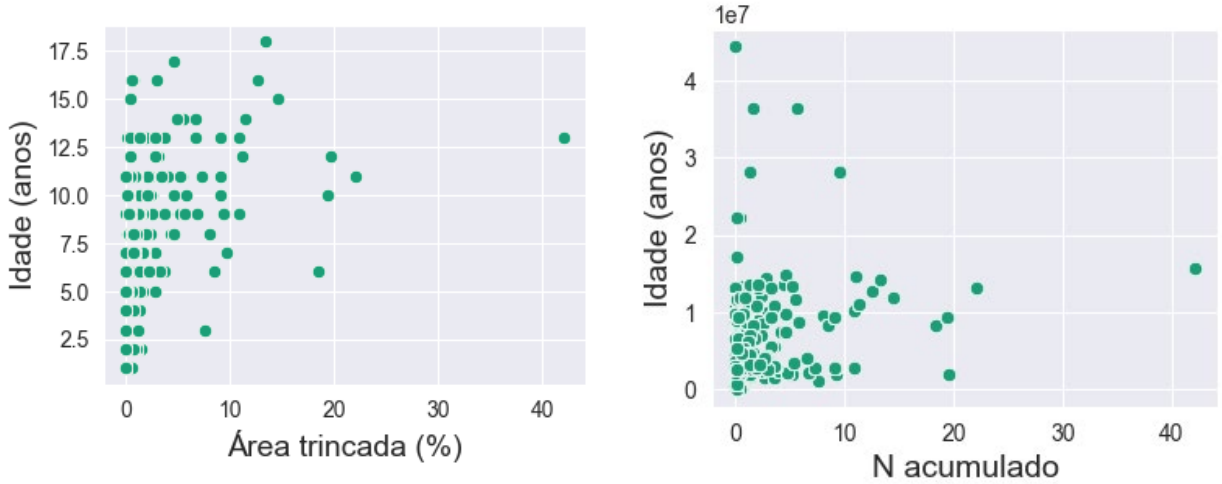
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

Como em geral as estruturas são projetadas para resistir aos respectivos números N de projeto, não há uma correlação direta entre o N e os resultados dos DBPs. Entretanto, há uma tendência dos trechos com maiores valores de tráfego apresentarem RC e AREA mais elevados e SCI, BDI e BCI em níveis menores. Porém, com o acúmulo do número N com o passar do tempo, há tendências de os DBPs apresentarem uma variação, conforme verificado no Capítulo 5 (p.88).

6.4.2. Correlação entre DBPs e a área trincada

O desempenho dos pavimentos foi avaliado através da evolução da área trincada. A ocorrência do incremento de área trincada indica a perda de rigidez do pavimento devido à fadiga do revestimento asfáltico, como verificado no Capítulo 5 (p.88). Os resultados dos levantamentos de área trincada foram plotados em relação às idades dos pavimentos e ao tráfego acumulado. A Figura 43 mostra a tendência de aumento da área trincada com a idade e o tráfego. Mas há trechos que, mesmo com idade elevada, continuam a apresentar baixo trincamento.

Figura 43 - Evolução da área trincada com relação com o tempo e tráfego



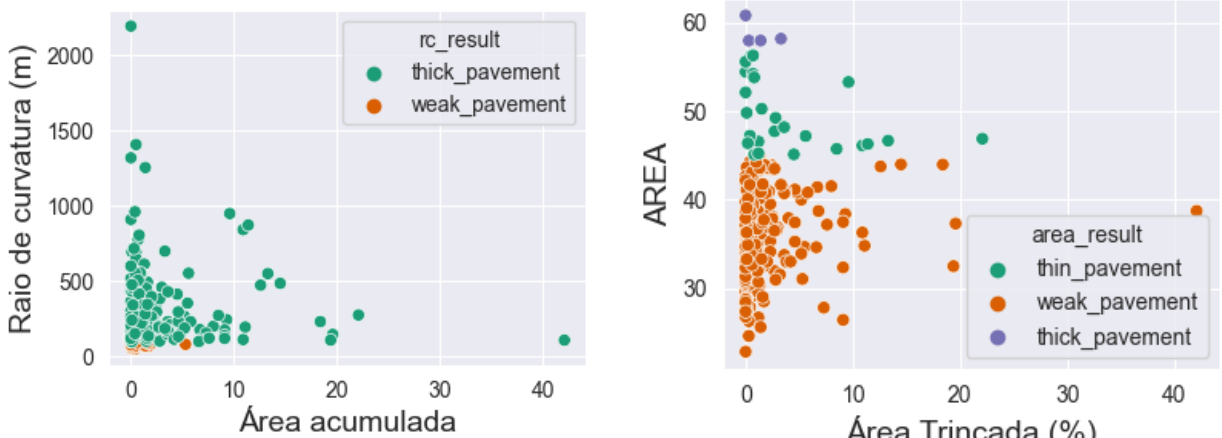
(a) Área trincada x Idade

(b) Área trincada x Número N

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

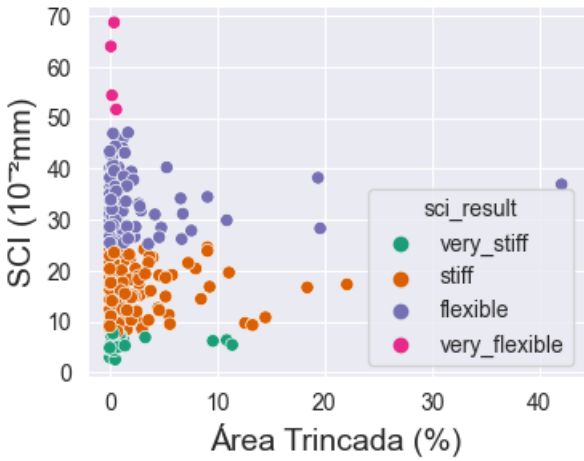
Como a fadiga do revestimento asfáltico altera a bacia de deflexão do pavimento, buscou-se correlação entre o aumento da área trincada e os resultados dos DBPs. Os resultados de DBPs foram correlacionados com os valores de áreas trincadas para cada uma das UA's. A Figura 44 mostra os resultados juntamente com os limites da avaliação dos parâmetros.

Figura 44 - Correlação entre a área trincada e os DBPs

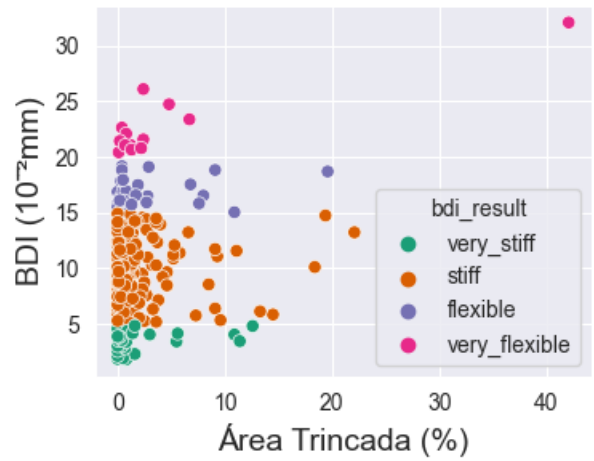


(a) Área trincada x RC

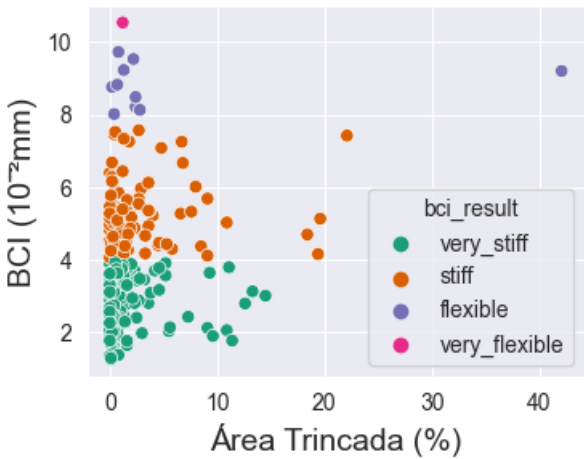
(B) Área trincada x AREA



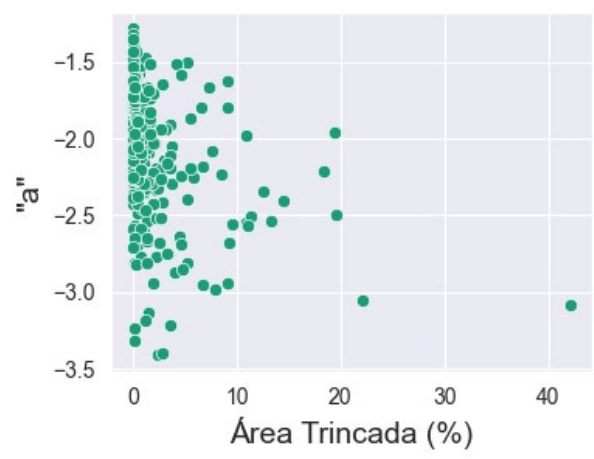
(c) Área trincada x SCI



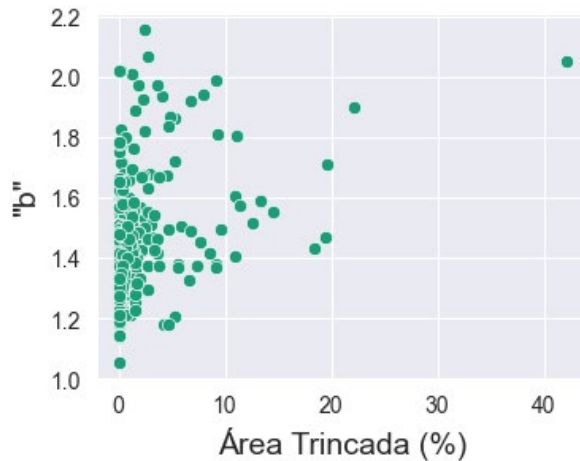
(d) Área trincada x BDI



(e) Área trincada x BCI



(f) Área trincada x "a"



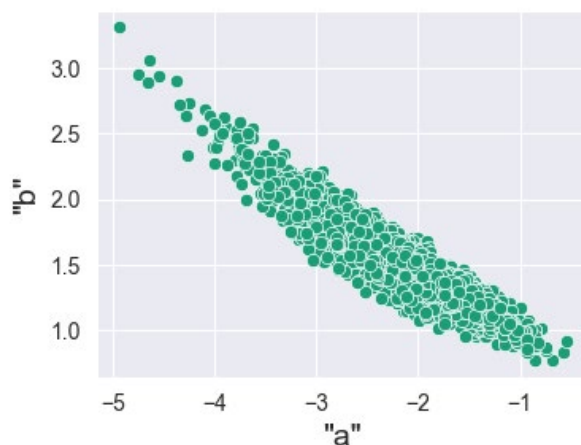
(g) Área trincada x "b"

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

6.4.3. Correlações com os coeficientes de Agnesi

Os coeficientes de regressão da equação de Agnesi (Equação 1 apresentada no Item 2.3) descrevem o formato da bacia de deflexão. A Figura 45 mostra uma correlação inversa entre os valores de “a” e “b”, sendo que quanto maior o valor de “a” menor tende a ser o valor de “b”.

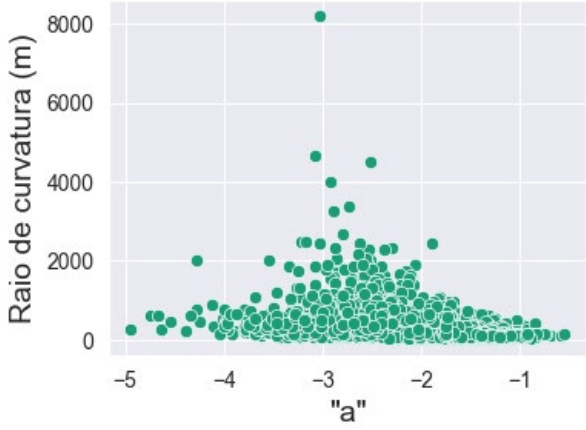
Figura 45 - Correlação entre os coeficientes de regressão “a” e “b”



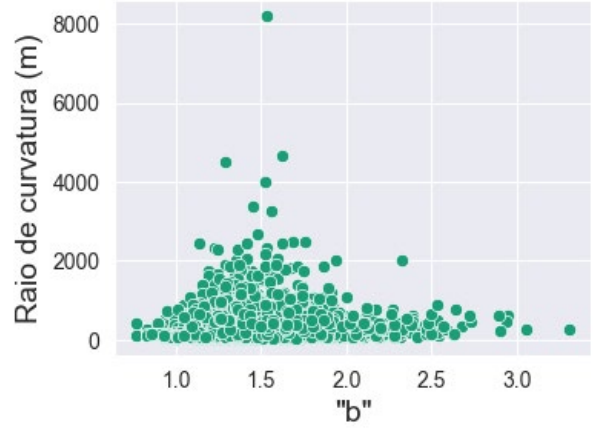
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

As correlações entre os coeficientes “a” e “b” e os DBPs são apresentadas na Figura 46, sendo que elas demonstram que os DBPs são dependentes do formato das bacias de deflexão. Os parâmetros AREA, BDI e BCI apresentaram melhores correlações com os coeficientes de Agnesi. Esses parâmetros são calculados através da diferença entre as deflexões intermediárias e finais da bacia de deflexão (por exemplo, D30, D60 e D90), e por isso estão próximos ao ponto de inflexão da curva, e também são bastante influenciados pelo formato da curva de deflexão, que, por sua vez, é descrito pelos coeficientes “a” e “b”. Essa tendência não é observada com relação aos parâmetros RC e SCI. Esses parâmetros são calculados com as deflexões mais próximas ao ponto de aplicação da carga e são mais influenciados pela grandeza da deflexão máxima do que pelo formato da curva de deflexão.

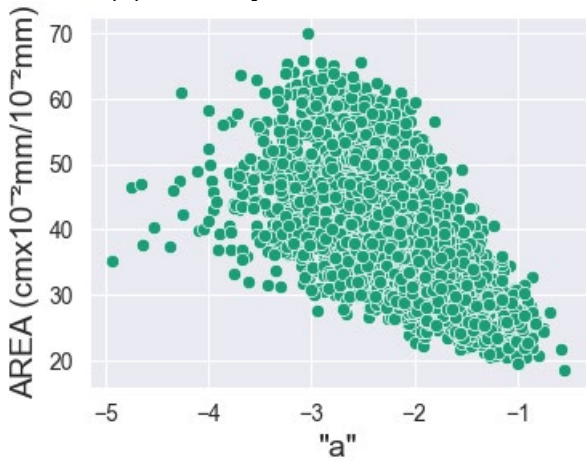
Figura 46 - Correlação entre os coeficientes de Agnesi e os DBPs



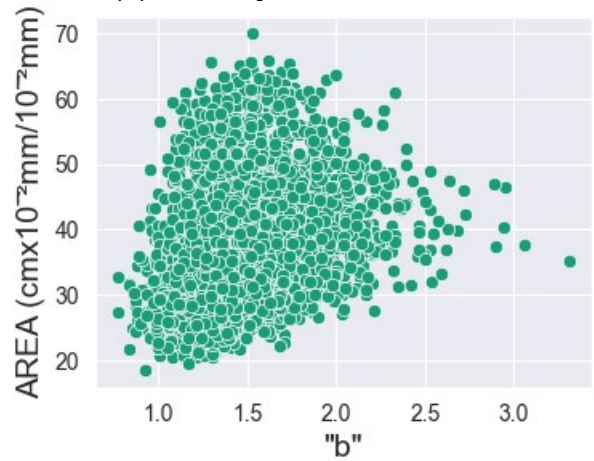
(a) Correlação entre "a" e RC



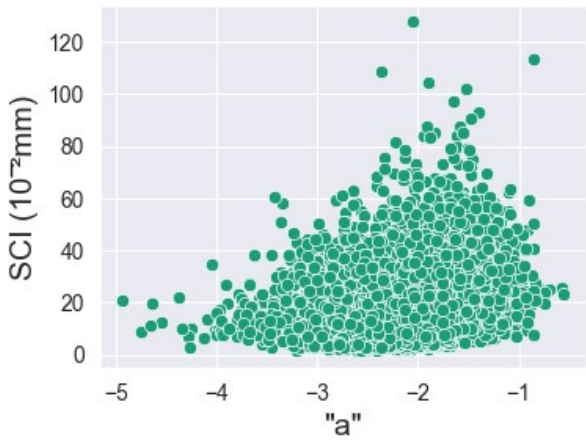
(b) Correlação entre "b" e RC



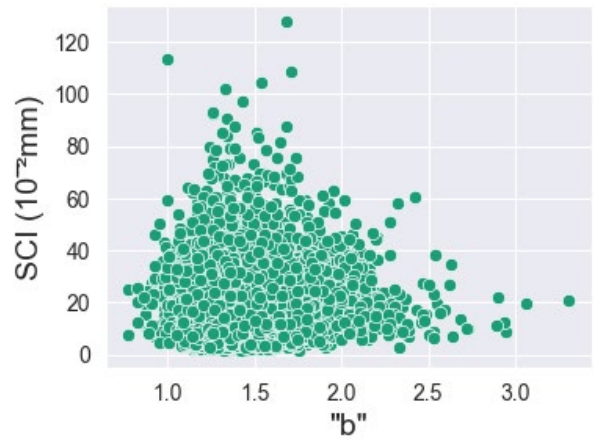
(c) Correlação entre "a" e AREA



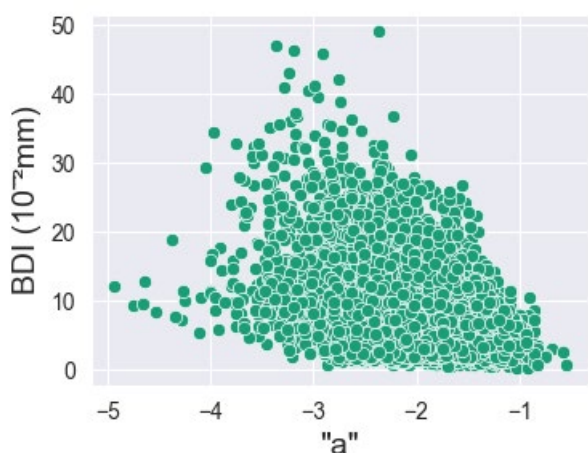
(d) Correlação entre "b" e AREA



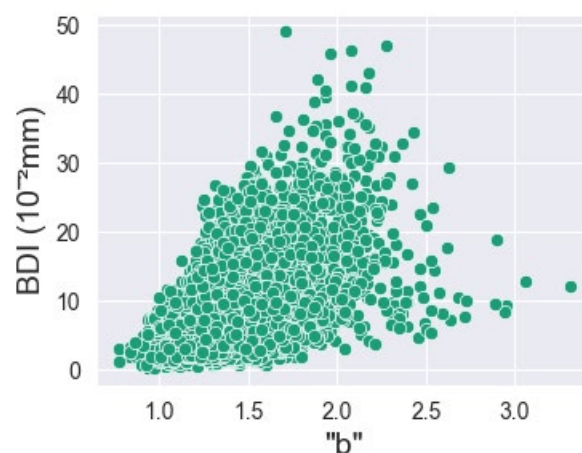
(e) Correlação entre "a" e SCI



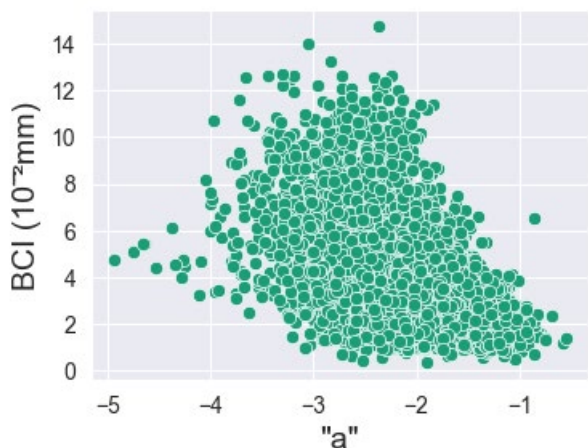
(f) Correlação entre "b" e SCI



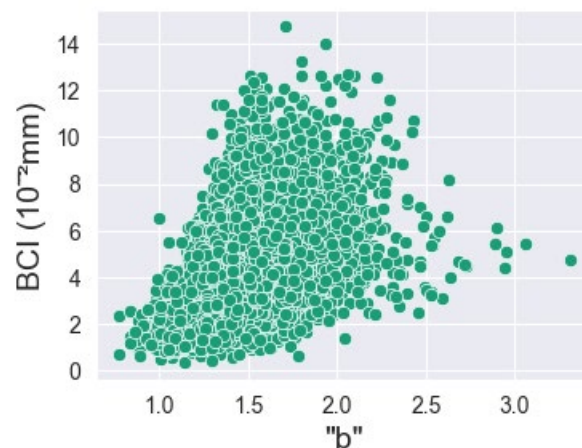
(g) Correlação entre "a" e BDI



(h) Correlação entre "b" e BDI



(i) Correlação entre "a" e BCI



(j) Correlação entre "b" e BCI

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

6.5. Modelos de classificação de comportamento

6.5.1. Modelo de classificação estrutural

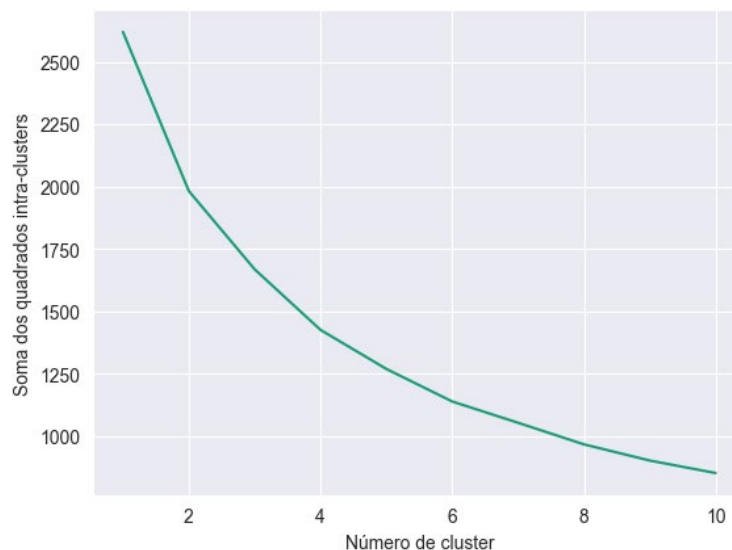
Para o desenvolvimento do modelo de classificação estrutural, foi aplicada a técnica do K-Vizinhos Mais Próximos (*K-Nearest Neighbors* - KNN). Esse é um método estatístico de aprendizado, que foi aplicado neste estudo de forma não supervisionada. Sua aplicação abrange problemas de previsão/classificação de dados por semelhança. A similaridade pode ser determinada pela distância euclidiana ou outro método relacionado. Por ser um método baseado por distância, as variáveis devem ser escalonadas para que valores com alta escala não dominem as métricas de distância.

Foram verificados dois modelos usando o método classificador KNN. O primeiro aplicou o KNN para classificar os trechos com tráfego Moderado, e o segundo para os trechos com tráfego Alto + Muito Pesado. Os dados foram selecionados a partir de uma combinação entre as variáveis inerentes à rodovia (espessura do revestimento), ao desempenho (tráfego acumulado e área trincada) e aos parâmetros de bacia (RC, AREA, SCI, BDI e BCI).

Como a escala da variável “N acumulado” é numericamente muito superior aos demais parâmetros, trabalhou-se com o log do tráfego. Para a aplicação do Método KNN, foi necessária a realização do escalonamento das variáveis, no qual foi adotado o método que escalona os valores segundo a média igual a zero e desvio padrão de + ou - 1.

A quantidade de *clusters* ou classes foi determinada através do Método Cotovelo (*Elbow Method*). Esse método verifica a quantidade ótima de *clusters* com relação entre as diferenças entre *clusters* e a diferença observada intra-*clusters*. A Figura 47 mostra a diminuição das diferenças com o aumento do número de *clusters*. O método determinou que 4 (quatro) seria a quantidade ideal de *clusters* indo ao encontro com a quantidade de classes de classificação do WsDOT (2005) para o parâmetro AREA e de SANRAL (2014) para os parâmetros SCI, BDI e BCI.

Figura 47 - Método Cotovelo para determinação do número de *clusters*



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

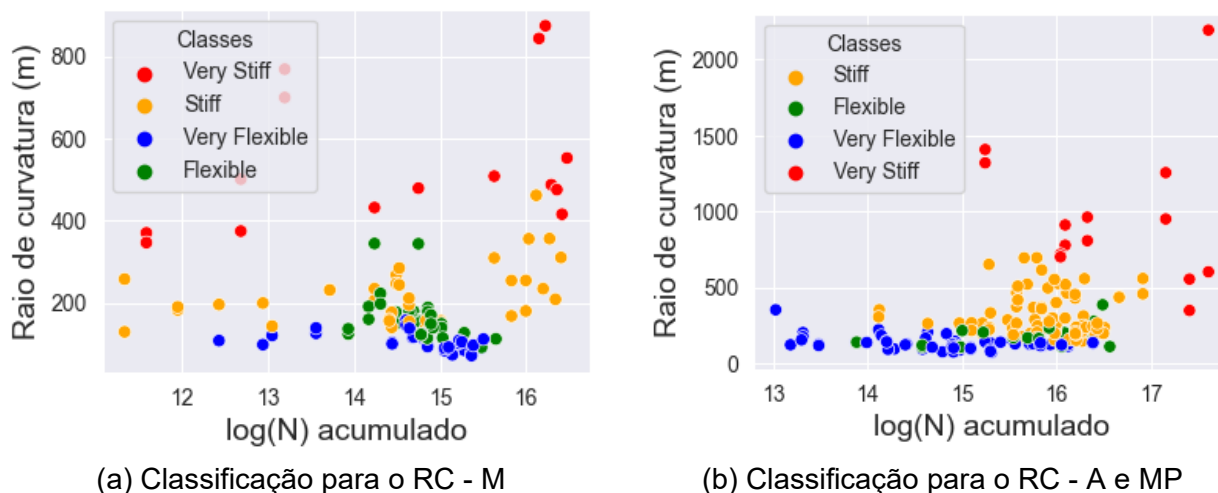
A classificação segundo o KNN separou os registros do banco de dados nas proporções apresentadas na Tabela 17. A divisão do modelo em duas categorias distintas resultou em melhores proporções de balanceamento dos *clusters*.

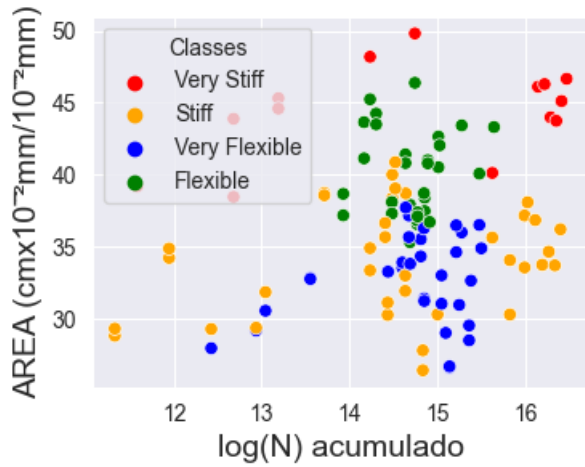
Tabela 17 - Balanceamento da classificação

Cluster/Classe	Quantidade tráfego M	Proporção (%)	Quantidade tráfego A e MP	Proporção (%)
Cluster 0	29	26,85	53	30,99
Cluster 1	6	5,56	77	45,03
Cluster 2	37	34,26	21	12,28
Cluster 3	36	33,33	20	11,70

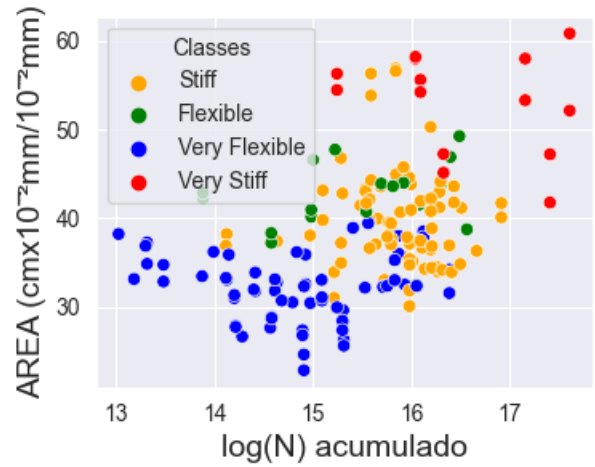
A Figura 48 mostra o resultado da classificação por DBPs e log do tráfego de acordo com as classificações. Como os resultados são de dois modelos diferentes (tráfego Moderado e tráfego Alto + Muito Pesado), são apresentadas duas figuras para cada parâmetro. Como o algoritmo utilizado realiza a aproximação aleatoriamente, os *cluster* para cada modelo acabam sendo distintos. Para melhor compreensão dos resultados, os *cluster* foram renomeados conforme apresentado na Figura 48.

Figura 48 - Resultado da classificação por KNN dos DBPs

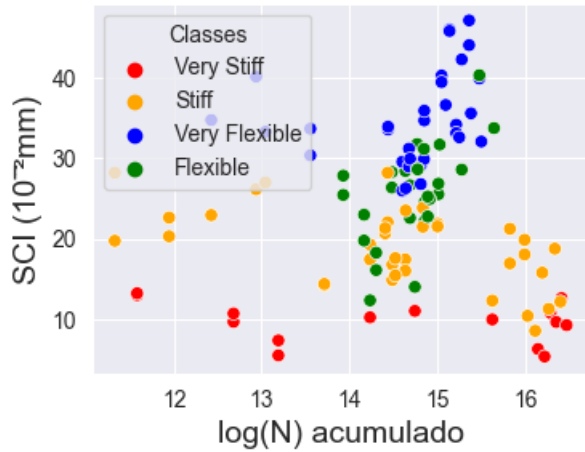




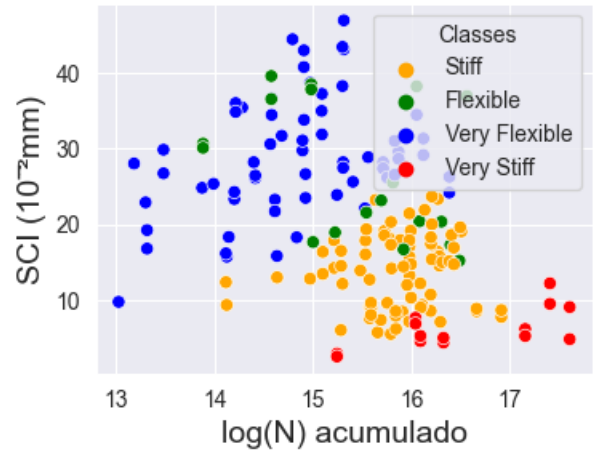
(c) Classificação para o AREA - M



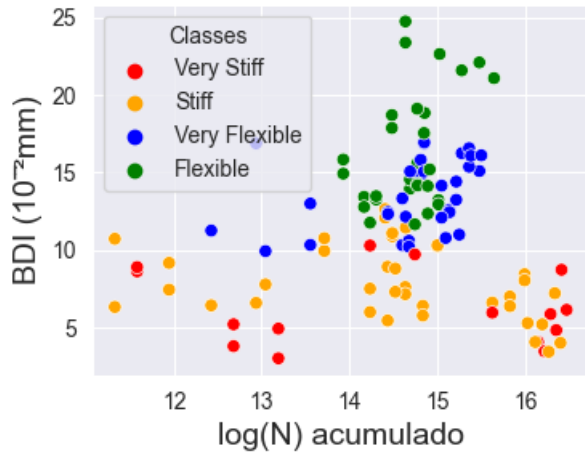
(d) Classificação para o AREA - A e MP



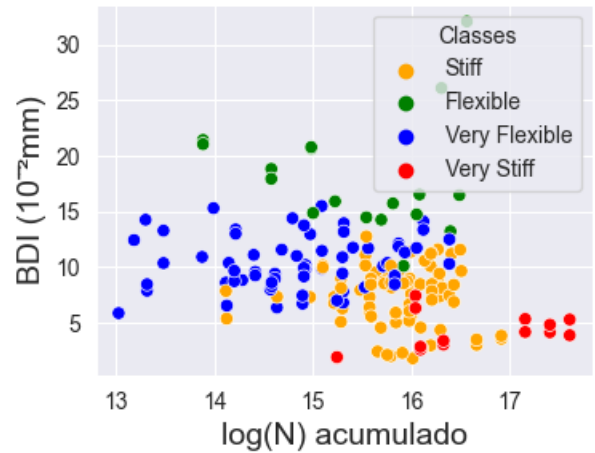
(e) Classificação para o SCI - M



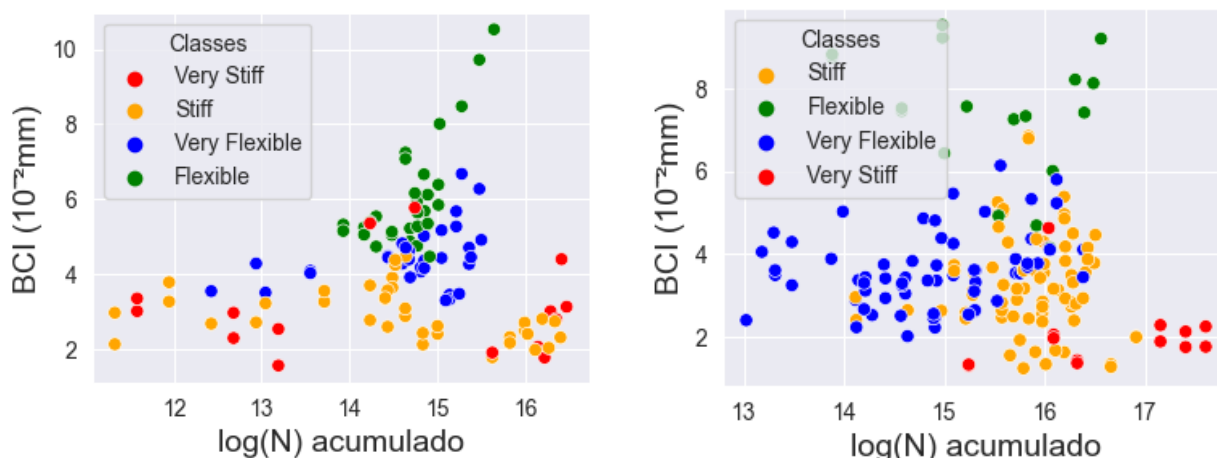
(f) Classificação para o SCI - A e MP



(g) Classificação para o BDI - M



(h) Classificação para o BDI - A e MP



(i) Classificação para o BCI - M

(j) Classificação para o BCI - A e MP

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

Os *cluster* com maiores valores de RC e AREA e menores valores para SCI, BDI e BCI são correlacionados com a classe “*Very Stiff*”, ou “Muito Rígido”. Essa classe representa os pavimentos asfálticos mais adequados para os respectivos tráfegos Moderado e Alto + Muito Pesado, podendo apresentar alto desempenho.

Seguindo a mesma tendência de hierarquia observada para os demais *cluster*, com valores em ordem decrescente, são correlacionados os clusters pertencentes a “*Stiff*”, ou “Rígido”, que devem apresentar desempenho adequado aos tráfegos Moderado e Alto + Muito Pesado.

Para a classificação de “*Flexible*”, ou “Flexível”, correlaciona-se os *clusters* que apresentaram parâmetros moderados e baixos para os tráfegos Moderado e Alto + Muito Pesado. Essa classificação pode apresentar uma pequena imprecisão, pois a tendência de valores decrescente das demais análises não se confirma para os parâmetros BDI e BCI. Entretanto, essa é uma característica dos pavimentos puramente flexíveis, que apresentam a bacia bem acentuada com altos valores de deflexão próximas à aplicação da carga, e pequenas deflexões para maiores distâncias. Os pavimentos asfálticos classificados nessa categoria podem apresentar baixo desempenho.

A classe “*Very Flexible*” ou “Muito Flexível” foi correlacionada com os *clusters* que apresentam os menores valores para RC e AREA, bem como os maiores valores para SCI, BDI e BCI, para ambas as categorias de tráfegos consideradas. As estruturas dos pavimentos asfálticos classificadas como “*Very Flexible*” são as estruturas rodoviárias menos adequadas aos tráfegos ocorrentes.

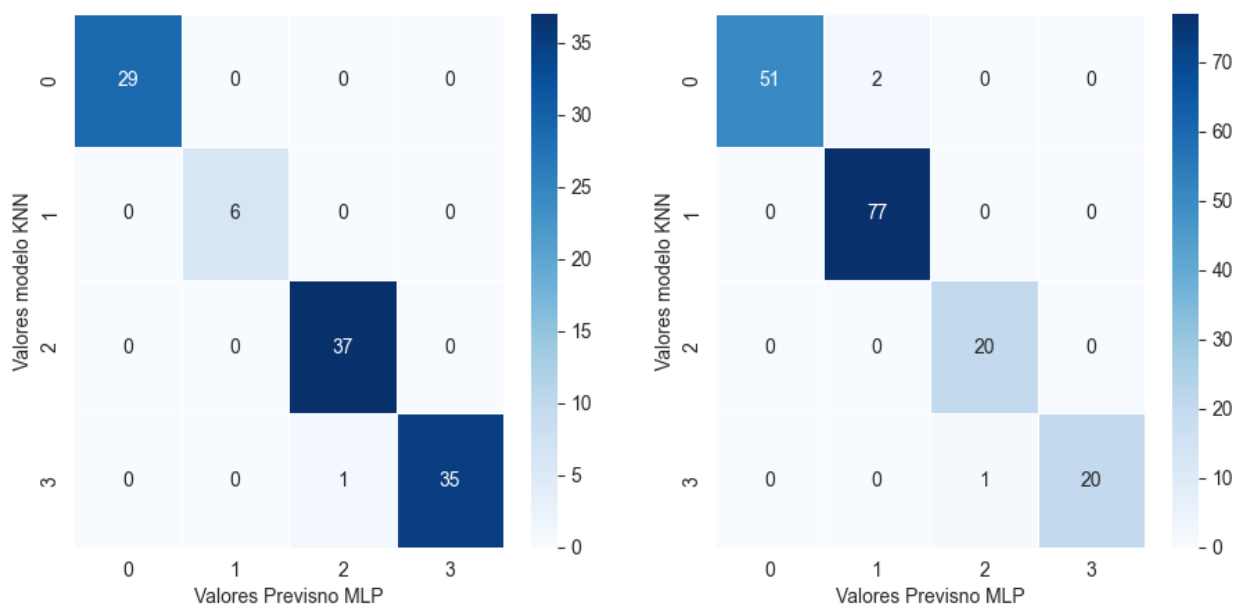
6.5.2. Modelo de previsão de classificação

Visando a aplicação da classificação das estruturas conforme desenvolvido para outros conjuntos de dados, desenvolveu-se uma rede neural que aprendeu os resultados do modelo KNN desenvolvido. Como em muitos bancos de dados não há dados do defeito de área trincada, esse parâmetro foi excluído dos dados de treinamento.

Os modelos foram desenvolvidos aplicando-se a técnica de *Multi Layer Perceptor* (MLP) com duas camadas ocultas com 100 e 50 neurônios com função de ativação “*relu*”. O modelo foi treinado com 400 interações, aplicando-se o algoritmo Adam (“*adam*”) para redução da função de perda durante o processo de aprendizagem.

Ao final do treinamento para o tráfego Moderado, obteve-se Coeficiente de Determinação (R²) de 0,98, Erro Quadrático Médio (MSE) de 0,02 e Raiz Quadrática do Erro-Médio (RMSE) de 0,14. Para o tráfego Alto + Muito Pesado, chegou-se no R² de 0,97, MSE de 0,02 e RMSE de 0,14. Os desempenhos dos modelos também podem ser avaliados pela Figura 49, que mostra as matrizes de confusão ou matrizes de erro para os modelos MLP desenvolvidos.

Figura 49 - Matriz de confusão para as previsões do MLP



(a) Tráfego Moderado

(b) Tráfego Alto + Muito Pesado

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de DNIT (2007)

Na matriz de confusão, a diagonal principal representa o número de previsões acertadas, e os demais valores apresentam o número de previsões erradas. A matriz de confusão é bastante usada pois permite que se avaliem as previsões com “Falso Positivo” ou “Falso Negativo”. Como o ocorrido na Figura 49 (a), em que houve uma previsão de *cluster* 2, e na realidade, seria um *cluster* 3, e na Figura 49 (b), em que ocorreu 2 previsões de *cluster* 1, sendo na verdade *cluster* 0, e 1 como *cluster* 2, sendo na verdade *cluster* 3. O que vale ressaltar é que mesmo havendo erros nas previsões dos modelos MLP, esses erram para classes próximas às da realidade.

6.6. Considerações sobre o Capítulo 6

O tratamento dos dados se mostrou de grande valia, pois permitiu manipular os dados, separando-os em classes, realizando junções e desenvolvendo os modelos. Os processos de tratamento dos dados, a normalização das deflexões e a correção das temperaturas permitem que se realizem comparações dos dados de uma série histórica.

As classificações de acordo com as categorias de tráfego permitiram que fossem obtidos níveis para os parâmetros deflectométricos mais adequados para o tráfego da rodovia. Dessa forma, os modelos desenvolvidos apresentam maiores possibilidades de acertos quanto ao comportamento estrutural.

O modelo de previsão estrutural desenvolvido mostrou alto grau de assertividade, mesmo utilizando menos parâmetros que o modelo de classificação original. A sua implementação permitirá a realização de avaliação em nível de rede somente com dados de deflexão e Número N de projeto.

7. CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RODOVIÁRIOS EM NÍVEL DE REDE

Neste estudo apresenta-se a metodologia de incorporação das técnicas usadas para interpretar e avaliar dados de deflexão a partir de parâmetros de bacia de deflexão (DBPs), com a finalidade de aplicação no âmbito de Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) em nível de rede. Para isso modelos de classificação estrutural são aplicados para rodovias paulistas integrantes do Programa de Concessões Rodoviárias do Estado de São Paulo sob responsabilidade da Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP). As classificações realizadas possibilitam a inferência do comportamento estrutural dos pavimentos das rodovias, elas possibilitam a identificação de segmentos críticos para a realização de recuperação de pavimentos da rede analisada. Possibilitam também identificar melhorias nos pavimentos das rodovias, devido às campanhas de manutenção periódica.

7.1. Introdução

Desde que o FWD foi introduzido no Brasil no final dos anos 1980, seu uso tem sido intensificado e difundido. Sua utilização para realização de monitoramentos periódicos resultou na formação de grandes bancos de dados de bacias de deflexões de pavimentos em órgãos rodoviários, concessionárias de rodovias e empresas de monitoramento de pavimentos rodoviários. Entretanto, ainda carece de avanços em uso e disseminação nacionais de análises desses dados. Seu uso se restringe basicamente aos parâmetros de deflexão máxima (D_{max} ou D_0) e do raio de curvatura (RC) DNER-PRO 011/1979, e para realização de retroanálises estruturais para projetos e avaliações específicas de pavimentos.

Os dados aqui apresentados e explorados são provenientes de trechos rodoviários sob concessão, e por isso estão sob jurisdição de contratos com os órgãos reguladores, no caso específico, a ARTESP, conforme citado acima. O processo de concessão de rodovias se estabelece por meio de contrato em que o poder público concede o direito à exploração da rodovia à iniciativa privada, que passa a ser responsável pela

manutenção e operação da rodovia, devendo manter toda a infraestrutura rodoviária atendendo a determinados parâmetros. O poder público também delega o poder de regulação das concessões a agências reguladoras; no caso do governo federal, essa delegação acontece para a ANTT, já no governo do estado de São Paulo, a agência reguladora é a ARTESP.

Dentro das atribuições das agências, uma das principais atividades é a fiscalização do atendimento dos parâmetros de operação da rodovia. Como a estrutura dos pavimentos rodoviários é o maior ativo da concessão, há dentro do contrato vários parâmetros que a concessão deve manter ao longo do período em que perdurar o contrato. São estipulados parâmetros de segurança, funcionais e estruturais dos pavimentos. Para a verificação do atendimento desses parâmetros, as empresas concessionárias de rodovias devem entregar regularmente resultados de monitoramentos realizados nas mesmas, seguindo o cronograma dos editais das concessões. Nos editais da SP-348 (DER-SP, 1997), da SP-280 (DER-SP, 1999) e da SP-021 (ARTESP, 2010), ao final do tempo de concessão, as concessionárias devem comprovar, por meio de curvas de desempenho, que os pavimentos tenham ao menos 6 anos de “vida remanescente” adicionais.

Dentro dos contratos de concessão das rodovias SP-348 e SP-280, é prevista a realização de numerosos ensaios de monitoramento dos pavimentos, como: controle deflectométrico, inventário da superfície do pavimento, controle das condições de conforto ao rolamento e das condições de segurança, aqui entendida especificamente como aderência pneu-pavimento em pavimentos molhados. Esses ensaios devem ser realizados anualmente, no caso da condição da superfície; a cada 2 anos para os ensaios deflectométricos e condições de conforto ao rolamento; e a cada 4 anos para condições de segurança (DER-SP, 1997, 1999). Para a concessão da SP-021 esses intervalos são um pouco menores, sendo: para o controle deflectométrico mantido a cada 2 anos; a avaliação da superfície mantida a cada ano; mas os intervalos para controle de condições de conforto ao rolamento foram reduzidos para monitoramentos

anuais, e de segurança em pavimentos molhados (aderência pneu-pavimento), reduzidos de 4 para a cada 2 anos (ARTESP, 2010).

Como os editais das SP-348 e SP-280 foram contratos do final dos anos 1990, previa-se na época a execução de ensaio deflectométrico usando a Viga Benkelman. Por isso, há uma diferenciação na realização do ensaio deflectométrico, com o registro da deflexão máxima em todas as faixas a cada 20 metros e a determinação da bacia de deflexão a cada 200 metros (DER-SP, 1997, 1999). Com a difusão do FWD, foi adotado o registro da bacia deflectométrica em todos os pontos de execução do ensaio.

Como o edital da concessão da SP-021 é mais recente, esse item sofreu alteração: para pistas simples, a distância mínima de execução é 20 metros por pista, ou 40 metros por faixa de rolamento; para rodovias de pista dupla, a distância mínima é de 40 metros para a faixa de tráfego pesado e, para os demais, 80 metros. Para o caso do uso de Viga Benkelman, é necessário determinar a bacia de deflexão a cada 400 metros (ARTESP, 2010). Esse edital também ressalta a importância da medição da temperatura do pavimento e estipula que, para as deflexões medidas em pavimentos com temperaturas diferentes da referência de 21°C, deverão ser aplicados fatores de correção. Entretanto, o edital acaba referenciando uma norma do DNER-ME 024/1994 que não contempla estes fatores de correção. A norma que menciona estes fatores é a norma do DER-SP IP-DE-P00-003 2006.

O edital de concessão da SP-021 prevê que, em um ano após o início da concessão, deverá ser implementado um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) com os dados dos levantamentos periódicos, e o SGP deve: (i) ter banco de dados compatível com o utilizado pelo DER/SP; (ii) registrar as intervenções realizadas; (iii) possuir um controle gráfico para visualização dos parâmetros; e (iv) promover um modelo matemático que permita estipular a vida útil e desempenho das intervenções (ARTESP, 2010)

O último edital publicado, referente à concessão do sistema rodoviário integrante do Lote Noroeste (ARTESP, 2022), possibilita tanto a realização dos monitoramentos

deflectométricos utilizando Viga Benkelman quanto o FWD, devendo ser realizado em uma periodicidade anual e mantendo os mesmos espaçamentos de avaliação do edital da SP-021 (ARTESP, 2010). Entretanto, para aplicação de procedimentos de cálculo de reforços estruturais, os quais foram desenvolvidos através do emprego de viga Benkelman, o anexo 6 exige o estabelecimento de correlação entre os equipamentos (Viga Benkelman e FWD) por meio de levantamento nos pavimentos que integram o lote de concessão, em uma extensão mínima de 5.000 metros. Pelo edital a concessionária rodoviária tem a obrigação de manter o SGP com banco de dados alimentado periodicamente com os resultados dos levantamentos, bem como características dos pavimentos (espessura das camadas e materiais utilizados).

Exigências como as dos editais de concessão do estado de São Paulo e dos Programas de Exploração de Rodovias - PER da ANTT ajudaram a popularizar o uso de FWD no ambiente técnico brasileiro. Atualmente há várias empresas com equipamentos de quase todos os modelos atuando no Brasil. A realização das campanhas de monitoramentos periódicos de deflexão possibilitara que existam grandes bancos de dados de deflexões nos órgãos reguladores, órgãos administradores rodoviários, empresas concessionárias de rodovias, construtoras e projetistas de rodovias. Por se tratar de banco de grande quantidade de dados de alta complexidade, estudos aprofundados são requeridos envolvendo custo computacional e custo profissional.

Nos últimos anos, a evolução computacional (que reduziu o custo de processamento e armazenamento de dados) proporcionou a aplicação de métodos estatísticos de aprendizagem de máquinas de forma a minorar os custos e aumentar a rapidez e a precisão, fazendo com que bancos de dados de SGP possam ser estudados de forma sistemática e que modelos de análise sejam desenvolvidos e implementados. Como o realizado por Aranha (2022) para, também, dados da ARTESP.

Dessa forma, neste capítulo tem-se o objetivo de aplicar a metodologia desenvolvida de tratamento de dados, os modelos desenvolvidos de correção da bacia deflectométrica

em função da temperatura e os modelos de classificação das estruturas dos pavimentos rodoviários para realização de análise estrutural de pavimentos asfálticos rodoviários em nível de rede. Tem-se também por objetivo verificar a evolução do comportamento estrutural dos pavimentos asfálticos ao longo do período de operação da rodovia.

7.2. Coleta de dados

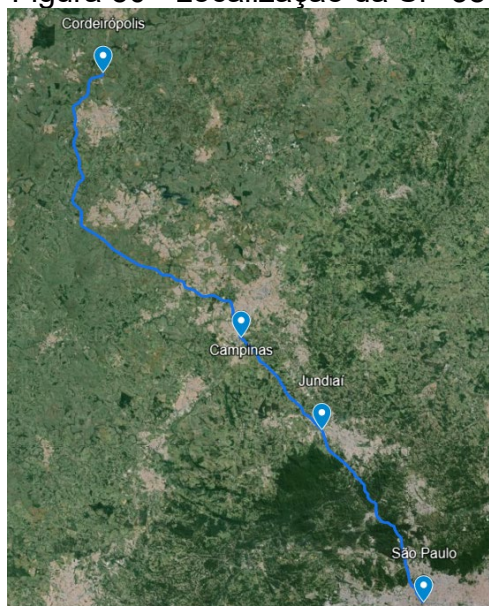
Foi disponibilizado, por meio da Diretoria de Investimentos da ARTESP, dados de monitoramentos periódicos e projetos de restauração de pavimentos desenvolvidos no âmbito do Programa de Concessões Rodoviárias do Estado de São Paulo, pertencente à Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP).

Os dados de monitoramento são referentes a levantamentos deflectométricos realizados usando FWD e projetos de restauração de pavimentos realizados dentro dos contratos de concessão das respectivas rodovias: Lote 01 - Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), sob responsabilidade da Concessionária do Sistema Anhanguera Bandeirantes S.A. - AutoBAN (DER-SP, 1997); Lote 20 - Rodovia Castelo Branco (SP-280), sob administração da Concessionária Rodovias Integradas do Oeste S.A. - SPVias (DER-SP, 1999); e Lote 25 - Rodoanel Mário Covas SP-021 - Trecho Sul e Leste, sob cuidados da Concessionária SPMAR S.A. (ARTESP, 2010).

7.2.1. Fonte de dados

A SP-348 conecta as duas maiores regiões metropolitanas do estado de São Paulo, as cidades de São Paulo e Campinas, sendo São Paulo a cidade de maior PIB nacional municipal, conectada a Campinas, que ocupa o quinto PIB nacional de municípios. O primeiro trecho da rodovia foi construído em 1978 e possui aproximadamente 85 km entre São Paulo e Campinas; seu prolongamento, com 78 km, foi concluído em 2001 ligando Campinas a Cordeirópolis. A Figura 50 mostra a localização da SP-348.

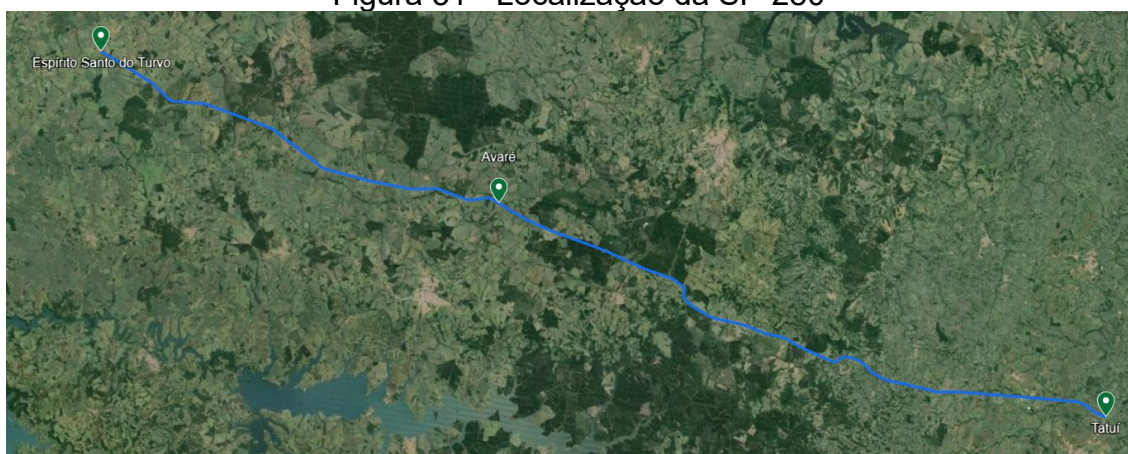
Figura 50 - Localização da SP-384



Fonte: Google (2024)

A Rodovia Presidente Castelo Branco SP-280 conecta a Cidade de São Paulo à região Oeste do estado de São Paulo, e é um importante corredor logístico transportador de grãos. Sua construção iniciou-se em 1963 e o primeiro trecho foi inaugurado em 1968, ligando São Paulo a Torre da Pedra. O Lote 20 da SP-280 consiste no trecho entre as cidades de Tatuí (km 129,600) e Espírito Santo do Turvo (km 315,030). A Figura 51 mostra a localização da SP-280 e do trecho em análise.

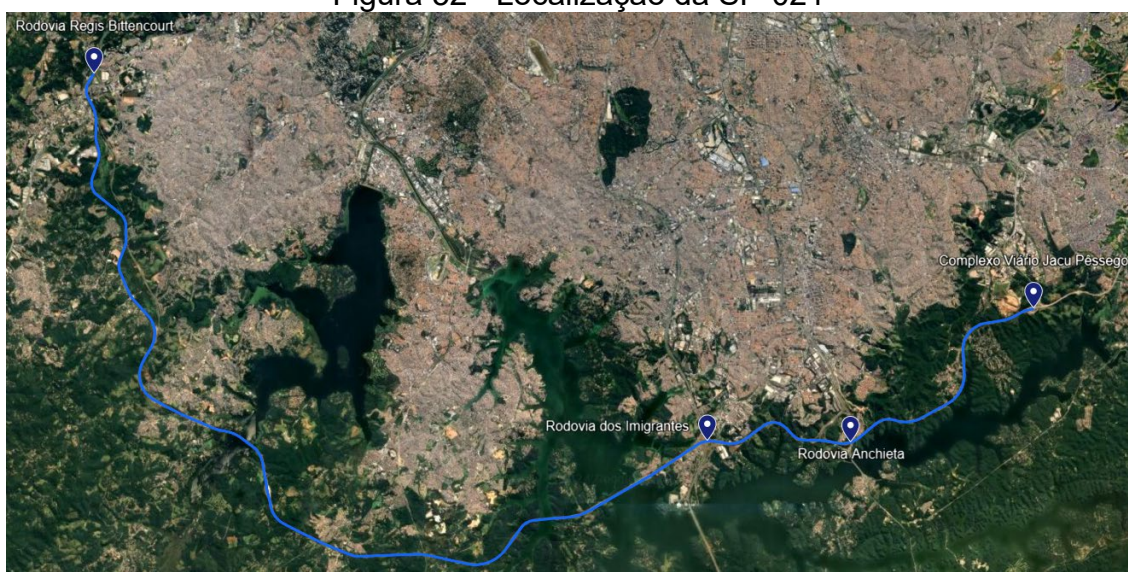
Figura 51 - Localização da SP-280



Fonte: Google (2024)

O Rodoanel Mario Covas SP-021 é um importante contorno ou anel logístico da região metropolitana da cidade de São Paulo, que reduz o trânsito de passagem na Cidade de São Paulo. O trecho Sul conecta o Trecho Oeste do Rodoanel às rodovias Regis Bittencourt, Rodovia dos Imigrantes, ao Complexo Viário Jacu Pêssego em Mauá e ao Trecho Leste do Rodoanel. O Rodoanel Sul teve sua construção iniciada em 2007 e inauguração em 2010. A Figura 52 mostra a localização do Rodoanel trechos Sul e Oeste.

Figura 52 - Localização da SP-021



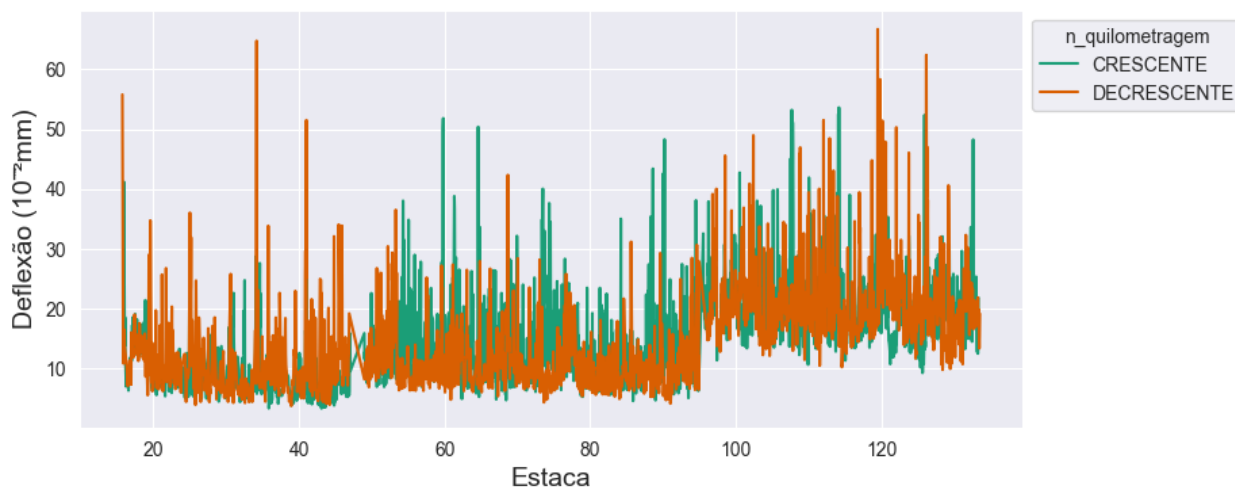
Fonte: Google (2024)

7.2.2. SP-348 Rodovia dos Bandeirantes

Os dados da rodovia SP-348 são referentes aos levantamentos deflectométricos realizados nos trechos São Paulo/Jundiaí/Campinas nos anos entre 1999 e 2016. E no trecho final entre Campinas e Cordeirópolis nos anos entre 2003 e 2016, uma vez que esse último trecho foi construído somente em 2002. A visualização dos resultados de deflexão máxima do levantamento de 2014 para a faixa mais carregada indica a subdivisão da rodovia em ao menos 3 trechos distintos, como pode ser observado na Figura 53. Entre as quilometragens 14 e 47, a média da deflexão máxima foi de $10,21 \times 10^{-2} \text{mm}$ e desvio padrão de $5,78 \times 10^{-2} \text{mm}$. Entre os km 47 e 95 com média de $12,08 \times 10^{-2} \text{mm}$, apresentando uma pequena variação entre a pista com quilometragem

creciente ($13,21 \times 10^{-2} \text{mm}$) e decrescente ($10,86 \times 10^{-2} \text{mm}$), mas ambas dentro do desvio padrão de $5,80 \times 10^{-2} \text{mm}$. E entre os km 95 ao 173, com média igual a $20,70 \times 10^{-2} \text{mm}$ e desvio padrão de $6,43 \times 10^{-2} \text{mm}$.

Figura 53 - Deflexão máxima para o ano de 2014 na faixa mais carregada



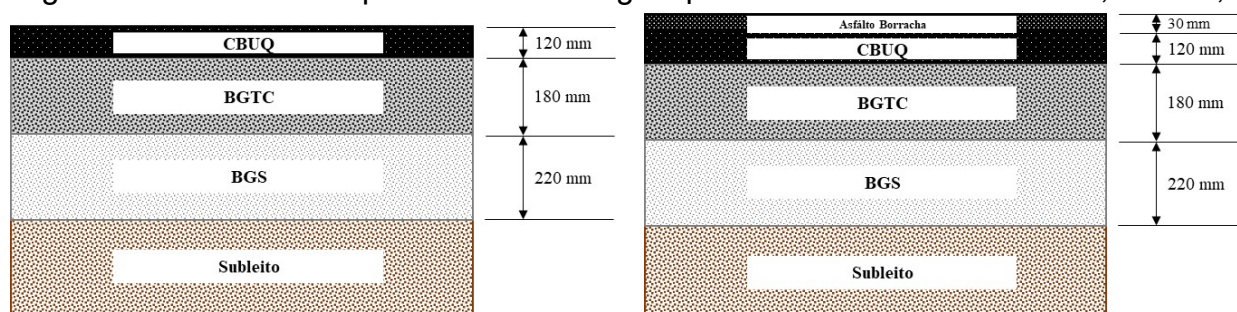
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

As divisões percebidas pela deflexão máxima são resultantes de vários fatores, como diferentes números N (tráfego) em cada um dos trechos, projetos de pavimentos distintos, materiais diferentes, épocas de construção e manutenção também diferentes, mudanças na camada de subleito dos trechos, relevo, clima etc.

As informações estruturais dos pavimentos foram encontradas em projetos de restauração realizados no ano de 2009 para o trecho entre os km 14,00 e 95,00 (São Paulo – Campinas) e em 2011 para o prolongamento entre os Km 95,00 e 173,00 (Campinas - Cordeirópolis). O perfil da estrutura do trecho entre São Paulo e Campinas é mostrado na Figura 54. A base cimentada caracteriza um pavimento asfáltico semirrígido. As estruturas existentes dos trechos foram cadastradas através de poços de sondagens, revelando variação entre as espessuras das camadas. Em alguns trechos, a estrutura projetada para restauração do pavimento foi a realização de reforço estrutural com camada de 3,0 cm de CBUQ. O projeto do prolongamento (Campinas - Cordeirópolis) é mostrado na

Figura 55. A camada de base com material granular e a sub-base com material cimentado caracterizando um pavimento asfáltico semirrígido invertido. Um projeto de restauração foi realizado em 2011, mas esse somente recomentou reparos pontuais.

Figura 54 - Estrutura de pavimento semirrígido para o trecho entre os Km 14,00 e 95,00

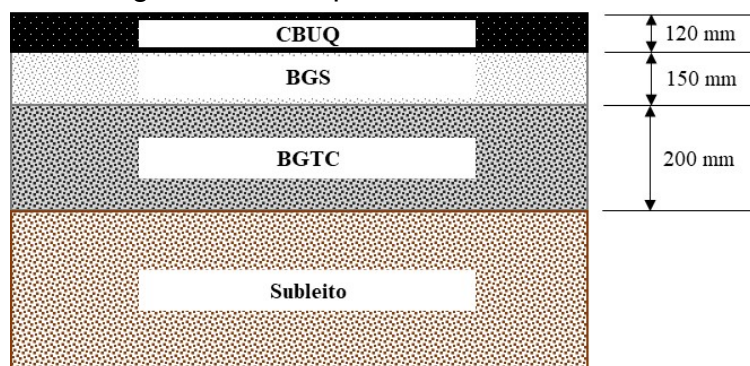


(a) Estrutura original

(b) Estrutura após reforço em 2009

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

Figura 55 - Estrutura Semirrígida Invertida para o trecho entre os Km 95,00 e 173,00

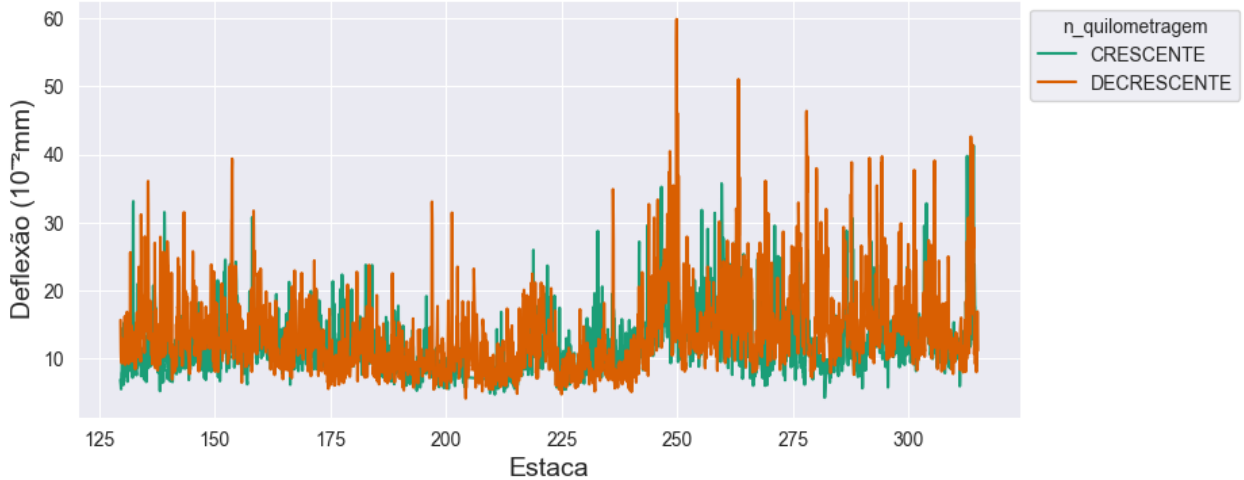


Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

7.2.3. SP-280 Rodovia Castelo Branco

Os levantamentos deflectométricos na rodovia Castelo Branco foram realizados entre os períodos de 2008 e 2020, entre o trecho de Tatuí a Espírito Santo do Turvo. Os dados de deflexão máxima indicam a divisão da rodovia em dois trechos diferentes, conforme indicado na Figura 56. Trecho entre as cidades de Tatuí e Avaré (km 129 até o km 241), interseção com a SP-255, com média de D_{max} de $11,36 \times 10^{-2} \text{ mm}$ e DP de $3,99 \times 10^{-2} \text{ mm}$; e o trecho entre as cidade de Avaré e Espírito Santo do Turvo (km 241 ao km 315), com média de $15,16 \times 10^{-2} \text{ mm}$ e DP igual a $5,97 \times 10^{-2} \text{ mm}$.

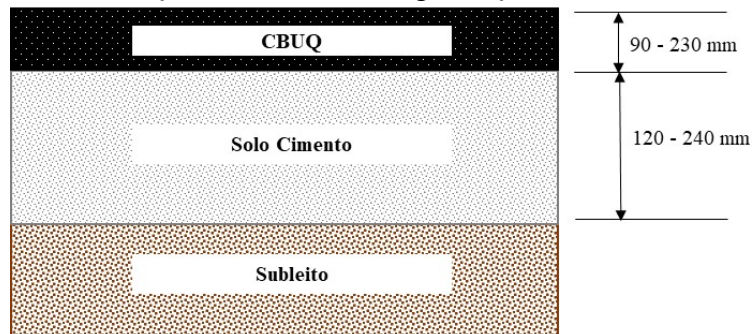
Figura 56 - Deflexão máxima para o ano de 2014 na faixa mais carregada



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

Informações históricas de projetos e sondagens realizadas nos trechos indicam que o pavimento tem uma estrutura do tipo asfáltica semirrígida, com base de Solo-Cimento, com as espessuras das camadas variando conforme indicado na Figura 57. A estrutura pode se caracterizar como um pavimento semirrígido ou um pavimento flexível a depender da porcentagem de cimento adotado na mistura Solo-Cimento e o grau de fadiga da camada de base. Essa informação não foi localizada nos arquivos disponibilizados e por isso o pavimento será nomeado como estrutura semirrígida neste estudo.

Figura 57 - Estrutura de pavimento semirrígido tipo da rodovia SP-280



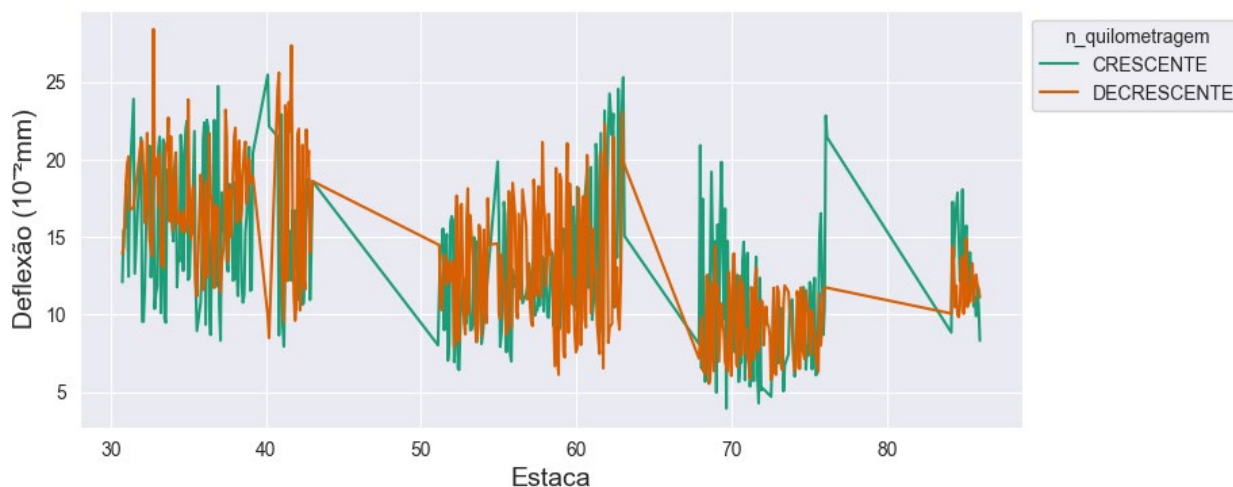
Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

O projeto realizado em 2013 mostrou que a estrutura no geral atendia a todos os parâmetros de análise e por isso recomendou-se somente reparos pontuais e adoção de microrrevestimento asfáltico nos segmentos que apresentavam a ocorrência de trincamento.

7.2.4. SP-021 Rodoanel Mario Covas Trecho Sul

As campanhas de levantamento defletoométrico utilizando FWD foram realizadas no Trecho Sul do Rodoanel nos anos de 2013, 2015 e 2017. Esse trecho foi construído cortando as represas Guarapiranga e Billings e por isso intercala segmentos com pavimento rígido e asfáltico do tipo semirrígido. Por essas questões, o trecho em análise pode ser dividido em 4 trechos diferentes, como indicado na Figura 58: trecho entre os km 30 e 43 com $D_{\text{máx}}$ médio de $16,35 \times 10^{-2} \text{mm}$ e DP de $4,19 \times 10^{-2} \text{mm}$; trecho entre os km 51 e 63 com $D_{\text{máx}}$ médio de $14,17 \times 10^{-2} \text{mm}$ e DP de $4,40 \times 10^{-2} \text{mm}$; trecho entre os km 67 e 76 com $D_{\text{máx}}$ médio de $13,38 \times 10^{-2} \text{mm}$ e DP de $4,71 \times 10^{-2} \text{mm}$; e trecho entre os km 84 e 86 com $D_{\text{máx}}$ médio de $13,35 \times 10^{-2} \text{mm}$ e DP de $4,62 \times 10^{-2} \text{mm}$. Os trechos em pavimento rígido existentes foram desconsiderados por não serem escopo deste estudo.

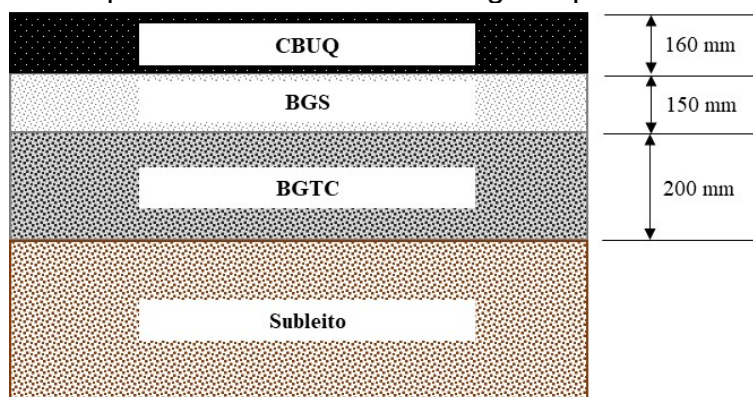
Figura 58 - Deflexão máxima nos pavimentos asfálticos para o ano de 2013 na faixa mais carregada



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

As informações estruturais foram encontradas em poços de sondagens feitos para elaboração de projetos de correção estrutural de segmentos específicos. A Figura 59 mostra a estrutura projetada para o trecho Sul do Rodoanel. Os trechos do Rodoanel Sul com revestimento asfáltico se caracterizam por serem uma estrutura semirrígida invertida.

Figura 59 - Estrutura de pavimento asfáltico semirrígido tipo da rodovia SP-021



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

7.3. Tratamento de dados

As coletas, organizações e tratamentos dos dados foram realizados seguindo os mesmos procedimentos apresentados no Capítulo 3 (p.40). Os dados foram coletados de planilhas excel, arquivos de texto word e arquivos pdf. Foi utilizado *script* em python para leitura e estruturação de um banco de dados sqlite. Com a organização dos dados seguindo o mesmo padrão já adotado, separaram-se os dados por categorias.

Foi realizado o mesmo pré-tratamento de dados no qual se eliminam as bacias com indicativo de problemas: bacias com deflexões zeradas, bacias com deflexões invertidas e bacias com deflexões constantes.

Também foi realizada a regressão de Agnesi para os cálculos das deflexões D25, usados nas determinações dos Raios de Curvaturas, e as deflexões D150 e D180. Dessa forma, o banco de dados segue o mesmo padrão de informações dos demais levantamentos, conforme apresentado no Capítulo 3 (p.40). Os coeficientes “a” e “b” da

Equação 1 também foram adicionados ao banco de dados para serem estudado como DBPs.

7.3.1. Estruturação dos dados

O banco de dados resultante compreende resultados de ensaios defletoométricos de FWD realizados em três rodovias ao longo de 21 anos, entre os anos de 1999 e 2020, em aproximadamente 300 km de extensão, em pavimentos flexíveis, semirrígidos e semirrígidos invertidos. Foram realizadas 10 campanhas na SP-348, 7 campanhas na SP-280 e 3 campanhas na SP-021, em ambas as direções do tráfego. Alguns levantamentos foram realizados em todas as faixas das rodovias e alguns somente na faixa mais carregada. O banco de dados para estas rodovias é composto por 155.923 registros.

7.3.2. Correção da temperatura

Os ensaios defletoométricos são realizados *in situ* ao longo do dia e às vezes no período noturno, devido ao tráfego elevado durante o dia e à impossibilidade de realização de interdição para realização do ensaio. O equipamento do FWD possui ao menos dois dispositivos de registro de temperatura, sendo que geralmente um registra a temperatura do ar e o outro registra a temperatura do pavimento. Como discutido no Capítulo 4 (p.66), os pavimentos asfálticos são extremamente dependentes da temperatura, que influencia as tensões, os deslocamentos e as deformações nas diferentes camadas, pois promove alteração de comportamento das camadas asfálticas.

Dessa forma, para se realizarem avaliações de deflexões obtidas em diferentes condições de temperatura, há a necessidade de padronização e correção das deflexões em função da temperatura. Por essa razão, os dados explorados neste estudo foram corrigidos segundo o mesmo procedimento desenvolvido no Capítulo 4 (p.66).

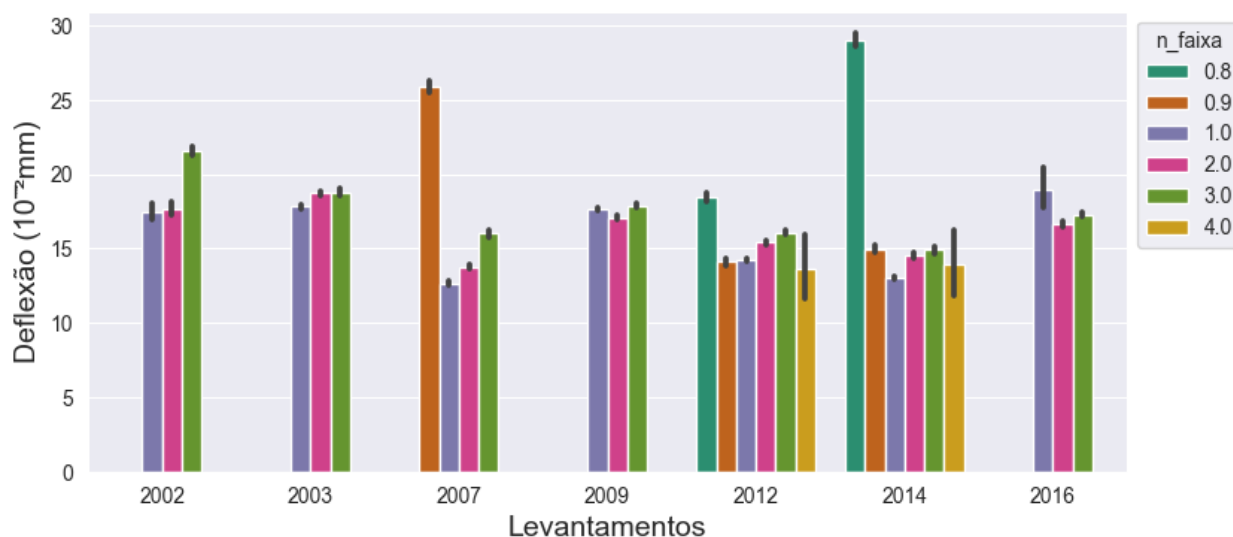
7.4. Análise de dados

A distribuição de frequência dos parâmetros indica em nível de rede a amplitude de cada um dos parâmetros e fornece uma ideia da situação geral dos pavimentos da rodovia, dessa forma pode-se, de forma estatística, estimar as ações de manutenção e os custos relativos das ações.

7.4.1. Visualização de dados da SP-348

Os resultados de deflexão máxima são apresentados na Figura 60, com as deflexões por ano e por faixa. As faixas com a numeração de 0.8 e 0.9 são as faixas de rolamento adicionais construídas no trecho entre São Paulo e Jundiaí no canteiro central. Essa nomenclatura foi adotada para que as faixas com tráfego pesado continuem com os nomes 2 e 3, e assim facilitar as análises.

Figura 60 - Valores médios de deflexão máxima dos pavimentos da rodovia SP-348 por levantamento e faixa



Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

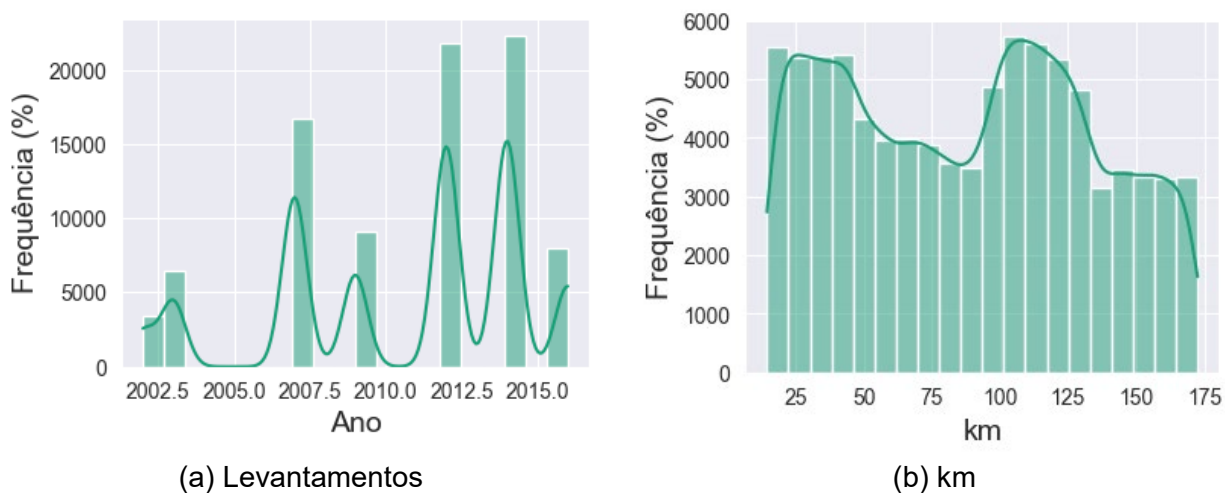
As deflexões nas faixas 2 e 3 são, em geral, mais elevadas que para as demais faixas, uma vez que nessas faixas o tráfego de veículos carregados é mais elevado, causando maior dano estrutural no pavimento do que nas demais faixas. Ocorre que, entre os levantamentos, as deflexões médias máximas alteram negativamente, esse é um efeito

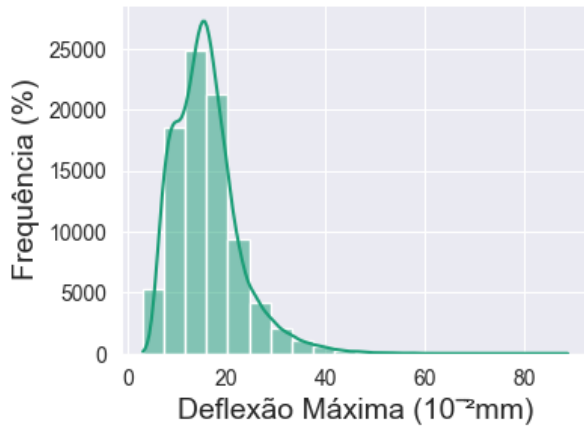
causado pelos parâmetros de desempenho dos pavimentos exigidos pelos editais de concessão. Como as empresas concessionárias de rodovias devem manter a rodovia atendendo numerosos parâmetros, principalmente os de aspecto funcional do pavimento, são executadas campanhas de manutenção rotineiramente, que acabam resultando na melhoria da infraestrutura rodoviária, impactando os resultados de deflexão do pavimento. Outro aspecto importante é que, embora a metodologia adotada realize a correção das deflexões em função da temperatura, a umidade do subleito não foi avaliada, sendo que essa altera o módulo de resiliência do subleito, podendo influenciar por sua vez substancialmente o comportamento estrutural dos pavimentos.

Nas campanhas do ano de 2007 e 2014, os resultados mostraram deflexões fora da média para as faixas 0.9 e 0.8. Essas faixas são as menos carregadas e não se realiza o monitoramento periódico nas mesmas, não sendo possível verificar se entre os levantamentos ocorreu algum fenômeno inesperado ou de exceção.

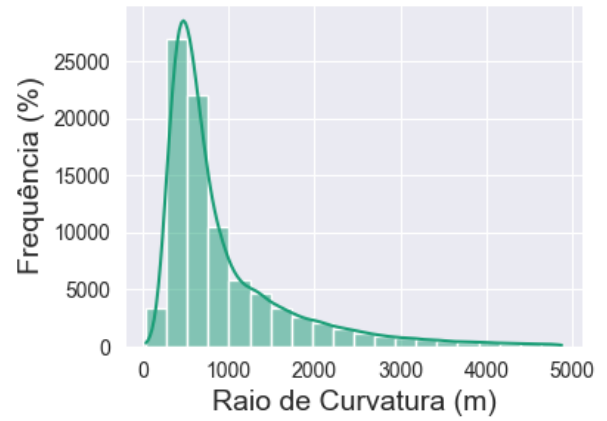
A Figura 61 mostra os histogramas das variáveis do banco de dados para a rodovia SP-348. Os gráficos das variáveis Ano e Km indicam que em determinados anos pode-se ter priorizados alguns trechos da rodovia para execução dos levantamentos de FWD.

Figura 61 - Histograma de distribuição das variáveis de levantamentos deflectométricos de levantamentos da rodovia SP-348

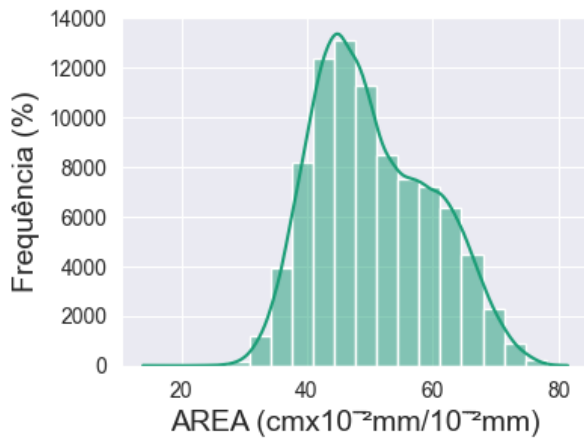




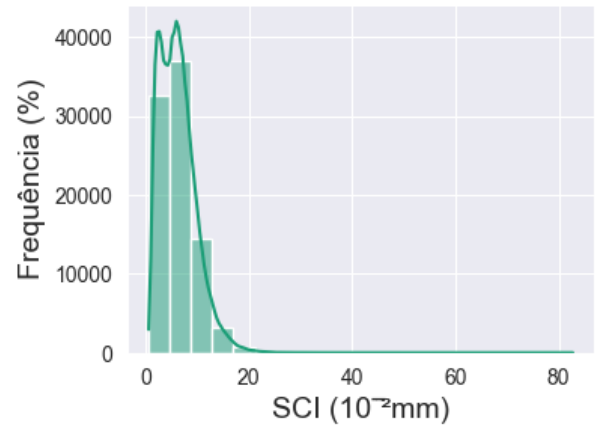
(c) Deflexão Máxima



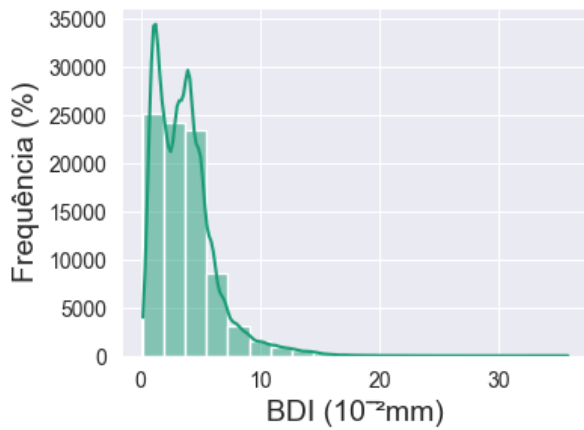
(d) Raio de Curvatura



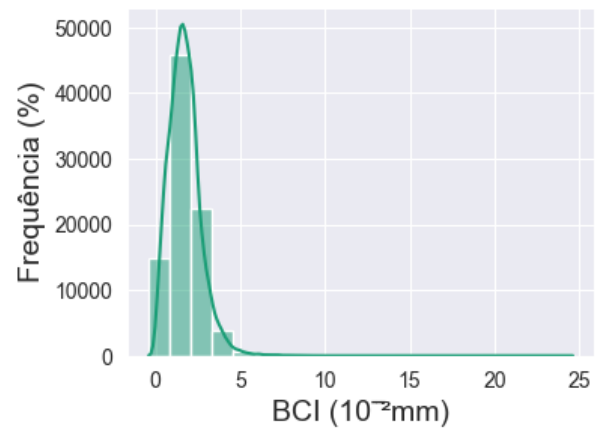
(e) AREA



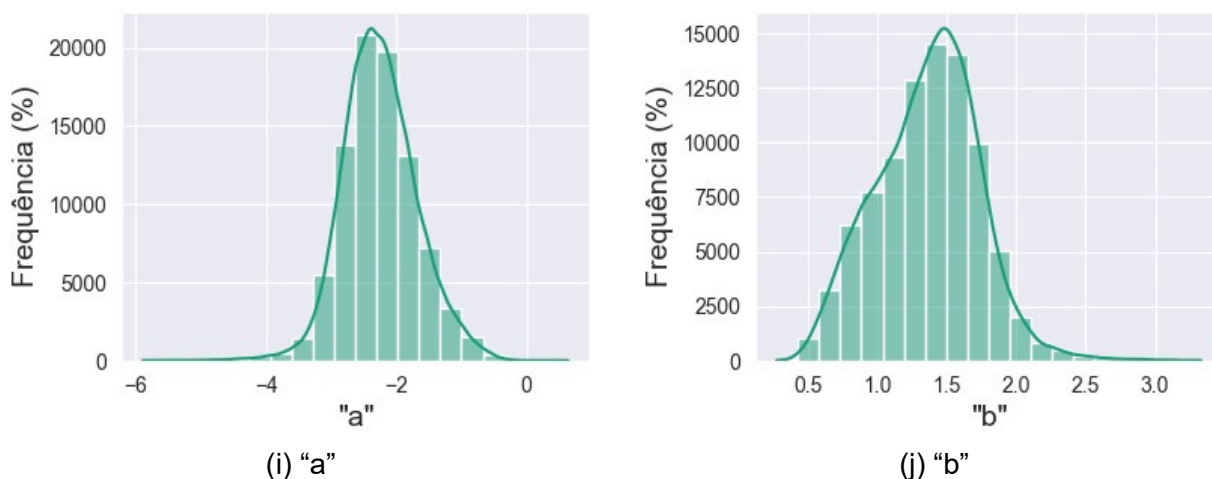
(f) SCI



(g) BDI



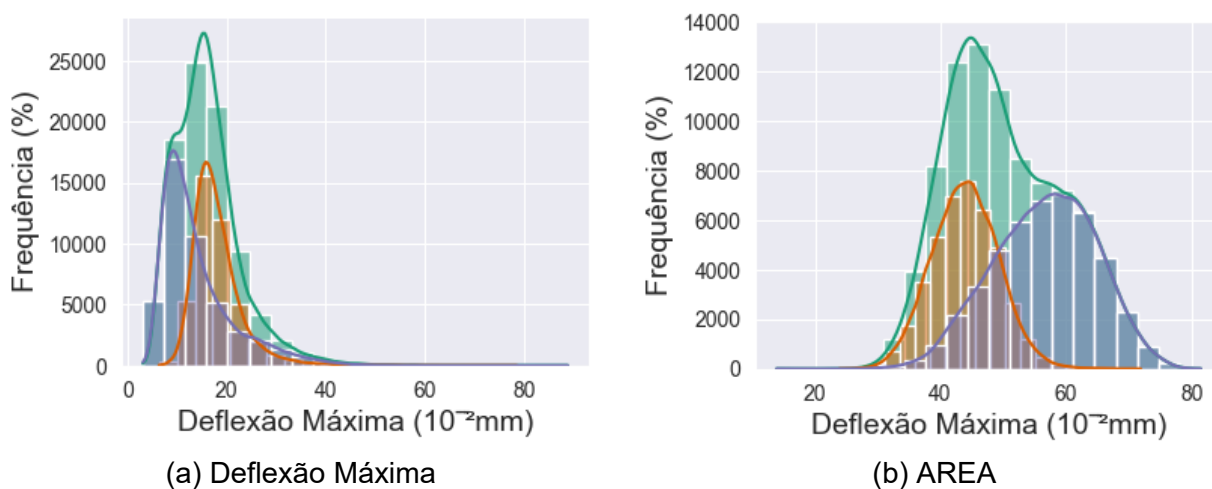
(h) BCI

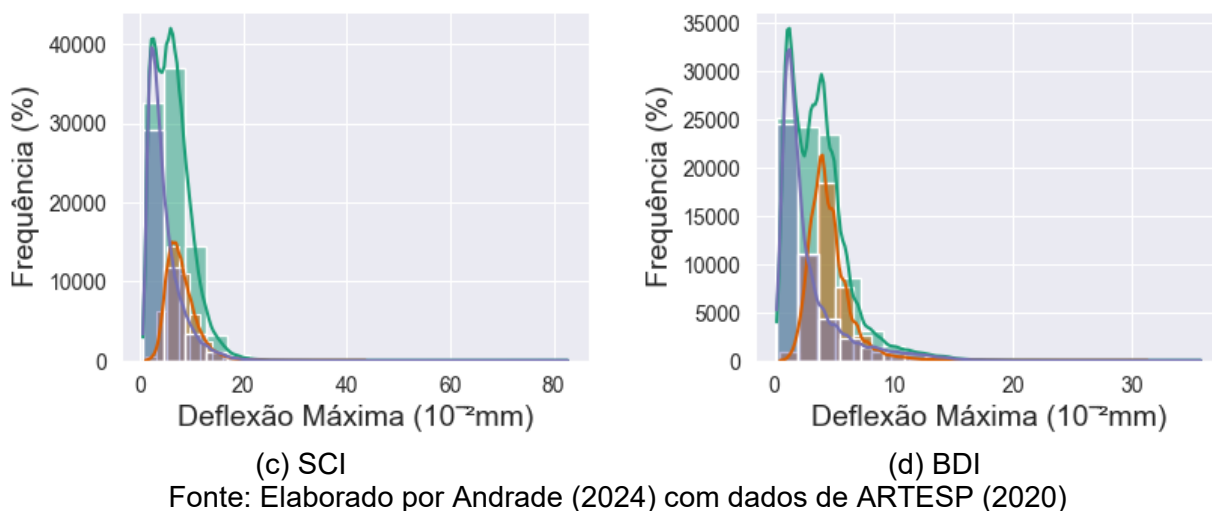


Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

Os gráficos dos parâmetros Dmax, AREA, SCI e BDI (Figura 61 c, g, f e g) são formados pela sobreposição de duas distribuições normais. Para esses parâmetros, espera-se uma distribuição próxima da normal conforme discutido no item 3.6.1. A Figura 62 mostra os histogramas com a separação em dois trechos, sendo um entre São Paulo e Campinas e o outro entre Campinas e Cordeirópolis, onde fica clara a diferença de distribuição dos parâmetros para cada trecho. Essa constatação evidencia as diferentes estruturas de pavimentos concebidas para estes dois diferentes trechos.

Figura 62 - Histogramas com sobreposição de efeitos

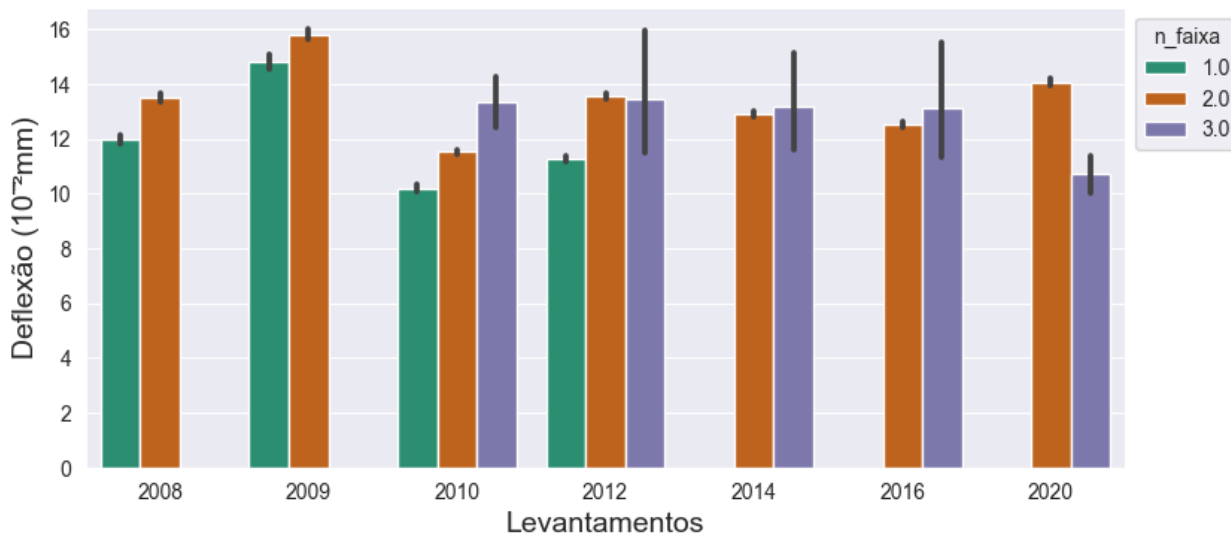




7.4.2. Visualização de dados da SP-280

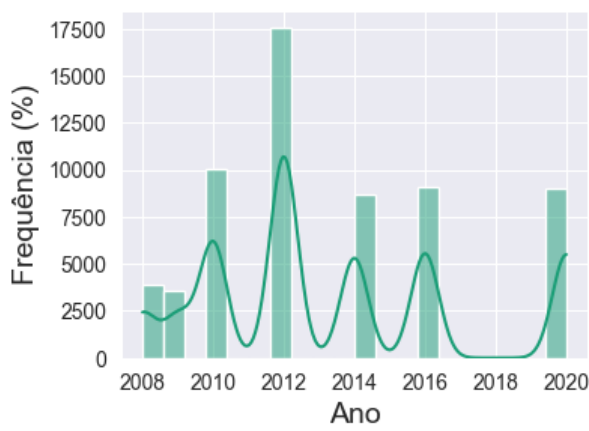
Os resultados de deflexão máxima da rodovia SP-280 são apresentados na Figura 63, com as deflexões por ano e por faixa. A rodovia SP-280 é composta por uma pista dupla, geralmente com duas faixas de tráfego. A faixa 3 mostrada no gráfico corresponde apenas a um pequeno trecho de faixa adicional existente entre os km 204 e 208, que possui 3 faixas de tráfego. Dessa forma pode-se perceber que a faixa 2, a mais carregada, apresenta valores médios superiores aos da faixa 1. As distribuições de frequência dos dados referentes à rodovia SP-280 são apresentadas na Figura 64.

Figura 63 - Valores médios de deflexão máxima da SP-280 por levantamento e faixa

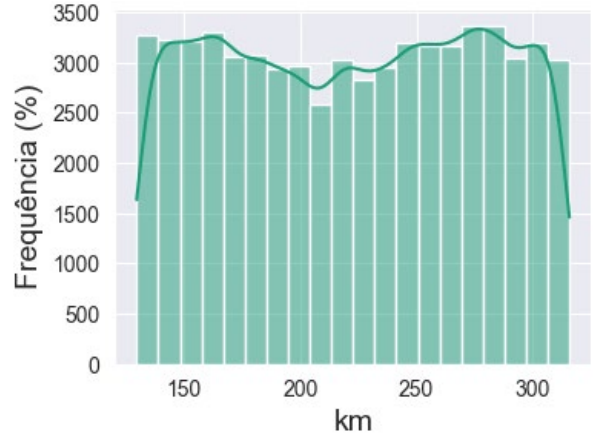


Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

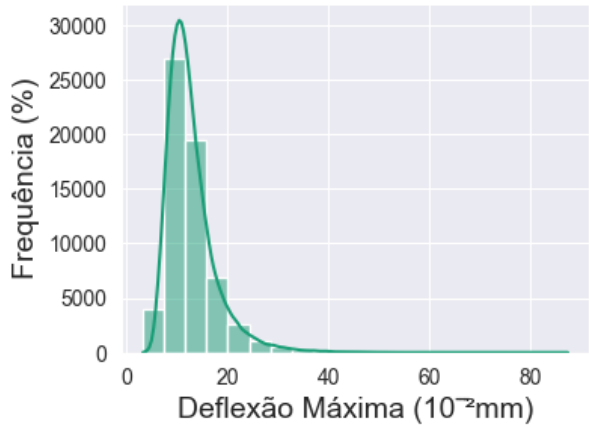
Figura 64 - Histograma de distribuição das variáveis de levantamentos deflectométricos de levantamentos da rodovia SP-280



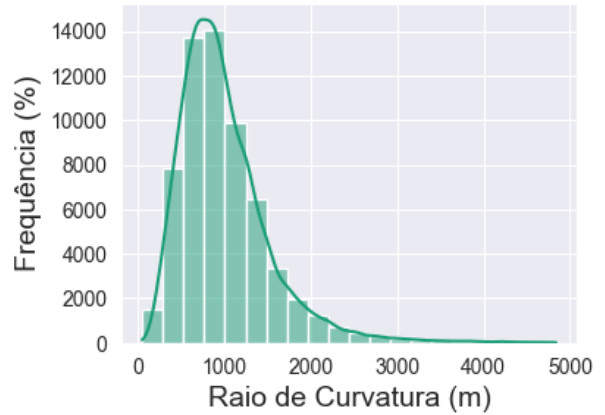
(a) Levantamentos



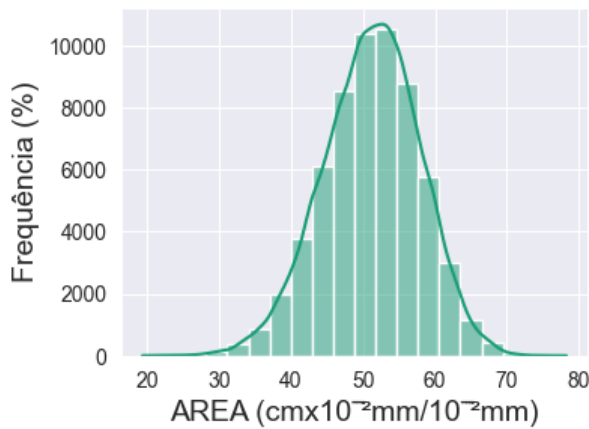
(b) km



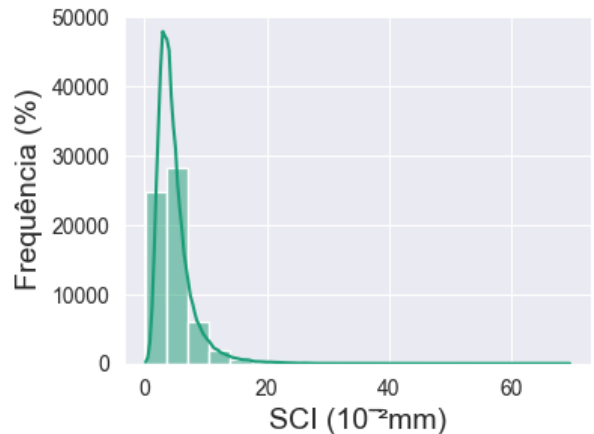
(c) Deflexão Máxima



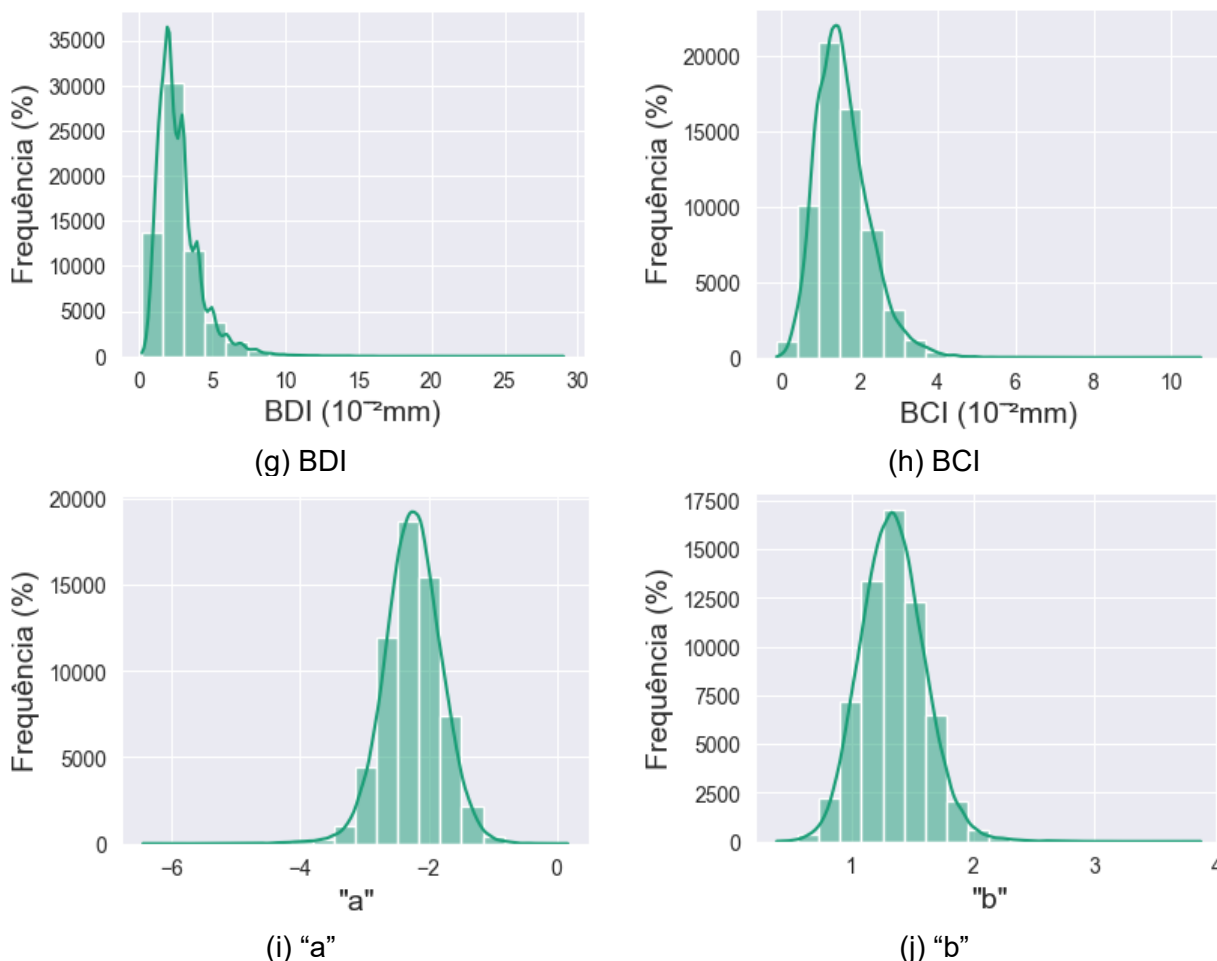
(d) Raio de Curvatura



(e) AREA



(f) SCI

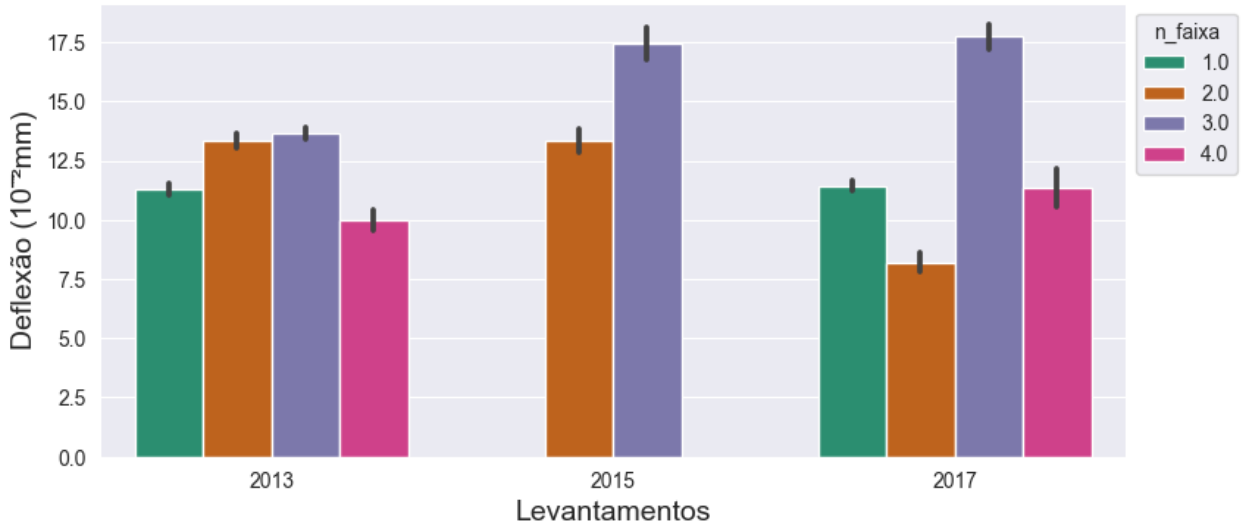


Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

7.4.3. Visualização dos dados da SP-021

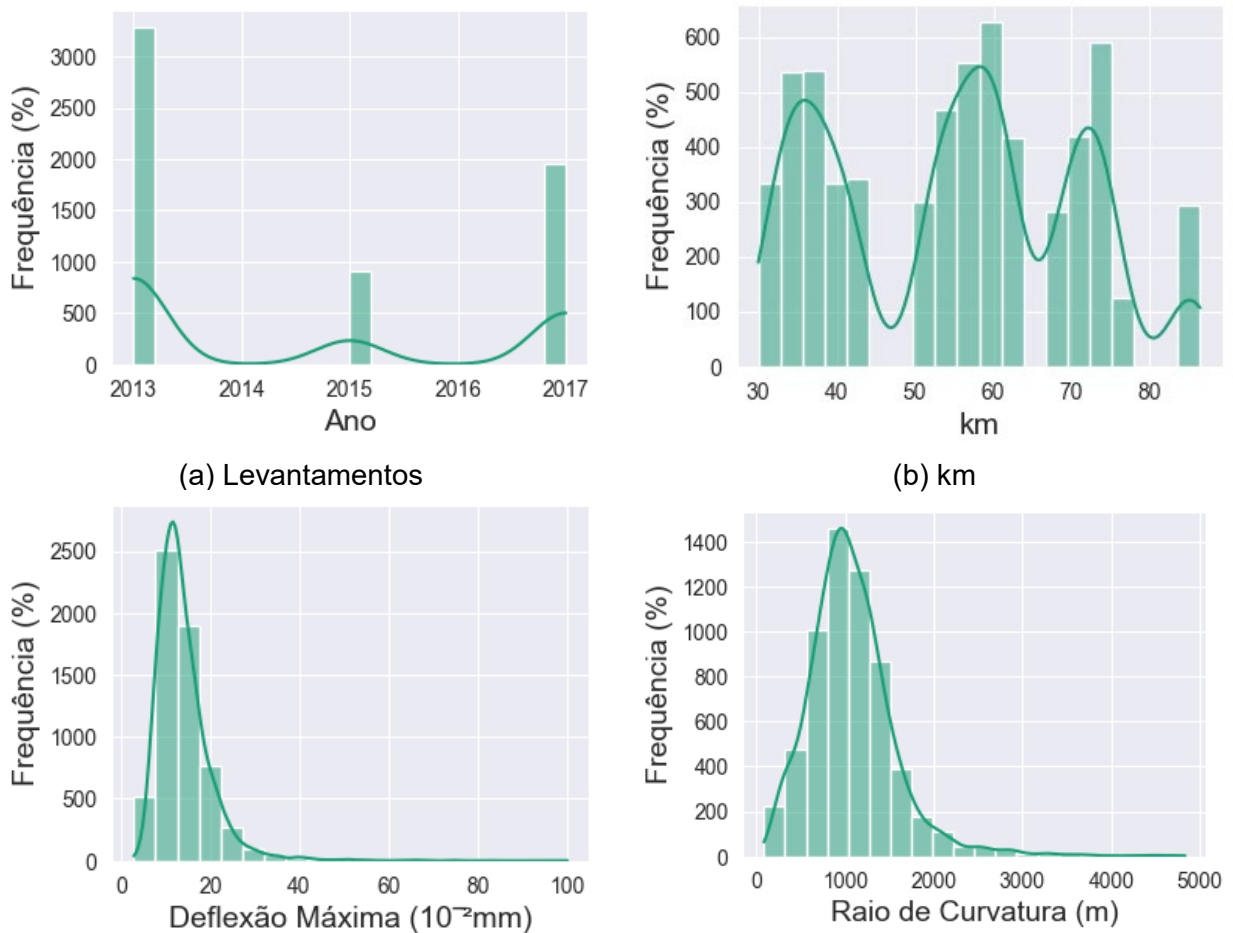
Os valores médios das deflexões máximas do trecho estudado do rodoanel são apresentados separados por faixa e ano na Figura 65. O Trecho Sul do Rodoanel é composto por 3 faixas. Diferentemente das outras rodovias estudadas, o Rodoanel foi concedido logo após a conclusão das obras, então, entre os levantamentos a tendência é a evolução das deflexões, como pode ser percebido no acréscimo no valor médio da deflexão máxima na faixa 3, a mais carregada. Os Histogramas de distribuição das variáveis são apresentados na Figura 66.

Figura 65 - Valores médios de deflexão máxima da SP-021 por levantamento e faixa

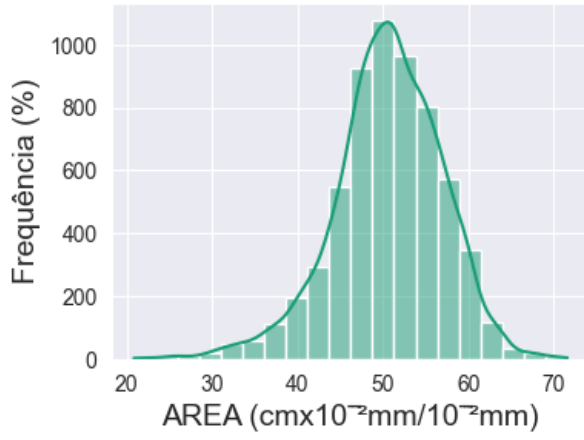


Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

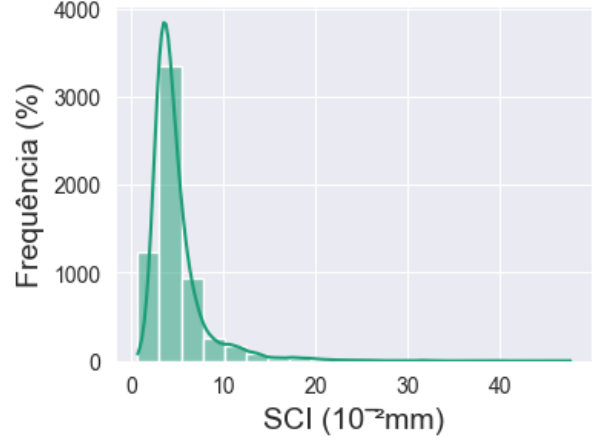
Figura 66 - Histograma de distribuição das variáveis de levantamentos deflectométricos de levantamentos da rodovia SP-021



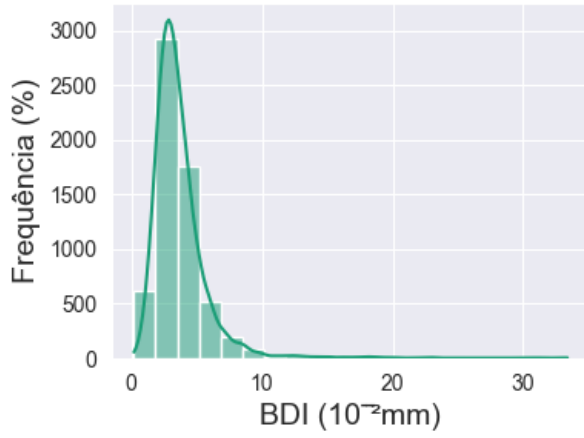
(c) Deflexão Máxima



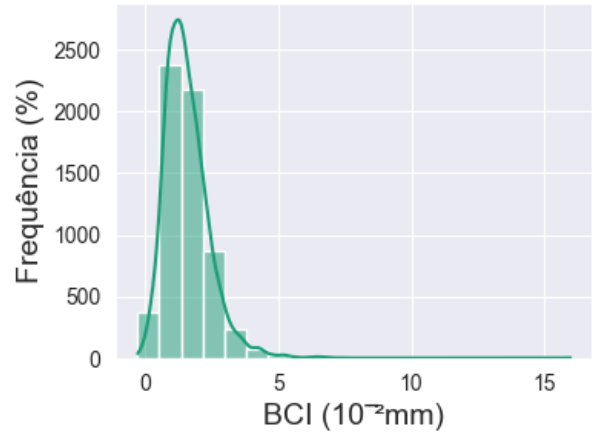
(d) Raio de Curvatura



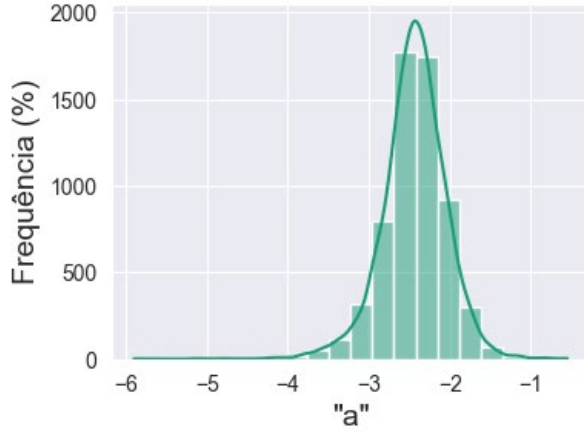
(e) AREA



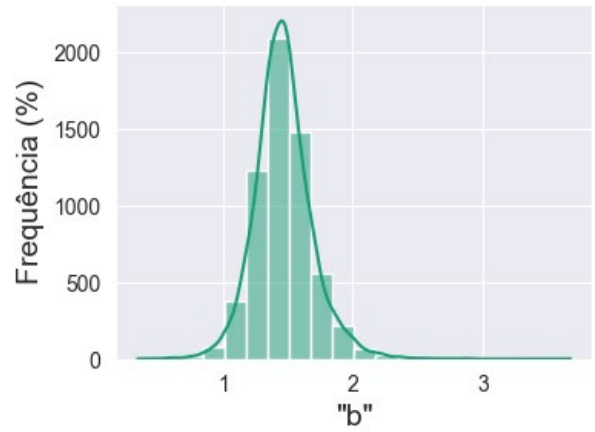
(f) SCI



(g) BDI



(h) BCI



(i) "a"

(j) "b"

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

7.5. Modelos estatísticos de classificação e previsão de comportamento estrutural de pavimentos asfálticos

Os modelos de classificação das estruturas de pavimentos asfálticos com base nos DBPs desenvolvidos no Capítulo 6 (p.121) foram aplicados para os dados da rede de pavimentos das três rodovias do estado de São Paulo estudadas neste capítulo. A classificação dos trechos com relação ao tráfego demonstrou que todos os segmentos se enquadravam em tráfego Alto ou Muito Pesado, conforme Tabela 18. Dessa forma, foi o modelo aplicado somente o modelo desenvolvido para o correspondente dessa faixa de tráfego (Alto + Muito Pesado).

Tabela 18 - Classificação conforme tráfego dos pavimentos pela classe de tráfego segundo Ceratti *et al.* (2015)

Categoria Tráfego	Quantidade
Baixo	0
Moderado	0
Alto	146.332
Muito Pesado	9.591

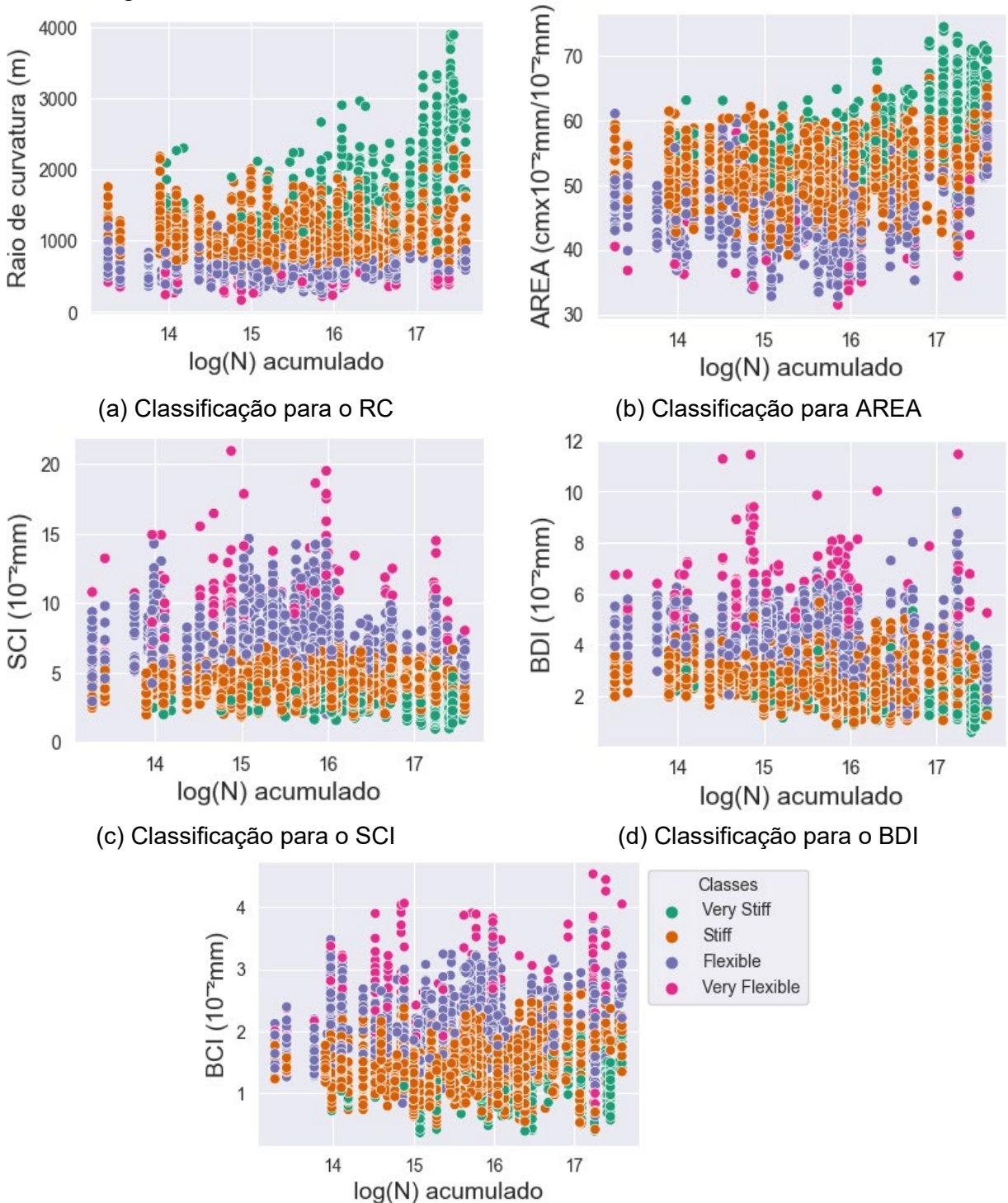
O modelo só foi usado para realizar a classificação apenas das faixas mais carregadas de cada rodovia. A classificação das estruturas de pavimentos resultou nas quantidades de *Clusters/Classes* apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Distribuição de classificações de estruturas de pavimentos

<i>Cluster/Classe</i>	Quantidade	Proporção (%)
<i>Cluster 0</i>	411	11,17
<i>Cluster 1</i>	1746	47,46
<i>Cluster 2</i>	1341	36,45
<i>Cluster 3</i>	181	4,92

A Figura 67 mostra o resultado da classificação por DBPs e log do tráfego de acordo com as classificações. Como os resultados são de dois modelos diferentes (tráfego Moderado e tráfego Alto + Muito Pesado), são apresentadas duas figuras para cada parâmetro.

Figura 67 - Resultados das classificações das estruturas de pavimento



(e) Classificação para o BDI
 Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

Os resultados demonstraram que o *cluster* correspondente à cor verde representava as estruturas mais rígidas, com valores mais elevados de RC e AREA e menos elevados

para SCI, BDI e BCI, e assim foi nomeado como “*Very Stiff*”. Seguindo as mesmas tendências, foram classificadas as estruturas pelas cores dos *clusters* vermelho, alaranjado, lilás e magenta (rosa púrpura) como sendo respectivamente “*Stiff*”, “*Flexible*” e “*Very Flexible*”.

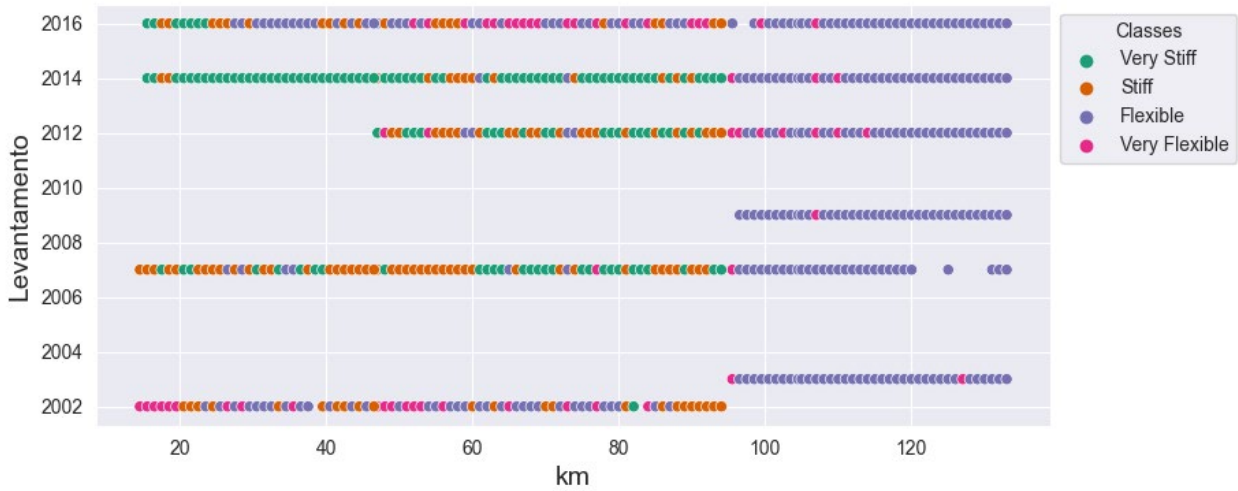
A classificação demonstra que os pavimentos classificados como “*Very Flexible*” ocorrem em menor quantidade. Isso evidencia a boa qualidade dos pavimentos das rodovias mantidas pelas empresas concessionárias rodoviárias, que, para atender aos requisitos dos editais de concessão, devem manter os pavimentos das rodovias sempre atendendo aos critérios de desempenho exigidos pelos órgãos reguladores.

7.6. Aplicação das classificações de comportamento estrutural de pavimentos em nível de rede

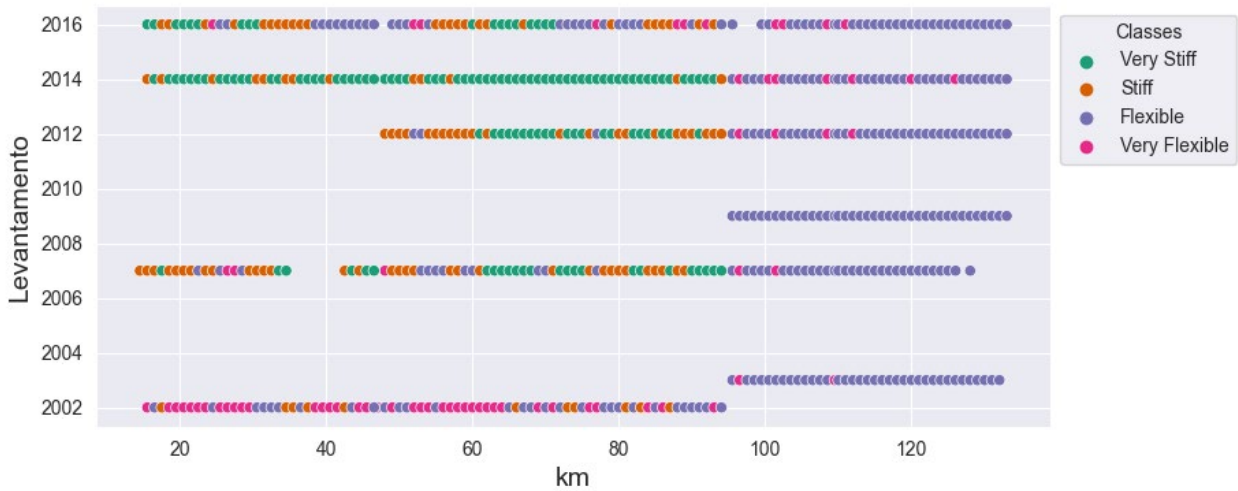
As análises em nível de rede são importantes ferramentas dos SGPs. Com a implementação do modelo de classificação das estruturas de pavimentos asfálticos, foi possível verificar o desempenho das estruturas ao longo do tempo. Cada ponto de classificação corresponde a segmentos de até 1,0 km de extensão da rodovia, seguindo a segmentação apresentado no item 3.4.

A Figura 68 apresenta as classificações da faixa mais carregada da rodovia SP-348 para os sentidos com quilometragem crescente e decrescente para o período avaliado.

Figura 68 - Avaliação das classes estruturais dos pavimentos em nível de rede para a SP-348



(a) Pista com quilometragem Crescente



(b) Pista com quilometragem Decrescente

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

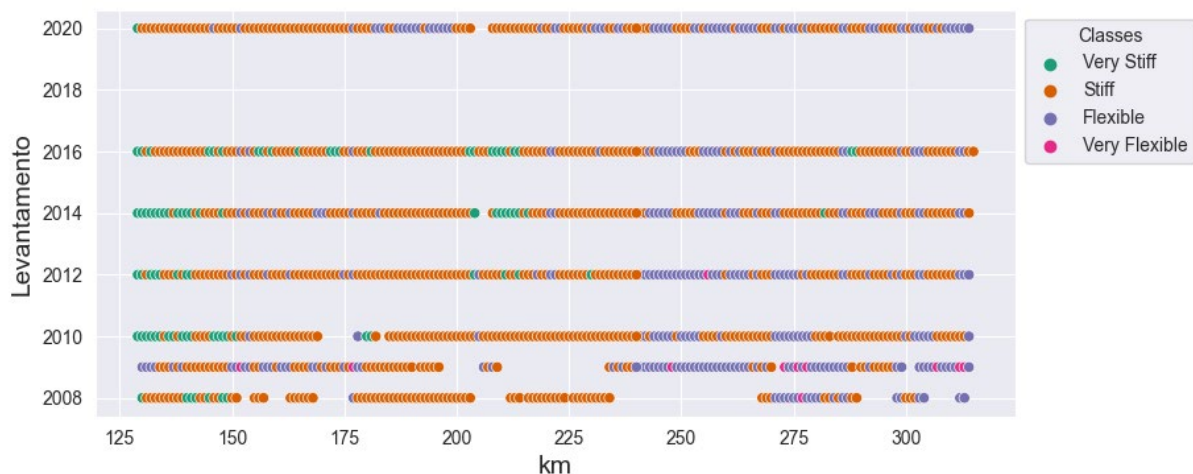
As classificações estruturais dos pavimentos da rodovia apresentam evoluções, sendo que, no levantamento de 2002, há uma predominância de estruturas “*Very Flexible*” no sentido decrescente, entre os km 16 e 90, trecho entre as cidades de São Paulo e Campinas. Já no sentido crescente, a classificação da estrutura é mais diversificada. No levantamento de 2007, há uma melhora global da classificação das estruturas para o mesmo trecho, passando a haver mais trechos com pavimentos asfálticos classificados como “*Stiff*” e “*Very Stiff*” em ambos os sentidos. A melhora estrutural dos pavimentos persiste para o ano de 2014, passando a ocorrer uma predominância de estruturas “*Very Stiff*”. Já para o ano de 2016, houve uma variação negativa da qualidade das

estruturas, apesar de ainda haver pavimentos classificados por “*Very Stiff*” e “*Stiff*”, mas havendo a ocorrência de várias estruturas já classificadas como “*Flexible*” ou “*Very Flexible*”.

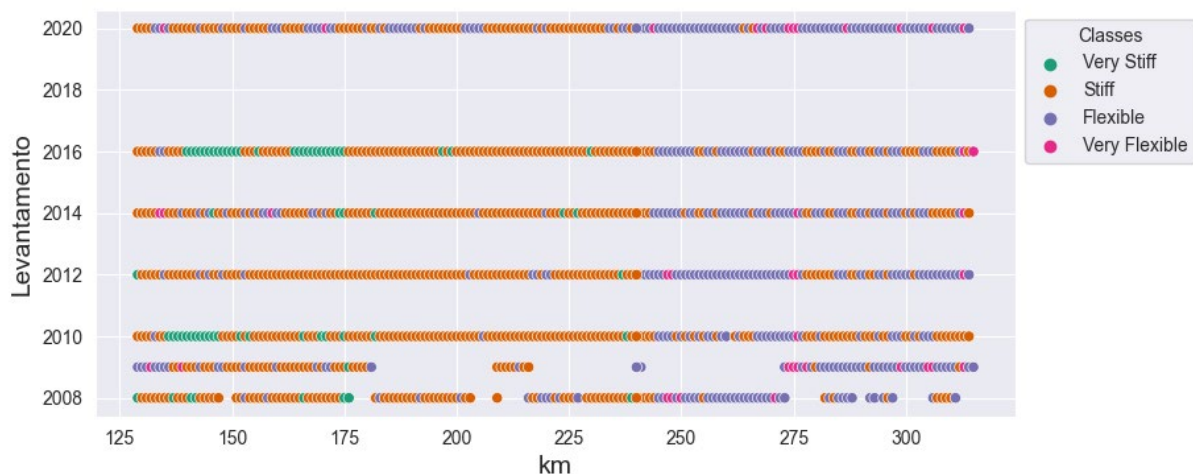
Para o trecho entre Campinas e Cordeirópolis, há uma diferença considerável do padrão da estrutura dos pavimentos, semelhante ao já observado na Figura 53. Este trecho é classificado como “*Flexible*” desde o primeiro levantamento realizado. Com a evolução do dano devido ao tráfego, a partir do levantamento de 2012, que coincide com o tempo de projeto de 10 anos comumente adotado, passaram a ocorrer segmentos classificados como “*Very Flexible*”. Esses trechos não perduram entre os levantamentos subsequentes, indicando a ocorrência de serviços de manutenção nos mesmos.

Os pavimentos da rodovia SP-280 são avaliados e os resultados das classificações estruturais são apresentados na Figura 69, com as respectivas classificações estruturais. A avaliação indica uma diferença entre as estruturas dos trechos de Tatuí a Avaré (dito primeiro trecho neste estudo) e entre Avaré e Espírito Santo do Turvo (denominado segundo trecho), como já indicado na Figura 56. O segundo trecho apresenta, entre os levantamentos, uma maior quantidade de segmentos classificados como “*Flexible*”. Já no primeiro trecho há uma predominância de estruturas “*Stiff*” com a ocorrência de intervalos de estruturas “*Very Stiff*”.

Figura 69 - Avaliação das classes estruturais dos pavimentos em nível de rede para a SP-280



(a) Pista com quilometragem Crescente



(b) Pista com quilometragem Decrescente

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

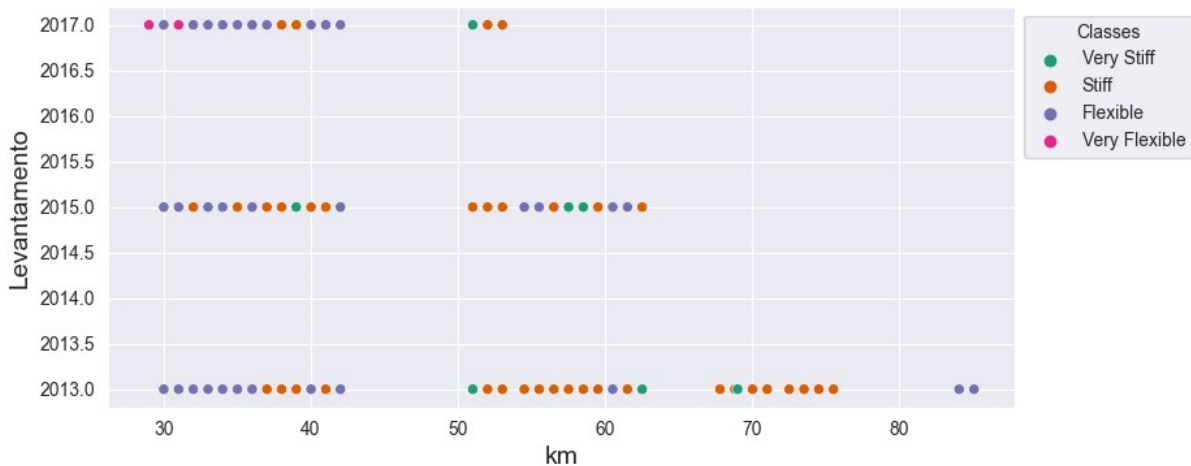
No primeiro trecho, entre Tatuí e Avaré, para ambos os sentidos, há uma melhora da classificação estrutural dos pavimentos da rodovia entre os levantamentos dos anos de 2009 e 2010 e entre 2014 e 2016. Essas melhoras podem estar correlacionadas ao período de restauração de pavimento adotado em algumas concessionárias, de 5 anos. Essa melhora é observada para o segundo trecho somente no primeiro período (2009-2010), já no segundo período há uma recorrência das classes das estruturas.

Para o levantamento de 2020, houve uma degradação global dos pavimentos da rodovia, passando a inexistir segmentos classificados como “*Very Stiff*”, e passando a

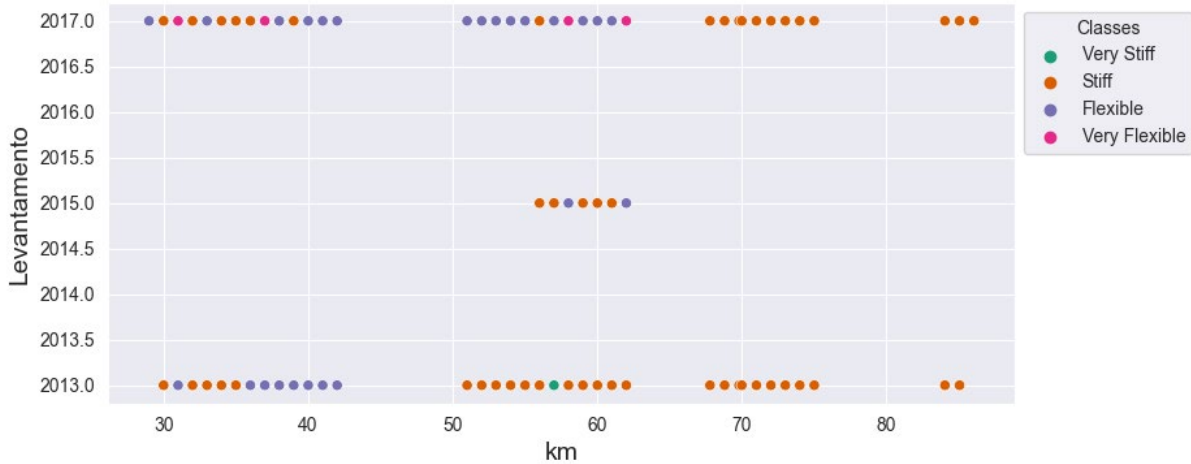
predominar estruturas de pavimento “*Flexible*” no segundo trecho. Entretanto, ressalta-se que, no período avaliado, houve pouquíssimos segmentos classificados como “*Very Flexible*”, indicando a ocorrência de manutenções corretivas e a qualidade dos serviços realizados pela concessionária.

A avaliação em nível de rede da SP-021 é um pouco prejudicada pela ausência de dados dos levantamentos mais recentes, como pode ser percebido na Figura 70. Há ausência de dados para os dois últimos trechos nos levantamentos de 2015 e 2017, no sentido crescente, e no sentido decrescente há poucos dados referentes ao trecho 2.

Figura 70 - Avaliação das classes estruturais dos pavimentos em nível de rede para a SP-021



(a) Pista com quilometragem Crescente



(b) Pista com quilometragem Decrescente

Fonte: Elaborado por Andrade (2024) com dados de ARTESP (2020)

Mesmo com a ausência de dados, pode-se perceber que a estrutura de pavimento inicialmente era classificada como “*Stiff*” ou “*Flexible*” (levantamento de 2013) e, no levantamento de 2017, houve uma degradação da estrutura, a estrutura que no primeiro segmento sendo é classificada predominantemente como “*Flexible*”, com ocorrência de segmentos “*Very Flexible*”. Passado o período de 4 anos, o estudo indica a necessidade de um ciclo de restauração de pavimentos.

7.7. Considerações do Capítulo 7

A estruturação dos dados em formato de banco de dados permitiu a realização de operações complexas de forma rápida e eficaz, como verificação de dados com indícios de erro, realização da normalização das deflexões em função da carga, correção das deflexões em função da temperatura, etc. A avaliação das variáveis permitiu a identificação das características de cada fonte de dados, como a divisão da rodovia em trechos por semelhança de estrutura e valores médios de parâmetros.

A aplicação do modelo de classificação para as rodovias paulistas possibilitou a avaliação estrutural em nível de rede. O modelo possibilita a verificação ao longo do tempo de operação da rodovia da evolução estrutural dos pavimentos asfálticos. Efeitos como a recuperação dos pavimentos da rodovia, degradação dos pavimentos e efeitos das manutenções periódicas nos mesmos são inferidas através dos resultados do modelo.

A classificação também permitiu a identificação de diferenças estruturais entre os pavimentos de trechos das rodovias e a indicação da necessidade de realização de campanha de restauração de pavimentos, mostrando-se de grande contribuição no processo de gerência de pavimentos em nível de rede.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Esta tese teve por objetivo desenvolver um método de avaliação e análise de dados de bacias de deflexão de pavimentos asfálticos rodoviários para a identificação e a classificação de suas condições estruturais, de modo a subsidiar decisões de gestão de manutenção de pavimentos em nível de rede de rodovias e de avaliação patrimonial.

Realizaram-se inicialmente estudos em banco de dados de bacias de deflexão obtidas por FWD de um trecho experimental em rodovia de tráfego muito pesado de uma concessão de rodovia federal, com quatro diferentes segmentos de pavimentos asfálticos e, a partir do método de análise estabelecido, foi possível evidenciar diferentes classes de robustez estrutural dos pavimentos.

A partir do método proposto, estendeu-se a análise para um segundo banco de dados de deflexão mais abrangente, reunindo 50 UA's de pavimentos asfálticos de rodovias com diferentes características de materiais e de tráfego, em diferentes regiões climáticas brasileiras, cujo estudo original foi conduzido pelo DNIT em rodovias sob sua responsabilidade. Essa ampliação permitiu demonstrar que o procedimento proposto para análise e subdivisão em diferentes classes de condições estruturais de pavimentos asfálticos tinha aplicabilidade para análises de redes de pavimentos rodoviários.

Dessa forma, por meio de ferramentas computacionais de ciência de dados e *machine learning*, ampliou-se a análise para um terceiro banco de dados para análise de deflexão de pavimentos de rodovias de tráfego pesado e muito pesado da rede de rodovias concessionadas paulistas sob jurisdição da ARTESP, possibilitando demonstrar a consistência do método proposto para classificação em diferentes grupos de pavimentos pela sua condição estrutural.

Com isso, pôde-se demonstrar, por meio dos três estudos em universos de diferentes magnitudes e abrangências de pavimentos asfálticos, que o método proposto de organização e análise de dados foi capaz de classificar em diferentes classes

pavimentos segundo suas condições estruturais e assim subsidiar estudos e análises de pavimentos rodoviários em nível de rede.

Com o procedimento de tratamento e análise exploratória dos dados usados nesta tese, foi possível estruturar um banco de dados com as informações e dados coletados que resultou na facilitação das aplicações de modelos analíticos e preditivos nos estudos desenvolvidos. Uma avaliação estatística dos parâmetros obtidos indicou alguns mecanismos de alteração ou conservação de condições estruturais dos pavimentos, e deu suporte para ampliar os estudos realizados. A realização de análises estatísticas permitiu a verificação de processos de deterioração, de cura e melhoria estrutural, de alterações por ações climáticas, entre outros fenômenos em materiais de pavimentação, garantindo a confiabilidade dos métodos matemáticos adotados e o rigor metodológico do estudo.

Para a condução de avaliações de séries históricas de pavimentos, como dito anteriormente, a padronização, seja pela normalização das cargas, seja pela correção das deflexões em função da temperatura de realização dos ensaios e a organização dos dados, são fundamentais. Um banco de dados estruturados permitiu a trabalhabilidade das informações, possibilitando a realização de estudos de séries históricas de dados deflectométricos nesta tese. Adicionalmente, por não haver um método consolidado para realização da correção de deflexão pela temperatura, esta tese propôs um procedimento de correção calibrado aos dados explorados neste estudo. Este método considera a temperatura do ar, temperatura do pavimento, espessura do revestimento asfáltico e o gradiente térmico ao longo dessa espessura do revestimento asfáltico para corrigir o módulo retroanalisado na temperatura original de ensaio da camada asfáltica para a temperatura de referência de 25°C. Com isso desenvolveu-se regressão linear calibrada para as condições ambientais analisadas que realiza a correção das bacias deflectométricas para o banco de dados estudado. Com esse procedimento, foi possível obter as bacias de deflexão em temperatura de referência e poder não apenas comparar as bacias de deflexão de diferentes segmentos para comparação em um determinado tempo, mas também a evolução da

bacia de deflexão ao longo do tempo, em diferentes estações do ano e em diferentes anos, de um mesmo segmento e, assim, analisar a progressão de danos e suas consequências na capacidade estrutural dos pavimentos que foram solicitados pelo tráfego e pelas ações climáticas. O procedimento proposto pode ser estendido para outras redes de pavimentos ou mesmo para análise em nível de projeto.

Foi realizado estudo de dados deflectométricos, módulos retroanalizados e parâmetros da bacia de deflexão (DBPs) para analisar o desempenho estrutural de pavimentos dos três diferentes universos de bancos de dados empregados nesta tese. O primeiro deles, como mencionado acima, mostrou que os DBPs de 4 segmentos de pavimentos asfálticos foram capazes de indicar o comportamento das estruturas estudadas, identificando os processos de fadiga ocorridos em um pavimento flexível com base granular de BGS; a estabilidade estrutural de um pavimento semirrígido com base de BGTC; e o ganho de rigidez de camadas de base recicladas, constituídas por RAP estabilizado com emulsão asfáltica e outro com espuma de asfalto, devido ao ganho estrutural decorrente do processo de cura desses tipos de materiais reciclados. Os módulos retroanalizados das camadas de revestimento, base e remanescente apresentaram uma correlação satisfatória com os DBPs avaliados. Com base nesses módulos retroanalizados e o parâmetro AREA, foi possível estabelecer três classes quanto ao comportamento estrutural, denominadas “Pavimento Fraco”, “Pavimento Delgado” e “Pavimento Espesso”, seguindo a classificação WSDOT, porém com limites estabelecidos mais rigorosos (mais exigentes) por se tratar de classes para tráfego muito pesado. Para AREA até $45 \text{ cm} \times \eta\text{-m}/\eta\text{-m}$, são considerados “Pavimentos Fracos”; para AREA entre 45 e $57 \text{ cm} \times \eta\text{-m}/\eta\text{-m}$, são considerados “Pavimentos Delgados”; e acima $57 \text{ cm} \times \eta\text{-m}/\eta\text{-m}$, são “Pavimentos Espessos”. Tendo em vista o número restrito de segmentos deste estudo, foi ampliado o estudo para um segundo banco de dados.

O segundo banco de dados, conforme mencionado acima, embasou o estabelecimento de um método estatístico de classificação, desenvolvido para avaliação estrutural dos pavimentos. Por meio deste estudo relativo a dados deflectométricos de 50 Unidades Amostrais (UA's) da malha rodoviária federal do DNIT, sendo que cada UA corresponde

a 2 segmentos, um por sentido, estabeleceu-se modelos estatísticos de categorização K-Vizinho Próximo (*K-Nearest Neighbors* - KNN), que realiza a classificação de pavimentos quanto às respostas deflectométricas. Os modelos de classificação possibilitaram a inferência do comportamento estrutural a partir dos DBPs. Os modelos desenvolvidos possibilitaram sua aplicação em sistemas de gerência de pavimentos para realização de análises em nível de rede. A combinação dos DBPs, empregando as classes de SANRAL (2014), e dos parâmetros AREA e RC permitiu a inferência do comportamento estrutural dos pavimentos rodoviários com maior assertividade, em 4 classes diferentes: “Muito Rígido” (Very Stiff), “Rígido” (Stiff), “Flexível” (Flexible) e “Muito Flexível” (Very Flexible). Isso demonstrou que a aplicação de somente um parâmetro único deflectométrico não foi capaz de indicar o comportamento das estruturas com a confiabilidade necessária. A subdivisão em classes (*clusters*) foi possível graças ao uso de *machine learning*. As subdivisões em classes dependem do tráfego, tendo sido identificadas 4 diferentes classes para tráfego Moderado e outras 4 classes com limites mais rigorosos (mais exigentes) para classificar as estruturas de pavimento para tráfego Alto e Muito Pesado.

Foi realizada a aplicação da metodologia de análise de dados para o terceiro universo de dados bastante ampliado, com 233,059 dados, para interpretar e avaliar dados de deflexão com a aplicação dos DBPs. O modelo de classificação foi aplicado para a verificação do desempenho das estruturas de pavimentos asfálticos em nível de rede de rodovias concessionadas do estado de São Paulo, conforme mencionado acima. As classificações realizadas possibilitaram a inferência do comportamento estrutural dos pavimentos rodoviários em 4 diferentes classes para tráfego muito pesado: “Muito Rígido” (Very Stiff), “Rígido” (Stiff), “Flexível” (Flexible) e “Muito Flexível” (Very Flexible), corroborando as classes encontradas no segundo estudo com as Unidades Amostrais do DNIT. Essas classes possibilitam a identificação de segmentos críticos, para a realização de recuperação de pavimentos e identificação de melhorias na rodovia, devido à realização de campanhas de manutenção periódica anteriores. Os modelos de classificação de estruturas desenvolvidos por meio dos DBPs, aplicando técnicas de *machine learning*, representam um grande avanço para os Sistemas de Gerência de

Pavimentos (SGPs) asfálticos, seja para estabelecimento de ações de manutenção, seja para avaliação do estado geral do patrimônio, valorando estes sistemas de pavimentos rodoviários asfálticos.

8.1. Continuidade da pesquisa

Para continuidade desta pesquisa, vários pontos podem ser explorados, destacando-se:

O banco de dados pode ser incrementado, acrescentando-se informações de rodovias de outros órgãos, agências, projetistas, etc., abrangendo assim todo o território nacional.

Pode-se verificar a aderência dos dados de deflexão provenientes do FWD e HSD (*Hight Speed Deflectometer*), e assim adaptar o banco de dados para recebimento dos dados desse novo equipamento deflectométrico.

Os estudos aqui realizados se limitaram a informações estruturais e correlacionados com dados de evolução de área trincada. Os estudos podem ser ampliados para demais defeitos como afundamento de trilha de roda, irregularidade longitudinal etc.

Para comparação das deflexões ao longo do tempo, foram utilizadas equações consagradas pela literatura para elaboração do modelo de correção da temperatura. Essas equações podem ser calibradas para a realidade nacional, em diferentes regiões, resultando em uma maior precisão do processo de correção das deflexões.

Os modelos desenvolvidos podem ser retroalimentados com novos dados das mesmas rodovias estudadas, melhorando a precisão e assertividade das previsões.

Os modelos estabelecidos podem ser melhorados, aplicando-se novas técnicas de tratamento de dados, utilizando novas tecnologias e outras técnicas de *machine learning*.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. (1993) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. (Volume 1.). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington , D.C. Obtido de <https://books.google.com.br/books?id=1HRB12tBQNM>
- Adwan, I., Milad, A., Memon, Z. A., Widyatmoko, I., Ahmat Zanuri, N., Memon, N. A., e Yusoff, N. I. M. (2021) Asphalt Pavement Temperature Prediction Models: A Review. *Applied Sciences*, 11(9), 3794. doi:10.3390/app11093794
- Akbarzadeh, H., Bayat, A., e Soleymani, H. R. (2012) Analytical review of the HMA temperature correction factors from laboratory and falling weight Deflectometer tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(1), 30–39.
- Alam, J., Galal, K. A., e Diefenderfer, B. K. (2007) Network-Level Falling Weight Deflectometer Testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1990(1), 111–118. doi:10.3141/1990-13
- Albuquerque, B. C. P. e, Pereira, V. Q., Perim, L. R., Hoffmann, I. C. S., Resende, C. R. L. P., e Campos, D. J. F. de. (2019) Metodologia para Avaliação do Impacto do Sobre peso nos Custos da Manutenção Rodoviária. ANPET (Ed), *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET* (p. 1431–1442). Balneário Camboriú-SC.
- Albuquerque, F. S. (2007) *Sistema de gerência de pavimento para departamentos de estradas do nordeste brasileiro*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Anderson, D. T. (1977) The design of asphalt concrete overlays for flexible highway pavements. Department of Civil Engineering. *University of California, Berkeley*.
- Andrade, L. R. de. (2017, março 13) *Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado*. Universidade de São Paulo, São Paulo. Obtido de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-13032017-095746/>
- ANTT. (2008) Programa de Exploração da Rodovia - PER - Rodovia BR-381/MG/SP Trecho: Belo Horizonte - São Paulo. Agência Nacional de Transportes Terrestres, Brasília - DF.

- Arango, L. F. (2018) RESULTADOS DO PROJETO DE CALIBRAÇÃO E AFERIÇÃO DO MODELO HDM-4 PARA AS CONDIÇÕES DA REDE DE RODOVIAS DO BRASIL. <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/campanhas-e-eventos/semana-do-planejamento/2a-semana-do-planejamento/1-calibracao-hdm-4-dnit-luisa-fernanda-arango.pdf>.
- Aranha, A. L. (2022, dezembro 9) *Machine learning model for asphalt pavements performance prediction*. Universidade de São Paulo, São Paulo. Obtido de <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-04042023-075119/>
- Arora, J., Tandon, V., e Nazarian, S. (2006) *Continuous deflection testing of highway at traffic speeds*. FHWA (Vol. 79968). Ek Paso, Texas.
- ARTESP. (2010) Edital N°001/2010 - Trechos Sul e Leste do Rodoanel Mário Covas. Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo, São Paulo - SP.
- ARTESP. (2022) Concorrência Internacional N° 02/2022 Para a concessão dos serviços públicos de ampliação, operação, conservação, manutenção e realização dos investimentos necessários para a exploração do sistema rodoviário denominado Lote Noroeste. Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo, São Paulo - SP.
- Bellman, R. (1952) On the Theory of Dynamic Programming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 38(8), 716–719. doi:10.1073/pnas.38.8.716
- Benevides, S. A. de S. e. (2006) *Modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para um sistema de gestão de rodovias estaduais do Ceará*. Universidade Federal do Rio de Janeiro -.
- Benkelman, A. C., Kingham, R. I., e Fang, H. Y. (1962) Special Deflection Studies on Flexible Pavement. *Highway Research Board Conference on the AASHO Road Test* (p. 102–125). Highway Research Board Special Report Issue Number: 73, ST. LOUIS, MISSOURI. Obtido de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr73/73-006.pdf>
- Bertollo, S. A. M. (1997) *Considerações sobre a gerência de pavimentos urbanos em nível de rede*. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos.
- Bessa, I. S. (2018, janeiro 18) *Laboratory and field study of fatigue cracking prediction in*

- asphalt pavements*. Universidade de São Paulo, São Paulo. Obtido de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-15012018-160715/>
- Bessa, I., Vasconcelos, K., Castelo Branco, V., Nascimento, L. A., e Bernucci, L. (2023) Prediction of Fatigue Cracking in Flexible and Semi-rigid Asphalt Pavement Sections. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(3), 563–575. doi:10.1007/s42947-021-00148-5
- Blass, L., Mota, B. T. de S., Bihain, A. L. J., e Silva, E. J. G. da. (2021) Análise do comportamento mecânico de pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperatura. doi:10.5540/03.2021.008.01.0366
- Blass, L., Specht, L. P., Borges, P. A. p., e Pereira, D. S. (2013) Modelagem matemática das respostas estruturais de pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperaturas máximas. *Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online)*, 13, 61–71.
- Bosso, M. (2018) *Uso da tecnologia Weigh-in-Motion para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais*. Universidade de São Paulo.
- Bosso, M., Vasconcelos, K. L., Beja, I. A., Bernucci, L. L. B., e Bittencout, T. (2016) Weigh-in-motion system to monitoring overloading in a brazilian heavy traffic highway. *7th International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM7)*. Foz do Iguaçu.
- Bosso, M., Vasconcelos, K. L., Ho, L. L., e Bernucci, L. L. B. (2020) Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(6), 843–859. doi:10.1016/j.jtte.2018.07.004
- Botella, R., Lo Presti, D., Vasconcelos, K., Bernatowicz, K., Martínez, A. H., Miró, R., Specht, L. P., Mercado, E. A., Pires, G. M., Pasquini, E., Ogbo, C., Preti, F., Pasetto, M., del Barco Carrión, A. J., Roberto, A., Orešković, M., Kuna, K. K., Guduru, G., Martin, A. E., Carter, A., Giancontieri, G., Abed, A., Dave, E., e Tebaldi, G. (2022) Machine learning techniques to estimate the degree of binder activity of reclaimed asphalt pavement. *Materials and Structures*, 55(4), 112. doi:10.1617/s11527-022-01933-9

- Brasil. (2019) LEI Nº 13.853, DE 8 DE JULHO DE 2019. Diário Oficial da União, Brasília - DF.
- Bruce, P., e Bruce, A. (2019) *Estatística Prática para Cientistas de Dados - 50 Conceitos Essenciais*. Revista Brasileira de Linguística Aplicada (1ª Edição., Vol. 5). Starlin Alta Editora e Consultoria Eireli, Rio de Janeiro. Obtido de <https://revistas.ufrj.br/index.php/rce/article/download/1659/1508%0Ahttp://hipatiapress.com/hpjournals/index.php/qre/article/view/1348%5Cnhttp://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500799708666915%5Cnhttps://mckinseysociety.com/downloads/reports/Educa>
- Bryce, J., Flintsch, G., Katicha, S., e Diefenderfer, B. (2013) Enhancing Network-Level Decision Making through the use of a Structural Capacity Index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2366(1), 64–70. doi:10.3141/2366-08
- Bueno, L. D. (2019) *Contribuição Para a Previsão Empírico-Mecanicista Da Irregularidade Longitudinal E Seus Desdobramentos Econômicos Em Pavimentos Asfálticos*. UFSM - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA.
- Carey Jr, W. N., e Irick, P. E. (1960) The Pavement Serviceability - Performance Concept. *Highway Research Board Bulletin*, (250), 40–58.
- Cargnin, A. P. (2023) *Development of a high-performance cement-treated crushed stone for pavement bases*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Ceratti, J. A. P., Bernucci, L. B., e Soares, J. B. (2015) *UTILIZAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS EM SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO*. (ABEDA.). Rio de Janeiro.
- Cerni, G., Cardone, F., Virgili, A., e Camilli, S. (2012) Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading. *Construction and Building Materials*, 28(1), 79–87. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.066
- Chang, C., Saenz, D., Nazarian, S., Abdallah, I. N., Wimsatt, A., Freeman, T., e Fernando, E. G. (2014) *TxDOT Guidelines to Assign PMIS Treatment Levels*. *Fhwa/Tx-14/0-6673-P1* (Vol. 79968). Austin, Texas.
- Chang, J.-R., Lin, J.-D., Chung, W.-C., e Chen, D.-H. (2002) Evaluating the Structural Strength of Flexible Pavements in Taiwan Using the Falling Weight Deflectometer.

- International Journal of Pavement Engineering*, 3(3), 131–141.
doi:10.1080/1029843021000067854
- Chen, D.-H., Bilyeu, J., Lin, H.-H., e Murphy, M. (2000) Temperature Correction on Falling Weight Deflectometer Measurements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1716(1), 30–39. doi:10.3141/1716-04
- Chowdhury, T., Shekharan, R. A., e Diefenderfer, B. K. (2012) Implementation of Network-Level Falling Weight Deflectometer Survey. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2304(1), 3–9. doi:10.3141/2304-01
- Damnjanovic, I., e Zhang, Z. (2006) Determination of Required Falling Weight Deflectometer Testing Frequency for Pavement Structural Evaluation at the Network Level. *Journal of Transportation Engineering*, 132(1), 76–85. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:1(76)
- Dantas Neto, S. A., Farias, M. M. de, e Pais, J. C. (2004) Modelação da viscosidade absoluta dos asfalto-borracha usando redes neurais artificiais. ANPET (Ed), *XVII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* (p. 28–39). Florianópolis - SC.
- de Andrade, L. R., Bessa, I. S., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. L. B., e Suzuki, C. Y. (2023) Structural Performance Using Deflection Basin Parameters of Asphalt Pavements with Different Base Materials Under Heavy Traffic. *International Journal of Pavement Research and Technology*. doi:10.1007/s42947-023-00307-w
- Dehlen, G. L. (1962) A Simple Instrument for Measuring the Curvature Induced in a Road Surfacing by a Wheel Load. *Civil Engineer in South Africa*, 4(9), 189–194.
- DER-SP. (1997) Edital de Licitação Nº 007/CIC/97 - Lote 01: Sistema Rodoviário Anhangüera-Bandeirantes. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, São Paulo.
- DER-SP. (1999) Edital de Licitação Nº 20/CIC/98 - Lote 20: malha rodoviária estadual de ligação entre Tatuí, Itapetininga, Capão Bonito, Itapeva, Itararé (divisa com o estado do Paraná) e Araçoiaba da Serra. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, São Paulo.

- DER-SP. (2006) *Avaliação funcional e estrutural de pavimento. IP-DE-P00/003*. São Paulo.
- DNER. (1979) *Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - Procedimento B. DNER-PRO 011/79*. Rio de Janeiro.
- DNER. (1986) *DNER-ES 173/1986 - Método de Nível e Mira para calibração de Sistemas Medidores de Irregular de Tipo Resposta*. Brasília - DF.
- DNER. (1994a) *DNER-PRO 182/1994 - Medição da irregularidade de superfície de pavimento com sistemas integradores IPR/USP e maysmeter*. Brasília - DF.
- DNER. (1994b) *Determinação das deflexões no pela viga benkelman. DNER-ME 024/94*. Rio de Janeiro.
- DNER. (1996) *DNER-PRO 273/1996 - PRO Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)"*. Brasília - DF.
- DNIT. (2003a) *DNIT 005/2003 - TER - Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia*. Brasília - DF. Obtido de https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf
- DNIT. (2003b) *DNIT 006/2003 - PRO - Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento*. Brasília - DF.
- DNIT. (2003c) *NORMA DNIT 007/2003 - PRO - Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos Procedimento. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*. Brasília - DF.
- DNIT. (2003d) *DNIT 008/2003 - PRO - Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos Procedimento*. Brasília - DF.
- DNIT. (2003e) *DNIT 009/2003 - PRO - Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos*. Brasília - DF.
- DNIT. (2003f) *Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia. Dnit 005/2003 - Ter*. Rio de Janeiro.
- DNIT. (2006) *Manual de estudos de tráfego. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Publicação IPR - 723*, Rio de Janeiro.

- DNIT. (2011) *Manual de gerência de pavimentos*. (IPR Publ. 745, Ed). Rio de Janeiro.
- DNIT. (2017) *Calibração e Aferição dos do Modelo HDM4 para as Condições da Rede de Rodovias do Brasil*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Brasília.
- DNIT. (2021) *DNIT 433/2021 - PRO - Levantamento do percentual de área trincada e afundamento de trilha de roda de pavimentos asfálticos em trechos experimentais, monitorados ou trechos homogêneos de curta extensão*. Brasília - DF.
- DNIT. (2023a) *DNIT 440/2023 - PRO - Levantamento funcional e estrutural contínuo de pavimentos utilizando um equipamento móvel*. Brasília - DF.
- DNIT. (2023b) *DNIT 442/2023 - PRO - Levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial*. Brasília - DF.
- Donoho, D. (2017) 50 Years of Data Science. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 26(4), 745–766. doi:10.1080/10618600.2017.1384734
- Dumbaugh, D. (2019) Maria Gaetana Agnesi 1718–1799. *Notices of the American Mathematical Society*, 66(03), 1. doi:10.1090/noti1827
- Duran, J. B. C. (2016, julho 27) *Sistema de gerência de pavimentos aeroportuários: estudo de caso no Aeroporto Estadual de Araraquara*. *Proceedings of the 2017 ACM on Conference on Information and Knowledge Management*. ACM, São Carlos. Obtido de <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3132847.3132886>
- Espindola, A. C. (2014) *Modelos de Previsão de Desempenho de Pavimentos Flexíveis para uma Rodovia no Rio de Janeiro*. Instituto Militar de Engenharia. Obtido de <https://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/8121>
- FAA. (2011) *150/5370-11B - Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements*. Federal Aviation Administration.
- Fakhri, M., e Shahni Dezfoulan, R. (2019) Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model. *Construction and Building Materials*, 204, 768–780. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.142
- Fernando, E. G., e Liu, W. (2001) User's Guide for the Modulus Temperature Correction Program (MTCP)., 7(2).
- Ferri, S. (2013) *Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos*. Escola Politécnica.

- Ferri, S., Suzuki, C. Y., Rubens, C., Santos, G., e Lopes, F. M. (2011) Proposition of Backcalculation Methodology To Estimate the Structural Behavior of Asphalt. *5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements*. Thessaloniki - Greece.
- FHWA, F. H. A. (2000) LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements. *Long-Term Pavement Performance Team, HRDI-13 Federal Highway Administration, 22101*(August), 1–100.
- Flintsch, G. W., Ferne, B., Diefenderfer, B., Katicha, S., Bryce, J., e Nell, S. (2012) Evaluation of Traffic-Speed Deflectometers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2304*(1), 37–46. doi:10.3141/2304-05
- Franco, F. A. C. de P., e Motta, L. M. G. da. (2020) *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos*. Rio de Janeiro. Obtido de <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>
- Fritzen, M. A. (2016) *Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do fano por fadiga em pavimentos asfálticos*. UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Fuentes, L., Taborda, K., Hu, X., Horak, E., Bai, T., e Walubita, L. F. (2020) A probabilistic approach to detect structural problems in flexible pavement sections at network level assessment. *International Journal of Pavement Engineering, 0*(0), 1–14. doi:10.1080/10298436.2020.1828586
- Gedafa, D. S., Hossain, M., Miller, R., e Van, T. (2010) Estimation of remaining service life of flexible pavements from surface deflections. *Journal of Transportation Engineering, 136*(4), 342–352. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000094
- Gödel, K. (1931) *Gödel's Theorem in Focus*. (S. G. Shanker, Ed)*Gödel's Theorem in Focus*. Routledge. doi:10.4324/9780203407769
- Godenzoni, C., Graziani, A., Bocci, E., e Bocci, M. (2018) The evolution of the mechanical behaviour of cold recycled mixtures stabilised with cement and bitumen: field and laboratory study. *Road Materials and Pavement Design, 19*(4), 856–877.

doi:10.1080/14680629.2017.1279073

- Gonçalves, F. J. P. (2002) *Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gong, H., Sun, Y., Hu, W., Polaczyk, P. A., e Huang, B. (2019) Investigating impacts of asphalt mixture properties on pavement performance using LTPP data through random forests. *Construction and Building Materials*, 204, 203–212. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.198
- Gong, H., Sun, Y., Mei, Z., e Huang, B. (2018) Improving accuracy of rutting prediction for mechanistic-empirical pavement design guide with deep neural networks. *Construction and Building Materials*, 190, 710–718. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.087
- Gong, H., Sun, Y., Shu, X., e Huang, B. (2018) Use of random forests regression for predicting IRI of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 189, 890–897. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.017
- Google. (2024) Google Maps.
- Grilli, A., Bocci, E., e Graziani, A. (2013) Influence of reclaimed asphalt content on the mechanical behaviour of cement-treated mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 666–678. doi:10.1080/14680629.2013.794367
- Grubbs, F. E. (1969) Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, 11(1), 1. doi:10.2307/1266761
- Guatimosim, F. V., Vasconcelos, K. L., e Bernucci, L. L. B. (2017) Structural evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt. *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields* (p. 1235–1241). CRC Press, Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300. doi:10.1201/9781315100333-165
- Guatimosim, F. V., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. L. B., e Jenkins, K. J. (2018) Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 19(2), 385–399. doi:10.1080/14680629.2016.1261726
- Haas, R., Hudson, W. R., e Zaniewski, J. P. (1994) *Modern Pavement Management*. Krieger Publishing Company. Obtido de <https://books.google.com.br/books?id=TstQAAAAYAAJ>

- Hall, K. T., Darter, M. I., Hoerner, T. E., e Khazanovich, L. (1997) LTPP Data Analysis, Phase 1: Validation of Guidelines for k-value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction.
- Hamim, A., Md. Yusoff, N. I., Omar, H. A., Jamaludin, N. A. A., Hassan, N. A., El-Shafie, A., e Ceylan, H. (2020) Integrated finite element and artificial neural network methods for constructing asphalt concrete dynamic modulus master curve using deflection time-history data. *Construction and Building Materials*, 257, 119549. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119549
- Herb, W., Velasquez, R., Stefan, H., Marasteanu, M. O., e Clyne, T. (2006) Simulation and characterization of asphalt pavement temperatures. *Minnesota Department of Transportation (MNDOT)*, (480), 1–42. doi:10.1.1.1063.943
- Herb, W., Velasquez, R., Stefan, H., Marasteanu, M. O., e Clyne, T. (2009) Simulation and Characterization of Asphalt Pavement Temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, 10(1), 233–247. doi:10.1080/14680629.2009.9690190
- Hoffman, M. S., e Thompson, M. R. (1981) *Mechanistic Interpretation of Nondestructive Pavement Testing Deflections. Load Response Characteristics of Flexible Pavements Project IHR-508*. Sprongfield.
- Horak, E. (1987) *Aspects of Deflection Basin Parameters Used in a Mechanistic Rehabilitation Design Procedure for Flexible Pavements in South Africa*. University of Pretoria.
- Horak, E. (2008) Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *Journal of the South African Institution of Civil Engineers*, 50.
- Husain, S., e George, K. P. (1985) in Situ Pavement Moduli From Dynaflect Deflection. *Transportation Research Record*, 69, 102–112.
- IBGE, I. B. de G. e E. (2010) Climas zonais. *Atlas Nacional do Brasil*. Obtido 19 de novembro de 2023, de <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa852>
- IBGE, I. B. de G. e E. (2023) Conheça o Brasil - Território CLIMA. *DIVISÃO POLITICO-ADMINISTRATIVA E REGIONAL*. Obtido 3 de março de 2023, de <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/20644-clima.html>
- INMET, I. N. de M. (2023) DADOS HISTÓRICOS ANUAIS. *Banco de Dados*

- Meteorológicos do INMET*. Obtido 19 de junho de 2023, de <https://bdmep.inmet.gov.br/>
- Isola, M., Betti, G., Marradi, A., e Tebaldi, G. (2013) Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 48, 238–247. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.042
- Jung, F. W. (1988) Direct Calculation of Maximum Curvature and Strain in Asphalt Concrete Layers of Pavements from Load Deflection Basin Measurements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1196, 125–132. Obtido de <https://trid.trb.org/view.aspx?id=302388>
- Karlaftis, A. G., e Badr, A. (2015) Predicting asphalt pavement crack initiation following rehabilitation treatments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 510–517. doi:10.1016/j.trc.2015.03.031
- Katicha, S., Flintsch, G., e Diefenderfer, B. (2022) Ten Years of Traffic Speed Deflectometer Research in the United States: A Review. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2676(12), 152–165. doi:10.1177/03611981221094579
- Katicha, S. W., Flintsch, G. W., Ferne, B., e Bryce, J. (2014) Limits of agreement method for comparing TSD and FWD measurements. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(6), 532–541. doi:10.1080/10298436.2013.782403
- Kilareski, W. P., e Anani, B. A. (1982) Evaluation of in-Situ Moduli and Pavement Life from Deflection Basins. *Proceedings of the Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Held Delft University of Technology, Vol 1*, 349–66. Obtido de <https://trid.trb.org/view/297137>
- Kim, R. Y., Hibbs, B. O., e Lee, Y.-C. (1995) Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli. *Transportation Research Record*, (1473).
- Kim, R. Y., Ranjithan, S. R., Troxler, J. D., e Xu, B. (2000) *Assessing Pavement Layer Condition Using Deflection Data*. NCHRP 10-48.
- Kuchiishi, A. K. (2019) *Mechanical behavior of cold recycled asphalt mixtures*. Universidade de São Paulo.
- Lee, Y.-C., Kim, Y., e Ranjithan, S. (1998) Dynamic Analysis-Based Approach To Determine Flexible Pavement Layer Moduli Using Deflection Basin Parameters.

- Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1639(1), 36–42. doi:10.3141/1639-04
- Leiva-Villacorta, F., Vargas-Nordbeck, A., e Timm, D. H. (2017) Non-destructive evaluation of sustainable pavement technologies using artificial neural networks. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2), 139–147. doi:10.1016/j.ijprt.2016.11.006
- Lerch, R. L. (2002) *Previsão de irregularidade pós-recape em rodovias do RS : ajuste no modelo HDM-4*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Obtido de <http://hdl.handle.net/10183/2981>
- Li, M., e Wang, H. (2019) Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(4), 490–498. doi:10.1080/10298436.2017.1309197
- Li, Y., Liu, L., e Sun, L. (2018) Temperature predictions for asphalt pavement with thick asphalt layer. *Construction and Building Materials*, 160, 802–809. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.145
- Livneh, M. (2010) On the reliability of excluding thickness in forward-calculating pavement parameters. *Road Materials and Pavement Design*, 11(September), 171–195. doi:10.1080/14680629.2010.9690331
- Loganathan, K., Isied, M. M., Coca, A. M., Souliman, M. I., Romanoschi, S., e Dessouky, S. (2019) Development of comprehensive deflection parameters to evaluate the structural capacity of flexible pavements at the network level. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(4), 347–355. doi:10.1007/s42947-019-0041-0
- Loizos, A., e Papavasiliou, V. (2006) Evaluation of Foamed Asphalt Cold In-Place Pavement Recycling Using Nondestructive Techniques. *Journal of Transportation Engineering*, 132(12), 970–978. doi:10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:12(970)
- Long, B., e Shatnawi, S. (2000) Structural evaluation of rigid pavement sections. *Road Materials and Pavement Design*, 1(1–2), 97–117. doi:10.1080/14680629.2000.9689886
- Lopes, F. M., Moura, R., e Suzuki, C. Y. (2013) Flexible Pavements – Structural

- Evaluation Based on Deflection Basin Parameters. *1º International Journal of Pavements Conference* (p. 1–9). São Paulo. Obtido de <http://www.ijpavement.com/wp-content/uploads/2013/12/2013-IJPC-163-1.pdf>
- Lukanen, E. O., Stubstad, R., e Briggs, R. C. (2000) Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement. (B. Intertec, Ed). FHWA. Obtido de <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/15368>
- Luo, Y., Wu, H., Song, W., Yin, J., Zhan, Y., Yu, J., e Abubakar Wada, S. (2023) Thermal fatigue and cracking behaviors of asphalt mixtures under different temperature variations. *Construction and Building Materials*, 369, 130623. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130623
- Macedo, J. A. G. de. (1996) *Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Magnaghi-Delfino, P., Mele, G., e Norando, T. (2020) *Faces of Geometry. From Agnesi to Mirzakhani*. (P. Magnaghi-Delfino, G. Mele, & T. Norando, Eds) (Vol. 88). Springer International Publishing, Cham. doi:10.1007/978-3-030-29796-1
- Marcelino, P., de Lurdes Antunes, M., Fortunato, E., e Gomes, M. C. (2021) Machine learning approach for pavement performance prediction. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(3), 341–354. doi:10.1080/10298436.2019.1609673
- Marcon, A. F. (1996) *Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Obtido de http://www.bd.bibl.ita.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1586
- Matini, N., Tabatabaee, N., e Abbasghorbani, M. (2018) Protocol for FWD Data Collection at Network-Level Pavement Management in Iran. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(40), 68–77. doi:10.1177/0361198118758392
- Mehranfar, V., e Modarres, A. (2018) Evaluating the recycled pavement performance and layer moduli at variable temperature by nondestructive tests. *International Journal of Pavement Engineering*, 0(0), 1–13. doi:10.1080/10298436.2018.1511784
- Mehta, Y., e Roque, R. (2003) Evaluation of FWD Data for Determination of Layer Moduli of Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), 25–31.

doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(25)

- Mohseni, A. (1998) *LTPP Seasonal Asphalt Concrete (AC) Pavement Temperature Models*. (Vol. 7).
- Moore, G. E. (2006) Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from *Electronics*, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff. *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, 11(3), 33–35. doi:10.1109/N-SSC.2006.4785860
- Moraes, C. G. (2015) *ANÁLISE DE BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS OBTIDAS POR 4 EQUIPAMENTOS DO TIPO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)*. *Biomass Chem Eng*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Motta, L. M. G. da. (1979) *O Estudo da Temperatura em Revestimentos Betuminosos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Obtido de <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282006%29132%3A7%28574%29>
- Motta, L. M. G. da. (1991) *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Muller, W. B., e Roberts, J. (2013) Revised approach to assessing traffic speed deflectometer data and field validation of deflection bowl predictions. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(4), 388–402. doi:10.1080/10298436.2012.715646
- Nascimento, L. A. H. do. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. North Carolina State University.
- ONU. (2015) *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, As Nações Unidas no Brasil*. Obtido 11 de janeiro de 2024, de <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- Papavasiliou, V., e Loizos, A. (2013) Field performance and fatigue characteristics of recycled pavement materials treated with foamed asphalt. *Construction and Building Materials*, 48, 677–684. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.056
- Park, H., Chung, M., Lee, Y., e Kim, B. (2013) A study on the correlation between soil properties and subgrade stiffness using the long-term pavement performance data. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), 146–153.

doi:10.1080/10298436.2011.633167

- Park, H., Kim, Y., e Wan Park, S. (2005) Assessment of Pavement Layer Condition with Use of Multiload-Level Falling Weight Deflectometer Deflections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1905(1905), 107–116. doi:10.3141/1905-13
- Paterson, W. D. O. (1987) *Road deterioration and maintenance effects: Models for planning and management*. (T. J. H. U. P. B. and London, Ed) *The World Bank* (Vol. 24). Washington, D.C. doi:10.1016/0191-2607(90)90027-4
- Pérez, P., Agrela, F., Herrador, R., e Ordoñez, J. (2013) Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. *Construction and Building Materials*, 44, 593–599. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.034
- Pinto, S., e Preussler, E. S. (2002) *Pavimentação Rodoviária Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis*. (01 ed). Rio de Janeiro.
- Pipicano, E. F. M., e Vieira, S. S. (2018) Processos utilizados pelo DNIT para coleta de dados necessários para a calibração e aferição do modelo HDM-4 às condições das rodovias brasileiras. ANPET (Ed), *32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET* (Vol. 32, p. 1177–1181). Gramado-RS.
- Pitangui, L. C. (2022) *Desempenho de Pavimento Sustentável com Camada de Base de Mistura Reciclada Estabilizada com Espuma de Asfalto*. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
- Primusz, P., Péterfalvi, J., Markó, G., e Tóth, C. (2015) Effect of Pavement Stiffness on the Shape of Deflection Bowl. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 11(1), 39–54. doi:10.1515/aslh-2015-0003
- Queiroz, C. A. V. de. (1981) *Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil*. The University of Texas at Austin.
- Rabbi, M. F., e Mishra, D. (2021) Using FWD deflection basin parameters for network-level assessment of flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(2), 147–161. doi:10.1080/10298436.2019.1580366
- Rodrigues, A. (2023) *Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal*. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

- Rohde, G. T. (1994) Determining pavement structural number from FWD testing. *Transportation Research Record*, (1448), 61–68.
- Rosenblatt, F. (1958) The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386–408. doi:10.1037/h0042519
- Saleh, M. (2016a) Simplified approach for structural capacity evaluation of flexible pavements at the network level. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(5), 440–448. doi:10.1080/10298436.2014.993202
- Saleh, M. (2016b) Utilisation of the deflectograph data to evaluate pavement structural condition of the highway network. *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), 136–152. doi:10.1080/14680629.2015.1064823
- Saleh, M. (2019) Effect of anisotropy and nonlinearity assumptions on the predicted surface deflections. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(5), 472–477. doi:10.1007/s42947-019-0057-5
- Salour, F., e Erlingsson, S. (2013) Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 141–158. doi:10.1080/14680629.2012.754600
- Salt, G., Grimshaw, L., e Marradi, A. (2022) Pavement structural performance: Predicting remaining life using rapid non-destructive testing. *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 3* (Vol. 3, p. 282–290). CRC Press, London. doi:10.1201/9781003222910-29
- Samuel, A. L. (1959) Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. *IBM Journal of Research and Development*, 3(3), 210–229. doi:10.1147/rd.33.0210
- SANRAL. (2014) *South African Pavement Engineering Manual Chapter 6 Road Prism and Pavement Investigations*. (Seconde Ed.). South African National Road Agency SOC Limited.
- Santos, C. R., Suzuk, C. Y., Vallejo, F., Ferri, S., e Daibert, R. F. (2011) Considerations of Area Parameter of the Deflection Basin on the Structural Evaluation of Flexible Pavements. *5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements*, (June), 1–3.
- Shannon, C. E. (1948) A Mathematical Theory of Communication. *Bell System*

- Technical Journal*, 27(4), 623–656. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x
- SHRP. (1993) SHRP Procedure for Temperature Correction of Maximum Deflections.
- Simonin, J., Geffard, J., e Horny, P. (2015) Performance of Deflection Measurement Equipment and Data Interpretation in France. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)* (p. 1–10). Berlin.
- Sivagnanasuntharam, S., Sountharajah, A., Bodin, D., e Kodikara, J. (2023) Prediction of average in-depth temperature of asphalt pavement using surface temperature measured during intelligent compaction. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2). doi:10.1080/10298436.2022.2072501
- Sollazzo, G., Fwa, T. F., e Bosurgi, G. (2017) An ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 134, 684–693. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.186
- Soncim, S. P. (2011) *Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia*. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos.
- Southgate, H. F. (1969) An Evaluation of Temperature Distribution Within Asphalt Pavements and Its Relationship to Pavement Deflection. *Nat Acad Sciences-Nat Research Council-Highway Research Rec*, (29), 116–131. Obtido de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0014618504&partnerID=40&md5=28435ba09844545f5b967ef46205b8e2>
- Southgate, H. F., e Deen, R. C. (1968) Temperature Distribution within Asphalt Pavements and Its Relationship to Pavement Deflection., (June).
- Souza, R. O. de, Dantas Neto, S., e Farias, M. M. de. (2006) *Statistical Analysis between Roughness Indices and Roughness Prediction Model Using Neural Networks*. *International Contest on Long-Term Pavement Performance Data Analysis*. Washington, D. C.
- Specht, L. P., Babadopulos, L. F. de A. L., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., e Soares, J. B. (2017) Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 149, 648–658. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.037
- Specht, L. P., e Khachatourian, O. (2014) Application of artificial intelligence to

- modelling asphalt–rubber viscosity. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(9), 799–809. doi:10.1080/10298436.2014.893316
- Sun, Z., Kasbergen, C., van Dalen, K. N., Anupam, K., Skarpas, A., e Erkens, S. M. J. G. (2023) A parameter identification technique for traffic speed deflectometer tests of pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 24(4), 1065–1087. doi:10.1080/14680629.2022.2060125
- Szentpéteri, I. (2013) Temperature dependence of deflection bowl. *Proceedings of the Second Conference of Junior Researchers in Civil Engineering*. Budapest, Hungary.
- Thyagarajan, S., Sivaneswaran, N., Petros, K., e Muhunthan, B. (2011) Development of a Simplified Method for Interpreting Surface Deflections for In-Service Flexible Pavement Evaluation. *8th International Conference on Managing Pavement Assets*. Santiago, Chile. doi:10.1.1.655.5703
- Turing, A. M. (1937) On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-42(1), 230–265. doi:10.1112/plms/s2-42.1.230
- Vestena, P. M., Schuster, S. L., Almeida Jr., P. O. B. de, Faccin, C., Specht, L. P., e Pereira, D. da S. (2021) Dynamic modulus master curve construction of asphalt mixtures: Error analysis in different models and field scenarios. *Construction and Building Materials*, 301, 124343. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124343
- Vyas, V., Singh, A. P., e Srivastava, A. (2020) Prediction of asphalt pavement condition using FWD deflection basin parameters and artificial neural networks. *Road Materials and Pavement Design*, 0(0), 1–19. doi:10.1080/14680629.2020.1797855
- Wang, H., Li, M., Szary, P., e Hu, X. (2019) Structural assessment of asphalt pavement condition using backcalculated modulus and field data. *Construction and Building Materials*, 211, 943–951. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.250
- Wang, H., Xie, P., Ji, R., e Gagnon, J. (2020) Prediction of airfield pavement responses from surface deflections: comparison between the traditional backcalculation approach and the ANN model. *Road Materials and Pavement Design*, 0(0), 1–16. doi:10.1080/14680629.2020.1733638
- Wang, Y., Tan, Y., Guo, M., e Wang, X. (2017) Influence of Emulsified Asphalt on the Mechanical Property and Microstructure of Cement-Stabilized Gravel under

- Freezing and Thawing Cycle Conditions. *Materials*, 10(5), 504. doi:10.3390/ma10050504
- Wimsatt, A. J. (1998) Direct analysis methods for falling weight deflectometer deflection data. *Transportation Research Record*, (1655), 135–144. doi:10.3141/1655-18
- World Bank. (2007) *HDM-4 Road Use Costs Model Documentation Version 1.10*. (W. Bank, Ed). Washington, D.C.
- WSDOT, W. S. D. of T. (2005) Everseries User's Guide Pavement Analysis Computer Software and Case Studies., (August), 122.
- Yshiba, J. K. (2003) *Modelos de desempenho de pavimentos: estudo de rodovias do Estado do Paraná*. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos.
- Zang, G., Sun, L., Chen, Z., e Li, L. (2018) A nondestructive evaluation method for semi-rigid base cracking condition of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 162, 892–897. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.157
- Zerbini, L. F. (1999) *Desenvolvimento de Modelos de Desempenho para Utilização em Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos*. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos.