



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ALICE OLIVEIRA JUSTO

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE TRECHOS DE RODOVIAS NA PARAÍBA A
PARTIR DE ENSAIOS *IN SITU* E RETROANÁLISE**

CAMPINA GRANDE – PB

2023

ALICE OLIVEIRA JUSTO

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE TRECHOS DE RODOVIAS NA PARAÍBA A
PARTIR DE ENSAIOS *IN SITU* E RETROANÁLISE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia

Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena

CAMPINA GRANDE – PB

2023

J96a

Justo, Alice Oliveira.

Avaliação estrutural de trechos de rodovias na Paraíba a partir de ensaios *in situ* e retroanálise / Alice Oliveira Justo. – Campina Grande, 2023.

174 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena".
Referências.

1. Geotecnia. 2. Viga Benkelman. 3. Módulo de Resiliência. 4. Vida Útil do Pavimento. 5. MeDiNa. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes. II. Título.

CDU 624.131(043)

ALICE OLIVEIRA JUSTO

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE TRECHOS DE RODOVIAS NA PARAÍBA A
PARTIR DE ENSAIOS *IN SITU* E RETROANÁLISE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 27 /10 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Avaliador Interno: Prof. Dsc. John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Avaliador Interno: Prof. Dsc. Jonny Dantas Patrício
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Avaliador Externo: Prof. Dsc. Fabiano Pereira Cavalcante
JBR Engenharia Ltda



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): ALICE OLIVEIRA JUSTO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. JONNY DANTAS PATRÍCIO - UFCG - EXAMINADOR INTERNO, DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - PPGECA/UFCG - EXAMINADOR INTERNO, DR. FABIANO PEREIRA CAVALCANTE - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 43/2023). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: "AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE TRECHOS DE RODOVIAS NA PARAÍBA A PARTIR DE ENSAIOS IN SITU E RETROANÁLISE" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / NA SALA DE CONFERÊNCIA DO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 27 DE OUTUBRO 2023**



Documento assinado eletronicamente por **Jonny Dantas Patricio, Usuário Externo**, em 30/10/2023, às 15:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FABIANO PEREIRA CAVALCANTE, Usuário Externo**, em 30/10/2023, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 30/10/2023, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 30/10/2023, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alice Oliveira Justo, Usuário Externo**, em 31/10/2023, às 21:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR**, em 01/11/2023, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3867699** e o código CRC **E1DFDD55**.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me capacitado e me dado forças para concluir esse trabalho e alcançar um sonho que Ele colocou em mim, não existem palavras que expresse o quanto sou grata.

Aos meus pais e a minha família, por terem me apoiado, e terem entendido a minha ausência desde a graduação até aqui. Agradeço em especial a minha irmã Luiza, por sempre ter orado e me confortado com palavras acolhedoras e de incentivo. Amo vocês.

Ao meu namorado, por toda paciência e compressão durante os dias mais difíceis dessa jornada. Obrigada pelo seu companheirismo e dedicação sem fim. Você foi essencial.

Ao orientador, professor Adriano Lucena, pelos ensinamentos e orientações, pela compreensão, pela serenidade passada na fase final da pesquisa. Estendo os agradecimentos ao Professor Fabiano Cavalcante que sempre se disponibilizou a me ajudar com muita paciência, acolhimento e conselhos.

Aos professores Jonh Kennedy e Jonny Dantas pela participação e disponibilidade na banca examinadora, contribuindo para o desenvolvimento deste trabalho. E também a todos os professores do PPGECA que contribuíram para minha formação.

Ao grupo de pesquisa do LEP, em especial a Thamires Dantas e Paulo Germano por todo apoio desde o dia em que eu decidi mudar o tema da dissertação, até os últimos ajustes na prorrogação do segundo tempo, sem vocês este trabalho não seria finalizado.

Ao colega, Gerson Alves, obrigada por todas orientações e por todo conhecimento transmitido sobre retroanálise.

Aos meus melhores amigos Mateus Valdevino, Renato Cavalcante, Jeferson Nunes, Cecinha, José Augusto, Mayrla Santos, Maria de Fátima e Thamires, por estarem do meu lado sempre que podiam, pelas conversas e conforto em dias angustiantes, em dias alegres, sou eternamente grata por tudo.

Aos meus colegas de turma e colegas do LEP: Alcidiney, Bruna, Aline, Danylo, Gabriel, Juliette, Renato, Samuel, Ingridy, Albaniza, Maria das Vitórias, Sonaly, Conrado, Priscila, Manoel, Osires, Daniel, José Daniel, Ildinho e Jadilson.

Agradeço à oportunidade a mim concedida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, e ao CNPQ pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

Na avaliação estrutural de pavimentos, fundamental para a gestão eficaz de rodovias, são utilizados *softwares* para realização de retroanálise a partir de medidas de deflexão efetuadas com equipamentos tipo Falling Weight Deflectometer (FWD) com o objetivo de estimar os módulos resiliência (MR) das camadas de pavimento. Atualmente, a viga Benkelman é utilizada no Brasil por ser um equipamento simples, acessível economicamente e ser bastante difundida, entretanto, grande parte dos programas de retroanálise só utilizam as medições realizadas com o FWD, inclusive o BackMeDiNa. Diante deste quadro, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre módulos de resiliência retroanalizados, obtidos a partir do uso da viga Benkelman com os obtidos em laboratório a partir de amostras extraídas como forma de verificar a eficácia destas retroanálises para este tipo de equipamento em específico. Foram utilizados dados conseguidos por meio de avaliações estruturais de dois trechos rodoviários localizados no estado da Paraíba, com ensaios não destrutivos, semi destrutivos e destrutivos a partir de uma abordagem mecanística-empírica. Com as amostras coletadas em campo, foram realizados ensaios de módulo resiliência da mistura asfáltica, das camadas de base e sub-base dos trechos estudados. As bacias deflectométricas tiveram seus parâmetros calculados e foram utilizadas como dados de entrada em dois softwares de retroanálise: o BackMeDiNa e o BAKFAA. Estudou-se também as relações entre os módulos de resiliência retroanalizados com as deflexões máximas, e por fim, foram estimadas a vida útil de fadiga e o incremento de deformação permanente, com auxílio do MeDiNa para análise da evolução do comportamento estrutural dos pavimentos sob estudo. Em relação aos resultados obtidos com a retroanálise, o BAKFAA gerou menores erros quadráticos médios (RMS) quando comparado ao BackMeDiNa, indicando que as bacias calculadas são mais próximas das medidas em campo, além disso, os módulos foram menores e mais próximos dos módulos de resiliência obtidos em laboratório, com diferenças que variaram de 0,28% a 31,65%. Em relação aos modelos de regressão, obteve-se correlações fortes e significativas, onde maiores valores de deflexão refletiam em menores módulos de resiliência e vice-versa. Os parâmetros da bacia deflectométrica corroboram com o comportamento encontrado em campo e com os valores de módulo. Para a vida útil dos pavimentos estimada pelo MeDiNa, foram encontrados valores próximos aos dados levantados ao longo dos três anos de monitoramento. Portanto, mesmo como uso da viga Benkelman, foi possível obter resultados próximos entre os módulos retroanalizados e obtidos *in situ*, correlações satisfatórias, destacando como uma boa ferramenta para o procedimento de retroanálise.

Palavras-chave: Viga Benkelman. Módulo de resiliência. Vida útil do pavimento. MeDiNa.

ABSTRACT

In the structural assessment of pavements, fundamental for the effective management of highways, software is used to perform retroanalysis based on deflection measurements carried out with equipment such as Falling Weight Deflectometer (FWD) with the aim of estimating the resilience modules (MR) of the layers of pavement. Currently, the Benkelman beam is used in Brazil because it is a simple, economically accessible and widespread equipment, however, most retroanalysis programs only use measurements carried out with the FWD, including BackMeDiNa. Given this situation, this work aimed to carry out a comparative analysis between retro-analyzed resilience modules, obtained from the use of the Benkelman beam, with those obtained in the laboratory from samples extracted as a way of verifying the effectiveness of these retro-analyses for this type of equipment. In specific. Data obtained through structural assessments of two road sections located in the state of Paraíba were used, with non-destructive, semi-destructive and destructive tests using a mechanistic-empirical approach. With the samples collected in the field, resilience modulus tests were carried out on the asphalt mixture, base and sub-base layers of the sections studied. The deflectometric basins had their parameters calculated and were used as input data in two retroanalysis software: BackMeDiNa and BAKFAA. The relationships between the back-analyzed resilience modules and the maximum deflections were also studied, and finally, the fatigue life and the increase in permanent deformation were estimated, with the aid of MeDiNa to analyze the evolution of the structural behavior of the pavements under study. In relation to the results obtained with the retroanalysis, BAKFAA generated smaller mean squared errors (RMS) when compared to BackMeDiNa, indicating that the calculated basins are closer to those measured in the field, in addition, the modules were smaller and closer to the modules of resilience obtained in the laboratory, with differences ranging from 0.28% to 31.65%. Regarding the regression models, strong and significant correlations were obtained, where higher deflection values reflected in lower resilience modules. The parameters of the deflectometric basin corroborate the behavior found in the field and the modulus values. For the useful life of the pavements estimated by MeDiNa, values were found close to the data collected over the three years of monitoring. Therefore, even using the Benkelman beam, it was possible to obtain close results between the retro-analyzed modules and those obtained in situ, satisfactory correlations, highlighting it as a good tool for the retro-analysis procedure.

Keywords: Benkelman beam. Resilience module. Pavement useful life. MeDiNa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de extração de amostras e poços de sondagem.....	25
Figura 2 - Estrutura da viga Benkelman.....	30
Figura 3 - Configuração de carga da viga Benkelman.....	30
Figura 4 - Execução do ensaio com Light Weight Deflectometer (LWD)	33
Figura 5 - Características da bacia de deflexão.....	36
Figura 6 - Zonas da bacia deflectométrica.....	36
Figura 7 - Representação gráfica da bacia deflectométrica.....	37
Figura 8 - Perfil de deflexão das camadas durante o ensaio de viga Benkelman.....	42
Figura 9 - Etapas de intervenções em pavimento asfáltico	49
Figura 10 - Interface padrão do software BAKFAA.....	54
Figura 11 - Modelo de planilha disponibilizado pelo programa	56
Figura 12 - Interface do programa BackMeDiNa	57
Figura 13 - Cálculo das distâncias "X" em função das distâncias "x"	59
Figura 14 - Interface do Programa MeDiNa versão 1.1.5.0.....	63
Figura 15 - Fluxograma das etapas metodológicas	65
Figura 16 - Localização dos trechos monitorados no Estado da Paraíba.....	66
Figura 17 - Imagem de satélite da via localizada na PB 138	67
Figura 18 - Composição estrutural da rodovia PB-138.....	67
Figura 19 - Imagem de satélite da BR 230/PB.....	69
Figura 20 - Composição estrutural da rodovia BR-230/PB	69
Figura 21 - Pesagem de caminhão calibrado com 8,2 tf de carga	71
Figura 22 - Posição da viga Benkelman durante levantamento deflectométrico	72
Figura 23 - Medição da área trincada conforme DNIT 433/2021-PRO.....	72
Figura 24 - Medição do afundamento em trilha de roda conforme o DNIT 433/2021-PRO...	73
Figura 25 – Extração de amostras indeformadas do revestimento.....	74
Figura 26 - Amostras extraídas e identificadas	75
Figura 27 - Ensaio de RT e ensaio de fadiga.....	75
Figura 28 - Gráfico da vida de fadiga x deformação específica resiliente – PB 138	76
Figura 29 - Modelo de arquivo de bacias preenchido com os dados da viga adaptados.....	79
Figura 30 - Interface do BackMeDiNa após retroanálise do Trecho 1 (ano 2019).....	80
Figura 31 - Exemplo de uma retroanálise realizada no BAKFAA.....	81
Figura 32 - Exemplo do cálculo do FV para a rodovia BR 230.....	83
Figura 33 - Valores do número N para PB 138.....	84
Figura 34 - Valores do número N para BR 230	84
Figura 35 - Deflexões características dos subtrechos homogêneos da PB 138.....	90
Figura 36 - Resumo e evolução dos parâmetros das bacias do trecho 1	92
Figura 37 - Deflexões características dos subtrechos homogêneos da BR 230/PB	95
Figura 38 - Resumo e evolução dos parâmetros das bacias do trecho 2	97
Figura 39 - Curva de Wholer: número de aplicações versus deformação específica resiliente	99
Figura 40 - Módulos equivalentes retroanalizados no BAKFAA: Trecho 2 (2021)	102
Figura 41 - Módulos equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa: Trecho 2 (2021)	103
Figura 42 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de revestimento:	104
Figura 43 - Comparativo para os MR médios da camada de revestimento.....	105

Figura 44 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de sub-base: trecho 1	107
Figura 45 - Comparativo para os MR médios da camada de sub-base	108
Figura 46 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de subleito: trecho 1	109
Figura 47 - Comparativo para os MR médios da camada de subleito.....	110
Figura 48 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de revestimento: trecho 2.....	112
Figura 49 - Comparativo para os MR médios da camada de revestimento asfáltico	113
Figura 50 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de base: trecho 2	114
Figura 51 - Comparativo para os MR médios da camada de base	115
Figura 52 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de sub-base: trecho 2.....	116
Figura 53 - Comparativo para os MR médios da camada de sub-base	117
Figura 54 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de subleito: trecho 2.....	118
Figura 55 - Comparativo para os MR médios da camada de subleito.....	119
Figura 56 - Gráficos de dispersão do revestimento asfáltico: trecho 1	126
Figura 57 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA - 2019.....	127
Figura 58 - Gráficos de dispersão da sub-base: trecho 1.....	128
Figura 59 - Valor previsto x valor calculado: BackMeDiNa – 2021	129
Figura 60 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA – 2019	130
Figura 61 - Gráficos de dispersão do subleito: trecho 1.....	131
Figura 62 - Valor previsto x valor calculado: BackMeDiNa (2022).....	132
Figura 63 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA (2021)	132
Figura 64 - Gráficos de dispersão do revestimento asfáltico: trecho 2	134
Figura 65 - Gráficos de dispersão da base: trecho 2.....	136
Figura 66 - Valor previsto x valor calculado: BackMeDiNa (2021).....	137
Figura 67 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA (2021)	137
Figura 68 - Gráficos de dispersão da sub-base: trecho 2.....	138
Figura 69 - Gráficos de dispersão do subleito: trecho 2.....	140
Figura 70 - Valor previsto x valor calculado: BackMeDiNa (2021).....	141
Figura 71 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA (2020)	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algumas correlações obtidas do LWD com diferentes equipamentos.....	35
Tabela 2 - Critérios de classificação da condição do pavimento conforme os parâmetros para base granular	38
Tabela 3 - Critérios de classificação da condição do pavimento conforme os parâmetros para base cimentada	38
Tabela 4 - Valores típicos de módulos de resiliência e coeficientes de Poisson, utilizados em pavimentos rodoviários	46
Tabela 5 - Valores de módulo de resiliência para materiais granulares.....	46
Tabela 6 - Valores usuais de módulo de resiliência	47
Tabela 7 - Valores usuais de coeficientes de Poisson	48
Tabela 8 - Critérios de parada e confiabilidade do método MeDiNa.....	64
Tabela 9 - Média dos valores para o cálculo do número N da PB 138 em 2019	68
Tabela 10 - Média dos valores para o cálculo do número N da BR 230/PB em 2020.....	70
Tabela 11 - Distâncias das leituras para delineamento das bacias	71
Tabela 12 - Resumo das adaptações realizadas para uso dos dados da viga Benkelman.....	78
Tabela 13 - Resumo dos módulos de resiliência semente.....	80
Tabela 14 - Veículos comerciais e fator de eixo (%): trecho 1	82
Tabela 15 - Veículos comerciais e fator de eixo (%): trecho 2	83
Tabela 16 - Percentual de área trincada ao longo dos anos.....	86
Tabela 17 - Afundamento em trilha de roda ao longo dos anos.....	86
Tabela 18 - Bacias deflectométricas: PB 138 - 2019	87
Tabela 19 - Segmentos homogêneos da PB 138	88
Tabela 20 - Análise estatística descritiva do Subtrecho 01 ao longo dos anos	88
Tabela 21 - Análise estatística descritiva do Subtrecho 02 ao longo dos anos	89
Tabela 22 - Resumo dos parâmetros Trecho 1	91
Tabela 23 - Segmentos homogêneos da BR 230/PB	92
Tabela 24 - Análise estatística descritiva do Subtrecho 01 ao longo dos anos	93
Tabela 25 - Análise estatística descritiva do Subtrecho 02 ao longo dos anos	94
Tabela 26 - Resumo dos parâmetros trecho 2	96
Tabela 27 - Resultados do RT e MR do revestimento asfáltico: trecho 1	98
Tabela 28 - Resultados do RT e MR do revestimento asfáltico: trecho 2.....	99
Tabela 29 - Valores dos coeficientes de regressão e MR médio do trecho 2.....	100
Tabela 30 - Módulos retroanalizados da camada de revestimento: trecho 1	106
Tabela 31 - Módulos retroanalizados da camada de sub-base: trecho 1	109
Tabela 32 - Módulos retroanalizados da camada de subleito: trecho 1	111
Tabela 33 - Módulos retroanalizados da camada de revestimento asfáltico: trecho 2	114
Tabela 34 - Módulos retroanalizados da camada de base: trecho 2	116
Tabela 35 - Módulos retroanalizados da camada de sub-base: trecho 2	118
Tabela 36 - Módulos retroanalizados da camada de subleito: trecho 2.....	120
Tabela 37 - Módulos retroanalizados e obtidos em laboratório: revestimento (trecho 1).....	121
Tabela 38 - Módulos retroanalizados e obtidos em laboratório: revestimento (trecho 2).....	122
Tabela 39 - Módulos retroanalizados e obtidos em laboratório: base e sub-base (trecho 2)..	122
Tabela 40 - Análise de correlação e significância do revestimento asfáltico: trecho 1.....	126
Tabela 41 - Análise de correlação e significância da sub-base: trecho 1	128
Tabela 42 - Análise de correlação e significância do subleito: trecho 1	130

Tabela 43 - Análise de correlação e significância do revestimento asfáltico: trecho 2.....	134
Tabela 44 - Análise de correlação e significância da base: trecho 2.....	135
Tabela 45 - Análise de correlação e significância da sub-base: trecho 2.....	138
Tabela 46 - Análise de correlação e significância do subleito: trecho 2.....	139
Tabela 47 - Percentual de área trincada obtida pelo MeDiNa: trecho 1.....	142
Tabela 48 - Comparativo entre % área trincada: trecho 1.....	143
Tabela 49 - Percentual de área trincada obtida pelo MeDiNa: trecho 2.....	143
Tabela 50 - Comparativo entre % área trincada: trecho 1.....	144
Tabela 51 - Resumo das informações do Trecho 1 (PB 138).....	158
Tabela 52 - Resumo das informações do Trecho 2 (BR 230/PB).....	158
Tabela 53 - Deflexões trecho 1 (PB 138).....	159
Tabela 54 - Deflexões trecho 2 (BR 230/PB).....	160
Tabela 55 - Bacias deflectométricas adaptadas: trecho 1.....	162
Tabela 56 - Bacias deflectométricas adaptadas: trecho 2.....	163
Tabela 57 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 1 (2019).....	165
Tabela 58 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 1 (2021).....	166
Tabela 59 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 1 (2022).....	167
Tabela 60 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 2 (2020).....	168
Tabela 61 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 2 (2021).....	168
Tabela 62 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 2 (2022).....	169
Tabela 63 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 1 (2019).....	170
Tabela 64 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 1 (2021).....	171
Tabela 65 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 1 (2022).....	172
Tabela 66 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 2 (2020).....	173
Tabela 67 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 2 (2021).....	173
Tabela 68 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 2 (2022).....	174

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Regressões obtidas por Preussler (2007)	40
Quadro 2 - Modelos de regressão para cada camada do pavimento.	124

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

°C	Grau Celsius
σ	Tensão aplicada
Cm	Centímetro
D ₀	Deflexão máxima
Kg	Quilograma
K	Constante da viga Benkelman
L ₀	Leitura inicial
L ₀	Leitura final
Min	Minuto
Mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
r	Coefficiente de correlação de Pearson
R ²	Coefficiente de determinação
tf	Tonelada força
pol	Polegada
ν	Coefficiente de Poisson
AASHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ANP	Agência Nacional de Petróleo
AT	Área Trincada
ATR	Afundamento em Trilha de Roda
AVA	Avaliação da Condição do Pavimento
BCI	Índice da Curvatura da Base
BDI	Índice de Danos à Base
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CAP	Concreto Asfáltico de Petróleo

CAUQ	Concreto Usinado à Quente
CBR	California Bearing Ratio
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobrás
CF	Fator de Curvatura
CV	Coeficiente de Variação
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPD	Cone de Penetração Dinâmica
COPPE	Instituto Albrto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DN	Índice de Penetração
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
FAA	Federal Aviation Administration
FC	Fator de carga
FFM	Fator de Fadiga da Mistura
FV	Fator Veículo
FWD	Falling Weight Deflectometer
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	International Roughness Index
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LWD	Leight Weight Deflectometer
LEAF	Layered Elastic Analysis
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos
MR	Módulo de Resiliência
RC	Raio de Curvatura
RMSE	Root Mean Square Error
RNA	Redes Neurais Artificiais
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SCI	Índice de Curvatura da Superfície

SH	Segmento Homogêneo
TER	Trilha de Roda Externa
TRI	Trilha de Roda Interna
TSD	Tratamento Superficial Duplo
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VB	Viga Benkelman
VMD	Volume Médio Diário

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	OBJETIVOS.....	21
1.1.1.	Objetivo Geral.....	21
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	21
1.2.	Organização do Trabalho.....	22
2.	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1.	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	23
2.1.1.	Métodos destrutivos.....	24
2.1.2.	Métodos semidestrutivos.....	26
2.1.3.	Métodos não destrutivos.....	27
2.1.3.1.	Viga Benkelman.....	28
2.1.3.2.	<i>Falling Weight Deflectometer</i> (FWD).....	31
2.1.3.3.	<i>Light Weight Deflectometer</i> (LWD).....	33
2.1.3.4.	Interpretação dos dados de deflexão.....	35
2.1.3.5.	Correlações entre medidas de deflexão.....	38
2.1.4.	Fatores que influenciam nas medidas deflectométricas.....	41
2.2.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	43
2.2.1.	Valores típicos de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson.....	45
2.3.	RETROANÁLISE.....	48
2.3.1.	Fatores que influenciam na retroanálise.....	52
2.3.2.	Softwares utilizados na pavimentação para retroanálise.....	53
2.3.2.1.	BAKFAA.....	53
2.3.2.2.	BackMeDiNa.....	55
2.3.3.	Adaptações da conversão do carregamento para uso de <i>softwares</i> de retroanálise.....	58
2.4.	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL.....	60
2.4.1.	MeDiNa.....	62
3.	METODOLOGIA	65
3.1.	PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	65

3.2.	CARACTERIZAÇÃO DOS TRECHOS.....	66
3.2.1.	Rodovia PB 138 (Trecho 1)	66
3.2.2.	Rodovia BR 230/PB em Cabedelo/PB (Trecho 2).....	68
3.3.	ENSAIOS <i>IN SITU</i>	70
3.4.	ENSAIOS EM LABORATÓRIO	74
3.5.	RETROANÁLISE	76
3.5.1.	Ajuste dos dados de viga Benkelman.....	77
3.5.2.	Retroanálise com o programa BackMeDiNa.....	78
3.5.3.	Retroanálise com o programa BAKFAA.....	80
3.6.	PREVISÃO DA VIDA DE FADIGA DO PAVIMENTO.....	82
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	85
4.1.	ENSAIOS EM <i>IN SITU</i>	85
4.1.1.	Percentual de área trincada e afundamento em trilha de roda.....	85
4.1.2.	Análise das bacias de deflexão medidas em campo	86
4.1.2.1.	Trecho 1	86
4.1.2.2.	Trecho 2.....	92
4.2.	ENSAIOS EM LABORATÓRIO	97
4.2.1.	Trecho 1	98
4.2.2.	Trecho 2.....	99
4.3.	RETROANÁLISE	100
4.3.1.	Síntese das retroanálises.....	101
4.3.2.	Comparativo entre módulos de resiliência retroanalizados por dois <i>softwares</i>	103
4.3.2.1.	Trecho 1	103
4.3.2.2.	Trecho 2.....	111
4.3.3.	Relação entre módulos retroanalizados e módulos obtidos em laboratório.....	120
4.3.4.	Correlações entre deflexões máximas e módulos de resiliência retroanalizados	123
4.3.4.1.	Trecho 1	124
4.3.4.2.	Trecho 2.....	133
4.4.	AVALIAÇÃO DE VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO PELO MEDINA	141

4.4.1.	Trecho 1	142
4.4.2.	Trecho 2	143
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
5.1.	CONCLUSÕES	145
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	146
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
	APÊNDICE A – RESUMO DOS DADOS DOS TRECHOS.....	158
	APÊNDICE B – DADOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN	159
	APÊNDICE C – DEFLEXÕES DE VIGA BENKELMAN ADAPTADAS PARA FWD.....	162
	APÊNDICE D – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS COM O BackMeDiNa 165	
	APÊNDICE E – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS COM O BAKFAA.	170

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, apesar da sua vasta extensão territorial, é um país onde o modal de transporte é predominantemente rodoviário. Este sendo o maior responsável pela movimentação de cargas e pessoas utiliza, em sua maioria, pavimento do tipo flexível devido a maior facilidade de aplicação e ao menor custo inicial na implementação, sendo uma tecnologia consolidada no meio técnico. Quando empregado, deve garantir resistência à fadiga, resistência a deformação permanente, aderência pneu-pavimento e rigidez.

É certo que, com o passar do tempo, os pavimentos asfálticos sofram com o intemperismo e com o crescente volume de tráfego, o que acaba contribuindo para o desgaste do pavimento e surgimento precoce de defeitos. A pesquisa mais recente realizada pela CNT (2022) avaliou as condições da superfície do pavimento do país e apontou que cerca de 91,1% das rodovias apresentam algum desgaste, trincas, remendos, afundamentos, ondulações, buracos e algumas encontram-se até destruídas. A consequência natural dessa má infraestrutura é o aumento dos custos associados à manutenção dos veículos e o aumento dos acidentes.

Dentre as patologias encontradas, as que mais se destacam por comprometerem a função estrutural do pavimento asfáltico, além de serem critério de dimensionamento em alguns métodos, são o afundamento em trilha de roda e as deformações por fadiga. De acordo com Moura (2012), essas patologias não apenas propiciam uma degradação acelerada da estrutura do pavimento, mas também reduzem consideravelmente o conforto ao rolamento, a segurança do usuário, e aumentam os custos operacionais.

O afundamento em trilha de roda (ATR) é proveniente das deformações plásticas sofridas por uma camada do pavimento ou pelo acúmulo dessas deformações devido ao fluxo e ao deslocamento permanente sob cargas repetidas de tráfego. Lima (2020) afirma que cada carga aplicada no pavimento causa uma deformação elástica. Quando elas se tornam repetitivas, a camada asfáltica pode sofrer deformações permanentes. As deformações por fadiga são frequentemente encontradas nas rodovias brasileiras e levam à formação de trincas em bloco, trincas longitudinais, fendas e até mesmo à desagregação do pavimento, resultando em deterioração estrutural.

Segundo Lima (2020), entre os fatores que contribuem para as deformações estão as variações de temperatura, a espessura inadequada da camada asfáltica, o excesso de carga, a má qualidade dos materiais empregados e a umidade. É certo que o pavimento, ao longo de sua vida útil, sofre um constante processo de degradação; no entanto, para garantir seu bom

desempenho, é imprescindível que haja um sistema de gerenciamento para realizar o acompanhamento do pavimento através de avaliações funcionais e estruturais.

Dentro desse contexto, as deformações podem ser evitadas desde a elaboração do projeto de pavimentação adequado ao tráfego esperado e a capacidade de suportar cargas repetidas, até as escolhas de materiais de alta qualidade e misturas apropriadas durante sua etapa final de execução. Atualmente são notórias as imprevisibilidades quando se trata em solucionar os problemas nas pavimentações das vias brasileiras, pois costuma-se implantar sistemas corretivos e executivos a curto prazo, levando ao comprometimento das camadas constituintes e diminuindo o seu período de vida útil (SILVA & SANTOS, 2021).

Nesse contexto, o monitoramento de trechos de estradas e rodovias desempenha um papel estratégico no contexto do planejamento, desenvolvimento e manutenção de redes viárias, possibilitando a avaliação contínua do desempenho das estruturas rodoviárias ao longo do tempo e viabilizando a implementação de medidas proativas de manutenção. Além de assegurar a qualidade, a segurança e a prolongação da vida útil do pavimento, a coleta de informações em trechos monitorados contribui para evolução das técnicas de projeto, para desenvolvimento de novos materiais e para a otimização das estratégias de preservação do pavimento.

Para desenvolver um projeto de restauração ou reabilitação de pavimento é necessário o conhecimento de suas necessidades, ou seja, identificar e avaliar o estado de conservação atual, de modo a escolher o procedimento mais adequado para restabelecer a serventia do pavimento. Conforme mencionado por Rocha (2020), tais avaliações consistem em análises das condições tanto no aspecto funcional, quanto no estrutural, sendo que esses dois modos não são mutuamente exclusivos, mas sim, complementares, indicando a capacidade do pavimento em fornecer conforto e segurança aos usuários.

Na avaliação estrutural, a capacidade de carga é determinada a partir da medição da deformação vertical através de ensaios de campo, ou seja, por meio da deflexão compreende-se as características de resistência e de deformabilidade das camadas por meio de processos de retroanálise. Esse é um método não destrutivo que pode ser realizado com diferentes tipos de equipamento. A Viga Benkelman (VB) era o equipamento mais utilizado nessas avaliações, entretanto devido a logística e ao tempo que requer para finalizar o ensaio, foi substituída em larga escala pelo *Falling Weight Deflectometer (FWD)* que se mostra mais rápido, prático e preciso. Vale ressaltar que no Brasil, em função da diferença de custo dos equipamentos, a viga ainda é bem mais utilizada pois se mostra mais acessível.

Conforme Bueno (2016), há inúmeras discussões associadas ao uso dos dois equipamentos a respeito da confiabilidade dos resultados medidos com a Viga Benkelman e a aplicabilidade das bacias deflectométricas em procedimentos de retroanálise. Magalhães (2015) informa que apesar do princípio básico destes ensaios ser o mesmo, os resultados obtidos não são necessariamente idênticos e para que se possa comparar os dados obtidos com diferentes equipamentos é necessário que se consiga obter correlações entre eles para que se possa fazer uma conversão. As correlações têm sido amplamente estudadas e ganhando destaque no meio acadêmico em diversas circunstâncias diferentes (DUARTE, SILVA E FABRÍCIO, 1996; HORAK *et al.*, 2008; GOMES, 2012; SALVIANO, 2015, BUENO, 2016; NERY, 2020). Isso tem tornando o uso de equipamentos mais comuns, como a viga Benkelman, viável para a aplicação de novas metodologias de dimensionamento que utilizam outros equipamentos. Em outras palavras, permite obter resultados equivalentes nas retroanálises ao aplicar o equipamento mais apropriado de acordo com as restrições de cada situação.

As pesquisas que buscam estabelecer correlações entre dois ou mais métodos não destrutivos (NERY, 2020; BUENO, 2016; LOPES, 2019) desempenham um papel de importância no contexto nacional. Isso ocorre porque o novo Método de Dimensionamento de Pavimentos – MeDiNa, um método mecanístico-empírico brasileiro, faz análises e dimensionamentos de reforço com base em módulos de resiliência retroanalizados, que são estimados a partir de deflexões medidas com o equipamento FWD.

O conceito de resiliência dos materiais, conforme Medina (1997), se refere à energia potencial de deformação que surge quando as tensões que causaram a deformação são aliviadas, sendo essa energia representada em um corpo elasticamente deformado. O módulo de resiliência se integra nas várias fases do ciclo de vida do pavimento, abrangendo desde a seleção criteriosa de materiais conformes às demandas climáticas e de tráfego impostas, até a caracterização da capacidade da camada asfáltica de enfrentar a fadiga decorrente de repetidos ciclos de carga.

Consequentemente, o módulo de resiliência assume uma função de importância crítica ao conferir ao pavimento a habilidade de absorver e dissipar de forma elástica a energia proveniente das solicitações do tráfego, evitando a ocorrência de deformações plásticas (permanentes). Adicionalmente, emerge como um parâmetro intrínseco às análises de pavimentos, possibilitando a projeção do desempenho estrutural em distintos contextos de

carregamento, e viabilizando a determinação das espessuras adequadas e o dimensionamento da estrutura do pavimento de acordo com as demandas predeterminadas.

O uso dos métodos mecanísticos-empíricos propiciou grande evolução e novas possibilidades aos projetistas no dimensionamento de pavimento novos e em projetos de reforço, contribuindo também na previsibilidade das deformações permanentes, da fadiga e na obtenção de módulos de resiliência com a aplicação de técnicas de retroanálise. No entanto, ainda é necessário um julgamento experiente por parte dos projetistas para determinar os módulos de resiliência.

Sendo assim, visa-se contribuir para essa discussão estabelecendo uma validação entre os parâmetros calculados no *software* MeDiNa (afundamento em trilha de roda e percentual de área de trincada) e os mesmos medidos em campo ao longo de três anos, bem como verificar a relação entre os valores de módulo de resiliência obtidos pela retroanálise mediante dois *softwares* com os obtidos *in situ* pelo método destrutivo, considerando resultados reais de dois trechos monitorados.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Realizar um estudo comparativo utilizando a retroanálise com módulos de resiliência obtidos com a viga Benkelman e módulos obtidos em laboratório pós extração de amostras.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Calcular os parâmetros da bacia de deflexão e avaliar seu comportamento (raio de curvatura (RC), índice de curvatura da superfície (SCI), índice de danos à base (BDI) e índice da curvatura da base (BCI);
- Correlacionar os módulos de resiliência obtidos nos softwares BackMeDiNa e BAKFAA com as deflexões máximas;
- Estimar a vida útil de fadiga e a deformação permanente, a partir de módulos retroanalizados com a viga Benkelman, colaborando com a consolidação no MeDiNa, comparando a evolução, ao longo dos anos, dos resultados indicados no dimensionamento e em campo.

1.2. Organização do Trabalho

Essa dissertação está organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo, a introdução, proporciona uma apresentação geral ao tema, informando a problemática em questão, definindo os objetivos gerais e específicos do trabalho, e resume o que será abordado nos demais capítulos.

No capítulo dois é apresentada a revisão bibliográfica dos principais assuntos relacionados ao desenvolvimento do trabalho, incluindo os conceitos e discussões de outros autores sobre o tema. Parte-se da argumentação da avaliação estrutural do pavimento, discutindo seus métodos de análise e os fatores que influenciam na obtenção dos resultados. Em seguida, são explorados os conceitos, a importância e o uso da retroanálise para obtenção do módulo de resiliência através de programas computacionais. Por fim, o capítulo aborda o novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil, o MeDiNa.

No capítulo três é feita a descrição da área de estudo e da metodologia adotada no desenvolvimento da pesquisa, incluindo os procedimentos experimentais e as análises estatísticas aplicadas.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos na dissertação, iniciando pela apresentação das deflexões medidas, bem como a análise estatística descritiva da mesma. Em seguida, são detalhadas as caracterizações realizadas em laboratório, seguidas dos dados obtidos na retroanálise pelo BackMeDiNa e pelo BAKFAA. Por fim, o capítulo inclui as comparações realizadas e as previsões de vida de fadiga para os trechos estudados.

No capítulo cinco, são apresentadas as conclusões da pesquisa, bem como as sugestões para pesquisas futuras.

Por fim, o trabalho é complementado com as referências bibliográficas que serviram de base para toda a pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Todas as estruturas asfálticas são projetadas para um período denominado de vida útil, durante o qual deve ser monitorado e reparado durante sua fase elástica para que não alcance a fase de fadiga antes do tempo determinado em projeto. A manutenção efetiva do pavimento é sempre posterior ao processo de verificação das condições de integridade dos materiais existentes. A avaliação estrutural, então, pode ser definida como a medida da adequação estrutural do pavimento, onde as características de resistência e deformabilidade são estudadas a partir da coleta de amostras, ensaios de laboratório e provas de carga. A partir dos dados obtidos nesta avaliação é possível diagnosticar a causa dos defeitos no pavimento, direcionando a solução necessária para mitigar a ação dos agentes causadores, a fim de garantir a vida de projeto (FONSECA, 2013).

Segundo Balbo (2007), a avaliação estrutural abrange a caracterização completa de elementos variáveis estruturais possibilitando uma descrição mais objetiva do comportamento do pavimento de acordo com as cargas do tráfego e do ambiente, possibilitando um julgamento mais preciso quanto a capacidade diante das futuras demandas de tráfego. O desempenho do pavimento depende do número de eixos padrão, condição de drenagem do pavimento, temperatura, solo presente no subleito, precipitação, etc.

Os principais tipos de deformações a que estão sujeitos os pavimentos são as deformações permanentes ou plásticas (irreversíveis) e as reversíveis, chamadas também de recuperáveis. De acordo com Borges (2001) podem ocorrer por consolidação da camada do pavimento ou do subleito devido a deficiências construtivas ou provocada pelo tráfego após a construção, pela deficiência estrutural devido a falha no dimensionamento, pelo escoamento plástico do revestimento asfáltico, pela mudança de volume dos materiais expansivos ou pelo seu rompimento por não resistir as tensões de cisalhamento.

O afundamento de trilha de roda ocorre como consequência das deformações plásticas acumuladas nas camadas que não se recuperam, especialmente no subleito das rodovias, e segundo Lopes (2019), são devidas ao deslocamento vertical causado pelo excesso de carga dos veículos, formando os afundamentos em trilha de roda que representam a contribuição da deformação todas as camadas.

Vários fatores influenciam as propriedades do pavimento flexível, o que pode servir como uma indicação de seu desempenho. Na concepção de Pai *et al.*, (2021) a manutenção do pavimento é uma medida necessária para segurança e, além de evitar o aumento de custos, pois a reabilitação do pavimento é muito cara. Para Salviatto *et al.*, (2020), a Avaliação da Condição do Pavimento (AVA), tornou-se um requisito essencial para qualquer sistema de monitoramento e gerenciamento de pavimentos.

As metodologias de avaliação estrutural de pavimentos vêm sendo empregadas no Brasil desde a década de 1960, inicialmente por meio de levantamentos deflectométricos com uso da viga Benkelman (ROCHA, 2020). Nesse tipo de ensaio os valores de deflexão são obtidos de forma não destrutiva, já que não é necessário retirar as amostras, entretanto, existem métodos destrutivos, semidestruídos e destrutivos que podem ou não funcionar de forma complementar. Atualmente, são cada vez mais usados métodos de ensaio não destrutivos em infraestruturas rodoviárias, devido ao seu fácil manuseamento e preservação da integridade das estruturas, em associação com um reduzido tempo de ensaio (MACHADO, 2012). A seguir, são apresentados os métodos mais utilizados no Brasil.

2.1.1. Métodos destrutivos

O método destrutivo envolve a determinação das características das camadas do pavimento por meio de processos manuais ou mecânicos que resultam em aberturas no pavimento. Esses métodos são chamados destrutivos porque tornam inviáveis, para testes futuros, as áreas do pavimento onde as remoções foram realizadas. Os processos mais corriqueiros são: abertura de cavas à pá e picareta; abertura de furos a trado ou concha; abertura de trincheiras transversais à pista; e extração de amostras com sondagens rotativas (BALBO, 2007). Na Figura tal, mostram-se exemplos de ensaios destrutivos para avaliação estrutural das camadas na retirada de amostras por meio da extratora rotativa (Figura 1 (a)) e pelo poço de sondagem (Figura 1 (b)).

Figura 1 - Exemplos de extração de amostras e poços de sondagem



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

Uma avaliação destrutiva, incluindo perfuração e abertura de valas, é um dos métodos mais confiáveis para avaliar as condições estruturais do pavimento em serviço. No entanto, é difícil aplicar regularmente os métodos destrutivos para um sistema de gerenciamento de pavimentos ao nível de rede devido ao alto custo e tempo em obras com aberturas de valas (YOU; YAN; LIU, 2020).

Os materiais recolhidos são ensaiados tanto *in situ* como em laboratórios certificados para a correta determinação de suas características físicas e propriedades mecânicas (GONÇALVES, 1999). De acordo com Borges (2001), as amostras são submetidas a vários estados de tensão, reproduzindo as condições de solicitação em campo, de modo a determinar o módulo resiliente do material de cada camada que compõe a estrutura. Outros parâmetros como peso específico e a umidade podem ser definidos no momento de abertura.

Os módulos resiliência determinados em laboratório são imprescindíveis para a comparação com os valores obtidos utilizando programas de retroanálise que fazem uso de ensaios não destrutivos, funcionando como uma validação dos valores de módulo encontrados.

Os métodos destrutivos, apesar de fornecerem bons resultados, de acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), possuem desvantagens associadas a necessidade de interromper o tráfego da rodovia por tempo significativo, ter a natureza destrutiva, serem caros, consumo de tempo, requerem maior quantidade de mão de obra e os resultados dos ensaios são representativos das condições do material em um ponto específico. Além disso, a retirada do núcleo é destrutiva por natureza, expondo o asfalto ao ar, à água e aos

elementos que irão deteriorar ainda mais a estrutura que está sendo inspecionada (DA SILVA; SANTOS, 2021).

2.1.2. Métodos semidestrutivos

As metodologias de natureza semidestrutiva são conduzidas por meio da utilização de dispositivos portáteis de dimensões reduzidas, resultando em aberturas menores no pavimento para a realização das inspeções. Os equipamentos utilizados nos ensaios são capazes de avaliar a capacidade de carga da camada e alguns determinam a espessura, além de ser possível obter algumas correlações, como o CBR. Metogo (2015), cita dois principais ensaios encontrados nessa categoria, o Cone de Penetração Dinâmica (CPD) e o Panda.

O Cone de Penetração Dinâmica (CPD) é constituído por uma haste de aço de 16 mm com um cone de aço de 20 mm de diâmetro e ângulo de 60° fixado na ponta. Ao ser colocado sobre a camada a ser avaliada, a penetração é executada dinamicamente por uma massa de 8 kg deslizando por uma haste de 25 mm de diâmetro, caindo de uma altura de 57,5 cm. A profundidade de penetração é medida com uma régua graduada na haste de 16 mm. São aplicados pequenos golpes preliminares para assegurar a penetração completa. Operado por dois indivíduos, um levanta o martelo e aplica os golpes enquanto o outro registra as leituras da penetração. Os resultados são anotados em uma planilha, usados para criar a curva CPD, que relaciona o número de golpes com a profundidade de penetração. A inclinação da curva CPD, representando o Índice de Penetração (DN), indica variações na resistência do solo devido a fatores como umidade e compactação.

Desenvolvido pelo Centre Universitaire des Sciences de Techniques de Clermont-Ferrant, na França, nos anos noventa, o Panda é um penetrômetro dinâmico ultraleve, conforme mencionado por Gouvés e Barjot (1995). O equipamento é composto por um martelo para aplicar golpes sequenciais em um cabeçote que está conectado a trilhos de hastes de 50 ou 100 cm de comprimento. Uma vantagem notável dos ensaios conduzidos com o Panda é sua facilidade de extração do solo após a sondagem. Isso ocorre, pois, as ponteiros permanecem no solo, minimizando o atrito durante o processo de remoção, algo que contrasta com outras abordagens, como o CPD. Adicionalmente, o Panda está equipado com um sistema de aquisição de dados que permite a transferência das informações para análises posteriores em um computador.

2.1.3. Métodos não destrutivos

Os ensaios não destrutivos desempenham uma função crucial no contexto do sistema de gestão da qualidade aplicado a construção de pavimentos. Eles habilitam a identificação precoce de falhas internas que, de outra forma, poderiam comprometer a eficácia do pavimento ou resultar em falhas estruturais após um determinado período de operação.

Dispositivos de teste não destrutivos são particularmente úteis para auxiliar o projeto de reforço estrutural, para distinguir os diferentes segmentos para efeito de projeto, em função dos valores de deflexão encontrados, para determinar causas de defeitos e verificar locais com falta de suporte ou excesso de vazios, para diferenciar os períodos críticos de deterioração do pavimento, para indicar a capacidade da estrutura suportar o tráfego atual, e, por fim, avaliação dos módulos de elasticidade por retroanálise, como indica o DNIT (2006).

Em relação as vantagens associadas ao método não destrutivo, estão a maior flexibilidade na avaliação estrutural em qualquer período de vida útil, permite que o mesmo ponto possa ser analisado e monitorado, fornecendo confiabilidade estatística aos dados adquiridos experimentalmente (BENEDETTO; TOSTI; DI DOMENICO, 2012).

Os ensaios avaliam as deflexões recuperáveis no pavimento asfáltico e podem ser executados com três tipos de equipamentos diferentes, conforme (DNIT, 2006):

- vigas de deflexão, chamada de viga Benkelman;
- equipamentos dinâmicos de vibração, Dynaflect;
- equipamentos dinâmicos de impacto, Falling Weight Deflectometer e Light Weight Deflectometer.

Nos últimos 15 a 20 anos, a viga Benkelman e o Dynaflect foram aplicados com sucesso em muitos projetos em todo o mundo (CHAG, LIN E CHEN, 2002). O deflectômetro de viga Benkelman envolve carga estática, enquanto o deflectômetro de peso em queda envolve carga dinâmica que simula o tráfego em movimento (SANJAY *et al.*, 2022). Apesar de ser uma técnica mais cara, o Falling Weight Deflectometer (FWD) é uma das técnicas não destrutivas mais utilizadas para avaliação e reforço de pavimentos flexíveis, em todo mundo, simulando realisticamente as respostas do pavimento sob carga de tráfego (CALHOON *et al.*, 2021). Medina e Motta (2015), afirmam que dois equipamentos de pequeno porte têm ganhado espaço na avaliação da condição estrutural do pavimento, o Geogauge e o *Leight Weight Deflectometer* (LWD) por serem rápidos, portáteis e de fácil aplicação.

2.1.3.1. Viga Benkelman

Conforme Rodrigues (1992), o primeiro equipamento desenvolvido para medir as deflexões foi um medidor elétrico desenvolvido pela General Electric com alto custo de instalação e grande lentidão de operação, surgindo a necessidade de criar um aparelho mais versátil. Sendo assim, em meados da década de 50, a viga Benkelman foi desenvolvida por Alvin Carton Benkelman do BPR (Bureau of Public Roads) durante os testes experimentais na estrada da Western Association of State Highway Officials (WASHO) na década de 1950, se tornando popular devido a sua simplicidade e acessibilidade. Ainda de acordo com o autor, a viga deu origem à produção de equipamentos sofisticados com o mesmo princípio de funcionamento.

No Brasil, a utilização da viga Benkelman iniciou-se, nos anos 60 com a iniciativa dos engenheiros Nestor José Aratangy em 1962 e Francisco Bolívar Lobo Carneiro em 1965 (BORGES, 2001). Salvino (2015) explica que, mesmo com as especificidades e a influência de fatores externos, ainda é o equipamento mais utilizado e difundido pelos engenheiros e projetistas nos levantamentos das deflexões para projetos de restauração e em camadas do pavimento em execução.

Atualmente, o método de ensaio para determinação das deflexões com aplicação da viga Benkelman é normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), através das normas NBR 8547 e DNER-ME 024/94.

A viga é um dispositivo simples a qual mede as deflexões, que ocorrem à superfície do pavimento, em diferentes pontos sob a ação de cargas aplicadas por rodas em movimento. É composta por duas partes principais: uma parte fixa e uma viga móvel. A parte fixa é apoiada no pavimento por meio de três pés reguláveis, enquanto a viga móvel é conectada à parte fixa por uma articulação. Uma das extremidades da viga Benkelman, chamada de ponta de prova, fica em contato com o pavimento, enquanto a outra extremidade aciona um extensômetro extremamente preciso, capaz de medir deformações em centésimos de milímetro.

O ponto de articulação divide a viga em duas partes proporcionais. Durante o ensaio, uma das pontas da viga (ponta de prova ou ponta) é posicionada exatamente no meio da distância entre as rodas do semieixo traseiro, que é simples, mas possui rodas duplas. Isso é feito no local onde se deseja medir a deflexão do pavimento. O caminhão utilizado para esse

tipo de levantamento segue um padrão específico. Suas rodas traseiras duplas possuem pneus calibrados com uma pressão de 0,55MPa (5,6kgf/cm² ou 80lb/pol²), e o eixo traseiro simples suporta uma carga de 80KN (8,2tf). Essas especificações são importantes para garantir a uniformidade dos resultados obtidos durante o ensaio com a viga Benkelman.

Após o posicionamento do caminhão, liga-se o vibrador para eliminar a inércia inicial da articulação com a viga móvel e realiza-se a leitura inicial (L_0) quando o extensômetro mostrar um valor menor ou igual a 0,01 mm/min ou após passar três minutos. Então o caminhão é deslocado para a frente até que seu peso não exerça mais influência sobre a viga, e é feita a leitura final (L_f). Utilizando a semelhança de triângulos, podemos calcular o valor do deslocamento da ponta de prova da viga, que é considerado igual à deflexão do pavimento no mesmo ponto. Esse cálculo é realizado multiplicando a diferença entre as leituras pelo valor da relação entre a articulação da viga (a) e o ponto de acionamento do extensômetro (b), como mostra a Equação 1. Geralmente, os comprimentos seguem a relação de 2:1, 3:1 e 4:1, conforme a Figura 2.

As deflexões são calculadas por meio das equações 1 e 2:

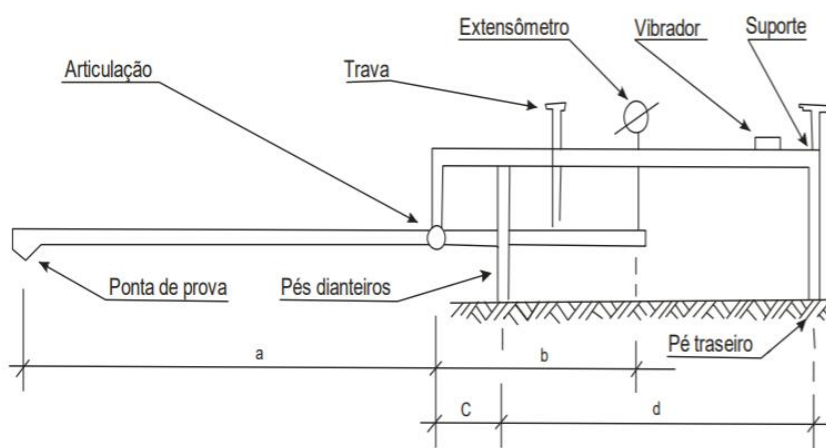
$$D_0 = (L_0 - L_f) \times a/b \quad (01)$$

$$D_n = (L_n - L_f) \times a/b \quad (02)$$

Onde:

- D_0 : deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetro;
- D_n : deflexão nos pontos correspondentes aos diversos deslocamentos do veículo;
- L_0 : leitura inicial, em centésimos de milímetro;
- L_n : leitura correspondente aos diversos deslocamentos do veículo, em centésimos de milímetro;
- L_f : leitura final, em centésimos de milímetro;
- a e b : dimensões da viga Benkelman, em centímetros.

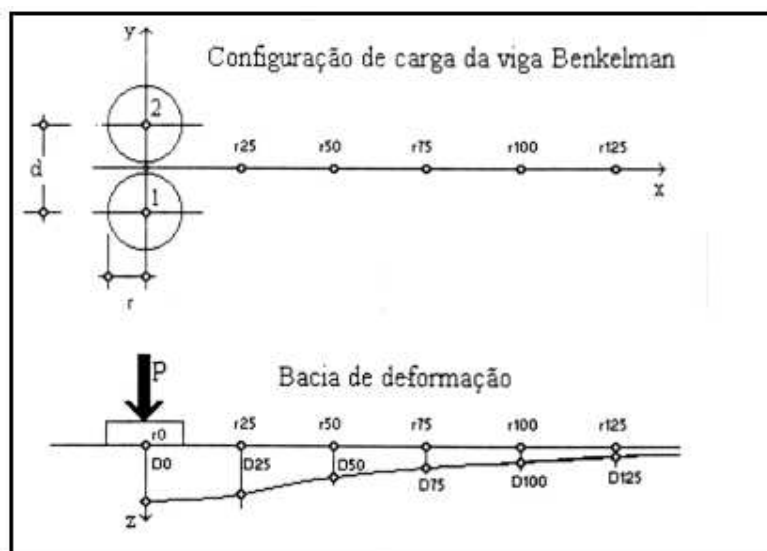
Figura 2 - Estrutura da viga Benkelman



Fonte: DNIT 133/2010 – ME (2010).

Borges (2001), explica que a viga foi projetada considerando-se que a área de influência da carga, no instante da leitura inicial não atinja nem os pés dianteiros nem a ponta de prova. A Figura 3 abaixo exemplifica os pontos de avaliação da viga, indicando que as leituras podem ser feitas à diferentes distâncias do ponto de aplicação da carga. Então, a partir da leitura em cada ponto de prova é possível determinar a bacia de deflexão e o cálculo do raio de curvatura. A bacia de deformação deve ser obtida conforme as recomendações do DNIT mediante a norma 133/2010.

Figura 3 - Configuração de carga da viga Benkelman



Fonte: Borges (2001, p.34).

O raio de curvatura (RC) da bacia representa uma parábola que passa no ponto de deflexão máxima, e, geralmente, a 25 cm do ponto inicial, sendo é calculado por meio da seguinte equação 03:

$$RC = \frac{6250}{2 \times k(L_0 - L_{25})} \quad (03)$$

Onde:

- L_0 : leitura real ou verdadeira, em centésimos de milímetro;
- L_{25} : leitura a 25 cm do ponto de prova, em centésimos de milímetro;
- k: constante da viga Benkelman.

De acordo com alguns autores (BORGES, 2001; MEDINA e MOTTA, 2015; LOPES, 2019; ROCHA FILHO E RODRIGUES, 1996), as dificuldades em trabalhar com a viga Benkelman são:

- a) Imprecisão nas medidas de deflexão em um elevado número de pontos;
- b) Dificuldade em determinar a curvatura e o tamanho da bacia de deflexão;
- c) Impossibilidade de assegurar que as bases de apoio da viga estejam fora da bacia de deflexão;
- d) O sensor mede a deflexão estacionária;
- e) A habilidade da equipe, o nível de experiência, as condições mecânicas do veículo e coordenação das pessoas responsáveis pela leitura afetam a precisão dos resultados;
- f) Vibrações decorrentes do tráfego.

Além disso, Borges (2001) cita que as principais vantagens são: a facilidade de operação; a necessidade de mão de obra pouco qualificada; e o baixo custo do ensaio. De acordo com Rocha (2020) e Vellasco (2018), mesmo com as restrições, o uso da viga Benkelman cumpre um papel importante no sistema rodoviário, conseguindo representar um considerável grau de confiabilidade da deformação do pavimento, se consolidando como uma solução acessível em projetos de avaliação estrutural de pavimentos.

2.1.3.2. *Falling Weight Deflectometer (FWD)*

O *Falling Weight Deflectometer (FWD)*, diferencia-se por ser um equipamento de impacto, que permite aplicar uma carga na superfície do pavimento, através de uma placa circular num ponto, e as deflexões em vários outros locais da carga são registradas por sensores colocados a distâncias previamente definidas. A carga aplicada simula o efeito da passagem de uma roda em movimento sobre a estrutura.

O procedimento a ser adotado para determinação das deflexões utilizando o deflectômetro de impacto, tipo FWD, é normalizado pelo DNER-PRO 273/96. O equipamento é instalado em um reboque tracionado por veículo, com placa de carga e barra de suporte dos sensores. O conjunto dos pesos e altura varia conforme especificado em projeto. A execução do ensaio é feita de forma automática e sem interferência de colaboradores, pois o operador, através do computador, consegue programar os parâmetros utilizados para realização do ensaio, fazer a locação do ponto inicial de coleta e a distância entre as estações, de modo que os resultados são computados e impressos.

As deflexões são obtidas com 7 ou 9 transdutores de velocidade, sendo um sob o centro da placa e os outros em posições variáveis, em uma barra levadiça de até 4,5 metros (ROCHA, 2020). Segundo Rocha Filho e Rodrigues (1996), a escolha mais acertada para o posicionamento dos sensores deve ser função da rigidez e das espessuras das camadas do pavimento que será avaliado, visto que pode influenciar os resultados obtidos na retroanálise para os módulos de elasticidade dos materiais.

Quanto as vantagens em utilizar esse equipamento, Medina *et al.*, (1994) e Bernucci *et al.* (2022) destacam:

- a) a precisão nas medidas;
- b) o registro automático e medição das temperaturas do ar, da superfície do pavimento e da distância percorrida;
- c) a redução de ensaios destrutivos complementares, a determinação dos módulos de elasticidade das camadas através da retroanálise das bacias de deflexão;
- d) a rapidez com que se pode variar a carga aplicada;
- e) e o número mínimo de operadores envolvidos no ensaio.

Os autores citam também algumas limitações relacionadas ao FWD, como:

- a) a presença de uma camada rígida na estrutura pode afetar a bacia de deformação e dificultar processos de retroanálise;
- b) a presença de nível d'água ou solo saturado mascaram os resultados;
- c) a aceleração de carga é maior do que uma roda em movimento;
- d) o equipamento tem um custo maior em relação aos outros;
- e) e, a necessidade de ter um operador especializado.

2.1.3.3. *Light Weight Deflectometer (LWD)*

O LWD é um deflectômetro de impacto para cargas baixas que apresenta características para ser usado pontualmente em levantamentos durante a construção das camadas ou após (MEDINA E MOTTA, 2015). Conforme, Ayyanchira (2014) e Commuri *et al.* (2012), os LWDs, também conhecidos como deflectômetros portáteis, são dispositivos empregados para medir o módulo de deformabilidade dinâmica do solo *in situ*, utilizando o princípio do teste de placa de carga dinâmica. Esses equipamentos desempenham um papel crucial na avaliação das propriedades mecânicas dos pavimentos, auxiliando tanto no processo de projeto quanto na construção. Além disso, são úteis no controle de qualidade das camadas compactadas e na avaliação da capacidade de carga do solo, por meio de correlações.

O equipamento é composto por uma placa de carga circular, um peso suspenso liberado em queda livre sobre a placa, sensores de deflexão para medir o movimento vertical da placa e um display e sistema de registro de dados (célula de carga) para mostrar os resultados em tempo real. A placa circular possui 300 mm de diâmetro e um peso de 15 kg, o valor máximo da força de impacto é medido na célula de carga de alta precisão e as deflexões são medidos com os três sensores que se posicionam em diferentes pontos em relação ao centro da placa. A Figura 4, ilustra a visão esquemática do equipamento com seus componentes.

Figura 4 - Execução do ensaio com Light Weight Deflectometer (LWD)



Fonte: Rodrigues (2017).

Em qualquer tipo de configuração, durante o ensaio, a deflexão é lida no centro da placa de carga e usada para calcular o módulo de elasticidade ou resiliência da camada em estudo. A expressão utilizada para o cálculo do módulo da camada é a de Boussinesq com base na Teoria da Elasticidade (REIS e GUIMARÃES, 2012), expressa pela Equação 04:

$$(E_{VD}) = \frac{F(1 - \nu^2)\sigma R}{Df} \quad (04)$$

Onde:

- F :fator variável, $F=2$ para distribuição uniforme, $F=\pi/2$ para placa rígida, $F=8/3$ para solo granular e $F=4/3$ para solo coesivo;
- ν : coeficiente de Poisson;
- σ : tensão aplicada (kPa);
- R : raio do prato de carga (mm);
- Df : deflexão (μm);
- E_{VD} : Módulo de elasticidade ou de resiliência (MPa).

O ensaio é realizado por impacto em cada ponto selecionado para avaliação, repetido três vezes, e o valor de módulo é a média dos três carregamentos. De acordo com a recomendação de Ferri (2013), é aconselhável realizar quatro ensaios consecutivos com o LWD em um mesmo ponto, descartando-se a primeira leitura devido ao efeito de assentamento do prato de carga no local ensaiado.

No Brasil, ainda não se tem norma para esse equipamento, entretanto a norma ASTM E 2583-07 (2011) descreve os procedimentos de aplicação no ensaio e os cálculos necessários. Borges (2016) indica que, os deflectômetros de impacto possuem vantagens significativas em comparação com o ensaio de carga estática com placa. Notavelmente, eles oferecem rapidez e facilidade de execução, especialmente em termos dos recursos mobilizados. Isso possibilita a realização de um grande número de ensaios com custos reduzidos e permite um tratamento estatístico dos resultados obtidos. O equipamento pode incluir GPS, o qual permite identificar o ponto de realização de cada ensaio (SANTOS, 2014).

O LWD surgiu como alternativa ao equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) convencional, especialmente em situações onde se possam encontrar dificuldades de acesso aos pontos de ensaio, como em estradas ainda em construção (RODRIGUES *et al.*, 2020). Machado (2012), comenta que uma das desvantagens do equipamento é o valor máximo de carga aplicável que não ultrapassa 20 kN.

Estudos realizados por Burhani (2016), Nazzal *et al.*, (2017), Horak *et al.*, (2008) e Nery (2020) vêm demonstrando que há relações entre medidas de deflexões do LWD com o FWD, apontando que existe um potencial do equipamento na avaliação estrutural das camadas de pavimento constituídas por diferentes materiais, como aponta a Tabela 1.

Tabela 1 - Algumas correlações obtidas do LWD com diferentes equipamentos

Ramo	Material	Deflexão	Autor
800	Subleito	$D_{FWD} = 3,59 D_{LWD}$	Preussler (2007)
200 A	Subleito + BGS	$D_{FWD} = 3,59 D_{LWD}$	Preussler (2007)
1000 A	Subleito + Rachão	$D_{FWD} = 3,59 D_{LWD}$	Preussler (2007)
-	Areia tratada com emulsão	$D_{FWD} = 0,3617 (D_{LWD})^{0,9831}$	Horak <i>et al.</i> (2008)
-	Revestimento asfáltico	$D_{VB} = 0,5757 D_{LWD} + 7,0855$	Rodrigues (2018)

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

2.1.3.4. Interpretação dos dados de deflexão

As bacias de deflexão são usadas principalmente para avaliar a capacidade estrutural de pavimentos flexíveis. Os dados coletados são cuidadosamente analisados para determinar a capacidade de carga do pavimento, identificar áreas com problemas estruturais e fornecer informações relevantes para decisões relacionadas à manutenção, reforço ou reconstrução do pavimento.

Franco *et al.* (2019) e Preussler (2010), comentam que a resiliência da estrutura é indicada pelo aumento da deflexão máxima, o que, por sua vez, implica em um maior comprometimento estrutural. No entanto, é fundamental notar que diferentes estruturas podem apresentar a mesma deflexão máxima, porém com diferentes configurações na curva da bacia de deflexão. Portanto, na avaliação estrutural do pavimento, deve ser levado em consideração a forma da bacia de deflexão, a fim de realizar uma análise precisa do estado da estrutura.

De acordo com Rodrigues (1992), a forma das bacias de deformação depende do carregamento que é imposto, das características estruturais do pavimento e da metodologia adotada, ou seja, durante o carregamento a zona submetida aos esforços se alarga em função das características das camadas. O autor ainda afirma que as deformações afastadas do ponto de carregamento dependem das características do subleito e as intermediárias das demais camadas como a base e sub-base. Conforme Murillo e Bejarano (2013), quando uma carga é aplicada na superfície do pavimento, todas as camadas também são fletidas, desenvolvendo tensões e deformações em cada camada. A partir da Figura 5, percebe-se que a combinação da

deflexão máxima (D_0) e da largura da bacia (L_0) permitem a avaliação de importantes características estruturais do pavimento e do subleito.

Figura 5 - Características da bacia de deflexão

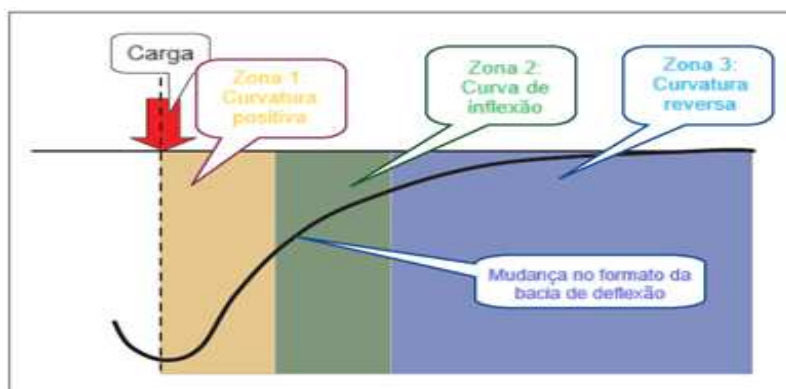
TIPO I	Type	Do	Lo	Avaliação
	I	Baixa	Alta	Subleito bom / Pavimento bom
	II	Alta	Alta	Subleito fraco / Pavimento bom
	III	Baixa	Baixa	Subleito bom / Pavimento fraco
	IV	Alta	Baixa	Subleito fraco / Pavimento fraco

Fonte: Adaptado de Murillo e Bejarano (2013).

A interpretação dos dados de deflexão possibilita a compreensão das condições do pavimento. De modo que quanto maior a deflexão, maior a indicação de enfraquecimento na camada do pavimento. Corroborando com a imagem citada anteriormente, locais com deflexões mais altas podem indicar áreas de falha, como trincas, painelas ou problemas no subleito do pavimento.

Horak (2008), mostra que a bacia de deflexão pode ser dividida em três zonas distintas com características particulares. A zona 1, que fica mais próxima ao ponto de carga, tem uma curvatura positiva e fica dentro de um raio inferior a 300 mm do ponto de aplicação de carga. Na zona 2, compreendida entre 300 a 600 mm da carga, a curvatura da bacia de deflexão muda e se torna reversa, sendo referida como uma zona de inflexão, entretanto depende da composição estrutural do pavimento. Por fim, a zona 3 está mais distante da aplicação da carga e dependerá da espessura do pavimento e da camada de subleito. A Figura 6 abaixo indica a representação das zonas.

Figura 6 - Zonas da bacia deflectométrica



Fonte: Adaptado de Horak (2008).

Portanto, a partir da bacia de deformação pode-se determinar parâmetros e índices de curvatura importantes para compreensão do comportamento da estrutura, além de ser o dado de entrada principal na retroanálise das camadas do pavimento. Ferri (2013), fez uma representação gráfica em sua pesquisa mostrando que cada índice de curvatura está associado a uma deflexão medida em distâncias específicas, como pode ser visto na Figura 7.

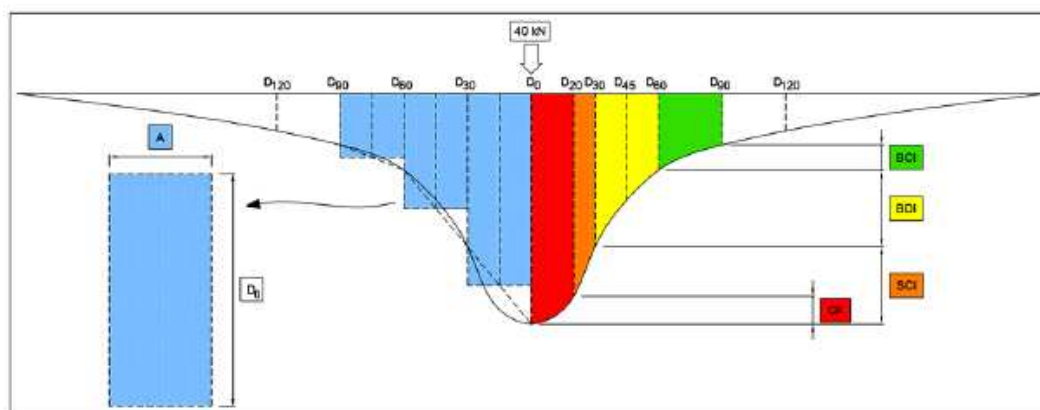
O fator de curvatura (CF) e o Índice de Curvatura da Superfície (SCI) são os melhores parâmetros para estimar a probabilidade de fissuração, sendo indicadores da camada asfáltica e estão associados a zona 1. Já o Índice de Danos à Base (BDI), relacionado a zona 2, é bom indicador da condição da base, e, por fim, o Índice Curvatura da Base (BCI) é bom indicador da condição de subleito, relacionado a zona 3. Os parâmetros podem ser calculados da seguinte forma (ZHENG; ZHANG; LIU, 2019):

- Índice de Curvatura da Superfície (SCI): é o parâmetro mais suscetível às variações de temperatura, obtido pela diferença entre as deflexões D_0 e D_{30} ;

- Índice de Danos à Base (BDI): é o parâmetro obtido pela diferença entre as deflexões D_{30} e D_{60} ;

- Índice de Curvatura da Base (BCI): é o parâmetro obtido pela diferença entre as deflexões D_{60} e D_{90} .

Figura 7 - Representação gráfica da bacia deflectométrica



Fonte: Ferri (2013).

Além desses índices há dois parâmetros na literatura que são determinados e de muita relevância para avaliação estrutural, o raio de curvatura (RC) e a Deflexão Recuperável Máxima (D_0). Como são de interesse nessa pesquisa, serão detalhados a seguir.

- Raio de curvatura (RC): é o parâmetro mais difundido, sendo indicativo da deformada na sua porção mais crítica, geralmente a 25 cm do centro da carga. O

raio indica a situação da capacidade da estrutura em distribuir os esforços solicitantes. Para realizar o cálculo e determinar o raio, a expressão utilizada é a mesma definida no item 2.1.2.1, sendo preconizada pela norma DNER-ME 024/94.

- Deflexão Recuperável Máxima (D_0): é a medida no ponto de aplicação da carga, que reflete o comportamento estrutural das camadas em relação à fadiga e a fissura das camadas asfálticas, de modo que quanto maior o valor, mais elástica é a estrutura e maior o comprometimento estrutural.

Horak (2008), exibiu a classificação de pavimentos com base granular e base cimentada em função dos valores dos parâmetros das bacias deflectométricas, como pode ser visualizado nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Critérios de classificação da condição do pavimento conforme os parâmetros para base granular

Estado do pavimento	D_0 (0,01 mm)	R (m)	SCI (0,01 mm)	BDI (0,01 mm)	BCI (0,01 mm)
Seguro	< 50	> 100	< 20	< 10	< 5
Em alarme	50 – 75	50 – 100	20 – 40	10 – 20	5 – 10
Severo	> 75	< 50	> 40	> 20	> 10

Fonte: Adaptado de Horak (2008).

Tabela 3 - Critérios de classificação da condição do pavimento conforme os parâmetros para base cimentada

Estado do pavimento	D_0 (0,01 mm)	R (m)	SCI (0,01 mm)	BDI (0,01 mm)	BCI (0,01 mm)
Seguro	< 20	> 15	< 10	< 5	< 4
Em alarme	20 – 40	8 – 15	10 – 30	5 – 10	4 – 8
Severo	> 40	< 8	> 30	> 10	> 8

Fonte: Adaptado de Horak (2008).

2.1.3.5. Correlações entre medidas de deflexão

A primeira geração de equipamentos de detecção de deflexão de pavimento introduzida no Brasil, foi a viga Benkelman, pelo qual um único pico de deflexão pode ser obtido, mas sua precisão de detecção é altamente dependente do operador. Posteriormente, devido a busca por

maior acurácia, produtividade e procedimentos mais simples e práticos, o uso do FWD passou a ganhar mais espaço na avaliação das deflexões.

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), desenvolveu métodos de projeto de restauração (DNER PRO-10/79, PRO-11/79 e PRO-159/85) que utilizam as deflexões medidas com a viga Benkelman para obter a melhor forma de conservar as rodovias. Porém, com o crescente uso de outros equipamentos, houve a necessidade de estabelecer correlações entre as medidas de deflexão obtidas por diferentes equipamentos para validar o emprego dos mesmos nos métodos de restauração.

Como as deflexões do pavimento medidas com os diferentes dispositivos refletem diferentes condições de carga (estática em comparação a dinâmica) e de duração, as mesmas obtidas por vários equipamentos não podem ser universalmente substituídas umas pelas outras. No entanto, às vezes há a necessidade de converter as deflexões de um dispositivo em deflexões obtidas de outros, pois os dados podem ser analisados de várias maneiras para fornecer informações detalhadas sobre um pavimento específico. (PANDOLFO; ECHEVERRIA; SPECHT, 2016).

O uso mais comum dos dados de deflexão é no processo de retroanálise através do qual as propriedades fundamentais de engenharia da estrutura do pavimento, como os valores de módulo resiliência das camadas, são determinadas. Uma suposição subjacente no processo da retroanálise é que existe um conjunto de valores de módulo de camada que produz as deflexões medidas sob a carga aplicada. É importante notar, no entanto, que a solução pode não ser única (CASTRO *et al.*, 2019).

O DNIT (2006), explica que as correlações entre as deflexões obtidas pela viga Benkelman e pelo FWD são dependentes de diversos fatores, dessa forma, não existem correlações de aplicação generalizada, porém, geralmente, as deflexões com a viga e os respectivos desvios padrões se mostram valores superiores ao obtidos pelo FWD. Assim, os projetistas devem estabelecer suas próprias correlações com base em pesquisas locais. Fleming, Frost e Lambert (2007), em sua pesquisa, afirmaram que as correlações entre as medidas de deflexão de diferentes equipamentos dependem do tipo de material e das espessuras das camadas do pavimento.

Davies (1997) e Livneh *et al.*, (1997) desenvolveram uma correlação entre o FWD e as deflexões medidas pela viga Benkelman nas camadas superficiais do pavimento, mas não conseguiram resultados bons, produzindo correlações ruins. Já Guzzarlapudi *et al.*, (2016)

realizou um estudo comparativo entre os módulos retroanalizados com a viga e com o Light Weight Deflectometer (LWD) e as análises indicaram uma boa correlação com valores de R^2 que variam entre 0,75 e 0,91.

Nery (2020) obteve modelos de regressão significativos ao comparar viga Benkelman e FWD, assim como LWD e FWD. A comparação LWD *versus* FWD apresentaram valores para o coeficiente de correlação Pearson (r) que demonstraram possui uma correlação fraca ou ínfima, demonstrando incerteza sobre a tendência de comportamento entre os dois equipamentos, não havendo consistência entre os resultados obtidos. Já a análise estatística da viga Benkelman *versus* FWD, mostrou melhores resultados, apresentando correlações moderadas. A autora sintetizou um único modelo com todos os dados de deflexão, mas obteve uma correlação fraca de R^2 igual a 0,36, porém na análise estatística foi verificado um valor de significância que valida as Equação 05 indicada abaixo.

$$D_{FWD} = 0,6615D_{VB} + 18,813 \quad (05)$$

Preussler (2007) conduziu ensaios utilizando os equipamentos LWD e FWD (modelo Dynatest) durante as obras de pavimentação no trevo da Rodovia SP-330 (Anhanguera), localizado no quilômetro 62. Os testes foram executados em diversas camadas, incluindo a camada de base em brita graduada simples (BGS) com espessura de 15 cm, as camadas de sub-base dos tipos BGTC com 18 cm e rachão com 25 cm, bem como no material selecionado do subleito. As deflexões máximas no ponto central de aplicação de carga (D0) exibiram as relações indicadas no Quadro 1 para ambos os equipamentos FWD e LWD.

Quadro 1 - Regressões obtidas por Preussler (2007)

SP-330 (Anhanguera)		
Ramo	Correlações obtidas	Material
800	$D_{FWD} = 3,59D_{LWD}$	Subleito
200 A	$D_{FWD} = 3,41D_{LWD}$	Subleito + BGS
800 A	$D_{FWD} = 3,48D_{LWD}$	Subleito + Rachão
1000 B	$D_{FWD} = 6,74D_{LWD}$	Subleito + BGTC
200 B	$D_{FWD} = 3,04D_{LWD}$	Subleito + BGS + BGTC

Fonte: Adaptado de Preussler (2007).

Conforme observado por Bueno (2016), a utilização dos dados obtidos pelo Falling Weight Deflectometer (FWD) é recomendável mesmo ao se buscar estabelecer correlações entre diferentes equipamentos. Isso ocorre devido à capacidade dos dados do FWD de possibilitar a criação de projetos de reforço de pavimentos mais sofisticados. Essa capacidade

é viabilizada através da aplicação de abordagens mecanicistas-empíricas, as quais têm ganhado destaque na atualidade, como exemplificado pelo software MeDiNa. O uso desses dados oferece um maior nível de refinamento nos projetos de reforço, resultando em soluções mais precisas e eficazes para a manutenção e melhoria de pavimentos.

2.1.4. Fatores que influenciam nas medidas deflectométricas

Vários fatores afetam a magnitude das deflexões medidas no pavimento, o que pode dificultar a interpretação dos resultados da deflexão. Os principais fatores que afetam as deflexões do pavimento incluem a estrutura do pavimento (tipo e espessura), a magnitude da carga e tipos de carga e o clima (temperatura e efeitos sazonais). (SANJAY *et al.*, 2021).

Medina e Motta (2015), afirmam que as variações diárias e sazonais da temperatura influenciam na rigidez dos revestimentos asfálticos, indicando que há relação entre a deformabilidade pavimento e as mudanças de temperatura e umidade. Como esses períodos variam ao longo do ano, o valor da deflexão medida no pavimento não será constante, sendo dependente do período em que forem realizados os levantamentos (SOUZA JÚNIOR, 2018).

Fato este é justificado, uma vez que, nos programas de retroanálise, o coeficiente de correção de temperatura está relacionado com a temperatura da superfície do pavimento e do ar e com a espessura da camada asfáltica. Quanto maior for a umidade nessas camadas, menor será o módulo de resiliência dos materiais, uma vez que tal relação é inversamente proporcional (BUENO, 2016).

Conforme destacado por Rocha Filho (1996), o efeito da temperatura é particularmente evidente no que se refere à deflexão máxima. Isso ocorre porque a camada betuminosa é a mais suscetível aos efeitos térmicos, devido às suas propriedades de alta absorção da radiação solar, baixa condutividade térmica e comportamento reológico específico, como revelado em estudos conduzidos na COPPE/UFRJ em 1986. No momento em que o pavimento se encontra em temperaturas mais baixas, o ligante betuminoso se torna mais viscoso e o revestimento mais rígido, e em consequência, aumenta a capacidade de distribuição de tensões das cargas do tráfego para as camadas inferiores do pavimento (ROCHA FILHO e RODRIGUES, 1996).

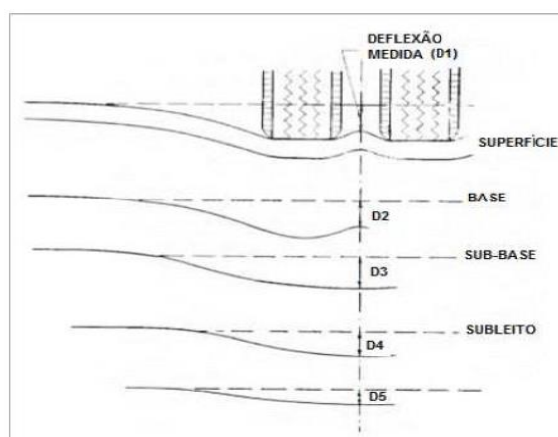
Bueno (2016), em sua pesquisa, trabalhou a retroanálise de bacias deflectométricas corrigidas em função da temperatura referência e com os valores de campo, concluindo que a forma mais adequada para obter os valores de rigidez sem compensações é retroanalisar sem nenhum ajuste quando estas se encontrarem próximas a temperatura referência de 25°C.

Um dos fatores mais óbvios que afetam as deflexões do pavimento é a magnitude da carga aplicada. A maioria dos equipamentos de deflexão modernos pode impor diferentes níveis de carga e é importante direcionar os níveis de carga apropriados para cada aplicação. O tipo de carregamento também pode afetar a deflexão do pavimento – uma condição de carregamento lento e estático produz uma resposta diferente de uma condição de carregamento rápido e dinâmico. Em geral, quanto mais rápido o carregamento, menor o pulso de carga e menores as deflexões (RODRIGUES; DOS SANTOS; ODEBRECHT, 2020).

A baixa velocidade de aplicação da carga influencia na resposta viscoelástica da camada asfáltica, já que os materiais empregados não apresentam comportamento linear, distorcendo os valores medidos em campo em dias de altas temperaturas (ULLIDTZ, 1987). Chang *et al.*, (1992), afirmou que o efeito da não linearidade pode subestimar as tensões em até 50%. O comportamento não-linear da maioria dos materiais utilizados em pavimentação resulta também em valores distorcidos das deflexões de campo, sendo que a não proporcionalidade entre carga e deformações podem conduzir erros significativos (ROCHA, 2020).

Outro fator que influencia diretamente no valor da deflexão é o ponto de ocorrência da deflexão máxima com a viga Benkelman. Conforme Rocha (2020), em alguns casos a deflexão medida com a ponta de prova posicionada entre as rodas duplas do eixo traseiro do caminhão não representa necessariamente o ponto de maior deformação na camada do pavimento. Então, a curvatura é mais pronunciada na área diretamente sob a aplicação da carga, o que pode resultar em uma deflexão aparentemente mais baixa quando medida no ponto médio entre as rodas. Abaixo, na Figura 8, pode-se analisar os perfis típicos de deflexão para cada camada do pavimento, onde as camadas mais profundas apresentam o valor máximo de deflexão na área de aplicação da carga.

Figura 8 - Perfil de deflexão das camadas durante o ensaio de viga Benkelman



Fonte: Walker e Yoder (1961) apud Rocha (2020).

A presença de camada rígida ou semirrígida durante o levantamento deflectométrico tem uma alta influencia na obtenção das deflexões, o que acontece em um dos trechos estudados nesta pesquisa. A camada rígida é aquela com elevada rigidez em relação às outras que acaba absorvendo a maioria das tensões provenientes do carregamento aplicado, contribuindo com o mínimo nas deflexões medidas. De acordo com Hora (2007), a influência dessa camada é significativa, uma vez que afeta tanto o desempenho dos pavimentos quanto as medições de deflexão. Quando a presença dessa camada não é adequadamente considerada nos softwares de retroanálise, isso pode levar a estimativas incorretas, que podem ser excessivamente elevadas ou baixas, em relação aos módulos de resiliência reais. Isso acontece porque a camada tem um papel crítico no comportamento estrutural do pavimento, e seu impacto precisa ser levado em conta para garantir resultados de análise mais precisos.

2.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Sabe-se que a interação estrutural entre as camadas que compõem um pavimento se comporta de acordo com o tipo de material empregado e com as cargas aplicadas pelas rodas dos veículos. Balbo (2007), cita que as cargas do tráfego causam solicitações de compressão vertical, flexão, confinamento e cisalhamento.

O autor explica que a compressão vertical causa o afastamento entre as partículas do material, gerando tração/compressão nas zonas de contato, levando a formação de microfissuras, que se tornam fissuras e, por fim, acarretam o material ao estado de fadiga. Da mesma forma, em materiais em que os esforços de cisalhamento são significativos, o material transfere as deformações do ponto vizinho por meio de forças cisalhantes gerando um acúmulo de deformações plásticas que causam as trilhas de roda na camada de rolamento.

A consideração da relação entre a carga aplicada sobre a estrutura e seus efeitos na deformação, assim como a geração de tensões nas diversas camadas dos pavimentos, é essencial. Isso se justifica pelo fato de que a estrutura é constituída por múltiplas camadas sobrepostas, as quais respondem de maneira interdependente às solicitações impostas pelos veículos.

As constantes elásticas (parâmetros) empregadas habitualmente e mais pesquisadas para a formalização de análises de sistemas de camadas são o módulo de resiliência dos materiais de pavimentação, bem como seus respectivos coeficientes de Poisson (Balbo 2007). O módulo de resiliência é um parâmetro fundamental para elaboração de um bom projeto de pavimentação,

já que é utilizado nos métodos de dimensionamento mecanístico-empírico, estando diretamente associado com o fenômeno de fadiga do revestimento asfáltico e com as deformações permanentes de todas as camadas.

De acordo com Medina (1997), o termo resiliência foi empregado com o objetivo de diferenciar as deformações ocorridas nos pavimentos, e Francis Hveem nomeou de deformação resiliente por serem muito maiores do que as ocorridas em outros materiais. É um parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais, como solos e britas, sob carregamento repetido, em laboratório, ou pelas ações das cargas dos veículos, repetidas sobre o pavimento (NORBACK, 2018).

O módulo resiliente dos materiais podem ser determinados através de ensaios em laboratório ou em campo por meio da retroanálise (interpretações de deflexões medidas em provas de carga). Segundo o DNIT (2006), pode-se conceituar “módulo de resiliência” de um material como a relação entre a tensão vertical aplicada repetidamente (σ) e a deformação axial recuperável que lhe corresponde (ε), após um determinado número de aplicações da carga, definido pela Equação 06:

$$M_r = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (06)$$

Onde:

- M_r : módulo de resiliência (Mpa);
- σ : tensão aplicada (MPa);
- ε : deformação axial recuperável ou elástica (mm/mm).

Em laboratório, a seleção do ensaio apropriado para determinar o módulo de resiliência depende da natureza do material em análise. Ensaio triaxiais dinâmicos são preferencialmente aplicados em materiais granulares, como solos, britas graduadas, misturas solo-agregado, entre outros. Por outro lado, o módulo de resiliência de misturas asfálticas é determinado utilizando o equipamento de compressão diametral de carga repetida.

Dessa maneira, pode-se prever o desempenho dos pavimentos considerando as características do comportamento tensão-deformação dos materiais que constituem as camadas, juntamente com a frequência, intensidade de tráfego e condições ambientais regionais a partir da análise de tensões e deformações de estruturas de pavimentos, considerando um sistema de multicamadas.

Autores como Cunto (1998), Mello (2019), Ponte *et al.*, (2014), realizaram estudos sobre o comportamento do módulo de resiliência de materiais asfálticos e dos solos, levando em consideração as características dos materiais, as condições de tráfego e as variações climáticas. Como dito, o módulo de resiliência desempenha um papel crucial na avaliação, projeto e análise de pavimentos, fornecendo informações valiosas sobre a capacidade do material em resistir às cargas repetidas, melhorando a durabilidade e o desempenho.

No Brasil, inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas na busca por encontrar valores típicos de módulos de resiliência. Costa *et al.* (2023), a partir de Redes Neurais Artificiais (RNA), buscaram prever o módulo de resiliência de solos melhorados com cimento a partir da caracterização física e obtiveram altos valores de R^2 acima de 0,99, indicando o grande potencial na utilização de RNA para predição do comportamento resiliente de solos.

Essas contribuições servem, por exemplo, quando deseja-se fazer uma avaliação estrutural através da retroanálise e não conhece o valor de MR inicial devido à alguma impossibilidade, então, o material apresentando características parecidas, aplica-se os dados para uma possível avaliação, visto que é de responsabilidade e experiência do engenheiro o uso desses valores.

Monismith *et al.* (1975) foi um dos primeiros estudiosos a avaliar a contribuição do subleito para a deformação permanente no pavimento através da análise elástica, baseando-se nas relações entre deformação permanente, tensão aplicada e número de aplicações de tensão com ase no ensaio triaxial de carga repetida. Diversos autores (SVENSON, 1980; PARKER JR, 1991; LEKARP *et al.*, 2000; MOTTA E MEDINA, 2006; MACÊDO, 1996; RAMOS, 2003) desenvolveram modelos que permitem calcular os módulos de resiliência em função do estado de tensões para materiais granulares e solos coesivos visando facilitar entender o comportamento dos mesmos. Portanto, o módulo de resiliência desempenha um papel crucial na avaliação, projeto e análise de pavimentos, fornecendo informações valiosas sobre a capacidade do material em resistir às cargas repetidas e melhorando a durabilidade e desempenho dos pavimentos.

2.2.1. Valores típicos de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson

Os valores típicos do módulo de resiliência podem variar de acordo com o tipo de material e as condições específicas do pavimento. Magalhães (2015), indica que as características mecânicas mais importantes para o dimensionamento são o módulo de resiliência

e o coeficiente de Poisson, entretanto, o último não tem muita influência no comportamento estrutural do pavimento e podem ser fixados valores típicos. Na Tabela 4, são indicados alguns valores típicos.

Tabela 4 - Valores típicos de módulos de resiliência e coeficientes de Poisson, utilizados em pavimentos rodoviários

Tipo de material	Módulo de resiliência (MR – Mpa)
Misturas Betuminosas	3000 – 5000
Materiais Granulares	50 – 1500
Solos	5 – 300
Concreto de Cimento Portland	30000 – 70000
Materiais tratados com cimentos	1000 – 40000

Fonte: Adaptado de Alves, 2007, apud Antunes, 1993.

Balbo (2007), em sua obra, traz inúmeras pesquisas que foram realizadas em diversos estados brasileiros com a finalidade de fazer a caracterização de solos, de misturas asfálticas e de outros materiais. Abaixo, na Tabela 5 é possível observar que a constituição do material influencia diretamente no módulo resiliência, como no caso dos solos em que a mudança de MR é significativa. Além disso, os resultados de Franzoi (1990) e Alvarez Neto (1998) quanto aos solos A-2-4 (HBR) e LA' (MCT) são parecidos para solos de diferentes regiões, mas com a mesma classificação, indicando um possível valor típico de MR.

Tabela 5 - Valores de módulo de resiliência para materiais granulares

Tipo de material	Módulo de resiliência (MPa)	Autor
Areia siltosa (A-2-4)	150	Franzoi (1990)
Areia (A-1-b)	45	Franzoi (1990)
Subleito MCT (LA')	120 – 170	Alvarez Neto (1998)
Base MCT (NA')	130 – 240	Alvarez Neto (1998)
BGTC	20.190 – 23.233	Balbo (1993)
BGTC (retroanálise)	≥15.000	Balbo (1993)
CAUQ (faixa B-DNER)	2.700 – 3.800	Preussler (1983)
CAUQ (faixa C-DNER)	3.800 – 4.300	Preussler (1983)
CAUQ (50/60)	4.100	Pinto (1991)

Fonte: Adaptado de Balbo, 2007.

A Instrução de Projeto DER/SP (2006), indica vários parâmetros recomendados a serem usados na análise mecanicista relativos à capacidade de suporte dos solos do subleito e do tráfego previsto, como essa pesquisa não engloba uma lista vasta de materiais, na Tabela 6 apresenta-se os principais e suas variações.

Tabela 6 - Valores usuais de módulo de resiliência

Material	Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)
Concretos Asfálticos:	
- revestimento (CAP 50-70)	2.000 – 5.000
- binder (CAP 50-70)	2.000 – 3.000
Materiais estabilizados quimicamente:	
- brita graduada tratada com cimento	7.000 – 18.000
Concreto de cimento <i>Portland</i>	30.000 – 35.000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito	
- solos de comportamento laterítico LA, LA', LG'	100 – 200
- solos de comportamento não laterítico	25 – 75
Concreto de cimento <i>Portland</i>	28.000 – 45.000

Fonte: DER/SP, 2007.

Rocha *et al.*, (2022) estudaram como a variabilidade dos módulos de resiliência obtidos por processos de retroanálise são afetados a partir da escolha inicial dos módulos de resiliência semente como dados de entrada. Notaram que ao variar 100% o MR semente de uma das camadas, as diferenças percentuais se estabeleceram dentro dos valores típicos para materiais de pavimentação usuais no Brasil. Além disso, em posse dos dados obtidos da retroanálise, estes foram inseridos MeDiNa para avaliar a influência da variabilidade dos MR sementes no dimensionamento e verificou-se diferenças percentuais de até 68,30% na espessura para camadas de base e sub-base, porém os MR sementes não causaram impacto significativo no dimensionamento, já que as diferenças entre as fissuras previstas do revestimento não chegaram a 2,5%.

Portanto, é importante ressaltar que o módulo de resiliência dos materiais varia de acordo com a localização e o tipo de material que se trabalha. Sendo necessário, em casos que é inviável a análise em laboratório, buscar valores típicos onde as características dos materiais sejam semelhantes. Como dito anteriormente, o coeficiente de Poisson pode ser definido como a relação entre a deformação vertical imposta ao material pela deformação horizontal sofrida pelo corpo de prova, em ensaios de compressão uniaxial, conforme a Equação 07.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v} \quad (07)$$

Onde:

- ε_h : deformação vertical imposta ao material;
- ε_v : deformação horizontal sofrida pelo corpo de prova;

- ν : coeficiente de Poisson.

O coeficiente de Poisson é um dos parâmetros de entrada necessário para que programas de dimensionamento funcionem, como MeDiNa, BackMeDiNa, SisPav, ELSYM, etc. Dessa forma, considerando que atualmente não é comum a realização de ensaios para medição do coeficiente de Poisson, apenas em ensaios de Módulo Complexo ou Dinâmico, devido a seu comportamento tixotrópico, é importante utilizar valores constantes e usuais, até porquê o parâmetro possui baixa relevância nos resultados de análises estruturais, como nas bacias deflectométricas (HUANG, 2004; BALBO, 2007; ROCHA, 2020).

Na Tabela 7 são apresentados valores típicos para coeficientes de Poisson de diferentes materiais de pavimentação.

Tabela 7 - Valores usuais de coeficientes de Poisson

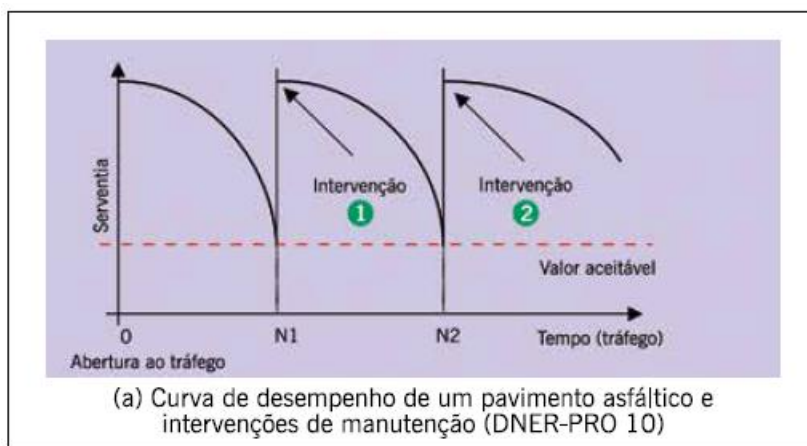
Material	Faixa de variação
Concretos Asfálticos	0,32 – 0,38
Concretos de cimento Portland	0,15 – 0,20
Solos arenosos	0,30 – 0,35
Solos finos	0,40 – 0,45
Misturas Betuminosas	0,35 – 0,40
Materiais Granulares	0,35
Solos	0,40

Fonte: Adaptado de Alves, 2007 e Balbo (2007).

2.3. RETROANÁLISE

A aplicação repetida de cargas de veículos, variações climáticas, características dos materiais utilizados e diversos outros fatores contribuem para a degradação progressiva da capacidade de suporte do pavimento, resultando em uma redução da sua vida útil remanescente. A Figura 9 mostra que durante a vida útil do pavimento, ele deve passar por algumas intervenções corretivas que são realizadas de acordo com a avaliação funcional e/ou estrutural que são feitas. Por este motivo, sistemas de gerenciamento precisam realizar acompanhamentos para prever programas de manutenção. O aspecto mais difícil é determinar a vida útil restante e para isso, o pavimento deve ser analisado estruturalmente com as propriedades do material para cada camada sendo o módulo de resiliência, o coeficiente de Poisson e a espessura da camada (SALTAN *et al.*, 2011).

Figura 9 - Etapas de intervenções em pavimento asfáltico



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

Na pavimentação, a retroanálise é um método muito utilizado na previsão dos parâmetros elásticos dos materiais a partir de medidas de deflexão obtidas por ensaios não destrutivos para análise estrutural. O processo de retroanálise envolve o uso de modelos computacionais ou algoritmos para inverter a análise do comportamento do pavimento. Isso significa que, em vez de calcular as deflexões esperadas com base nas propriedades conhecidas dos materiais, a retroanálise busca determinar as propriedades dos materiais com base nas deflexões medidas. Ou seja, a retroanálise é o procedimento não destrutivo que fornece o módulo de resiliência das camadas que compõem o pavimento e subleito com base nas bacias de deformações formadas pelas medidas de deflexão em cada ponto.

Conforme Tutka *et al.*, (2022), a determinação dos módulos de resiliência das camadas do pavimento rodoviário por meio da retroanálise, tem como objetivo encontrar um conjunto de parâmetros de materiais para os quais os valores de deflexão calculados estarão suficientemente próximos da bacia medida, de modo que o erro quadrático médio (RMS) seja mínimo. Em geral, a retroanálise é um processo trabalhoso, que requer um alto grau de habilidade, e os resultados são conhecidos por serem moderados a altamente dependentes do indivíduo que faz o processo de retroanálise (SALTAN *et al.*, 2011).

Outrora, o método para avaliação estrutural de pavimentos rodoviários, era baseado apenas na medição da deflexão máxima, porém a partir da década de 1970, foi percebido que havia a necessidade de considerar a bacia de deflexão como um novo dado. No Brasil, entre os anos de 1977 e 1982, foram realizadas pesquisas na COPPE/UFRJ, visando estabelecer uma rotina de projeto mecânico-empírico de reforço de pavimento, objetivando a previsão do

levantamento das medidas de deflexões. Esse estudo resultou no desenvolvimento do procedimento para projeto de reforço, normatizado pela DNER PRO 269/94 (LOPES, 2019).

Irwin (2002) indica que a atual popularidade dos processos de retroanálise pode ter sido atribuída a fatores como: a correlação entre pavimentos com boas condições estruturais e baixas deflexões e pavimentos em péssimas condições com deflexões elevadas, relacionando o desempenho do pavimento com as deflexões; o desenvolvimento de equipamentos de medidas de deflexões precisos e acessíveis; e, o desenvolvimento de teorias mecânicas que retratam as propriedades fundamentais dos materiais em relação às tensões, deformações e deslocamentos.

Inúmeros programas computacionais foram desenvolvidos ao longo dos anos, muitos seguem o modelo da teoria de camadas elásticas lineares (originado a partir da teoria original de Boussinesq), como o MnLayer usado pelo estado de Minnesota nos EUA, o AEMC ferramenta do programa SisPav, ELMOD3, BAKFAA e o BackMeDiNa. Segundo Sivanewaran, Kramer e Mahoney (1991), dizem que um bom método de retroanálise deve apresentar precisão, rapidez e robustez.

Diversos autores têm contribuído para a divulgação e disseminação da retroanálise, compartilhando seus estudos e resultados em publicações científicas, conferências e eventos da área, desempenhando papéis significativos. Han *et al.*, (2020), utilizaram a retroanálise para avaliar a eficácia de uma geogrelha numa camada de base, sob altas cargas de tráfego. As bacias de deflexão foram obtidas com auxílio do FWD e o software MODULUS 6.1, desenvolvido pelo Instituto e pelo Departamento de Transporte do Texas, foi usado para realizar o cálculo dos módulos pela retroanálise. Os resultados mostraram que a camada de base reforçada melhorou a distribuição de tensões, de modo que a deformação permanente reduziu em 13% na secção intermediária e 37% na inferior.

Pereira (2007), através de bacias teóricas obtidas com o ensaio de viga Benkelman, fez a retroanálise do subleito com base na Teoria do Ponto Inerte pelo *software* ELSYM5 e, elaborou um modelo matemático para obtenção aproximada do módulo resiliente equivalente das camadas acima do subleito. A retroanálise apresentou resultados significativos com erros inferiores a 10% e o modelo matemático desenvolvido apresentou uma alta dependência da precisão do módulo de resiliência do subleito, revelando uma excelente representatividade para as bacias deflectométricas geradas pelo ELSYM5.

Bueno (2016) estudou o comportamento estrutural, por meio da retroanálise em *softwares* (BackSisPav, BAKFAA e MnLayer), de três trechos na cidade de Santa Maria/RS usando os equipamentos FWD e viga Benkelman. Com os dados das bacias deflectométricas calculadas e dos módulos retroanalizados, verificou-se um comportamento não linear das camadas granulares de base e sub-base para os trechos 1 e 2, e valores superiores de módulos para a retroanálise com a viga. Paralelo a isso, o autor analisou a influência da correção da temperatura e das condições de aderência entre as camadas, verificando-se adequada a retroanálise sem ajuste nas bacias de campo e, quando considerou as camadas aderidas, os módulos de resiliência foram substancialmente reduzidos.

Dentre as vantagens associadas a utilização da retroanálise, pode-se citar a avaliação precisa das propriedades dos materiais, a melhoria na precisão dos modelos de projeto, a redução do custo devido a não necessidade de realizar ensaios destrutivos, a preservação do pavimento existente e a melhoria na tomada de decisões em projetos de reabilitações e restaurações.

Albernaz (1997), cita as principais desvantagens na obtenção dos módulos de resiliência a partir do processo de retroanálise:

- a) os módulos retroanalizados apresentam os módulos equivalentes, que podem variar pois dependem de fatores “in situ”;
- b) a confiabilidade dos equipamentos e dos procedimentos deve ser sempre verificada;
- c) a sensibilidade do cálculo dos valores dos módulos de elasticidade aos valores das bacias pois possuem uma imprecisão inerente aos levantamentos em campo.

Existem métodos de retroanálise classificados como iterativos, que definem as propriedades elásticas e geométricas dos materiais e são feitas comparações entre as bacias de deflexões teóricas e medidas, e, os métodos simplificados em que a determinação das propriedades são realizadas por equações, tabelas e gráficos. Uma vez que quanto mais afastado o ponto de leitura de deflexão do ponto de aplicação de carga, menos camadas influenciarão na resposta estrutural, o processo iterativo de retroanálise ocorre no sentido do subleito ao revestimento, buscando igualdade com a bacia medida a partir das deflexões mais afastadas seguindo no sentido do ponto de aplicação da carga. Considera-se um processo análogo a um sistema de equações lineares de matriz triangular (CAMARINI *et al.*, 2018).

Ultimamente outras técnicas de retroanálise vêm sendo desenvolvidas, como por exemplo por meio de redes neurais artificiais (RNA) e por algoritmos genéticos (ROCHA,

2020). Mabrouk *et al.*, (2022), desenvolveram uma nova metodologia para retroanalisar os módulos resiliência em função da velocidade de tráfego usando RNA e constataram que o modelo desenvolvido apresentou um coeficiente de determinação de 94,08%. Além disso, os módulos retroanalizados foram validados em relação aos dados de laboratório com erro quadrático médio (RMS) de 5,42% para os módulos da camada asfáltica, 4,33% para os módulos da base e 6,50% para a camada de subleito.

2.3.1. Fatores que influenciam na retroanálise

De acordo com alguns autores (Macêdo, 2003; Nóbrega, 2003; Ullidtz e Coetzee, 1995; Pereira, 2007; Prussler *et al.*, 2000; Medina *et al.*, 1994; Hora, 2007; Hariyadi e Utami, 2015; Bueno, 2016), os principais problemas encontrados nos procedimentos de retroanálise são os seguintes:

1. Sensibilidade dos resultados aos dados de entrada: os resultados obtidos na retroanálise podem ser sensíveis aos parâmetros utilizados, como as propriedades dos materiais e as deflexões medidas. Já que é possível obter diferentes combinações de módulo de resiliência para uma mesma bacia deflectométrica utilizando outros parâmetros iniciais.
2. Dificuldade na obtenção de deflexões precisas: a qualidade e a precisão das deflexões medidas em campo podem variar de acordo com o método não destrutivo empregado, o que pode introduzir incertezas nos resultados da retroanálise.
3. Complexidade das análises e modelagem: a não linearidade no comportamento tensão *versus* deformação de solos e materiais granulares resulta em variações relativamente grandes nos módulos finais desses materiais. Quando a elasticidade não-linear das camadas granulares não é considerada, ocorre uma compensação entre as camadas, como acontece quando o subleito é modelado como um material elástico não-linear, resultando em um módulo de resiliência bem maior do que o esperado.
4. Limitações dos modelos mecânicos: os modelos utilizados na retroanálise são simplificações do comportamento real do pavimento. Esses modelos podem não capturar todas as nuances e complexidades do comportamento do pavimento, resultando em resultados aproximados.
5. Variação das espessuras: a espessura das camadas do pavimento é geralmente considerada constante ao longo do perfil longitudinal. No entanto, na prática, essa

suposição não é realista devido a várias razões construtivas e de manutenção. Essas variações de espessuras afetam os valores modulares das camadas. Quando as espessuras são menores do que as adotadas no programa, os valores modulares são superestimados. Por outro lado, espessuras maiores são compensadas por valores modulares menores.

6. Camada rígida: considera-se como camada “rígida no subleito” aquela que não contribui para as deflexões e nem permite a contribuição dos materiais abaixo dela para as deflexões medidas nas superfícies. Assim, tanto uma camada de rocha, como de pavimento rígido, gera problemas para análise e interpretação das bacias. As camadas rígidas podem ser reais ou aparentes e possivelmente constituem-se no problema mais comum encontrado na estimativa das bacias de deflexões (PEREIRA, 2007).

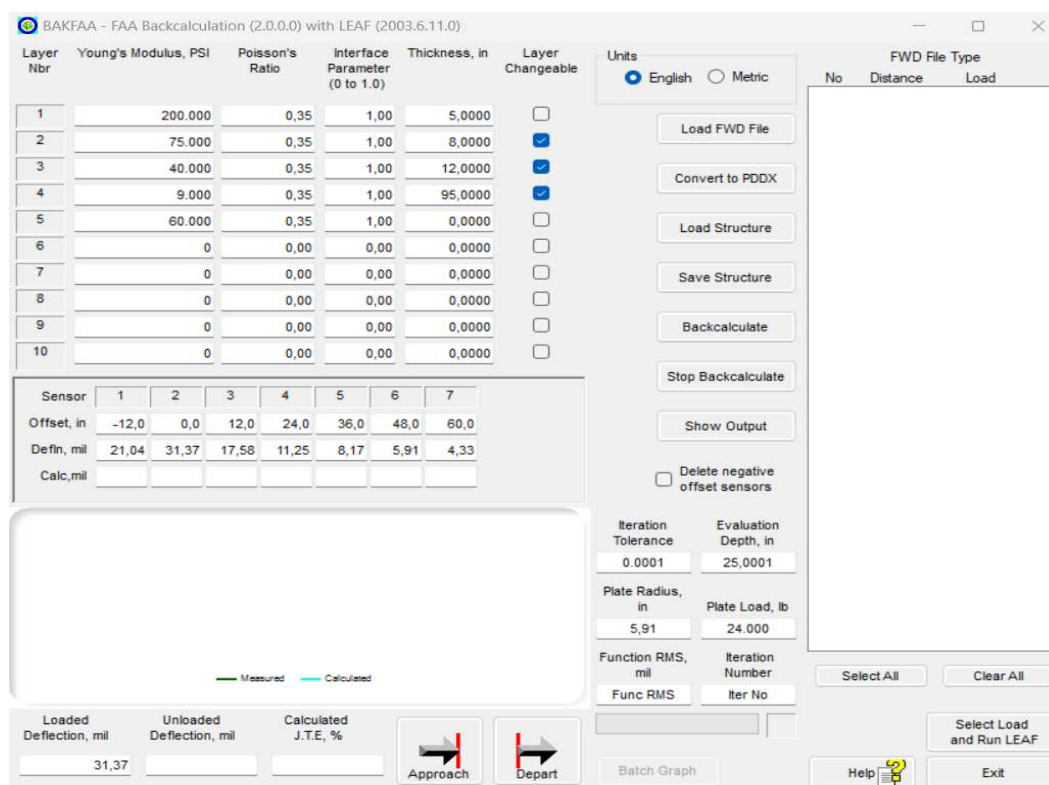
2.3.2. Softwares utilizados na pavimentação para retroanálise

2.3.2.1. BAKFAA

O BAKFAA é programa de software da FAA (Federal Aviation Administration) gratuito que faz a retroanálise das camadas do pavimento com base em dados de deflectômetros de peso ou de queda, como HWD e FWD. O BAKFAA executa os cálculos retroativos usando o programa LEAF (Layered Elastic Analysis) e um método de minimização multidimensional que soma os quadrados das diferenças entre as deflexões verticais da superfície calculadas com o programa elástico de camadas (LEAF).

Os cálculos são realizados através de processos iterativos que buscam encontrar uma combinação de módulos de resiliência das camadas de modo que o erro quadrático médio (RMS) das bacias de deflexão calculadas e medidas seja minimizado. A interface do BAKFAA, como ilustra a Figura 10, exibe um quadro onde são inseridas as informações da seção do pavimento, uma janela com os arquivos de dados do levantamento deflectométrico e as informações relativas a retroanálise.

Figura 10 - Interface padrão do software BAKFAA



Fonte: Elaborada pela autora, com base na versão 2.0.0.0 do BAKFAA (2023).

Para o usuário definir as informações estruturais das camadas, o programa inclui uma biblioteca com quinze tipos diferentes de estruturas do pavimento e inclusive requer um número mínimo de dados para caracterizar as propriedades do material de cada camada da estrutura, podendo também inserir uma camada definida pelo usuário. O número mínimo de camadas é três e o máximo é dez. O BAKFAA, além de mostrar a tabela de camadas, representa em um gráfico a seção transversal do pavimento de acordo com o tipo de material e características inseridas, mas não leva em consideração as características climáticas.

O software requer um valor de “módulo semente”, em cada camada, para iniciar o processo iterativo de cálculo. Estes valores são atribuídos com base nas informações disponíveis das propriedades do material, como ensaios realizados em laboratório, dados históricos, etc. Quanto ao formato de arquivo, vários fabricantes produzem equipamentos de FWD e cada dispositivo vai utilizar um formato, dessa forma, o BAKFAA, conforme Manual tal, suporta vários tipos de extensões de arquivos como “.fwd”, “.hwd”, “.ddx”, “.txt”, “.xml”, entre outros.

Em suma, para realizar a retroanálise, o usuário deve definir a estrutura da camada do pavimento, carregar um arquivo FWD, selecionar o número de quedas, definir a tolerância das

iterações e clicar no botão de “backcalculation”. Ao final do processo, o programa fornece o número de iterações que foram necessárias, o erro quadrático médio (RMS) e as deflexões calculadas.

Metogo (2015), em sua tese, realizou a retroanálise com dados de deflexão adaptados, já que foram obtidos com a viga Benkelman, no BAKFAA em um pavimento composto por uma estrutura básica de subleito, base e revestimento em concreto asfáltico ao longo de 5 anos. O estudo contemplou vários trechos com materiais distintos para base, entretanto a retroanálise foi realizada apenas em um ano. Os resultados indicaram valores compatíveis com aqueles encontrados em laboratório, com os valores de RMS relativamente baixos, caracterizando uma boa acurácia.

Assim como o autor anterior, Viera (2020), objetivou a avaliação estrutural de três trechos diferentes através de retroanálises feitas em dois programas computacionais diferentes, o BackMeDiNa e o BAKFAA, com dados de deflexão obtidos com a viga Benkelman. O autor fez a conversão dos dados com base na metodologia proposta por Theisen *et al.* (2009) e concluiu que o BackMeDiNa apresenta valores de MR menores que o BAKFAA, com menores erros, além disso os dois softwares mostraram que a condição de “não aderência” entre as camadas aponta maiores rigidezes. Este estudo evidenciou a viabilidade da utilização de dados obtidos por meio da viga Benkelman na análise de *softwares* de retroanálise de pavimentos mecanísticos.

2.3.2.2. BackMeDiNa

O BackMeDiNa é um software que realiza processos de retroanálise dos módulos de resiliência a partir das bacias deflectômetricas obtidas com o FWD. Foi desenvolvido para uso como componente nos programas MeDiNa e AEMC. "BackMeDiNa" é uma abreviação que se refere a uma técnica chamada "Backcalculation Method for Mechanistic Design of Pavements" ou "Método de Retrocálculo para Projeto Mecanístico de Pavimentos", em português.

Segundo Franco *et al.*, (2018), a rotina de cálculo implementada utiliza um método iterativo para aproximar as bacias medida e calculada. Esse método é realizado ajustando os valores dos módulos em torno de um valor central fornecido pelo usuário, e faz uso do componente AEMC para a análise. O Manual da versão 1.2.0, informa que as hipóteses do programa se baseiam nas mesmas consideradas pelo AEMC na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, são elas:

- a) Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- b) A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c) As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- d) Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-finita;
- e) A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área circular de contato;
- f) Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- g) A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda área circular de contato;
- h) A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- i) As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Para iniciar o processo de retroanálise é preciso ter as bacias deflectométricas (com as medidas de temperatura do ar e da superfície da rodovia), a estrutura do pavimento e suas respectivas espessuras, os valores do coeficiente de Poisson, as estimativas de módulo de resiliência para cada camada, o carregamento aplicado e a distância entre os sensores.

Em resumo, o programa fornece uma planilha para importação do arquivo de bacias, no formato *.csv* (*comma separated file* ou arquivo separado por vírgulas) com os valores das deflexões obtidas com o FWD. Na Figura 11, abaixo, pode ser observado a interface da planilha onde podem ser alteradas as distâncias medidas entre os pontos, a carga aplicada, entre outras informações.

Figura 11 - Modelo de planilha disponibilizado pelo programa

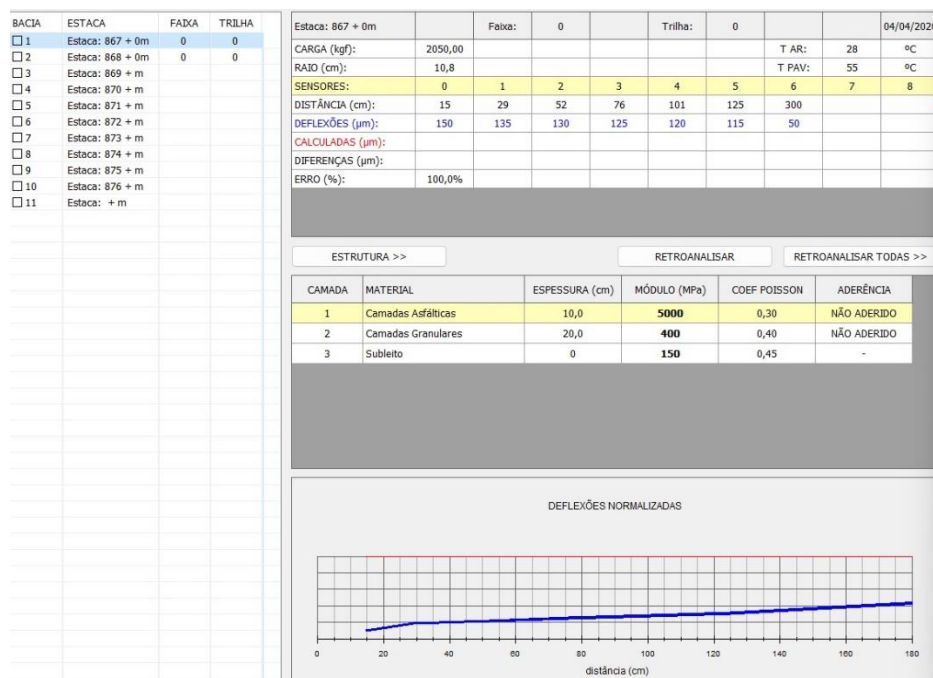
1	BACKMEDINA																	
2	SEÇÃO:	Modelo																
3	RAIO (cm):	15																
4	Data de Execução	Temp. Do	Temp. Do	Carga	Estaca – N	Estaca – D	Estaca – F	Estaca – T	d0	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180	
5	04/04/2018	28	55	4000	1	0	0	0	706	563	467	351	266	164	115	89	74	
6	04/04/2018	28	55	8000	2	0	0	0	1412	1126	935	703	532	328	230	179	148	
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Posteriormente, o arquivo é importado para o software e os parâmetros são inseridos de acordo com cada camada do pavimento. Feito isso, a opção retroanalisar deve ser acionada e o programa irá realizar o cálculo automático ao encontro do menor erro quadrático médio (RMS) e, para que tenha um resultado satisfatório, o botão deve ser clicado até que o erro se encontre dentro dos limites e não varie. Caso a retroanálise ainda assim se apresente inadequada, o usuário pode fornecer outro valor inicial de módulo em qualquer uma das camadas e então repetir o processo (FRANCO *et al.*, 2018).

A Figura 12 apresenta a área de interação do software BackMeDiNa, onde são exibidas as discrepâncias entre as deflexões medidas e calculadas, visualizadas por meio de um gráfico, juntamente com a representação do erro. Quando o erro fica abaixo de 5%, o programa realça a seção correspondente na lista à esquerda em verde, indicando uma correlação bem-sucedida na retroanálise. Caso o erro esteja entre 5% e 10%, a seção é destacada em amarelo, indicando uma correlação razoável. Por fim, quando o erro ultrapassa os 10%, a seção é realçada em vermelho, indicando uma correlação insatisfatória.

Figura 12 - Interface do programa BackMeDiNa



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A primeira versão do BackMeDiNa foi publicada em 2018 no site do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), e desde lá vêm sendo aplicado em pesquisas e projetos de restaurações para avaliar sua sensibilidade e consistência dos resultados. Lopes (2019) conduziu um estudo utilizando três programas de retroanálise, nomeadamente o PITRA-BACK,

ELMOD e BackMeDiNa, com o objetivo de avaliar o impacto de cada método no dimensionamento de reforço. Os resultados apontaram que o BackMeDiNa oferece resultados sólidos e possibilita a melhoria do RMS, permitindo que, além do valor do Módulo de Resiliência (MR), o projetista perceba o ajuste das curvas das bacias de deflexão. Além disso, esse programa demonstrou ser apropriado para as condições brasileiras, fornecendo valores que refletem as características de uma estrutura real.

Machado (2019), realizou o levantamento de bacias pelo equipamento FWD a fim de calcular a camada de reforço do pavimento da UFJF. A partir da retroanálise, verificou-se que o revestimento do pavimento flexível ainda tinha um alto módulo elástico de 5369,79 MPa. Como os cálculos apresentaram erros inferiores a 5 μm , constatou-se existir uma boa relação entre as bacias medidas e calculadas pelo BackMeDiNa.

Nery (2020), em sua pesquisa, objetivou comparar os valores de módulo de elasticidade equivalentes, por meio de deflexões medidas com o FWD, LWD e viga Benkelman. Os valores de módulo retroanalizados com o BackMeDiNa mostraram-se coerentes com os valores obtidos nos ensaios de laboratório, assim como valores identificados em estudos realizados por outros autores. Além disso, a autora utilizou a metodologia proposta por Theisen *et al.*, (2009) que se revelou adequada para conversão do carregamento padrão nos levantamentos feitos com a viga Benkelman, obtendo-se resultados próximos aos cálculos realizados com o FWD.

2.3.3. Adaptações da conversão do carregamento para uso de *softwares* de retroanálise

A conversão do carregamento com eixo padrão é uma técnica utilizada na engenharia de pavimentos para estimar o impacto de um carregamento real em um pavimento por meio de um padrão equivalente. A conversão do carregamento utilizando um eixo padrão tem como propósito determinar um carregamento equivalente que cause efeitos de carga similares ao carregamento real no pavimento, e então é posteriormente empregado em análises de pavimentos e projetos relacionados.

No contexto da retroanálise, diante dos diversos *softwares* utilizados para obtenção dos módulos de resiliência, alguns usam dados provenientes da viga Benkelman, outros usam dados do equipamento FWD, entre outros. De acordo com a restrição ou disponibilidade de cada obra, vai ser escolhido um tipo de equipamento para fazer o controle das camadas ou a avaliação estrutural de um determinado pavimento. Dessa forma, para tornar o processo de retroanálise possível para uso de diversos *softwares*, existem metodologias que permitem a adequação

desses dados com base na conversão do carregamento e do raio da placa, já que são valores diferentes para cada equipamento utilizado.

Theisen *et al.* (2009), desenvolveu uma metodologia simples para uso em programas de retroanálise que usam bacias oriundas de FWD para bacias oriundas de cargas de eixo padrão, através da sobreposição de efeitos, onde uma das cargas é responsável por metade da deflexão do pavimento.

Em seu trabalho, ele adotou algumas hipóteses, que são:

- as camadas do pavimento são consideradas horizontalmente infinitas e de espessura constante;
- os materiais são considerados como lineares elásticos, homogêneos e isotrópicos;
- o carregamento é composto de duas placas circulares de pressão uniforme de iguais pressões e raios;
- e, os centros geométricos estão igualmente distantes dos pontos de medida de deflexões na superfície do pavimento.

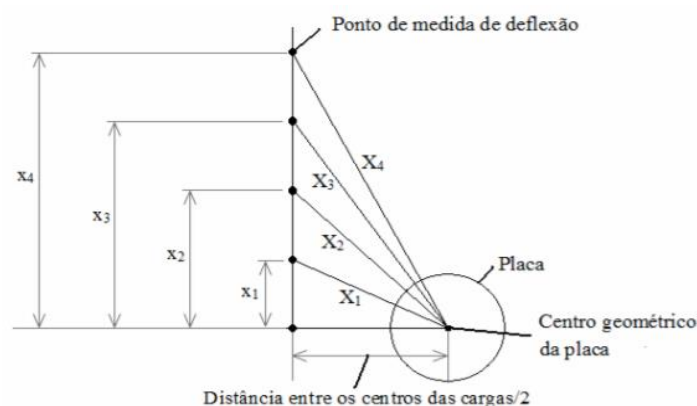
De acordo com a Figura 13 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as novas distâncias “X” são calculadas em função das distâncias “x” entre os pontos da bacia de deflexão, através da Equação 08.

$$X_i = [(x_i)^2 + (0,5dcg)^2]^{1/2} \quad (08)$$

Onde:

- X_i : distância calculada;
- x_i : distância entre os pontos da bacia de deflexão;
- dcg : distância entre o centro geométrico das placas carregadas.

Figura 13 - Cálculo das distâncias "X" em função das distâncias "x"



Fonte: Adaptado de Theisen *et al.*, (2009).

Desta maneira, se para cada x_i há uma deflexão associada D_i , o método simplesmente se trata da substituição de x_i por X_i e de D_i por $0,5D_i$ na retroanálise de um dado conjunto de bacias deflectométricas, considerando apenas a atuação de uma das rodas do eixo padrão e assim não havendo a necessidade de uma análise em três dimensões do problema em questão (THEISEN *et al.*, 2009).

Já em relação ao cálculo do raio de uma roda do semieixo padrão, Medina e Motta (2015), descrevem o cálculo do diâmetro para a carga por roda de 20 kN, com a pressão do pneu igual a 55 N/cm², sendo considerada igual à pressão de contato com o pavimento. Então, o cálculo se dá pelas Equações 09 e 10 informadas abaixo, que indicam respectivamente a área circular de contato e o diâmetro, obtendo um raio de aproximadamente 10,8 cm.

$$A = \frac{2 \times 104}{55} = 363 \text{ m}^2 \quad (09)$$

$$D = 2 \times (A/\pi)^{1/2} = 2 \times (363/\pi)^{1/2} = 21,4 \text{ cm} \quad (10)$$

Vieira (2020), para comprovar sua escolha do método de adaptação do carregamento em sua pesquisa, utilizou como exemplo os dados obtidos de Bueno (2016) do Trecho 1 que usou outra metodologia. O autor constatou que houve uma diferença numérica nos módulos do revestimento e uma variação das camadas inferiores, concluindo que essa solução gera resultados mais próximos aos encontrados nas condições de campo.

Além disso, o próprio Bueno (2016) cita que a metodologia de Theissen *et al.* (2009) seria mais apropriada para essa conversão, mas o autor vislumbrou em período avançado à pesquisa. Portanto, nesta dissertação, foi escolhida a metodologia de Theisen *et al.* (2009) para converter o carregamento do eixo padrão e poder utilizar os programas de retroanálise que usam dados de entrada obtidos com o equipamento FWD.

2.4. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

A estrutura de um pavimento é composta por camadas sobrepostas de diferentes tipos de materiais, para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e com um custo mínimo possível (BALBO, 2007). Conforme apontado por Fritzen (2016) e Marques (2014), o objetivo primordial do dimensionamento de pavimentos é calcular as espessuras das camadas constituintes da estrutura do pavimento. Isso é realizado com a devida consideração à escolha de materiais apropriados, de modo a permitir a distribuição eficiente das cargas impostas pelo tráfego ao subleito, evitando quaisquer deformações ou rupturas na estrutura.

No final do século XIX, a implantação de rodovias não se baseava em nenhum tipo de dimensionamento, tampouco devido ao baixo significado de cargas atuante na época e por ser normal utilizarem para realizar os pavimentos espessuras de materiais de caracterização semelhante (SANTOS, 2011). A partir daí, os inúmeros métodos de dimensionamento buscavam fornecer um instrumento simples, de modo que pudesse ser aplicado em diversas situações, com parâmetros medidos em campo e tabulados.

Estes eram baseados em experiências prévias, proveniente de observações estratégicas relacionadas à condição do pavimento, os chamados métodos empíricos. Sendo assim, os métodos empíricos são baseados em regras desenvolvidas a partir de experiências com os mais diversos tipos de pavimentos, para determinados tipos de materiais e, alguns consideram as condições climáticas peculiares a região que o projeto se desenvolverá (FRANCO, 2007; MACHADO, 2019).

Outros métodos são nominados mecanísticos-empíricos, como o MeDiNa, que levam em consideração a modelagem do comportamento de cada um dos materiais constituintes, bem como sua influência no comportamento estrutural das camadas pelo conhecimento empírico, laboratorial e/ou em pista. O método é dito mecanístico quando utiliza a teoria para prever as tensões e deformações na estrutura do pavimento em função da ação do tráfego e do clima (NERY, 2020).

Conforme Balbo (2007), a grande variedade de métodos de dimensionamento diferentes se atribui, principalmente, a maneira de como se constitui a ruptura de um pavimento. Dessa forma, há três tipos de ruptura básicas que ocorrem: a ruptura plástica, a funcional e a ruptura por fadiga. A primeira, como o nome diz, apresenta muitas deformações plásticas, a segunda se dá quando o pavimento não serve aos usuários (em termos de conforto e rolamento) e, por fim, a ruptura por fadiga é responsável pelo trincamento de revestimentos.

Medina e Motta (2015) mencionam que, no Brasil, as estruturas de pavimentos asfálticos de rodovias são dimensionadas utilizando o método do DNER, que se baseia no ensaio CBR (Índice de Suporte Califórnia), nas curvas de dimensionamento do Corpo de Engenheiros Militares dos EUA (USACE) e em dados obtidos da pista experimental do AASHO, que remonta ao final da década de 1950. Este método apresenta certas adaptações regionais em relação às especificações dos materiais, bem como suas limitações.

Como o propósito das metodologias mecanísticas é a de projetar um pavimento que resista ao tráfego e as ações climáticas, foi criado um método de dimensionamento

mecanísticos-empíricos que objetiva o cálculo de tensões e deformações e deslocamentos a partir das cargas de tráfego e das características dos materiais.

O novo método de dimensionamento nacional de pavimentos mecanístico-empírico, denominado MeDiNa, proposto pelo DNIT, proporciona uma abordagem inovadora e mais precisa para o dimensionamento de pavimentos novos e de reforço. O software realiza o dimensionamento com base na deformabilidade dos materiais, na curva de fadiga do material e na previsão da área trincada. Esses elementos são cruciais para calcular as espessuras das camadas, garantindo que o pavimento seja capaz de resistir às cargas do tráfego e evitar falhas prematuras, como trincamento e deformações excessivas.

2.4.1. MeDiNa

Conforme Franco *et al.*, (2018), a necessidade da modelagem mecanística-empírica surge da busca contínua pela melhoria dos projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural. Isso ocorre para possibilitar o uso de materiais cujo desempenho em campo ainda não possui experiência suficiente. Além disso, é importante considerar os efeitos das condições ambientais e de tráfego, que podem ser diferentes daquelas para as quais os métodos empíricos, ainda utilizados no país, foram desenvolvidos.

O programa MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) foi desenvolvido a partir do Termo de Execução Descentralizada, celebrado entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, bem como da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás – CENPES e de diversas Universidades do Brasil, como a UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), fruto de mais de 20 anos de pesquisa.

Tal programa visa a realização, a averiguação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos de implantação e reabilitação, através da rotina AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas). Conforme Franco e Motta (2020), essa rotina calcula as tensões, as deformações e verifica se o número da carga aplicada causará trincas excessivas por fadiga e/ou causará deformações permanentes em trilha de roda, observando se as espessuras das camadas e materiais empregados atendem às condições de projeto.

O software inclui dois módulos adicionais: o BackMeDiNa, utilizado para realizar o cálculo reverso e determinar os módulos de elasticidade das camadas do pavimento; e o AEMC,

atribuído para o cálculo elástico de múltiplas camadas. Franco e Motta (2020), declaram que no dimensionamento de um pavimento novo é necessário realizar ensaios de laboratório para obter o módulo de resiliência e o módulo de deformação plástica das camadas. Posteriormente, com todos os parâmetros definidos, deve-se ter em mãos os dados do tráfego, dado pelo conceito de Número Equivalente de Eixos (Número N), e então iniciar o dimensionamento. Os modelos utilizados no programa MeDiNa mostram-se sensíveis a pequenas variações no Número N, e, portanto, uma estimativa apurada é de grande importância para o sucesso do projeto (FRANCO e MOTTA, 2020).

A interface do software pode ser visualizada na Figura 14, sendo organizada em três abas: Estrutura, Modelagem e Resultados. Ao dar início ao software, ele sempre abre na aba Estrutura, onde os dados de identificação do projeto, a estrutura do pavimento, as informações do tráfego e o painel de resumo dos resultados são inseridos. Antes de preencher os dados do projeto, é necessário selecionar o modo que o programa irá tratar os dados, ou seja, se é o dimensionamento de um pavimento novo ou de um projeto de reforço.

Figura 14 - Interface do Programa MeDiNa versão 1.1.5.0

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaise C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1.000
N anual (1º ano):	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O programa inclui uma estrutura padrão como exemplo para orientar o projetista sobre como preencher as informações nos campos. Essa estrutura inicial consiste em quatro camadas que podem ser completamente modificadas, sendo permitido ter no mínimo três e no máximo oito camadas. Na tabela que exibe a estrutura do pavimento as informações são resumidas sobre

as propriedades de cada camada, como o material constituinte, o tipo selecionado, a espessura, o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson.

Para o segundo modo, como citado no tópico 2.3.2, o projeto reforço exige os valores retroanalizados de bacias de campo, obtidos pelo BackMeDiNa, bem como os dados do percentual de área trincada, do IRI (Índice de Regularidade tal) e o tempo de uso do pavimento.

Após o lançamento dos dados, no modo Projeto Novo, o projetista escolhe se quer apenas analisar a estrutura ou dimensioná-la. A análise realiza cálculos e verifica se os critérios de área trincada e/ou deformação permanente são atendidos para espessuras definidas pelo projetista, permitindo uma avaliação quanto a escolha dos materiais. Já o dimensionamento verifica a estrutura pelo critério de deformação permanente e área trincada, de modo que as espessuras das camadas são definidas até os critérios serem atendidos. Se os materiais ou espessuras das mesmas forem insuficientes, a camada que está sendo dimensionada atingirá o seu limite, impossibilitando a conclusão do dimensionamento.

Ao final dos processos são gerados relatórios que podem ser visualizados na aba dos resultados. Existem três tipos de relatório: o primeiro mostra a evolução mensal dos danos de %AT e ATR; o segundo relatório é um resumo da deformação permanente na estrutura ao fim do período de análise, com contribuição da deformação permanente total; por fim, o terceiro trata-se do relatório completo da análise, que apresenta todas as informações utilizadas no dimensionamento ou na análise da estrutura.

A importância em informar o tipo de via a ser analisada ou dimensionada está associada a incidência do critério de parada e da confiabilidade de cada sistema funcional, pois foram definidos em conformidade com a hierarquia do DNIT, como mostra o Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 - Critérios de parada e confiabilidade do método MeDiNa

Tipo de via	Confiabilidade	Área Trincada	Def. Permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

Fonte: Adaptado de Franco (2018).

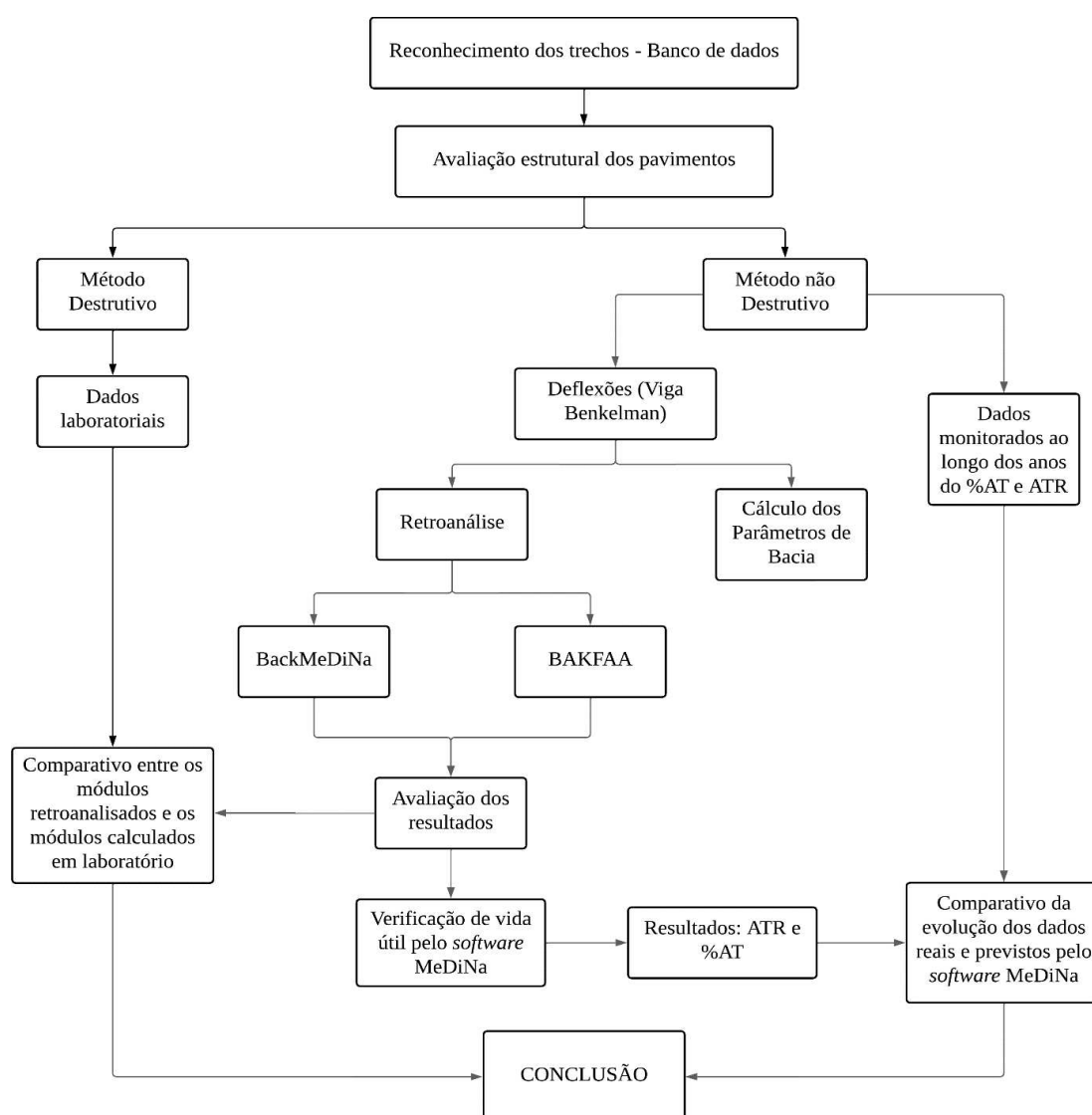
3. METODOLOGIA

A metodologia empregada para o desenvolvimento dessa pesquisa envolveu a realização de ensaios de campo com a viga Benkelman, ensaios destrutivos, ensaios em laboratório para caracterização dos módulos de resiliência extraídos, retroanálises nos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA, análises estatísticas descritivas para avaliação das deflexões em conjunto com os módulos de resiliência, bem como a utilização do *software* MeDiNa.

3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O fluxograma representado na Figura 15, ilustra de forma sucinta, o processo metodológico adotado para a condução da pesquisa, delineando as etapas percorridas e demonstrando a estratégia empregada na consecução dos objetivos estabelecidos.

Figura 15 - Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS TRECHOS

Os dois trechos monitorados e estudados na pesquisa estão localizados nas rodovias: Rodovia Estadual PB 138, próximo à entrada de Catolé de Boa Vista; e BR 230/PB, da Travessia Urbana de Cabedelo ao bairro de Oitizero em João Pessoa, conforme indica a Figura 16. Esses trechos fazem parte do Projeto de Pesquisa entre a PETROBRAS/ANP e a UFCG intitulado “Estudos para Validação de Modelos de Desempenho de Pavimentos no Nordeste”.

Figura 16 - Localização dos trechos monitorados no Estado da Paraíba



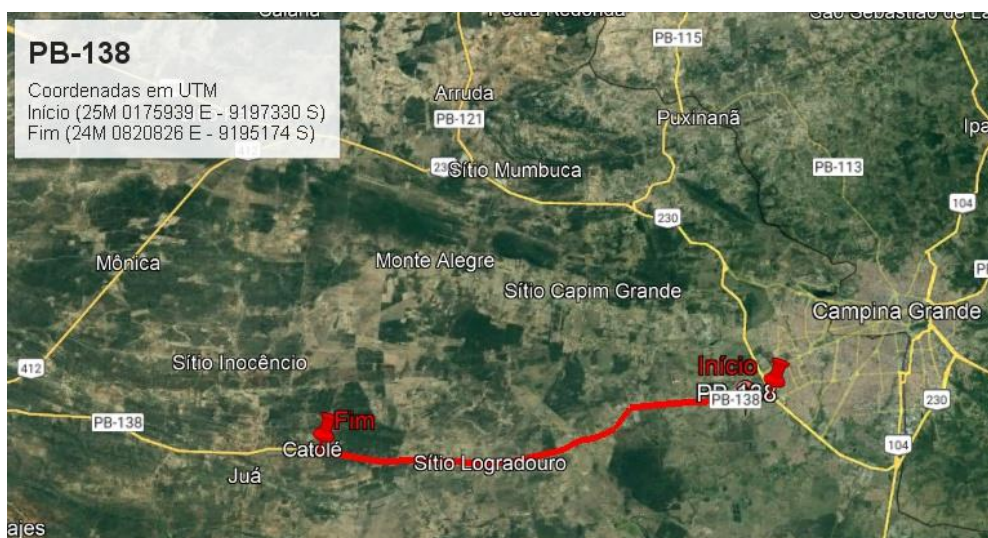
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

3.2.1. Rodovia PB 138 (Trecho 1)

O primeiro trecho monitorado está localizado na PB 138, com extensão de 400 metros (totalizando 20 estacas, iniciando na 43 e terminando na 63), na mesorregião do Agreste Paraibano, compreendido entre uma das saídas da área industrial de Campina Grande, no bairro Verdejante, e a entrada da cidade de Catolé de Boa Vista. A via em questão teve seu tráfego liberado no ano de 2015 e faz parte do “Programa Caminhos da Paraíba”, que abrange cerca de 440.000 habitantes dos municípios de Campina Grande e da microrregião do Cariri, de acordo com o último censo realizado pelo IBGE em 2022, com 18 quilômetros de extensão.

A via, no qual o trecho está situado, contribuiu significativamente para a melhoria da qualidade de vida e o aumento da oferta de empregos, pois favoreceu as atividades de mineração de bentonita na região, graças ao desenvolvimento na infraestrutura rodoviária. Além disso, funciona como uma rota alternativa para aqueles que desejam evitar a BR 230/PB, que apresenta tráfego intenso, reduzindo assim o tempo de deslocamento. A Figura 17 ilustra a via em questão.

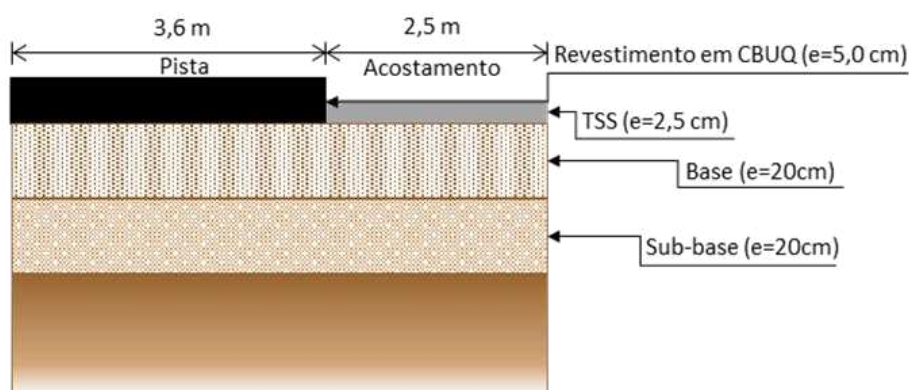
Figura 17 - Imagem de satélite da via localizada na PB 138



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A PB 138, originalmente classificada como vicinal, apresentava uma série de defeitos, carecia de sinalização e não possuía balizamento nos bordos, necessitando de um projeto de implantação. No novo projeto, a rodovia é composta com uma estrutura que inclui uma camada de sub-base com 20 centímetros de espessura, composta por solo local, uma camada de base com 20 centímetros, que consiste no mesmo solo adicionado de 30% de areia, e um revestimento em Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ – CAP 50/70) de 5 centímetros de espessura, de acordo com a faixa “C” do DNIT. Essa estrutura é representada na Figura 18, que também ilustra o perfil da estrutura do pavimento, destacando uma pista de rolamento com largura de 7,20 metros e acostamento de 2,50 metros em ambos lados da pista.

Figura 18 - Composição estrutural da rodovia PB-138



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A fase de monitoramento teve início no ano de 2019, quatro anos após a liberação do tráfego na rodovia. O trecho inicia-se na estaca 43 e finaliza na estaca 63, totalizando uma

extensão de 400 metros. É importante destacar que a faixa monitorada corresponde à faixa direita. O resumo dos dados pode ser visualizado no Apêndice A.

No que se refere às características de tráfego local, não foram encontrados dados históricos suficientes e disponíveis referentes aos fluxos anuais na via em estudo. Portanto, o grupo de Projeto mencionado anteriormente, para a obtenção do volume de tráfego, instalou um posto de contagem, que registrou os movimentos dos veículos por um período de 24 horas. Essa ação foi realizada de acordo com as diretrizes do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (IPR Publicação 723, 2006). Os detalhes relativos à quantidade e ao tipo de veículos identificados podem ser encontrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Média dos valores para o cálculo do número N da PB 138 em 2019

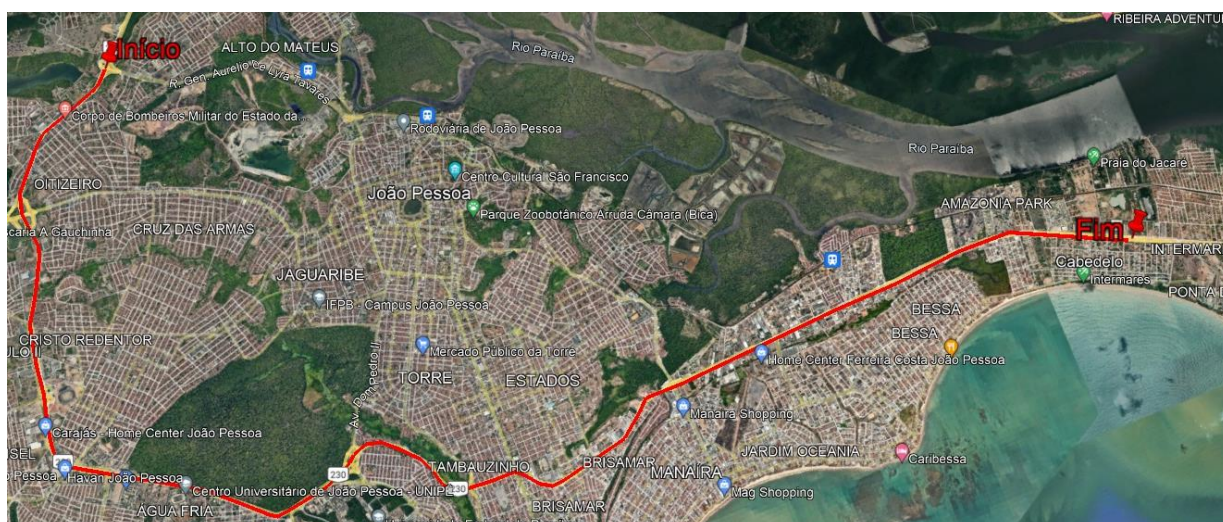
Tipo de veículo	Média
2CB	60
3BC	8
2C	110
3C	145
2S1	27
2S2	52
2S3	6
3S2	29
3S3	97
3T4	51
3P5	3
3M6	4
3T6	17

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

3.2.2. Rodovia BR 230/PB em Cabedelo/PB (Trecho 2)

O segundo trecho monitorado possui uma extensão de 260 metros, com um total de 13 estacas posicionadas a cada 20 metros. Este trecho faz parte da ampliação da BR 230/PB, localizada na região litorânea da Paraíba, entre a Travessia Urbana de Cabedelo e o bairro de Oitizero em João Pessoa, abrangendo uma extensão de aproximadamente 28 quilômetros (do km 2 ao km 28), promovendo a conexão entre o Porto de Cabedelo, que é o único porto do Estado da Paraíba, com a rodovia BR-101/PB, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Imagem de satélite da BR 230/PB

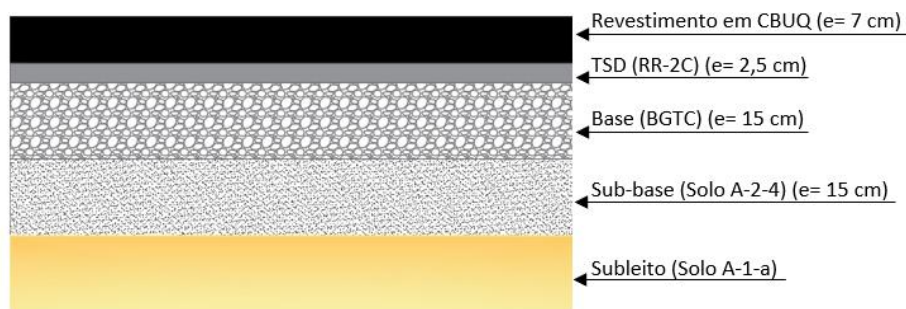


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Devido à extensão da rodovia, o trecho 2 escolhido corresponde à restauração e execução da terceira faixa à direita da BR 230/PB. A obra teve início em março de 2017 e foi concluída no segundo semestre de 2020, com a liberação do tráfego em outubro do mesmo ano. Esse segmento é composto por três faixas de tráfego por sentido, cada uma com 3,60 metros de largura, além de uma faixa de segurança com 0,60 metros, separadas por canteiro central de 1,50 metros de largura.

Conforme o DNIT (2016), o trecho analisado está incluído no “Segmento II” (estaca 105/km 2,10 – estaca 445/km 8,90) já que se compreende entre as estacas 340 a 353. O dimensionamento do novo pavimento adotou uma solução composta por um revestimento em CAUQ (faixa C – CAP 55/75) de 7 centímetros, um Tratamento Superficial Duplo (TSD) com 2,5 centímetros, uma base em BGTC com 15 cm e uma sub-base em cascalho de seixo rolado, também com 15 centímetros de espessura, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Composição estrutural da rodovia BR-230/PB



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Assim como a PB 138, a BR 230/PB também faz parte do Projeto de Pesquisa. O grupo responsável observou, pelo portal de multas do DNIT, o fluxo geral de veículos todos os dias do ano e perceberam que a quantidade de veículos é praticamente constante. Então, um posto de leitura foi instalado durante três dias, e o resumo do fluxo de veículos encontrado para o ano de 2020 está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Média dos valores para o cálculo do número N da BR 230/PB em 2020

Tipo de veículo	Média
2CB	809
3CB	506
2C	760
3C	6367
2S1	188
2S2	584
3S3	1577

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O quadro resumo com as características de todos os dados do trecho, pode ser visualizado no Apêndice A.

3.3. ENSAIOS *IN SITU*

- Viga Benkelman

Os ensaios com a viga Benkelman foram realizados ao longo de três anos, abrangendo todas as estacas que compõem os trechos, com o objetivo de avaliar a capacidade estrutural do pavimento. As deflexões foram medidas, calculadas e os equipamentos posicionados de acordo com as normas DNER – ME 024/94 e DNIT 133/2010 – ME. No trecho 1, os ensaios com a viga foram realizados nos meses de fevereiro em 2019, 2021 e 2022, com uma lacuna de dois anos devido à pandemia ocorrida em 2020. Já o trecho 2 foi monitorado no segundo semestre de 2020, quando teve seu tráfego liberado, e nos anos 2021 e 2022.

Previamente à execução do ensaio, os pneus foram inflados a uma pressão de 0,56 MPa. Utilizou-se um caminhão padronizado, conforme diretrizes normativas, com capacidade de carga de 8,2 tf no eixo traseiro. O veículo foi carregado e, posteriormente, submetido à pesagem em uma balança, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Pesagem de caminhão calibrado com 8,2 tf de carga



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A equipe responsável pelo levantamento se preocupou em medir as temperaturas do ar e do pavimento em cada ensaio, visando futuras correções. Para o delineamento da bacia de deflexão, estabeleceu-se o distanciamento entre as leituras, seguindo as distâncias de: 0, 25, 50, 75, 100, 125, 300 cm, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Distâncias das leituras para delineamento das bacias

D_0 (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	D_3 (mm)	D_4 (mm)	D_5 (mm)	D_6 (mm)
0	250	500	750	1000	1250	3000

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Em todas as avaliações, a extremidade da viga Benkelman, com relação 4/1, foi posicionada entre os pneus, na linha vertical do eixo traseiro. A trava foi, então, liberada para iniciar o ensaio, como ilustrado na Figura 22. Além disso, foi assegurada a consistência de realizar as leituras nos mesmos pontos ao longo dos anos, com o propósito de avaliar a evolução estrutural do pavimento. Os valores medidos podem ser consultados no Apêndice B.

Figura 22 - Posição da viga Benkelman durante levantamento deflectométrico



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Percentual de área trincada e afundamentos em trilhas de roda

A medição da área trincada é um dos procedimentos de avaliação de defeitos estruturais do pavimento. A execução do ensaio segue as diretrizes estabelecidas na norma DNIT 433/2021-PRO que exige a inclusão de todas as fissuras, trincas, panelas ou buracos e remendos presentes no pavimento. Com o auxílio da ficha de levantamento de defeitos e do instrumento adequado, dividiu-se a faixa de rolamento em três subdivisões transversais nomeadas como trilha interna, trilha externa e centro, e todos os defeitos identificados foram devidamente registrados, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Medição da área trincada conforme DNIT 433/2021-PRO



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Assim, como a área trincada, os procedimentos para avaliar os Afundamentos em Trilha de Roda (ATR) também estão em conformidade com a norma DNIT 433/2021-PRO. Para

realização do ensaio, utilizou-se uma treliça de alumínio padronizada que mede, em milímetros, as flechas da trilha de roda. O ensaio foi realizado a cada 10 metros, abrangendo tanto as trilhas de roda interna (TRI) quanto as trilhas de roda externa (TRE), até que a leitura máxima fosse alcançada, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 - Medição do afundamento em trilha de roda conforme o DNIT 433/2021-PRO



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os levantamentos do %AT e do ATR em cada segmento rodoviário, possibilitaram a comparação do desempenho dos trechos com a previsão feita no Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa, como prescreve a norma DNIT 433/2021-PRO.

- Extração de amostra indeformada da camada asfáltica

A extração de amostras de asfalto foi realizada simultaneamente aos ensaios de viga Benkelman, seguindo um procedimento executado pela equipe técnica com o auxílio de uma sondagem rotativa, conforme Figura 25. Para cada trecho e em cada ano, foram extraídos 9 corpos de prova visando determinar a resistência à tração (RT) e o módulo de resiliência da camada “in loco” em laboratório. Isso possibilitou a avaliação do trecho, considerando que essas amostras representavam as mesmas características de todo o trecho.

Figura 25 – Extração de amostras indeformadas do revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

3.4. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

No Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), localizado na UFCG, foram conduzidos estudos que envolveram a determinação da resistência à tração, dos módulos de resiliência e da vida de fadiga dos materiais recolhidos e extraídos dos trechos. Esses ensaios seguiram os procedimentos estabelecidos nas seguintes normas:

- DNIT 136/2018 – ME: “Misturas Asfálticas: determinação da resistência à tração por compressão diametral.”
- DNIT 135/2018 – ME: “Misturas Asfálticas: determinação do módulo de resiliência.”
- DNIT 134/2018 – ME: “Solos: Determinação do módulo de resiliência.”
- DNIT 183/2018 – ME: “Pavimentação asfáltica: ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.”
- DNIT 181/2018 – ME: “Pavimentação: Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência.”

As amostras extraídas do pavimento flexível dos dois trechos foram levadas para o laboratório, onde foram devidamente identificadas e caracterizadas, conforme ilustrado na Figura 26. Essas amostras foram submetidas a ensaios de resistência à tração por compressão diametral e ensaios de módulo de resiliência.

Figura 26 - Amostras extraídas e identificadas



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Adicionalmente, foram realizados ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência e vida de fadiga no revestimento asfáltico, utilizando corpos de prova replicados em ambiente laboratorial a partir das misturas empregadas nas seções analisadas, visando a obtenção dos parâmetros da curva de fadiga k_1 e k_2 para serem usados posteriormente no *software* MeDiNa para previsão de vida de fadiga útil. Esses ensaios podem ser observados na Figura 27.

Figura 27 - Ensaio de RT e ensaio de fadiga

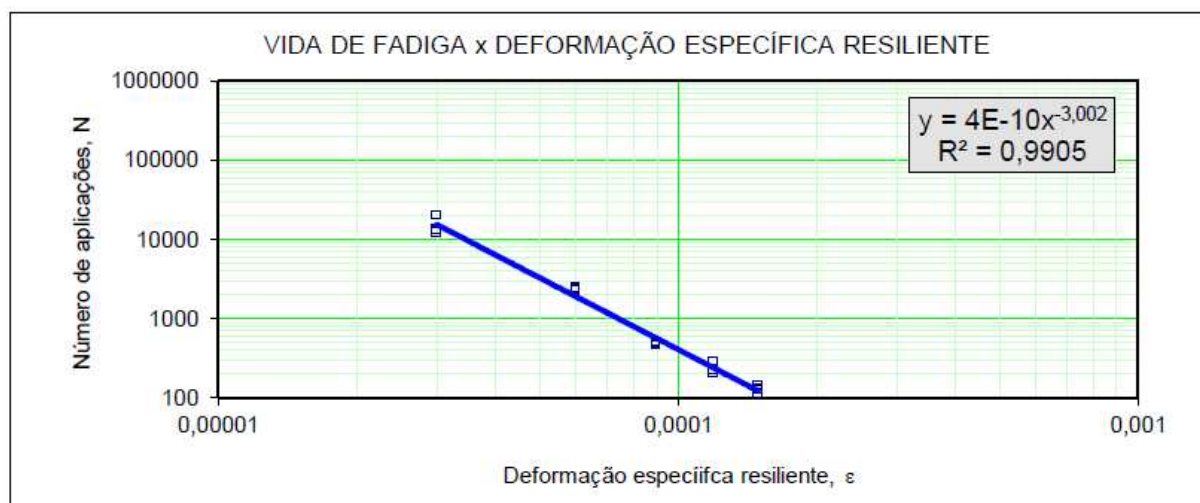


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

No que diz respeito aos solos, não foi possível realizar o ensaio do módulo de resiliência para o trecho 1 devido à falta de material disponível. Entretanto, para o trecho 2, o solo foi coletado e submetido a ensaios em laboratório, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma DNIT 134/2018 – ME. Além disso, os parâmetros k_1 e k_2 obtidos no ensaio de fadiga da camada de BGTC foram, respectivamente, 11,142 e -10,721.

O ensaio de fadiga da mistura asfáltica no Trecho 1 (PB 138) foi realizado pelo grupo de pesquisa. Os resultados indicam que as curvas de fadiga apontam para uma mistura asfáltica de alta rigidez, pertencente a Classe 2 de fadiga, sugerindo a possibilidade de fadiga precoce, já que, conforme Rocha (2020), a Classe 1 é considerada a menos resistente e a Classe 4 a mais resistente. A análise da Figura 28, mostra que os parâmetros k_1 e k_2 da mistura são, respectivamente, $4E-10$ e -3,002.

Figura 28 - Gráfico da vida de fadiga x deformação específica resiliente – PB 138



Fonte: Relatório Técnico Final (2019).

3.5. RETROANÁLISE

Com o objetivo de obter os módulos de resiliência das camadas que compõem os pavimentos dos trechos monitorados, procedeu-se à retroanálise utilizando dois diferentes programas. No entanto, foi imprescindível definir o critério de parada antes de iniciar o processo iterativo, ou seja, determinar o momento em que o ajuste entre as bacias deflecométricas teoricamente determinadas a partir da retroanálise se aproxima satisfatoriamente das bacias de campo.

O erro da retroanálise é calculado método da raiz do valor quadrático médio ou RMS (root mean square), que é calculado pela diferença entre as deflexões calculadas e medidas.

Bueno (2016), em sua pesquisa adotou como critério principal valores para erros relativos de acordo com a distância de aplicação de carga, variando entre 10 a 50%. Machado (2019) avaliou estruturalmente 98 pontos de teste e, durante a retroanálise feita pelo BackMeDiNa utilizou como critério de parada a constância do erro calculado, ou seja, as iterações foram realizadas até que o erro deixasse de variar. Já Vieira (2020), a partir de dados obtidos pela viga, usou as deflexões em processos de retroanálise nos softwares BackMeDiNa e BAKFAA, buscando os menores valores de erro, porém priorizando obter valores de módulo de resiliência coerentes.

Dessa forma, como os dados utilizados nesta dissertação foram obtidos pela viga Benkelman, e considerando os estudos mencionados anteriormente, as retroanálises foram realizadas admitindo-se erros maiores que os recomendados pelo Manual do BackMeDiNa, priorizando sempre a coerência dos resultados. Além disso, o uso dos dados adaptados da viga é mais um motivo para justificar os erros encontrados.

Ao final dos processos iterativos de retroanálise, foram realizadas análises através da estatística descritiva dos dados de deflexão e de módulo resiliência para cada estaca realizada nos dois trechos, a partir da determinação da média (X), do desvio padrão (σ), dos valores máximos (D_{max}) e mínimos (D_{min}), das deflexões características (DC) e dos coeficientes de variação (CV).

3.5.1. Ajuste dos dados de viga Benkelman

Condizente com o que foi explicado nos itens 2.3.2.1. e 2.3.2.2., os programas utilizados nesta pesquisa são configurados para retroanalisar os dados de bacias de deflexão com o equipamento FWD. Assim, para avaliar a estrutura do pavimento, foi necessário fazer a conversão do carregamento do eixo padrão, proposta pela metodologia Theisen *et al.* (2009), mencionada no item 2.3.3., em que os autores admitem que cada carga é responsável por metade da deflexão do pavimento.

Inicialmente, as distâncias entre as medidas de deflexão foram recalculadas conforme a Equação 08, e, considerando o efeito de apenas uma das rodas, tanto as deflexões como a carga aplicada foram divididas por dois. Como resultado, a área circular de contato foi ajustada e o diâmetro também. Por fim, com base nas equações 09 e 10, o raio foi calculado para correta adaptação dos *softwares*. As distâncias corrigidas, bem como os outros dados podem ser observadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo das adaptações realizadas para uso dos dados da viga Benkelman

	D_0 (cm)	D_1 (cm)	D_2 (cm)	D_3 (cm)	D_4 (cm)	D_5 (cm)	D_6 (cm)	Raio (cm)	Carga (kgf)
Original	0	25	50	75	100	125	300	15	4100
Método de Theisen <i>et al.</i> (2009)	15	29	52	76	101	125	300	10,79	2050

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Destaca-se a notável complexidade envolvida no cálculo das curvas a partir dos levantamentos de campo realizados com a viga Benkelman. A acurácia intrínseca ao equipamento e a complexidade inerente, decorrente da adaptação dos operadores, contribuem significativamente para a dispersão nos resultados obtidos. Nesse âmbito, o enfoque direcionou-se na adoção de módulos resilientes aceitáveis, alinhados com as características das camadas componentes, evitando, assim, a aquisição de dados irracionais e sem significado, apenas para atender os critérios de confiabilidade.

3.5.2. Retroanálise com o programa BackMeDiNa

As retroanálises conduzidas com o BackMeDiNa foram realizadas sem a consideração da correção da temperatura e sob a premissa de camadas "não aderidas". A escolha de não aplicar a correção de temperatura é fundamentada na capacidade intrínseca do software em efetuar essas compensações quando os parâmetros da temperatura do pavimento e do ambiente são inseridos. Adicionalmente, é relevante destacar que o escopo da pesquisa não se fundamentou na influência da correção de temperatura.

Em relação a aderência entre camadas, o Manual de Ajuda do BackMeDiNa estabelece como camada "aderida" apenas uma camada asfáltica sobre a outra, e na estrutura dos trechos utilizados nesta pesquisa não há essa relação. Fato este que corrobora com o conceito proposto por Huang (2004), em que pavimentos flexíveis típicos são compostos por uma ou mais camadas aderidas entre si, constituídas por materiais asfálticos sobre camadas granulares não aderidas.

Posto isso, iniciou-se o processo de retroanálise inserindo os dados adaptados (estaca, raio da placa, carga aplicada, temperaturas do ar e pavimento, e deflexões) em uma planilha "modelo de arquivo de bacias" fornecida pelo próprio programa em formato "csv" do *software* Excel. A Figura 29 apresenta um arquivo em formato "csv" preenchido com os dados de viga utilizado para retroanálise do Trecho 1, no ano de 2019.

Figura 29 - Modelo de arquivo de bacias preenchido com os dados da viga adaptados

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	BACKMEDINA														
2	SEÇÃO: PB 138														
3	RAIO (cm): 10,79														
4	Data de Exe	Temp. Do	Temp. Do	Carga	Estaca – N	Estaca – D	Estaca – F	Estaca – T	d15	d29	d52	d76	d101	d125	
5	01/01/2019	28	48	2050	43	0	0	0	216,5	84	14,2	4,1	1,7	0,8	
6	02/01/2019	28	48	2050	44	0	0	0	299,5	230,4	87,3	32,3	14,4	7,5	
7	03/01/2019	28	48	2050	45	0	0	0	416	335,9	252,8	192,9	151,3	122	
8	04/01/2019	28	48	2050	46	0	0	0	266,5	157,2	85,5	52,7	35,8	26,1	
9	05/01/2019	28	48	2050	47	0	0	0	366,5	214,3	129,5	87,6	64,2	49,6	
10	06/01/2019	28	48	2050	48	0	0	0	283	255,9	153,5	73,8	36,7	20,1	
11	07/01/2019	28	48	2050	49	0	0	0	366,5	352,1	280,5	183,5	111	67,8	
12	08/01/2019	28	48	2050	50	0	0	0	249,5	162,1	108,5	78,6	60,4	48,4	
13	09/01/2019	28	48	2050	51	0	0	0	318	209,6	174,4	152,8	137,6	126,1	
14	10/01/2019	28	48	2050	52	0	0	0	200	166,7	76,2	30,6	14,1	7,4	

Fonte: Elaborado pela autora (2023), com base no BackMeDiNa.

Após importar a planilha, antes de iniciar as iterações, foi necessário informar as camadas que compõem o pavimento, juntamente com as respectivas espessuras, o coeficiente de Poisson e os valores iniciais para o módulo de resiliência de cada camada. Como os valores padrões do programa para o coeficiente de Poisson coincidiram com os que seriam inseridos, não houveram mudanças nesse aspecto. Em relação ao módulo de resiliência, foram arbitrados valores iniciais com base nas características de cada material.

Conforme Camarini, Silva Junior e Fontenele (2019), os valores iniciais de módulo têm pouca influência nos módulos finais calculados. Optou-se em iniciar a retroanálise com o valor de 100 MPa para o subleito e 300 MPa para a sub-base, tendo em vista que são valores médios para as camadas com base no item 2.2.1. e nas características dos solos dos trechos (item 3.2.), discutidos nessa dissertação.

A base do trecho 2 é composta por BGTC, um material que possui módulos de resiliência elevados. Portanto, escolheu-se o valor de 15.000 MPa. Por fim, como o tráfego do trecho 1 foi liberado em 2015 e o revestimento em CAUQ já se encontra mais envelhecido, optou-se pelo valor de 6.000 MPa. No caso do trecho 2, que teve seu tráfego liberado em 2020, escolheu-se um módulo resiliente inicial de 5.000 MPa. A síntese das informações previamente expostas encontra-se apresentada na Tabela 13.

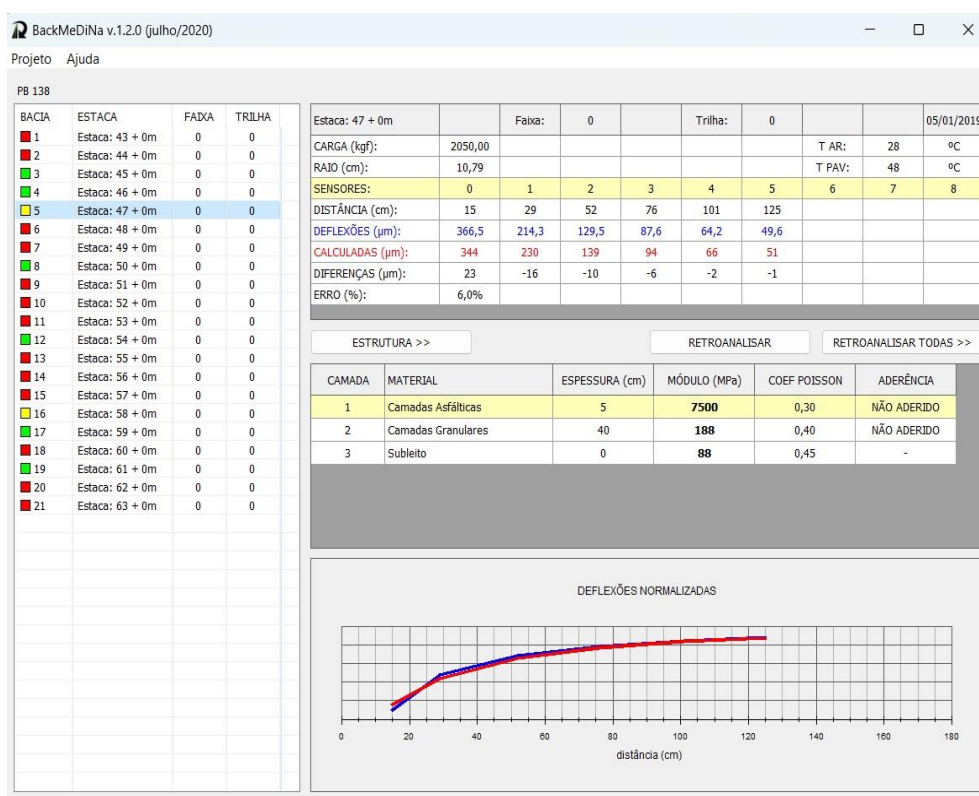
Tabela 13 - Resumo dos módulos de resiliência semente

Camada	Módulo de resiliência (MPa)	
	Trecho 1	Trecho 2
Revestimento (CAUQ)	6.000	5.000
Base (BGTC)	-	15.000
Sub-base (Solo natural)	300	300
Subleito (Solo natural)	100	100

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Posteriormente, a execução dos cálculos iterativos teve início ao ativar a função "retroanálise". Esse processo foi repetido iterativamente até que fosse alcançado o melhor ajuste entre as deflexões medidas e calculadas. A Figura 30 apresenta uma representação das bacias obtidas e a interface do BackMeDiNa, destacando a retroanálise de apenas uma estaca.

Figura 30 - Interface do BackMeDiNa após retroanálise do Trecho 1 (ano 2019)



Fonte: Elaborado pela autora (2023), com base no BackMeDiNa.

3.5.3. Retroanálise com o programa BAKFAA

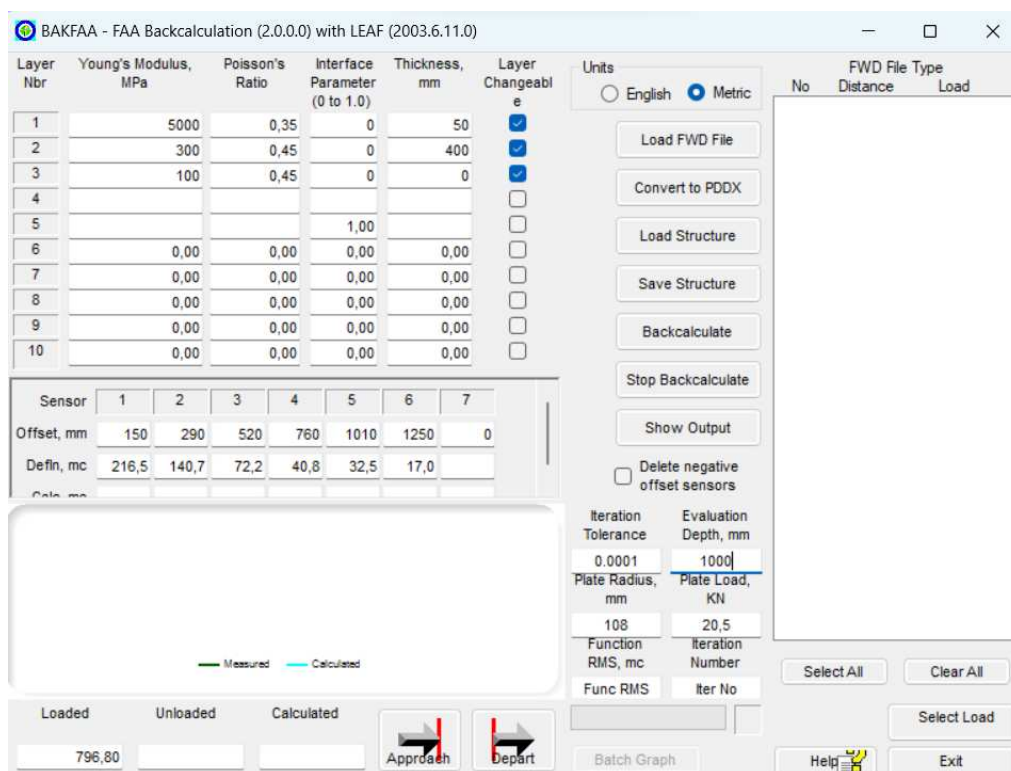
Conforme mencionado anteriormente, o BAKFAA utiliza informações provenientes de ensaios realizados com o FWD. Assim, após finalizar toda retroanálise com o programa BackMeDiNa, procedeu-se à realização de retroanálises no BAKFAA, seguindo as condições pré-estabelecidas, que incluem distâncias, cargas, raio, coeficientes de Poisson, deflexões,

módulos de resiliência iniciais e parâmetros de interface (camada não aderida). O objetivo desta etapa foi permitir uma comparação direta dos resultados obtidos ao término dos respectivos procedimentos.

A versão utilizada foi a 2.0.0.0, em virtude da possibilidade de alterar o valor do raio da placa, já que a mais recente, além de precisar importar e alterar um arquivo em formato “.fwd”, não permite a mudança do raio. O processo de entrada de informações no *software* é mais demorado que o BackMeDiNa. Inicialmente, estabeleceu-se a unidade de medida desejada para a apresentação das informações e, em seguida todas as informações foram inseridas uma de cada vez. As informações de deflexão, carga e distância, equivalentes às inseridas no BackMeDiNa, foram empregadas, em consonância com a Tabela 4. A tolerância padrão de 0,001 foi mantida e clicou-se no botão "backcalculate". Os valores de módulo foram ajustados até que a bacia calculada se aproximasse da bacia medida.

Ao final das iterações, é possível visualizar o “RMS” e o número de iterações realizadas pelo *software*. Na Figura 31, pode-se observar a interface do programa com um exemplo apresentando as informações inseridas.

Figura 31 - Exemplo de uma retroanálise realizada no BAKFAA



Fonte: Elaborado pela autora (2023), com base no BAKFAA.

3.6. PREVISÃO DA VIDA DE FADIGA DO PAVIMENTO

A previsão de vida de fadiga do pavimento foi conduzida mediante o *software* MeDiNa (versão 1.1.5.0 – dezembro 2020), que engloba dois critérios de dimensionamento: o percentual de área trincada e o afundamento em trilha de roda. O propósito desta fase foi empregar os resultados da retroanálise, fundamentada nos dados provenientes do ensaio da viga Benkelman, na análise mecanística-empírica do pavimento. A sequência de cálculos foi conduzida em conformidade com as orientações do Guia de Utilização do programa, visando estimar a vida de serviço projetada do pavimento para cada segmento em avaliação.

Como explanado 2.4.2., para iniciar o processo, os dados de contagem do tráfego são necessários para que o programa calcule o fator de veículo (FV) e o número N, com base na metodologia USACE. Os resumos dos Volumes Médios Diários encontram-se nas Tabela 1 e 2, e para a realização dos cálculos, admitiu-se uma taxa de crescimento anual de 3% para a PB 138 com base nas observações realizadas ao longo do período de três anos de monitoramento. Analogamente, para a rodovia BR 230/PB, foi adotado um crescimento de 5% ao ano, associado a um horizonte de projeto de 10 anos para os trechos. Nas Tabelas 14 e 15, são apresentados os volumes de tráfego e as porcentagens de cada tipo de veículo em relação ao valor total (fator de eixo).

Tabela 14 - Veículos comerciais e fator de eixo (%): trecho 1

Veículos	Quantidade diária	Fator de eixo (%)
2CB	60	9,85
3BC	8	1,31
2C	110	18,06
3C	145	23,81
2S1	27	4,43
2S2	52	8,54
2S3	6	0,99
3S2	29	4,76
3S3	97	15,93
3T4	51	8,37
3P5	3	0,49
3M6	4	0,66
3T6	17	2,79
Total	609	100%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 15 - Veículos comerciais e fator de eixo (%): trecho 2

Veículos	Quantidade diária	Fator de eixo (%)
2CB	809	7,50
3BC	506	4,69
2C	760	7,04
3C	6367	59,00
2S1	188	1,74
2S2	584	5,41
3S3	1577	14,61
Total	10.791	100%

Fonte: Relatório Técnico Final (2019).

A Figura 32 mostra a interface dedicada ao cálculo do fator de veículo (FV) no MeDiNa. Nela, foram inseridas as informações sobre a configuração dos eixos para cada categoria de veículo encontrada nas contagens da dissertação. De acordo com o tipo de veículo, preencheu-se a planilha com os respectivos eixos e a fator de eixo. O valor da carga de cada eixo já é preenchido automaticamente, e o *software* calcula o fator de carga (FC), o fator de veículo (FV) e o número N.

Figura 32 - Exemplo do cálculo do FV para a rodovia BR 230

MeDiNa - Cálculo do Fator de Veículo (DNIT)

EIXO	CONFIGURAÇÃO	RODAS	FATOR DE EIXO (%) (1º Ano)	CARGA (ton)	FATOR DE CARGA (FC)	FATOR DE VEÍCULO (FV)
1	Eixo Simples	2	7,5	6,00	0,278	0,021
2	Eixo simples de roda dupla	4	7,5	10,00	3,289	0,247
3	Eixo Simples	2	4,69	6,00	0,278	0,013
4	Dois eixos duplos	8	4,69	15,00	4,303	0,202
5	Eixo Simples	2	7,04	6,00	0,278	0,020
6	Eixo simples de roda dupla	4	7,04	10,00	3,289	0,232
7	Eixo Simples	2	59	6,00	0,278	0,164
8	Dois eixos duplos em tandem	8	59	17,00	8,549	5,044
9	Eixo Simples	2	1,74	6,00	0,278	0,005
10	Eixo simples de roda dupla	4	1,74	10,00	3,289	0,057
11	Eixo simples de roda dupla	4	1,74	10,00	3,289	0,057
12	Eixo Simples	2	5,41	6,00	0,278	0,015
13	Eixo simples de roda dupla	4	5,41	10,00	3,289	0,178
14	Dois eixos duplos em tandem	8	5,41	17,00	8,549	0,462
15	Eixo Simples	2	14,61	6,00	0,278	0,041
16	Dois eixos duplos em tandem	8	14,61	17,00	8,549	1,249
17	Três eixos duplos em tandem	12	14,61	25,00	9,300	1,359

Inserir >>
 <<<< << Remover
 F.V. (DNIT) = 9,366

Sair Transportar

Fonte: Elaborado pela autora (2023), com base no MeDiNa.

Após inserir todos os dados necessários, foram obtidos os números N para o primeiro ano de tráfego e ao fim da vida de projeto, como pode ser visualizado nas Figuras 33 para a PB 138 e na Figura 34 para a BR 230.

Figura 33 - Valores do número N para PB 138

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	609
FV:	11.839
N anual (1º ano):	2,63e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	2,63e+06
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	3,02e+07

Fonte: Elaborado pela autora (2023), com base no MeDiNa.

Figura 34 - Valores do número N para BR 230

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	10791
FV:	9,366
N anual (1º ano):	3,69e+07
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	3,69e+07
Taxa de crescimento (%):	5,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	4,64e+08

Fonte: Elaborado pela autora (2023), com base no MeDiNa.

Para o trecho 1, como os materiais da sub-base e do subleito não puderam ser coletados, a contribuição dessas camadas na deformação permanente total não foi avaliada. Para o trecho 2, as informações das camadas de base e sub-base foram informadas. Em posse dos dados, no modo “Pavimento Novo (Nível A) do MeDiNa, foram inseridos: a estrutura do pavimento, os módulos de resiliência retroanalizados, os coeficientes de Poisson e as características dos materiais de cada camada. Então, a vida útil do pavimento das duas rodovias foi estimada, através dos dados do BackMeDiNa e BAKFAA, considerando os limites impostos pelo programa, ou seja, percentual máximo de área trincada igual a 30% e afundamento em trilha de roda máximo de 10 mm, pois são vias do tipo Sistema Arterial Principal.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos dos ensaios realizados nas três etapas de monitoramento nos trechos 1 (PB 138) e trecho 2 (BR 230/PB). A princípio, determinou-se o percentual de área trincada e o afundamento em trilha de roda ao longo dos anos. Em seguida, os dados de deflexão passaram por uma análise estatística descritiva onde foram definidos dois subtrechos homogêneos para cada trecho estudado, bem como a determinação dos parâmetros das bacias. Adicionalmente, a retroanálise das bacias deflectométricas foram feitas pelos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA e foi possível fazer correlações e comparações para os módulos de resiliência de cada camada do pavimento. Por fim, com os valores dos módulos de resiliência obtidos com o BackMeDiNa e BAKFAA, foi realizada a análise de vida útil do pavimento por meio do MeDiNa, e estes foram comparados com o %AT e o ATR medidos em campo.

4.1. ENSAIOS EM *IN SITU*

4.1.1. Percentual de área trincada e afundamento em trilha de roda

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos em campo com os previstos pelo software MeDiNa, o levantamento do percentual de área trincada e do afundamento em trilha de roda considerou os dois trechos como sendo homogêneos. A partir dos ensaios, foram identificados e delimitados todos os defeitos presentes no pavimento, obtendo os valores do percentual de área trincada (AT%) e do afundamento em trilha de roda (ATR) na faixa avaliada.

O novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis – MeDiNa, associa o percentual de área trincada e o ATR ao fim de vida útil do revestimento asfáltico. Ele considera que há comprometimento estrutural quando os valores atingem, respectivamente, 30% ou mais e uma deformação permanente máxima de 10 mm para uma via arterial principal. Observando os valores apresentados nas Tabelas 16 e 17, é possível notar que após 4 anos de uso (2019), o trecho 1 já exibiu percentuais de AT, com um aumento de 3,2% no segundo ano e 1,5% no último ano. Em outras palavras, ao longo de 7 anos de serviço, com espessura de 5 cm de CAUQ, o trecho atingiu o limite máximo. Quanto ao ATR, o trecho apresentou um valor máximo médio de 3,33 milímetros na trilha de roda interna.

No entanto, o trecho 2 não apresentou áreas trincadas ao longo dos anos, mesmo com o tráfego intenso, sugerindo a ausência de fadiga no revestimento. Porém, no segundo e terceiro ano de monitoramento, registrou um valor de 2,36 milímetros na trilha de roda interna. Esses

resultados destacam o tráfego substancial na BR 230/PB, uma vez que, mesmo com apenas dois anos de serviço e sendo considerado um pavimento semirrígido devido à camada de BGTC, alcançou um valor próximo ao registrado na PB 138, a qual possui sete anos de serviço e uma estrutura menos robusta.

Tabela 16 - Percentual de área trincada ao longo dos anos

AT%	Ano 1	Ano 2	Ano 3
PB 138	25%	28,20%	29,70%
BR 230/PB	0%	0%	0%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 17 - Afundamento em trilha de roda ao longo dos anos

	Ano	TRI (mm)	TRE (mm)
PB 138	2019	1,95	0,24
	2021	2,76	0,33
	2022	3,33	0,91
BR 230/PB	2020	0,00	0,00
	2021	1,64	0,71
	2022	2,36	1,07

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.1.2. Análise das bacias de deflexão medidas em campo

Seguindo as recomendações de Balbo (2007) para garantir a qualidade do processo de retroanálise, é essencial analisar seções por meio da subdivisão em trechos homogêneos com parâmetros pouco variáveis. Isso permite determinar as deflexões características para cada segmento, evitando que mascarem a verdadeira condição de conservação do pavimento.

Com base nos dados de deflexão, nesta etapa, foram estabelecidos os limites dos segmentos homogêneos usando um critério estatístico conforme especificado na norma DNER-PRO 11/79 e determinados os parâmetros da bacia de deflexão. A análise estatística descritiva de cada trecho homogêneo também foi feita com a determinação da média, do desvio padrão, valores máximos e mínimos, deflexões características, coeficientes de variação, variância e os limites máximos e mínimos. Além disso, foi utilizado o Método das Diferenças Acumuladas da AASHTO para auxiliar e visualizar melhor os segmentos homogêneos.

4.1.2.1. Trecho 1

A partir dos dados de deflexão levantados nos anos de 2019, 2021 e 2022, da PB 138, procedeu-se à análise estatística descritiva, para avaliar as subdivisões homogêneas. A partir da

Tabela 18, percebeu-se que os valores dos coeficientes de variação (CV) estão acima do valor máximo recomendado para se caracterizar como um segmento homogêneo.

Tabela 18 - Bacias deflectométricas: PB 138 - 2019

Estaca	Distâncias do ponto de aplicação da carga						
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	125 cm	300 cm
43	43,3	28,1	14,4	8,2	6,5	3,4	0
44	43,3	20,5	16,6	6,5	3,4	2,3	0
45	69,6	49,4	23,2	10,7	5,6	2,3	0
46	23,2	15,8	8,2	5,6	3,4	2,3	0
47	63,0	49,4	23,2	9,8	4,1	2,3	0
48	36,5	25,4	12,8	6,5	3,4	2,3	0
49	39,8	25,4	14,4	7,6	4,1	2,3	0
50	33,1	20,5	12,8	8,2	6,5	5,0	0
51	63,0	43,3	21,3	11,9	6,5	4,1	0
52	33,1	20,5	8,2	5,2	4,1	2,3	0
53	36,5	25,4	11,9	5,6	3,4	2,3	0
54	23,2	15,8	10,7	8,9	4,1	2,3	0
55	33,1	16,6	11,9	6,5	4,1	2,3	0
56	23,2	12,8	8,2	5,6	3,4	2,3	0
57	16,6	11,9	7,6	4,1	2,3	1,5	0
58	33,1	15,8	11,9	5,6	3,4	2,3	0
59	16,6	11,9	7,6	5,6	3,4	2,3	0
60	16,6	8,2	5,6	3,4	2,3	1,5	0
61	16,6	10,7	6,5	5,6	2,3	1,5	0
62	20,5	11,9	7,6	4,1	2,3	1,5	0
63	28,1	10,7	6,5	4,1	2,3	1,5	0
Média	33,9	21,4	12,0	6,6	3,9	2,4	0
Desvio padrão (σ)	15,35	11,97	5,24	2,22	1,34	0,85	0
Coef. Variação	45%	56%	44%	33%	35%	36%	0%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Diante desses valores de CV, para auxiliar na análise, realizou-se a segmentação homogênea com base no Método das Diferenças Acumuladas da AASHTO, e percebeu-se que a estaca 46 representava um ponto de inflexão na curva. Visto que essa estaca possui uma deflexão menor em relação ao subtrecho em que está contida e um raio de curvatura maior, a mesma pôde ser eliminada, sem afetar o resultado final. O processo se repetiu para os outros anos de análise, obtendo dois subtrechos denominados SH-01 e SH-02 (Tabela 19), o primeiro com uma extensão de 220 metros e o segundo com 200 metros. Então prosseguiu-se novamente para análise estatística descritiva dos subtrechos, como indica as Tabelas 20 e 21.

Tabela 19 - Segmentos homogêneos da PB 138

Segmento	Estacas	Extensão (m)
SH-01	43 a 53	220
SH-02	54 a 63	200

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 20 - Análise estatística descritiva do Subtrecho 01 ao longo dos anos

Segmento Homogêneo 01 da PB 138						
Distâncias	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	125 cm
SH-01 2019						
Média	46,12	30,80	15,88	8,02	4,76	2,87
Desvio padrão (σ)	13,04	11,23	4,85	2,10	1,29	0,94
Deflexão característica	59,16	42,03	20,73	10,12	6,05	3,81
Mínimo	33,10	20,50	8,20	5,20	3,40	2,30
Máximo	69,60	49,43	23,20	11,90	6,53	5,02
Coef. Variação	28,3%	36,5%	30,5%	26,2%	27,1%	32,8%
Variância	170,12	126,16	23,53	4,41	1,66	0,88
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	78,7	58,9	28,0	13,3	8,0	5,2
Limite mínimo	13,5	2,7	3,8	2,8	1,5	0,5
SH-01 2021						
Média	52,15	35,64	20,52	12,05	8,09	5,04
Desvio padrão (σ)	11,13	13,52	6,67	3,42	2,50	1,98
Deflexão característica	63,29	49,16	27,19	15,48	10,59	7,02
Mínimo	33,10	18,00	12,80	8,20	4,10	2,30
Máximo	71,50	57,90	33,10	21,30	14,40	9,80
Coef. Variação	21,3%	37,9%	32,5%	28,4%	30,9%	39,3%
Variância	123,91	182,89	44,45	11,72	6,24	3,92
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	80,0	69,4	37,2	20,6	14,3	10,0
Limite mínimo	24,3	1,8	3,9	3,5	1,8	0,0
SH-01 2022						
Média	59,73	42,52	28,60	19,57	13,52	8,14
Desvio padrão (σ)	11,90	12,55	9,99	8,67	7,01	4,41
Deflexão característica	71,63	55,06	38,59	28,24	20,53	12,55
Mínimo	43,30	23,20	15,80	7,60	4,10	2,30
Máximo	83,20	68,10	49,40	36,50	28,10	16,60
Coef. Variação	19,9%	29,5%	34,9%	44,3%	51,8%	54,2%
Variância	154,59	171,73	108,97	81,95	53,54	21,24
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	89,5	73,9	53,6	41,2	31,0	19,2
Limite mínimo	30,0	11,2	3,6	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 21 - Análise estatística descritiva do Subtrecho 02 ao longo dos anos

Segmento Homogêneo 02 da PB 138						
Distâncias	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	125 cm
SH-02 2019						
Média	22,76	12,64	8,41	5,35	2,99	1,90
Desvio padrão (σ)	6,32	2,54	2,16	1,50	0,73	0,40
Deflexão característica	29,08	15,18	10,58	6,85	3,72	2,30
Mínimo	16,60	8,20	5,60	3,40	2,30	1,50
Máximo	33,10	16,60	11,90	8,89	4,10	2,30
Coef. Variação	27,8%	20,1%	25,7%	28,1%	24,5%	21,1%
Variância	39,96	6,46	4,67	2,26	0,53	0,16
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	38,6	19,0	13,8	9,1	4,8	2,9
Limite mínimo	7,0	6,3	3,0	1,6	1,2	0,9
SH-02 2021						
Média	26,59	17,83	11,44	7,63	5,24	3,84
Desvio padrão (σ)	7,29	5,39	3,65	2,83	2,52	1,73
Deflexão característica	33,88	23,22	15,09	10,47	7,76	5,58
Mínimo	16,60	10,70	7,60	4,10	3,40	2,30
Máximo	36,50	28,10	16,60	14,40	11,90	8,20
Coef. Variação	27,4%	30,2%	31,9%	37,1%	48,0%	45,1%
Variância	53,16	29,07	13,33	8,04	6,33	3,01
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	44,8	31,3	20,6	14,7	11,5	8,2
Limite mínimo	8,4	4,4	2,3	0,5	0,0	0,0
SH-02 2022						
Média	30,36	18,95	12,11	8,24	6,19	4,58
Desvio padrão (σ)	5,60	5,30	4,53	4,18	3,70	2,96
Deflexão característica	35,96	24,24	16,64	12,42	9,90	7,54
Mínimo	20,50	10,70	7,60	3,40	2,30	1,50
Máximo	39,80	25,40	21,30	16,60	14,40	10,70
Coef. Variação	18,4%	27,9%	37,4%	50,7%	59,8%	64,7%
Variância	31,31	28,04	20,49	17,46	13,72	8,78
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	44,3	32,2	23,4	18,7	15,5	12,0
Limite mínimo	16,4	5,7	0,8	0,0	0,0	0,0

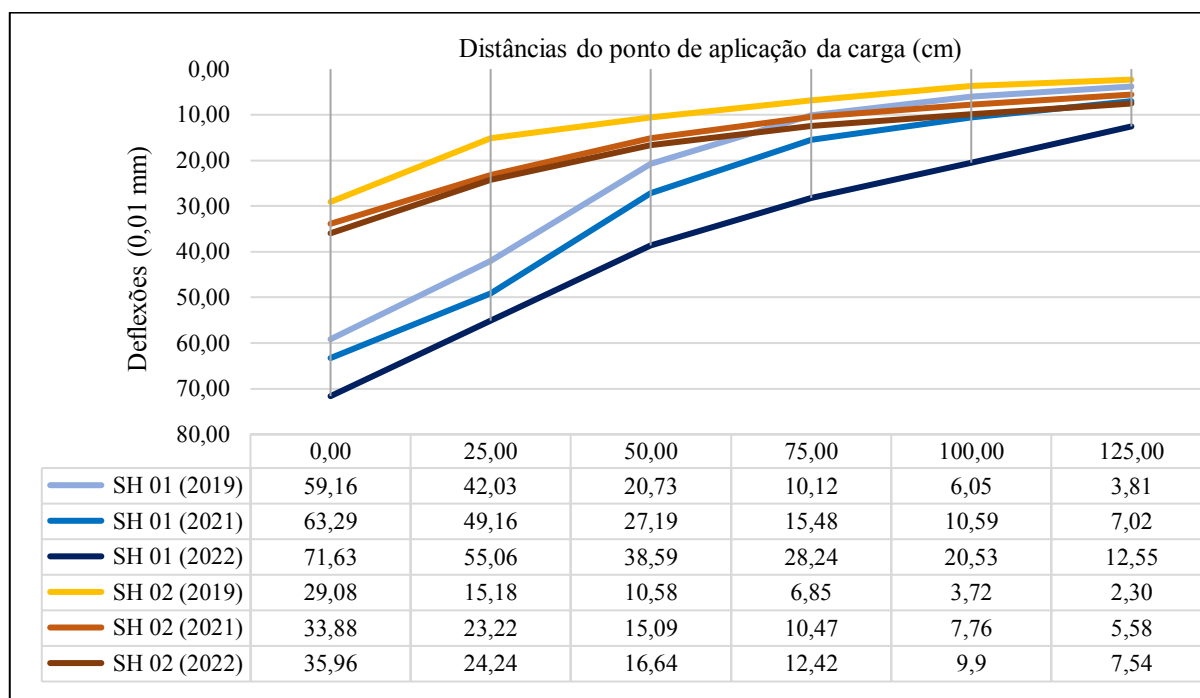
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Observando os resultados obtidos, constata-se que as deflexões máximas não ultrapassaram o limite máximo. No entanto, é perceptível que em algumas leituras distantes do ponto de aplicação da carga, o CV foi maior que 30%. Conforme a própria norma DNER-PRO 11/79 afirma, o limite máximo é restrito apenas para a deflexão máxima, dessa forma, os coeficientes são aceitáveis.

Em posse das bacias características dos subtrechos, foi realizado a plotagem de todas em um gráfico. Analisando a Figura 35, percebe-se a coerência dos levantamentos deflectométricos, já que para um mesmo subtrecho, elas apresentam semelhança no comportamento, com a geometria das linhas de influência parecidas entre si. Além disso, o SH-01 apresentou valores de deflexões máximas, que correspondem aproximadamente ao dobro quando comparadas ao SH-02, indicando ser um segmento com maior comprometimento estrutural.

Ao comparar as deflexões máximas ao longo dos anos, observa-se um aumento mais significativo de 2019 para 2021 do que de 2020 para 2022 no subtrecho SH-02. Esse aumento era esperado, dado que o intervalo entre os levantamentos foi maior. No entanto, para o SH-01, os valores das deflexões são maiores e, nos últimos dois anos de tráfego, aumentaram quase na mesma proporção em comparação ao primeiro ano, o que sugere ser um subtrecho com bacias de áreas menores em função do pavimento ter base granular.

Figura 35 - Deflexões características dos subtrechos homogêneos da PB 138



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Parâmetros das bacias deflectométrica

O raio de curvatura (RC) da bacia é um dos parâmetros importantes para a avaliação estrutural, pois os pavimentos em boas condições estruturais tendem a apresentar deflexões máximas reduzidas e raios de curvatura consideravelmente elevados. Conforme a norma

DNER-PRO 11/79, quando se trata de pavimentos flexíveis, raios de curvatura inferiores a 100 metros indicam capacidade estrutural insuficiente. Além do RC, foram determinados os seguintes parâmetros indicadores da condição estrutural de cada bacia deflectométrica: índice de Curvatura da Superfície (SCI), Índice de Danos à Base (BDI) e BCI (Índice de Curvatura da Base). A Tabela 22, apresenta os valores médios calculados para cada segmento durante os três anos de análise.

Tabela 22 - Resumo dos parâmetros Trecho 1

Subtrecho homogêneo	Raio de curvatura (m)	SCI	BDI	BCI
SH - 01 (2019)	235,1	17,2	14,9	5,7
SH - 01 (2021)	213,6	19,8	15,6	7,3
SH - 01 (2022)	201,1	21,8	12,9	8,8
SH - 02 (2019)	387,0	11,3	4,2	3,4
SH - 02 (2021)	380,4	10,2	6,8	3,4
SH - 02 (2022)	289,8	13,6	6,8	3,1

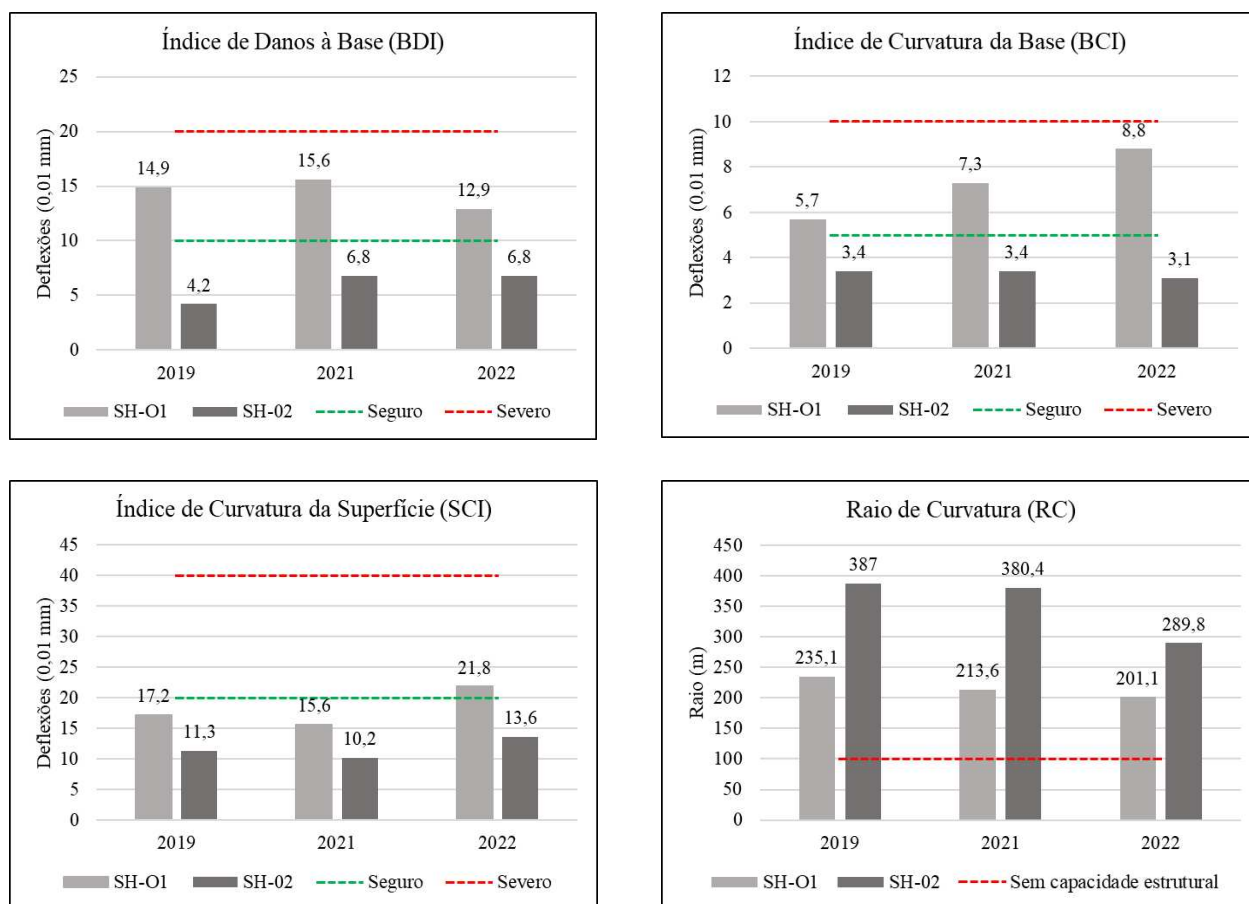
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Pode-se observar que todos os valores apresentaram raios de curvatura superiores a 100, o que está acima do mínimo recomendado. Além disso, com o passar dos anos, eles diminuíram conforme o esperado, visto que o pavimento se deteriora com o tempo e o valor da deflexão é inversamente proporcional ao RC.

Quanto aos parâmetros da bacia de deflexão, a Figura 36 ilustra os valores limites que associam os índices de acordo com a condição do pavimento, em conformidade com a Tabela 2 elaborada por Horak (2008). Horak (2008) divide os intervalos para definir o estado do pavimento como “seguro”, “em alerta” e “severo”. Os valores médios obtidos no Índice de Curvatura da Superfície (SCI), apresentaram valores inferiores ao limite que considera a condição do revestimento “segura”, com exceção do SH-01 (2022) que obteve um valor médio acima de 20 (0,01 mm), indicando que está “em alerta”.

Nota-se graficamente que o Índice de Curvatura da Base (BCI) para o SH-01 cresce progressivamente com o passar dos anos, chegando ao último ano de monitoramento próximo ao limite que é enquadrado como estado “severo”. Como o BCI é um indicativo da condição do subleito, verifica-se um comportamento diferente quando comparado ao SH-02, que se mantém praticamente constante ao longo dos anos. Por fim, em relação ao Índice de Danos à Base (BDI), os valores permanecem constantes ao longo dos anos; no entanto, o SH-01 apresentou valores médios que indicam uma situação de “alerta” para camada de base, enquanto o SH-02 está na zona considerada “segura”.

Figura 36 - Resumo e evolução dos parâmetros das bacias do trecho 1



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.1.2.2. Trecho 2

O Trecho 2 refere-se à BR 230/PB, uma rodovia que teve seu tráfego liberado no segundo semestre 2020, mesma época em que se iniciaram os levantamentos deflectométricos. Assim como no trecho anterior, todos os procedimentos de análise estatística descritiva e método das diferenças acumuladas foram feitos. Percebeu-se que este também se dividiria em dois subtrechos homogêneos, o primeiro com 120 metros de extensão e o segundo com 160 metros, como pode ser visto nas Tabelas 23, 24 e 25.

Tabela 23 - Segmentos homogêneos da BR 230/PB

Segmento	Estacas	Extensão (m)
SH-01	340 a 345	120
SH-02	346 a 353	160

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 24 - Análise estatística descritiva do Subtrecho 01 ao longo dos anos

Segmento Homogêneo 01 da BR 230/PB						
Distâncias	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	125 cm
SH-01 2020						
Média	10,30	6,53	3,94	2,33	1,00	0,00
Desvio padrão (σ)	1,12	0,58	0,98	0,87	0,71	0,00
Deflexão característica	11,42	7,11	4,91	3,20	1,71	0,00
Mínimo	9,80	5,60	2,33	1,50	0,00	0,00
Máximo	12,80	7,60	5,60	4,10	1,50	0,00
Coef. Variação	10,9%	8,9%	24,8%	37,2%	70,7%	0%
Variância	1,25	0,34	0,95	0,75	0,50	0,00
Z (PRO-11/79)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,0
Limite máximo	12,5	7,7	5,9	4,1	2,4	0,0
Limite mínimo	8,1	5,4	2,0	0,6	0,0	0,0
SH-01 2021						
Média	25,62	19,58	12,37	7,90	5,62	3,72
Desvio padrão (σ)	10,66	6,80	4,18	3,53	2,83	1,93
Deflexão característica	36,27	26,38	16,55	11,43	8,44	5,65
Mínimo	10,70	9,80	6,51	3,40	2,30	1,50
Máximo	43,30	28,10	18,00	12,80	10,70	7,60
Coef. Variação	41,6%	34,7%	33,8%	44,7%	50,4%	51,9%
Variância	113,59	46,23	17,49	12,48	8,00	3,72
Z (PRO-11/79)	2,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Limite máximo	52,3	29,8	18,6	13,2	9,9	6,6
Limite mínimo	0,0	9,4	6,1	2,6	0,0	1,0
SH-01 2022						
Média	29,98	22,77	17,23	12,20	9,12	6,76
Desvio padrão (σ)	12,36	8,89	7,72	5,69	4,68	3,92
Deflexão característica	42,34	31,66	24,95	17,89	13,79	10,68
Mínimo	10,70	8,20	5,60	3,40	2,30	1,50
Máximo	43,30	33,10	28,10	20,50	16,60	12,80
Coef. Variação	41,2%	39,1%	44,8%	46,6%	51,3%	58,1%
Variância	152,69	79,11	59,53	32,32	21,86	15,38
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	60,9	45,0	36,5	26,4	20,8	16,6
Limite mínimo	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	1,0

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 25 - Análise estatística descritiva do Subtrecho 02 ao longo dos anos

Segmento Homogêneo 02 da BR 230/PB						
Distâncias	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	125 cm
SH-02 2020						
Média	7,05	4,45	2,60	1,63	0,25	0,00
Desvio padrão (σ)	1,67	1,44	0,67	0,30	0,56	0,00
Deflexão característica	8,72	5,89	3,27	1,93	0,81	0,00
Mínimo	5,60	3,40	2,30	1,50	0,00	0,00
Máximo	10,70	7,60	4,10	2,30	1,50	0,00
Coef. Variação	23,6%	32,4%	25,8%	18,3%	223,6%	0%
Variância	2,77	2,08	0,45	0,09	0,31	0,00
Z (PRO-11/79)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,0
Limite máximo	10,4	7,3	3,9	2,2	1,4	0,0
Limite mínimo	3,7	1,6	1,3	1,0	0,0	0,0
SH-02 2021						
Média	11,44	8,55	6,13	3,96	2,74	1,46
Desvio padrão (σ)	4,43	3,30	2,11	1,38	0,91	1,05
Deflexão característica	15,87	11,85	8,24	5,35	3,65	2,51
Mínimo	6,50	4,10	3,40	2,30	1,50	0,00
Máximo	21,30	15,80	10,70	6,50	4,10	3,40
Coef. Variação	38,7%	38,5%	34,4%	34,9%	33,2%	71,5%
Variância	19,62	10,87	4,45	1,91	0,83	1,09
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	22,5	16,8	11,4	7,4	5,0	4,1
Limite mínimo	0,4	0,3	0,9	0,5	0,0	1,0
SH-02 2022						
Média	12,94	10,15	7,60	5,59	4,47	2,98
Desvio padrão (σ)	5,26	4,76	4,13	4,32	3,87	3,87
Deflexão característica	18,19	14,91	11,72	9,91	8,34	6,84
Mínimo	6,50	4,10	3,40	2,30	1,50	0,00
Máximo	25,40	21,30	18,00	16,60	14,38	12,80
Coef. Variação	40,6%	46,9%	54,3%	77,4%	86,4%	130,0%
Variância	27,63	22,65	17,04	18,69	14,94	14,96
Z (PRO-11/79)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Limite máximo	26,1	22,0	17,9	16,4	14,1	12,6
Limite mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

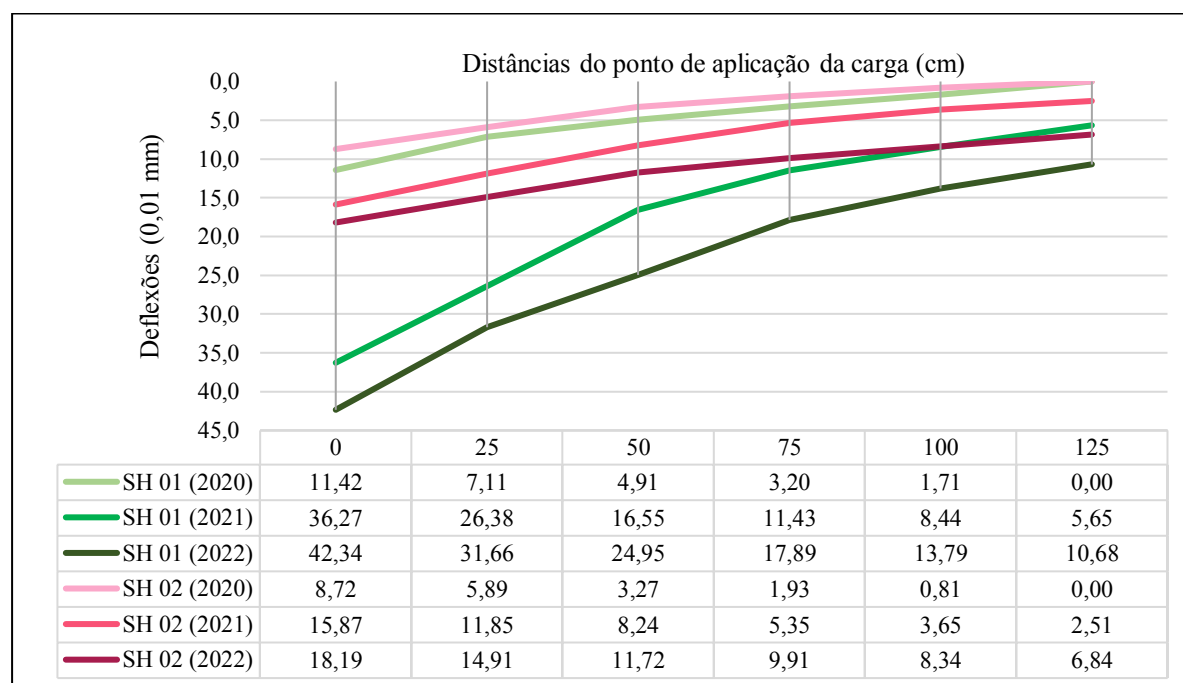
Ao analisar os resultados obtidos, percebe-se que a divisão dos subtrechos garantiu que alguns coeficientes de variação ficassem abaixo do limite estabelecido para as leituras realizadas no ponto de aplicação da carga. No ano de 2020, houve, apenas, leituras até 100 cm de distância do ponto de aplicação da carga devido ao estado inaugural do pavimento, inclusive algumas leituras iguais a zero, e por este motivo o CV ultrapassou o valor mínimo estabelecido. O SH-02, nos anos de 2021 e 2022, apresentou valores maiores que o permitido na maioria dos

pontos de leitura. Conforme a própria norma DNER-PRO 11/79 afirma, é impraticável a proposição de diretrizes rígidas para os limites desses segmentos devido ao número reduzido de bacias, ou seja, pela curta extensão do trecho.

O gráfico com todas as bacias características dos subtrechos foi elaborado para a BR 230/PB. A análise da Figura 37 permite inferir que os dois segmentos apresentaram o mesmo comportamento gráfico no ano em que teve o tráfego liberado (2020), inclusive com valores de deflexão relativamente semelhantes. No entanto, nos anos de 2021 e 2022, quando o pavimento estava passando pela fase de elástica, percebe-se que o SH-02 diferencia-se do SH-01 por apresentar deformações maiores, de modo que cada segmento mantém sua curvatura parecida nos dois anos.

Os valores de deflexão característica máxima variam de 8,72 a 42,34 ($\times 10^{-2}$ m) ao longo dos três anos para o Trecho 2. Segundo Bernucci *et al.* (2022), o valor típico de deflexão máxima para pavimentos novos com revestimento de concreto asfáltico e base ou sub-base cimentada apresentam deflexões máximas da ordem de 10 a 30 ($\times 10^{-2}$ m), o que está de acordo com o observado. Além disso, os altos CV não influenciaram no comportamento dos segmentos.

Figura 37 - Deflexões características dos subtrechos homogêneos da BR 230/PB



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Parâmetros das bacias deflectométrica

A Tabela 26 apresenta os raios de curvatura das bacias da BR 230/PB e os parâmetros das bacias deflectométricas. Como era de se esperar devido à sua pouca idade de serviço e à elevada rigidez da camada de base de BGTC, o RC apresentou altos valores que indicam a ótima conservação estrutural do pavimento. Além disso, observa-se uma diferença significativa nos valores de raio a cada ano de serviço no SH-01, enquanto que o SH-02 manteve-se praticamente constante.

Assim como no Trecho 1, a análise dos parâmetros baseou-se na Tabela 3 elaborada por Horak (2008). Porém, os limites são diferentes, uma vez que a base do pavimento é cimentada. Dessa forma, os valores médios calculados podem ser visualizados na Figura 38.

Tabela 26 - Resumo dos parâmetros trecho 2

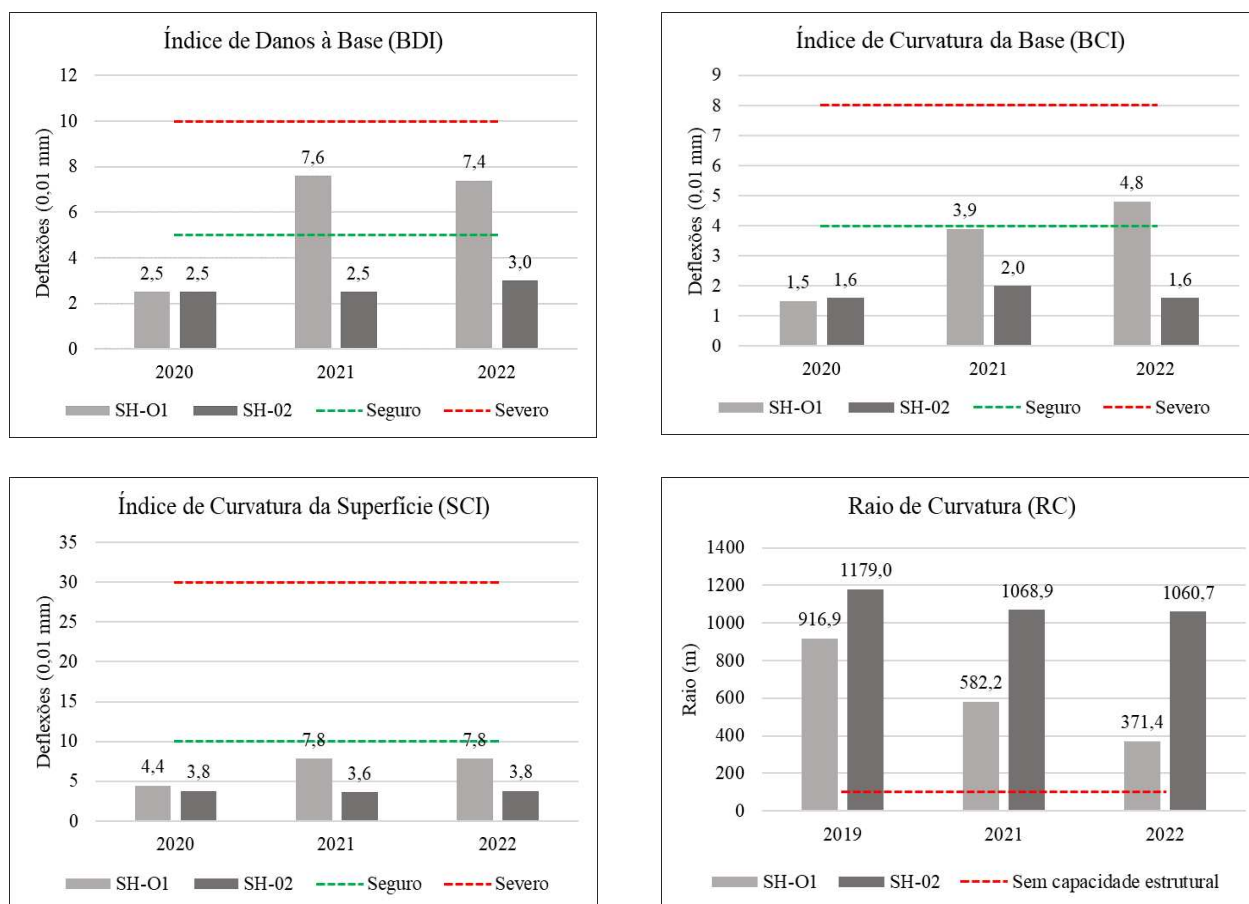
Subtrecho homogêneo	Raio de curvatura (m)	SCI	BDI	BCI
SH - 01 (2020)	916,9	4,4	2,5	1,5
SH - 01 (2021)	582,2	7,8	7,6	3,9
SH - 01 (2022)	371,4	7,8	7,4	4,8
SH - 02 (2020)	1179,0	3,8	2,5	1,6
SH - 02 (2021)	1068,9	3,6	2,5	2,0
SH - 02 (2022)	1060,7	3,8	3,0	1,6

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Ao analisar os parâmetros SCI, BDI e BCI para os dois subtrechos no ano de 2020, observa-se que eles são semelhantes. No entanto, ao longo dos anos, o SH-02 mantém sua estabilidade, enquanto o SH-01 apresenta um comportamento distinto durante a fase de consolidação do pavimento. Nota-se que apenas os valores do BDI nos últimos dois anos estão dentro da faixa de "alerta", juntamente com o valor do BCI no ano de 2022. Portanto, ambos os segmentos exibem resultados satisfatórios, com valores que se mantêm dentro dos limites estabelecidos por Horak (2008).

Essa situação se confirma ao verificar que o aumento nas deflexões, nos dois subtrechos foi de 248% e 96% de 2020 para 2021. Já o aumento da deflexão máxima característica de 2021 para 2022, foi significativamente menor, sendo de apenas 14,8% para o SH-01 e 22,1%, para o SH-02. Isso ocorreu após as camadas terem se estabilizado com o tráfego existente, Nery (2020) também observou esse comportamento em sua pesquisa.

Figura 38 - Resumo e evolução dos parâmetros das bacias do trecho 2



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Não foi possível realizar todos os ensaios nos materiais de cada trecho; porém, no caso do trecho 1, como citado anteriormente, o ensaio de fadiga já tinha sido realizado e os ensaios de módulo resiliência para camada de sub-base e subleito não puderam ser feitos pela falta de material. Assim, foi realizado, apenas, os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e o ensaio de módulo de resiliência para as amostras extraídas do revestimento asfáltico.

Quanto ao trecho 2, os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e curva de fadiga para a camada de revestimento asfáltico foram realizados. Adicionalmente, os módulos de resiliência da camada de base e sub-base foram determinados, exceto para o solo da camada de subleito, onde o ensaio não foi conduzido, pela falta de material. Os módulos de resiliência das camadas granulares demonstram uma característica não-linear, dependendo das tensões (ou deformações) aplicadas, e não se mantêm constantes. Visto que alguns programas de retroanálise não levam em consideração essa não linearidade

das camadas, e um dos objetivos é relacionar esses módulos com os dados obtidos em laboratório, optou-se por adotar a média entre os módulos correspondentes às tensões aplicadas. Rocha (2020) afirma que, no contexto brasileiro, é comum fazer uso dessa média entre os módulos associados às tensões aplicadas no ensaio triaxial.

4.2.1. Trecho 1

No trecho 1, foram conduzidos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR) tanto na mistura asfáltica das amostras retiradas do pavimento existente quanto na mistura asfáltica de projeto, como pode ser observado na Tabela 27.

Tabela 27 - Resultados do RT e MR do revestimento asfáltico: trecho 1

Ensaio	Média dos valores obtidos			
	Ano 1 (2019)	Ano 2 (2021)	Ano 3 (2022)	Projeto
Resistência à tração (MPa)	1,50	1,49	1,53	1,09
Módulo de Resiliência (MPa)	7670	7760	6342	8833

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Ao examinarmos os resultados obtidos, observa-se que a resistência à tração permanece praticamente inalterada ao longo dos três anos de análise. No entanto, ao compará-la com a resistência de projeto, verifica-se uma discrepância de cerca de 0,40 MPa. É importante ressaltar que o valor mínimo estabelecido pela norma DNIT 031/2006 para a camada de rolamento é de 0,65 MPa, e esse parâmetro foi adequadamente atendido.

O módulo de resiliência de projeto foi determinado em laboratório, com a confecção de corpos de prova seguindo as especificações do projeto de mistura asfáltica. Assim, considera-se que este valor é referente ao ano em que o tráfego foi liberado, ou seja, 2015. Ao comparar o valor inicial de projeto com o valor obtido na primeira extração de 2019, verifica-se uma redução de 1.163 MPa, representando uma diminuição percentual de 15,16%. Em relação aos resultados encontrados ao longo dos monitoramentos subsequentes, observa-se um aumento praticamente insignificante no MR em 2021, seguido por uma diminuição em 2022. Esse valor pode ser atribuído ao aumento do percentual de área trincada (%AT), igual a 29,7%. De acordo com Bernucci *et al.* (2022), em situações de alta área trincada, é esperada uma diminuição no módulo de resiliência, o que se comprova nos estudos de Rocha *et al.* (2021) e Cavaleiro e Oliveira (2018).

4.2.2. Trecho 2

No trecho 2, assim como no trecho 1, foram realizados ensaios de Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR) e curva de fadiga do revestimento asfáltico. Adicionalmente, foi obtido o MR da camada de base (BGTC) e da sub-base. Na Tabela 28, estão apresentados os resultados dos dois últimos anos de monitoramento, uma vez que não foi possível coletar amostras no primeiro ano. Os valores de RT das amostras extraídas são idênticos, assim como os valores de MR, que estão próximos e coerentes com o curto período de serviço do pavimento, demonstrando um eficiente controle tecnológico durante a execução.

Tabela 28 - Resultados do RT e MR do revestimento asfáltico: trecho 2

Ensaio	Média dos valores obtidos		
	Ano 2 (2021)	Ano 3 (2022)	Projeto
Resistência à tração (MPa)	1,55	1,56	1,59
Módulo de Resiliência (MPa)	4926	5196	5124

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Figura 39, é apresentado o resultado da curva de fadiga da mistura conforme o projeto original, visando uma posterior análise de vida útil por meio do software MeDiNa. Nota-se que os coeficientes de regressão k_1 e k_2 possuem valores de $2,00E-16$ e $-4,804$, respectivamente. A partir desses resultados, foi possível determinar a classe de fadiga da mistura com base no FFM (Fator de Fadiga da Mistura), que foi categorizada como Classe 2. O módulo de resiliência obtido em laboratório e a Classe de fadiga da mistura, se mostraram semelhantes aos valores encontrados por Machado *et al.* (2020) em sua pesquisa. Conforme indicado por Fritzen *et al.* (2019), o autor da metodologia de classificação, classes mais elevadas estão associadas a um melhor desempenho da mistura em termos de resistência à fadiga.

Figura 39 - Curva de Wholer: número de aplicações versus deformação específica resiliente



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O módulo de resiliência da camada de base (BGTC) foi determinado, e obteve-se o valor médio de 15.928 MPa. Este valor está em consonância com o teor de cimento presente na composição, como evidenciado no Relatório Final da ANTT (2019), que apresentou resultados parecidos e com o estudo desenvolvido por Back (2022). Os parâmetros e o módulo de resiliência médio da sub-base da BR 230/PB, obtidos na análise do modelo composto, estão detalhadamente apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Valores dos coeficientes de regressão e MR médio do trecho 2

Parâmetros	Valores Obtidos
k_1	1497,99
k_2	0,3872
k_3	-0,2217
R^2	0,9749
$MR_{\text{médio}} \text{ (MPa)}$	815

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.3. RETROANÁLISE

Com o objetivo de determinar os módulos de resiliência das diversas camadas presentes nos pavimentos e validar os valores de módulo resiliência retroanalizados com dados de viga Benkelman, conduziram-se retroanálises utilizando dois *softwares* distintos: BackMeDiNa e BAKFAA. Inicialmente, no BackMeDiNa, executaram-se inúmeras retroanálises para cada bacia deflectométrica em todos os segmentos, com os valores de módulos iniciais de cada camada, variando de forma individual. Em seguida, dependendo do resultado dos módulos, era feita uma nova retroanálise. Adicionalmente, outra rodada de retroanálises foi realizada para todas as bacias utilizando o software BAKFAA, com o propósito de comparar os módulos obtidos com o BackMeDiNa.

Um dos objetivos específicos desta pesquisa é realizar a comparação entre os módulos retroanalizados com os obtidos *in situ*. Portanto, diferentemente das análises feitas em cada subtrecho para as deflexões, na retroanálise considerou-se o trecho homogêneo. Essa consideração foi devida ao número reduzido de corpo de corpos de prova extraídos nas rodovias, onde foi avaliado o MR médio para cada trecho. Portanto, não seria possível comparar a evolução dos módulos de resiliência em cada subtrecho homogêneo.

Como mencionado no item 2.3.2., os programas utilizados nesta pesquisa realizam a retroanálise com dados obtidos por meio do equipamento FDW. Assim, foram requeridas adaptações também nas deflexões, na carga, no raio e na posição das leituras, conforme a metodologia de Theisen *et al.* (2009). Embora as deflexões adaptadas representam apenas 50%

das deflexões originais, a manutenção do formato inalterado implica que a distribuição e a relação entre as deflexões ao longo da extensão da bacia permanecem consistentes. Isso é crucial para garantir que o comportamento das medidas de deslocamento vertical não seja distorcido ou alterado durante o processo de adaptação. Essa característica intrínseca da metodologia de adaptação torna-a especialmente benéfica ao converter medidas de deflexão obtidas com a viga Benkelman em valores de deflexão compatíveis e comparáveis em análises que utilizam o FWD, conforme observado por Vieira (2020), Nery (2020) e Boettcher (2023) em suas pesquisas. As deflexões adaptadas para o trecho 1 e 2, encontram-se no Apêndice C.

Os resultados encontrados de retroanálise para os dois trechos, com os valores de MR brutos, bem como as bacias deflectométricas teóricas, calculadas e os erros determinados encontram-se no Apêndice D e E.

4.3.1. Síntese das retroanálises

A retroanálise no BackMeDiNa é realizada por meio de múltiplos processos interativos, nos quais se busca determinar os módulos de resiliência que resultem em erros mínimos entre as distâncias medidas e as distâncias calculadas. Esse processo envolve iterações contínuas para otimizar os parâmetros e atingir uma correspondência precisa entre os dados medidos e os valores previstos. No entanto, em muitos casos, foram obtidos valores de módulo resiliência irreais ao serem comparados com valores típicos encontrados na literatura, com erros considerados insignificantes. Dessa forma, optou-se por adotar uma abordagem mais interativa, na qual a decisão de encerrar a retroanálise foi tomada com o objetivo de obter valores que pudessem ser considerados reais, assim como fez Boettcher (2023) em sua pesquisa.

Em função das deflexões serem obtidas com dados de viga Benkelman, mesmo com as adaptações realizadas, a retroanálise foi demorada já que os resultados das bacias requeriam mais iterações para convergir, que se justifica pela menor precisão no equipamento ao medir as deflexões. Nos momentos em que o erro não era reduzido e havia um aumento inconsistente nos valores de módulo, a retroanálise era refeita. Observando as tabelas contidas no Apêndice D, percebe-se que o erro máximo chegou até 33,90%, lembrando que esse foi um caso isolado. De modo geral, os erros maiores foram obtidos para o trecho 1, no ano de 2019.

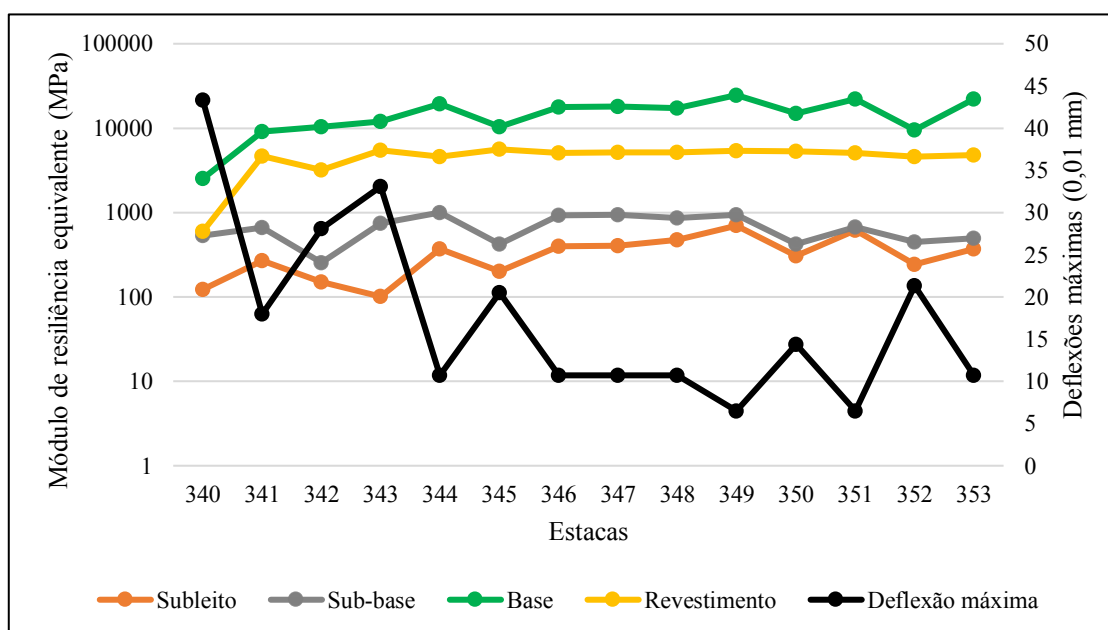
Já as retroanálises realizadas no BAKFAA, foram conduzidas com a ativação do botão “backcalculate” em cada iteração, até que os módulos resilientes gerassem as bacias calculadas com os menores erros. Durante a retroanálise, percebeu-se que os valores de módulo resiliência

das camadas de sub-base e subleito afetavam significativamente a curva da bacia, de modo que as mudanças no “módulo inicial” do revestimento influenciavam apenas na deflexão máxima. Após a devida adaptação das deflexões, verificou-se que, em termos gerais, os erros calculados no software BAKFAA foram substancialmente menores em comparação aos encontrados no BackMeDiNa, conforme evidenciado nas tabelas disponíveis no Apêndice E. Em resumo, como será abordado posteriormente com mais detalhes, os valores retroanalizados para o módulo de resiliência nos dois trechos apresentaram concordância entre os dois softwares.

Para exemplificar e analisar o comportamento dos módulos equivalentes obtidos para cada trecho, em diferentes softwares, nas Figuras 38 e 39, foram representados graficamente os módulos retroanalizados de cada camada do pavimento, bem como as deflexões máximas em cada estaca correspondente para o ano de 2021. Estes gráficos exibem os resultados obtidos por meio dos softwares BAKFAA e BackMeDiNa.

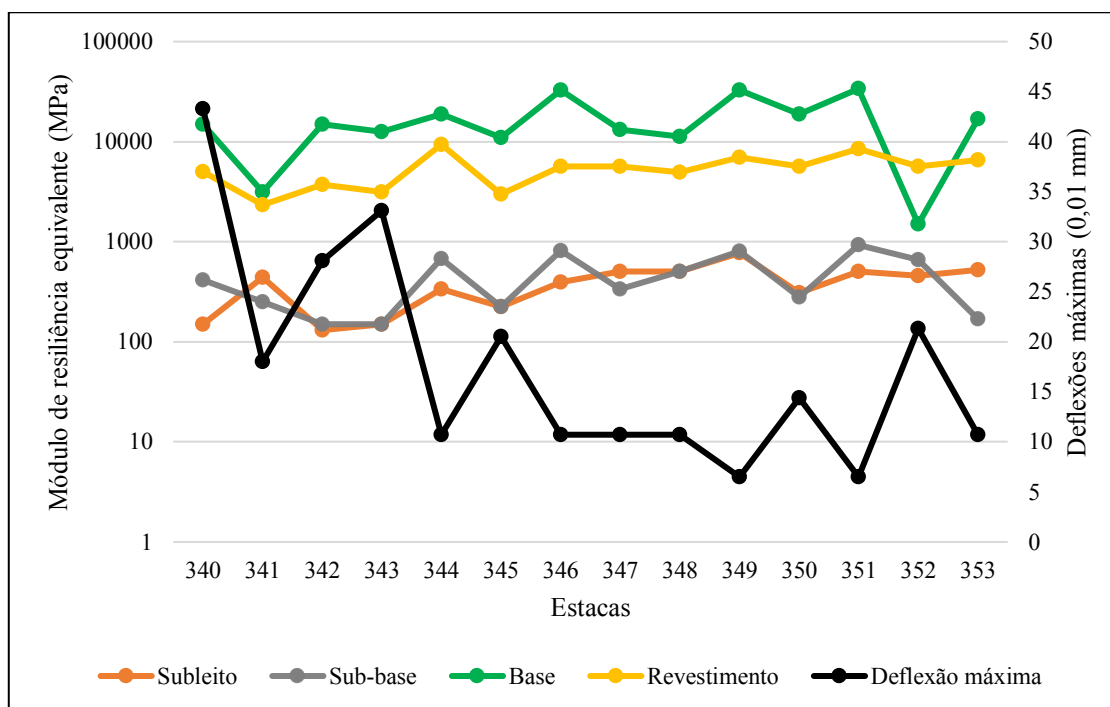
As Figuras 40 e 41 representam as deflexões máximas, para o Trecho 2, e os módulos equivalentes retroanalizados no BAKFAA e BackMeDiNa. Nota-se nas estacas 340, 345, 350 e 352, que à medida que a deflexão máxima aumenta, os valores de módulo tendem a diminuir. O contrário também se confirma nas estacas 341, 349 e 351, para os dois *softwares*. Ao realizar a comparação entre as figuras, torna-se evidente que o comportamento padrão observado é também documentado nos estudos conduzidos por Bueno (2016), Pandolfo *et al.* (2016), Vieira (2020), Nery (2020) e Boettcher (2023).

Figura 40 - Módulos equivalentes retroanalizados no BAKFAA: Trecho 2 (2021)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 41 - Módulos equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa: Trecho 2 (2021)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.3.2. Comparativo entre módulos de resiliência retroanalizados por dois softwares

A apresentação dos resultados referentes aos módulos resilientes retroanalizados será realizada de maneira segmentada para cada trecho e camada, nos três anos de monitoramento para o BackMeDiNa e BAKFAA. Inicialmente, para determinar a média dos valores de módulo de resiliência em cada camada do pavimento, foram gerados diagramas de caixa para identificar e remover pontos considerados discrepantes (*outlier*). Com base nos novos conjuntos de dados resultantes dessa depuração, conduziu-se uma análise estatística descritiva, que incluiu o cálculo do desvio padrão, do coeficiente de variação, do módulo característico e dos valores máximos e mínimos.

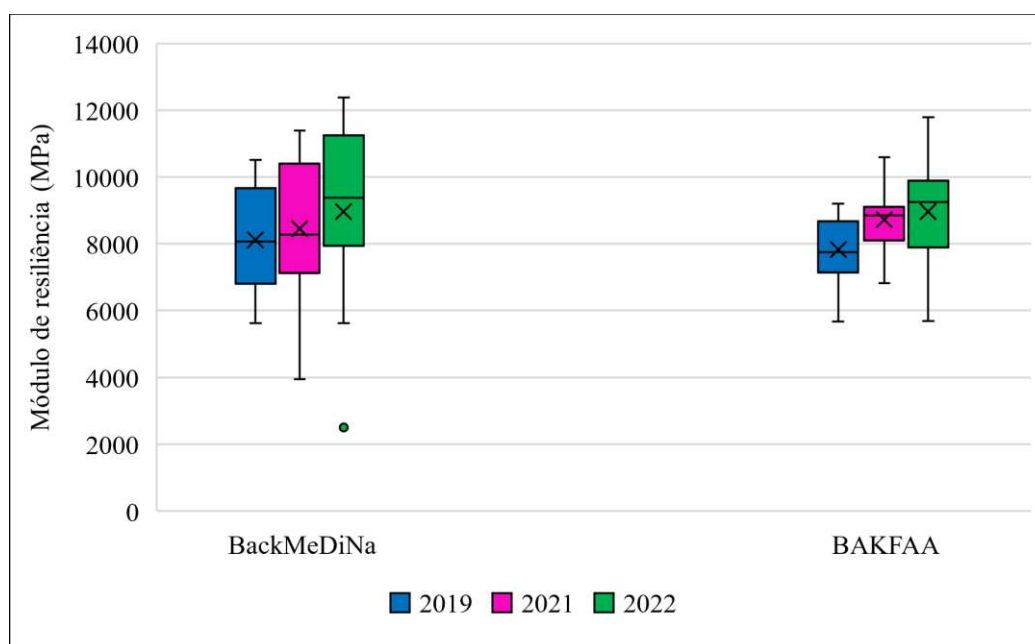
4.3.2.1. Trecho 1

O trecho 1, que pertence a rodovia PB 138, foi resumido em três camadas: revestimento asfáltico, sub-base e subleito. Vale destacar que a camada de base é composta pelo mesmo solo da sub-base, acrescido de 30% de areia. Portanto, considerou-se uma camada única como parte conjunta de 40 centímetros, seguindo a abordagem adotada por Bueno (2016) e Nery (2020) em suas pesquisas. Dessa forma, determinou-se um único valor de MR para os materiais da base e sub-base.

- Revestimento asfáltico

Quanto aos módulos retroanalizados da camada de revestimento, a Figura 42 apresenta uma análise comparativa usando diagramas de caixa para os valores obtidos a partir dos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA. Além disso, a figura indica e destaca pontos considerados *outlier*, ou seja, os valores distantes do resultado encontrado. É notável que as caixas referentes ao BAKFAA são mais estreitas, demonstrando uma menor dispersão entre os valores calculados em comparação com o BackMeDiNa, o qual nota-se a presença de um ponto de exceção para o ano de 2022, correspondente à estaca 62.

Figura 42 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de revestimento:



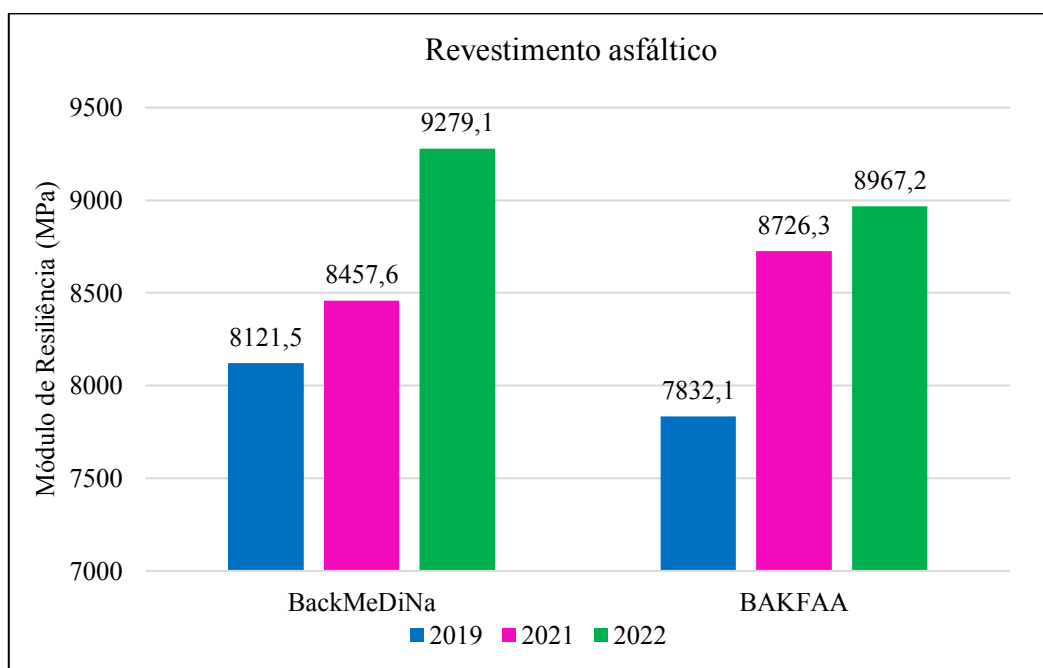
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Após a exclusão do ponto, foi realizada análise estatística descritiva dos dados. A Figura 43 apresenta um resumo dos módulos de resiliência médios obtidos com os dois programas computacionais durante os três anos de monitoramento. Verifica-se, que os valores de MR aumentam com o passar do tempo, indicando aumento na rigidez do pavimento e certa uniformidade nos valores determinados com diferentes programas. Destaca-se que o BAKFAA se mostrou mais conservador, com valores de módulo 10,6% e 9,6% menores, respectivamente, para o ano de 2019 e 2021, assim como mostrou as pesquisas desenvolvidas por Bueno (2016), Vieira (2020) e Boettcher (2023).

A rigidez da camada se alinha com os valores médios encontrados no Índice de Curvatura da Superfície (SCI), onde foi visto que a condição estrutural do pavimento está em

“alerta”, e com a curva de fadiga. Rocha *et al.* (2021), em sua pesquisa estudaram uma estrutura parecida e também encontraram módulos de resiliência que chegaram até aproximadamente 8.000 MPa, afirmando que a consideração de camadas “não aderidas” na retroanálise, para que possam reproduzir a mesma bacia de deflexão que em campo, levam a estruturas mais rígidas, ou seja, altos módulos de resiliência quando comparados a valores encontrados na literatura. Rocha (2020), obteve módulos retroanalizados pelo *software* BackMeDiNa que alcançaram 10.858 MPa e afirmou que esses valores altos de módulo são usualmente utilizados no Brasil, demonstrando camadas asfálticas antigas que enrijeceram por envelhecimento, como aconteceu com a PB 138.

Figura 43 - Comparativo para os MR médios da camada de revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Tabela 30 apresenta-se a análise estatística dos dados do MR da camada de revestimento, onde os seguintes pontos são observados:

- as diferenças entre as médias obtidas com os dois softwares variaram entre 289, 268 e 311 MPa, respectivamente, para os anos de 2019, 2021 e 2022, indicando a coerência, visto que os valores são próximos;
- no ano de 2021 a partir do BackMeDiNa, como pode-se identificar visualmente na Figura 41 amplitude do valor mínimo e máximo de módulos foi de 7.453 MPa, a maior entre as calculadas, com valor mínimo de 3.938 MPa e valor máximo de 11.391 MPa;

- os valores de desvio padrão se mostraram maiores e mais variáveis para o BackMeDiNa, como previsto pela dispersão de dado observado na Figura 40, e o BAKFAA constantes;
- os valores de módulos característicos se comportaram de maneira igual aos médios, mas com uma amplitude maior para os valores do BackMeDiNA, visto que o desvio padrão foi maior;
- em relação aos coeficientes de variação, os valores encontrados com o BackMeDiNa foram superiores ao BAKFAA, apresentaram valores que variaram de 19 a 35% e, para o BAKFAA, valores entre 11 e 17%. Bueno (2016), em sua pesquisa, também encontrou coeficientes de variação menores para o BAKFAA e a unicidade nos valores de módulo para os dois programas.

Tabela 30 - Módulos retroanalizados da camada de revestimento: trecho 1

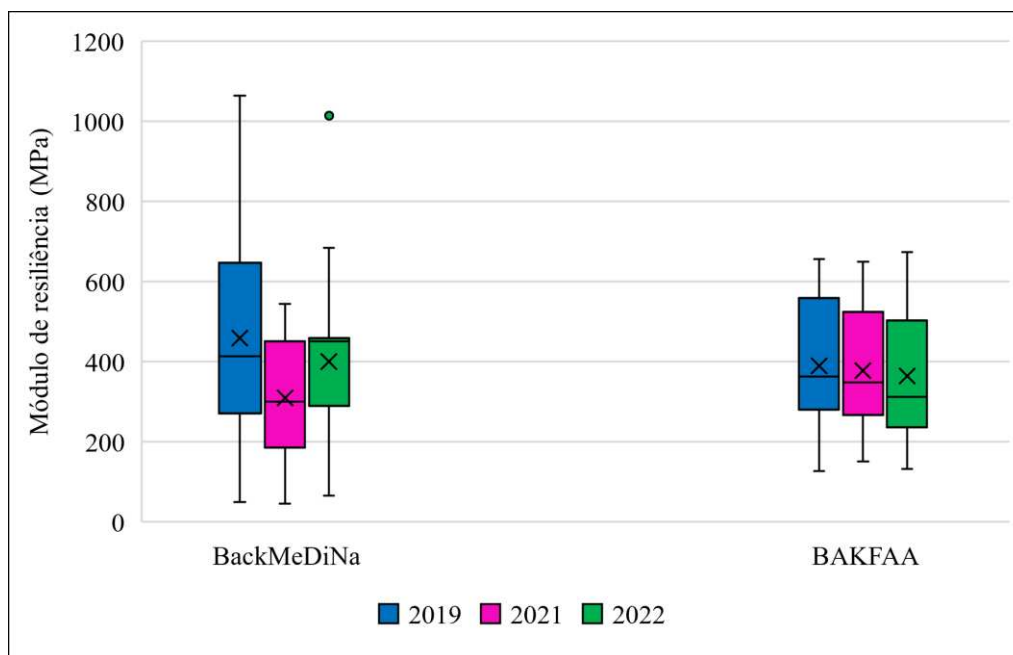
	BackMeDiNa			BAKFAA		
	2019	2021	2022	2019	2021	2022
Média	8121,5	8457,6	9279,1	7832,1	8726,3	8967,2
Desvio Padrão	1513,6	2122,0	1886,1	970,2	970,3	1531,3
Módulo característico	9635,1	10579,6	11165,2	8802,3	9696,6	10498,4
Módulo mínimo	5625,0	3938,0	5625,0	5666,0	6828,0	5690,0
Módulo máximo	10505,0	11391,0	12375,0	9204,0	10598,0	11793,0
C.V	19%	25%	20%	12%	11%	17%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Sub-base

Nas análises relativas à camada de sub-base, observa-se novamente uma maior dispersão dos dados de MR encontrados com o BackMeDiNa em comparação com o BAKFAA, que é notada pela grande amplitude entre os valores máximos e mínimos. Além disso, identifica-se um ponto muito extremo da média amostral para o ano de 2022, correspondente à estaca 63 avaliada no BackMeDiNa, conforme ilustrado na Figura 44. Este ponto foi excluído na análise estatística.

Figura 44 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de sub-base:
trecho 1



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

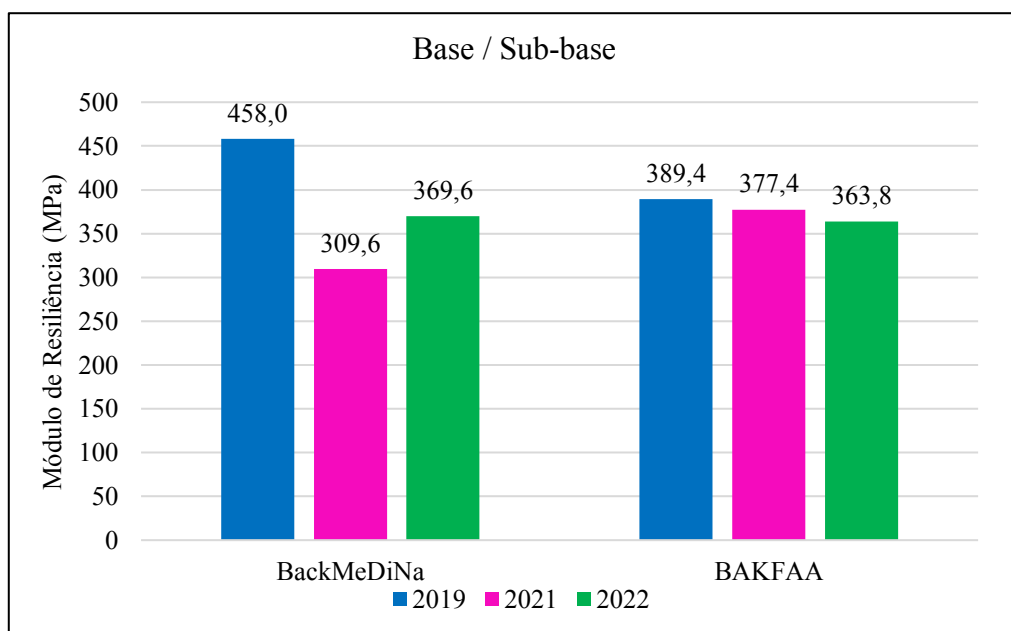
Observando a Figura 45, nota-se que os valores médios da camada de sub-base retroanalizados com o BAKFAA se comportaram de maneira progressiva decrescente, ou seja, os valores de módulo médio para sub-base no primeiro ano foi de 389,4 MPa e esse valor foi diminuindo, aproximadamente a 8%, até chegar em 2022 com valor igual a 363,8 MPa. Diferente do que aconteceu com o BackMeDiNa, o valor do MR médio no primeiro ano é maior que nos seguintes, e o ano de 2021 é o que apresenta menor valor. quando comparados ao Índice de Danos à Base (BDI), que apresentou valores acima do limite considerado seguro, verifica-se que a base encontra-se em estado de “alerta”.

Os valores de módulo se encontram dentro de limites esperados para camada de sub-base, sendo maiores que o mínimo sugerido de 150 MPa, conforme Souza Junior (2018). Bueno (2016), que também chegou a módulos parecidos para camada de base granular, afirma que esses valores são significativamente altos para as camadas de base e sub-base, quando comparados aos módulos resilientes clássicos, presentes na literatura. Mas, vale ressaltar que a base da PB 138 é composta pelo solo local acrescido de 30% de areia, o que eleva a resistência do material.

Além disso, percebe-se que o coeficiente de variação no ano de 2019 é 64% e o valor máximo é 1.064 MPa. Mesmo com todas essas ressalvas, de modo geral, os valores médios

obtidos com os dois softwares são semelhantes e coerentes com valores de módulo resiliente para sub-base encontrado por Nery (2020) e Rocha (2020), apresentando diferenças de 17,61%, 17,96% e 10,15%, respectivamente, para os anos de 2019, 2021 e 2022.

Figura 45 - Comparativo para os MR médios da camada de sub-base



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

As seguintes observações são notadas a partir da análise estatística resumida na Tabela 31, abaixo:

- Os valores médios de MR, para os dois softwares, se mantiveram entre 309,6 e 458,0 MPa;
- Os valores de desvio padrão foram praticamente constantes, variando de 147,1 e 173,7 MPa, com exceção do ano de 2019 onde obteve-se o valor de 295,1 MPa para módulos calculados com o BackMeDiNa;
- como explicado anteriormente, quando se avaliam os valores máximos e mínimos, a maior variação ocorre no ano de 2019 para o BackMeDiNa, alternando entre 50 e 1064 MPa. Porém, os valores para os três anos de monitoramento, obtidos com o BAKFAA, apresentam praticamente os mesmos valores mínimos e máximos, alternando entre 126 e 673 MPa;
- quanto aos coeficientes de variação, para os dois softwares, os valores foram próximos alternando entre 39 e 48% com exceção do ano de 2019, para o BackMeDiNa, que teve valor de 64%.

Tabela 31 - Módulos retroanalizados da camada de sub-base: trecho 1

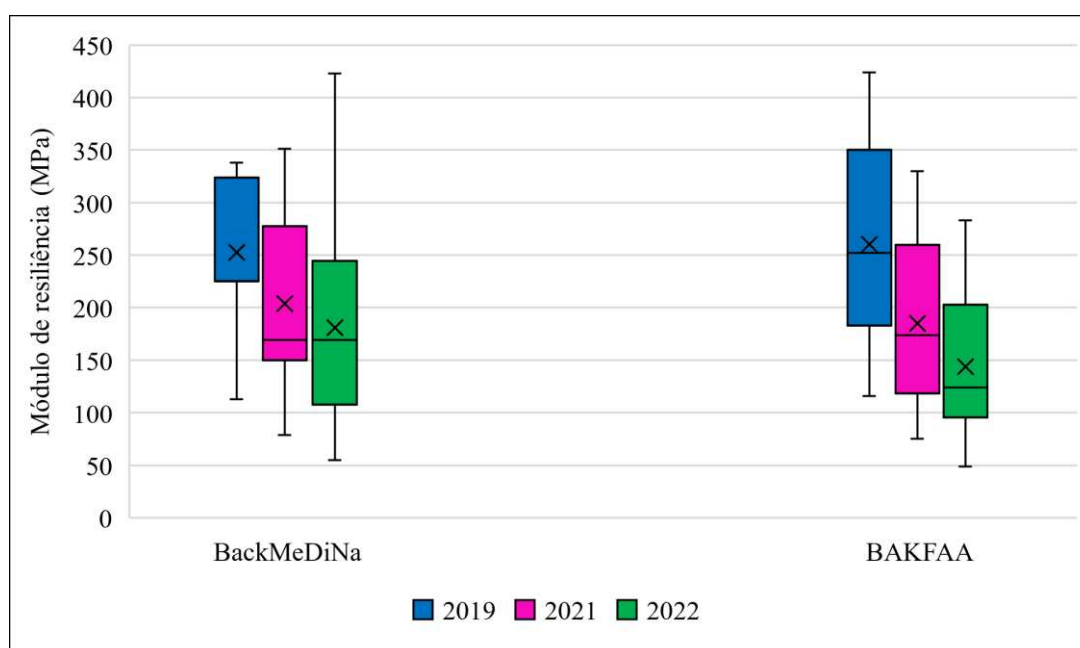
	BackMeDiNa			BAKFAA		
	2019	2021	2022	2019	2021	2022
Média	458,0	309,6	369,6	389,4	377,4	363,8
Desvio Padrão	295,1	148,7	173,7	156,2	147,1	163,4
Módulo característico	753,1	458,3	543,3	545,6	524,6	527,2
Módulo mínimo	50,0	46,0	66,0	126,0	151,0	132,0
Módulo máximo	1064,0	544,0	683,0	656,0	649,0	673,0
C.V	64%	48%	47%	40%	39%	45%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Subleito

Para camada de subleito, os resultados para os três anos, nos dois softwares, foram mais dispersos apresentando em seus diagramas, caixas mais alongadas com valores máximos e mínimos distantes, conforme a Figura 46. Também não foi observado nenhum ponto outlier para camada de subleito.

Figura 46 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de subleito: trecho 1



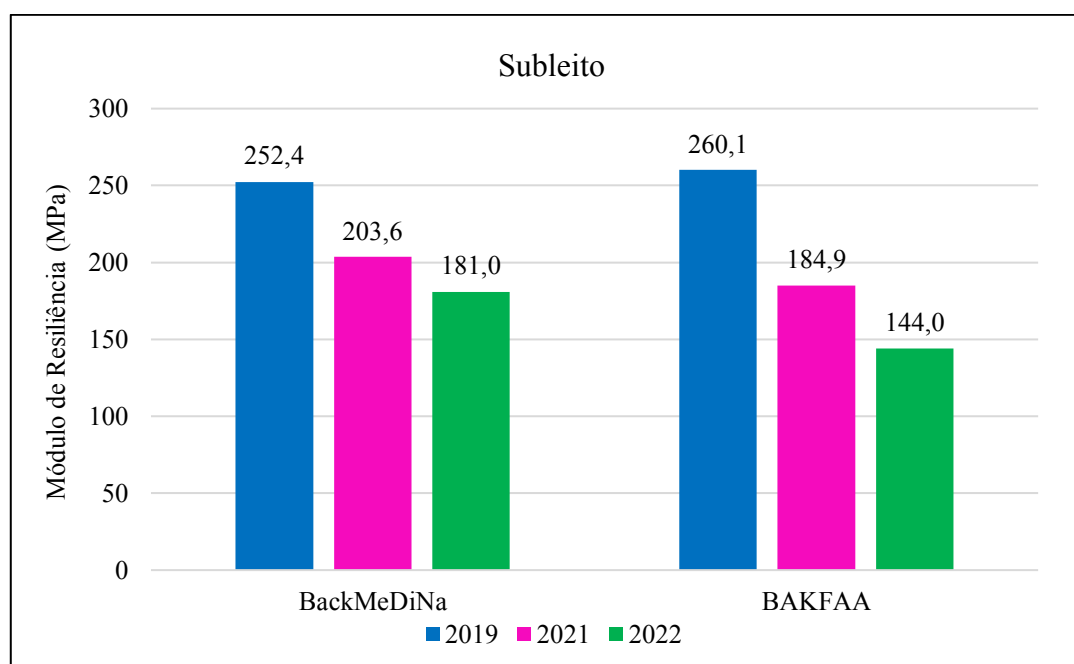
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 47 indica que os valores do subleito foram decrescendo a cada ano. Comparando os dois *softwares* verifica-se que, com exceção do ano de 2019, os valores encontrados com o BackMeDiNa são superiores aos do BAKFAA, na ordem de 11,01% e

25,69%. Os valores de MR médio em 2019 foram de 252,4 e 260,1 MPa, respectivamente, para o BackMeDiNa e BAKFAA, com diferença de apenas 7,7 MPa. Para os anos de 2021 e 2022, as diferenças foram de 18,7 e 37 MPa, respectivamente.

Esses valores de módulo são típicos para camadas de subleito, indicando que, como possuem MR baixos, as altas tensões geradas pelo tráfego são distribuídas de maneira eficaz até o subleito. O que faz sentido, visto que o módulo de resiliência com o passar do tempo reduz em 55,4% e o parâmetro BCI considerou a condição estrutural como “severa”. Rocha (2020), Nery (2020), Bueno (2016) e Boettcher (2023), chegaram a módulos de resiliência parecidos para camadas de subleito. Apesar de serem valores mais altos do que encontrados na literatura, acredita-se, assim como os autores citados, serem coerentes com o subleito da região em função dos resultados semelhantes encontrados por diferentes programas.

Figura 47 - Comparativo para os MR médios da camada de subleito



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Tabela 32, resume os dados estatísticos, onde observa-se:

- a variabilidade da amostragem foi parecida, visto que o desvio padrão para o BackMeDiNa variou entre 64,9 e 96,7 MPa, quando em comparação com o BAKFAA que variou entre 69,9 e 101,4 MPa;
- os valores mínimos e máximos, em todos os anos, foram praticamente iguais para os dois softwares, variando de 19 a 424 MPa. Entretanto, comparando os módulos máximos no BAKFAA, os valores foram decrescentes.

- os coeficientes de variação estiveram próximos aos encontrados por Nery (2020). Em sua pesquisa, a retroanálise com dados de viga Benkelman, os coeficientes de variação chegaram até 45% para camada de subleito.

Tabela 32 - Módulos retroanalizados da camada de subleito: trecho 1

	BackMeDiNa			BAKFAA		
	2019	2021	2022	2019	2021	2022
Média	252,4	203,6	181,0	260,1	184,9	144,0
Desvio Padrão	64,9	74,9	96,7	101,4	76,8	69,9
Módulo característico	317,3	278,5	277,66	361,5	261,6	214,0
Módulo mínimo	113,0	79,0	55,0	116,0	75,0	49,0
Módulo máximo	338,0	351,0	423,0	424,0	330,0	283,0
C.V	26%	37%	53%	39%	42%	49%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

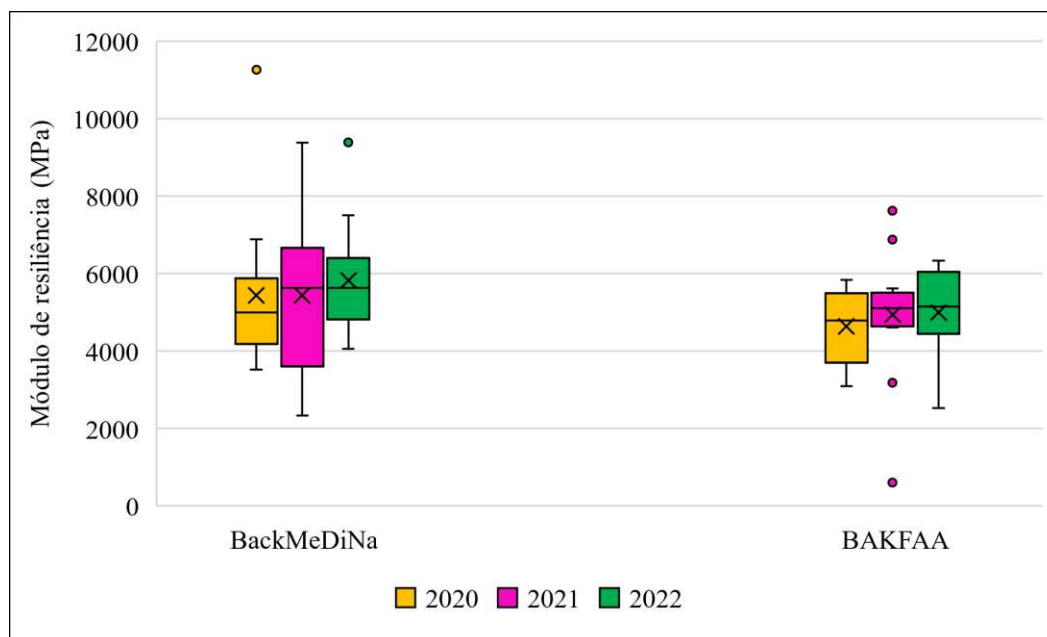
4.3.2.2. Trecho 2

A retroanálise do trecho 2, que faz parte da rodovia BR 230/PB, englobou as quatro camadas do pavimento: revestimento asfáltico, base, sub-base e subleito. Assim como no trecho 1, optou-se por tratar o trecho como homogêneo para possibilitar a determinação dos valores médios de módulo de resiliência.

- Revestimento asfáltico

No que diz respeito aos módulos retroanalizados da camada de revestimento, a Figura 48 oferece uma comparação por meio de diagramas de caixa entre os valores resultantes da utilização dos dois *softwares*. É notável que a caixa relacionada ao BackMeDiNa em 2019 é mais alongada indicando uma maior dispersão entre os valores, diferente das outras caixas que se apresentam mais estreitas. Adicionalmente, são identificados 2 pontos *outliers* sendo um em 2020 e outro em 2022, para o BackMeDiNa, correspondendo as estacas 341e 353. Já para o BAKFAA, em 2021, apresentou quatro pontos *outliers* referente as estacas 340, 342, 344 e 349. Todos esses pontos externos foram retirados para posterior análise estatística descritiva.

Figura 48 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de revestimento:
trecho 2

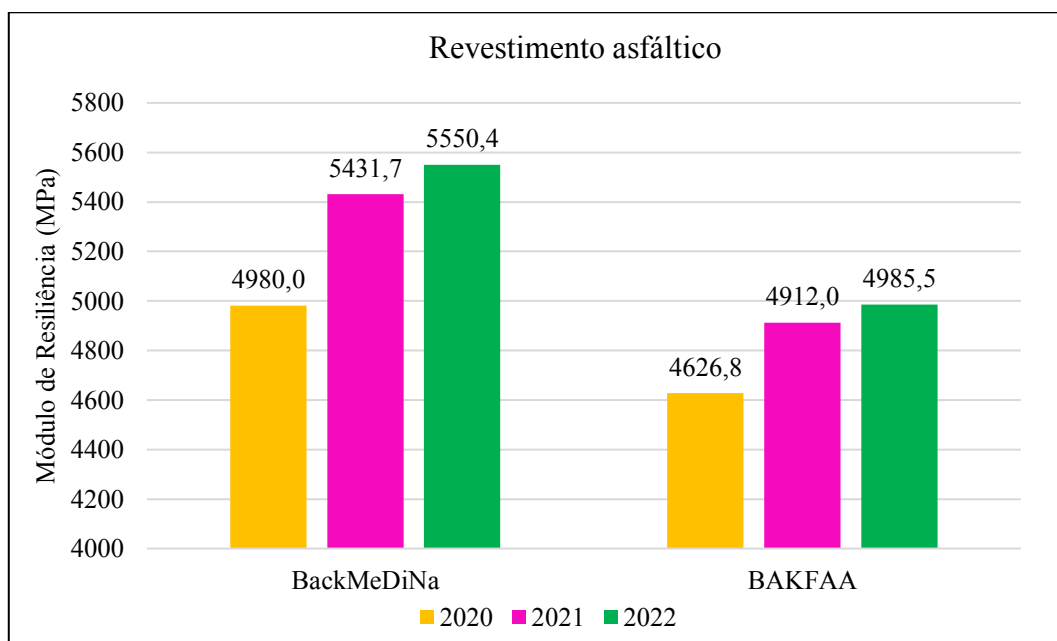


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 49 traz um comparativo entre os valores médios obtidos com o BackMeDiNa e o BAKFAA ao longo dos anos monitorados. Verifica-se que, assim como no trecho 1, os valores médios de cada ano para o BackMeDiNa foram superiores aos encontrados com o BAKFAA. No ano de 2019 a diferença foi de 7,63%, em 2020 foi de 10,58% e, por fim, em 2022 de 11,13%, ou seja, os dois *softwares* chegaram a resultados próximos. Quanto a evolução do módulo de resiliência, para os dois softwares, o valor de MR cresce com o aumento do tempo em serviço.

Porém, em oposto as outras camadas, os valores de módulos retroanalizados no BAKFAA foram superiores aos módulos obtidos no BackMeDiNa. O valor médio encontrado para o módulo de resiliência variou, ao longo dos anos, entre 4626,8 a 5550,4 MPa, corroborando com o valor esperado para uma camada com apenas dois anos de serviço. Os valores médios do SCI, reforçam esses resultados, pois estão dentro da faixa que é considerada segura em termos da capacidade estrutural do pavimento. Rocha (2020) encontrou resultados parecidos para módulos retroanalizados com o BackMeDiNa, afirmando que são revestimentos relativamente flexíveis e com módulos próximos ao da literatura. Boettcher (2023), assim como nessa pesquisa, obteve módulos maiores com o BackMeDiNa em relação ao BAKFAA.

Figura 49 - Comparativo para os MR médios da camada de revestimento asfáltico



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A análise estatística para os módulos de resiliência da camada de revestimento asfáltico é apresentada na Tabela 33, abaixo, em que se observa:

- as médias variaram entre 4980 e 5550,4 MPa para os módulos retroanalizados com o BackMeDiNa, amplitude de 570,4 MPa e, para o BAKFAA, variaram entre 4626,8 e 4985,5 MPa, alcançando amplitude de 358,7 MPa;
- o maior desvio padrão foi no ano de 2021 para os módulos retroanalizados no BackMeDiNa;
- os valores de módulo característico se comportaram de maneira diferente das médias, com valores desordenados, visto que os desvios padrões foram mais altos para cada amostra de dados;
- a amplitude dos valores máximos e mínimos do BAKFAA foi menor que do BackMeDiNa, com valores de 3.796 e 5.166 MPa, respectivamente;
- como esperado, apenas para o ano de 2021, no BackMeDiNa, o valor do coeficiente de variação foi alto com valor igual a 36%; no caso dos dois *softwares*, nos anos de 2020 e 2022 os coeficientes apresentaram valores iguais de 19% e 21%.

Tabela 33 - Módulos retroanalizados da camada de revestimento asfáltico: trecho 2

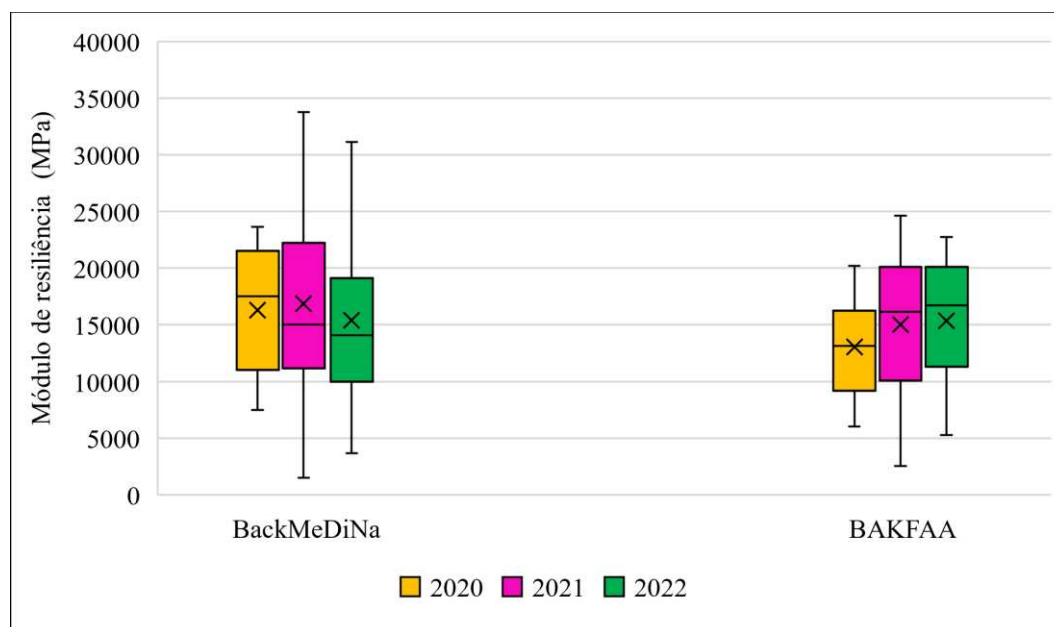
	BackMeDiNa			BAKFAA		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
Média	4980,0	5431,7	5550,4	4626,8	4911,5	4985,5
Desvio Padrão	960,5	1936,4	1055,5	959,3	621,4	1037,9
Módulo característico	5940,5	7368,2	6605,9	5586,0	5532,9	6023,4
Módulo mínimo	3516,0	2334,0	4050,0	3090,0	4610,0	2525,0
Módulo máximo	6883,0	9375,0	7500,0	5838,0	5610,0	6321,0
C.V	19%	36%	19%	21%	13%	21%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Base

Os resultados encontrados para o módulo de resiliência da camada de base, apresentam maior amplitude dos dados obtidos com o BackMeDiNa e todas as caixas se encontram alongadas indicando a dispersão dos dados, como indica a Figura 50. Verifica-se também que não há *outliers* nos dados encontrados. Dessa forma, prosseguiu-se para análise estatística.

Figura 50 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de base: trecho 2



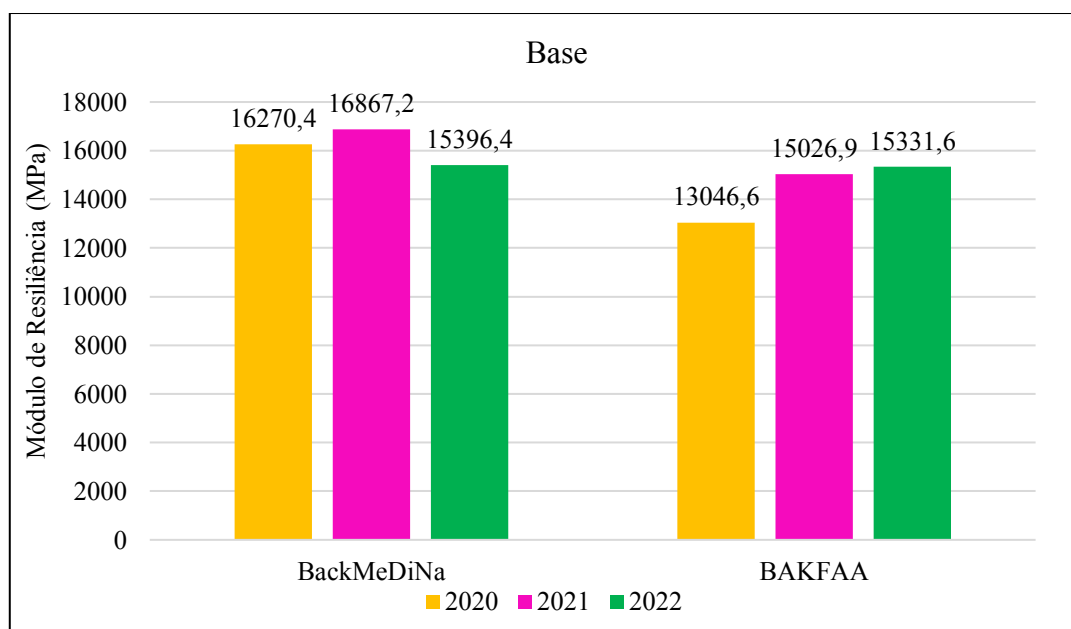
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme ilustrado na Figura 51, os valores obtidos com o BackMeDiNa são superiores ao BAKFAA, porém percebe-se que no decorrer dos anos, a variação é mínima de modo que a diferença se deve a variação de dados dentro de uma mesma amostra. O ano de 2019 apresentou maior disparidade entre os módulos, com o módulo calculado pelo BAKFAA sendo 24,7%

inferior ao obtido pelo BackMeDiNa. Em 2021, a diferença foi de 12,24%, e em 2022, foi de apenas 0,4%. O valor médio para camada de base, considerando a média entre os anos de cada programa, resulta em 16.178 para o BackMeDiNa e 14.468 para o BAKFAA.

Quanto ao valor médio, a camada de BGTC apresentou resultados típicos para composição com 2% de cimento, iguais a 16.178 e 14.468 MPa, respectivamente para o BackMeDiNa e BAKFAA. Esses valores estão em conformidade com a literatura e com a pesquisa desenvolvida por Back (2022). Rocha (2020), também obtém altos valores de módulo resiliência para camada de base, justificando-se pela presença do material estabilizado, e, portanto, com alta rigidez, corroborando com os resultados encontrados nesta pesquisa. O autor ainda afirma que nesse tipo de estrutura (pavimento semirrígido), a linha neutra que fica predominantemente no revestimento, pode se deslocar para camada de base e alterar os esforços de compressão e tração no pavimento.

Figura 51 - Comparativo para os MR médios da camada de base



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Percebe-se, analisando a Tabela 34, que:

- os valores de desvio padrão nos anos 2021 e 2022, para o BackMeDiNa, foram 9.749,2 e 7.173,2 MPa, bem maiores que os demais para os dois softwares;
- os módulos característicos variaram de 21.723,4 e 26.616,4 com o BackMeDiNa e, de 17145 e 2107 MPa com o BAKFAA, ambos com mesma amplitude;

- os módulos mínimos e máximos retroanalizados com o BackMeDiNa foram de 1.500 a 33.750 MPa e, para o BAKFAA, 2525 a 24.647 MPa;
- os coeficientes de variação do BAKFAA foram inferiores aos obtidos com o BackMeDiNa, com valor mínimo de 34% e máximo de 58%.

Tabela 34 - Módulos retroanalizados da camada de base: trecho 2

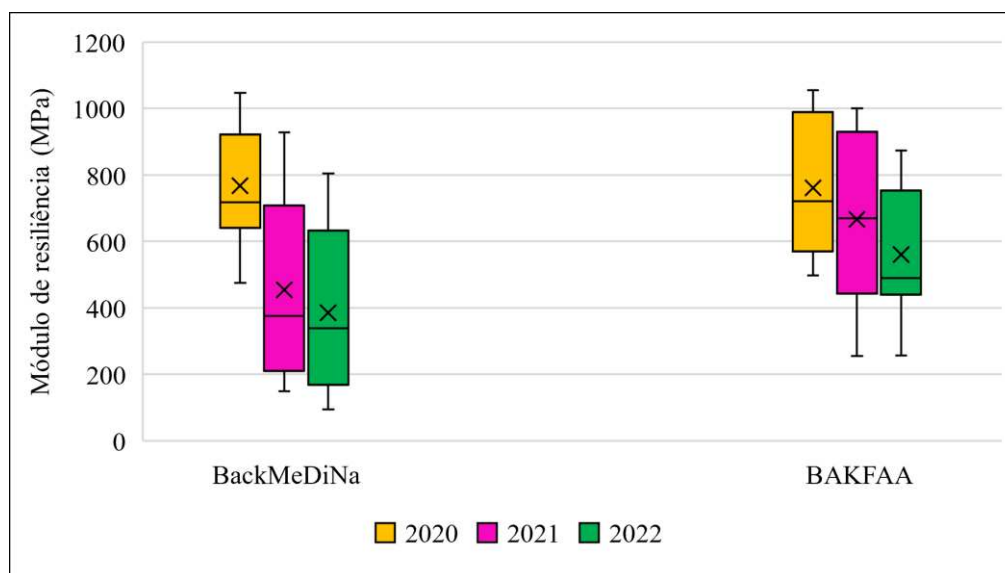
	BackMeDiNa			BAKFAA		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
Média	16270,4	16867,2	15396,4	13046,6	15026,9	15331,6
Desvio Padrão	5453,1	9749,2	7173,2	4098,5	6045,2	5548,5
Módulo característico	21723,4	26616,4	22569,6	17145,0	21072,0	20880,1
Módulo mínimo	7500,0	1500,0	3678,0	6050,0	2525,0	5255,0
Módulo máximo	23625,0	33750,0	31125,0	20200,0	24647,0	22739,0
C.V	34%	58%	47%	31%	40%	36%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Sub-base

Da mesma forma que na camada de base, não foram identificados pontos discrepantes nos dados obtidos pelos *softwares* de retroanálise, como indica a Figura 52. Em relação à forma das caixas, percebe-se que todas se encontram alongadas, indicando a dispersão dos dados encontrados tanto no BackMeDiNa quanto no BAKFAA.

Figura 52 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalizados da camada de sub-base: trecho 2

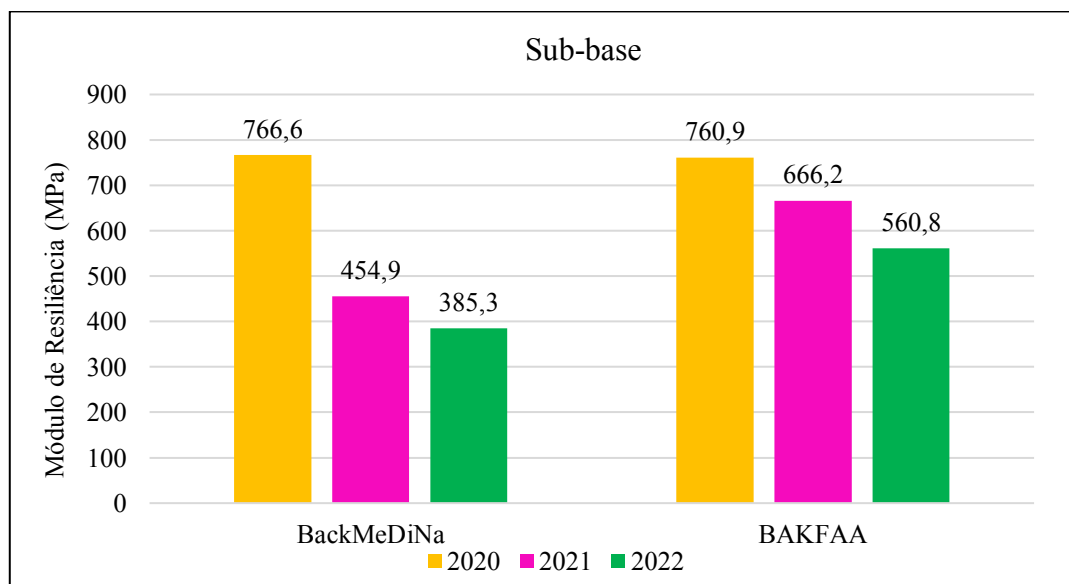


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme representado na Figura 53, no ano de 2020, ambos os *softwares* apresentaram valores de MR parecidos, com diferença de apenas 0,7%, registrando 766,6 e 760,9 MPa. No entanto, nos anos subsequentes, os valores de MR obtidos com o BackMeDiNa foram consistentemente inferiores aos do BAKFAA, com diferenças significativas de 31,71% e 31,29% (correspondendo a 211,3 e 175,5 MPa) nos anos de 2021 e 2022, respectivamente.

Entretanto, vale ressaltar que os valores dos coeficientes de variação nesses dois últimos anos foram consideravelmente altos nas retroanálises feitas no BackMeDiNa. Verificou-se uma redução significativa do módulo de resiliência do primeiro para o segundo ano. Esse comportamento tem coerência com os resultados do Índice de Danos à Base (BDI), que indicaram a condição de “alerta” nos dois últimos anos. Além disso, o primeiro monitoramento ocorreu simultaneamente à liberação do tráfego, o que significa que a estrutura estava sendo solicitada. Rocha (2020) também ressalta que essa diminuição da sub-base pode ser justificada pelo baixo confinamento ou estar submetida à esforços de tração, que geram rupturas localizadas e diminuem seu módulo de resiliência.

Figura 53 - Comparativo para os MR médios da camada de sub-base



A Tabela 35 apresenta a estatística descritiva para os módulos de resiliência calculados para a sub-base, onde observa-se:

- as médias variaram entre 385,3 e 766,6 MPa para as retroanálises feitas no BackMeDiNa, e 560,8 e 760,9 MPa para as retroanálises feitas no BAKFAA;
- os valores de desvio padrão, para os dois softwares, foram próximos variando de 182,2 a 264,3 MPa;

- os módulos característicos apresentaram a mesma tendência que os valores médios, em valores parecidos no ano de 2019, que decrescem em 2021 e 2022;
- o coeficiente de variação para os anos de 2021 e 2022 obtidos com os dados reanalisados pelo BackMeDiNa, foi o que se destacou com valor de 58%, bem acima dos outros que variaram de 24% a 35%.

Tabela 35 - Módulos retroanalisados da camada de sub-base: trecho 2

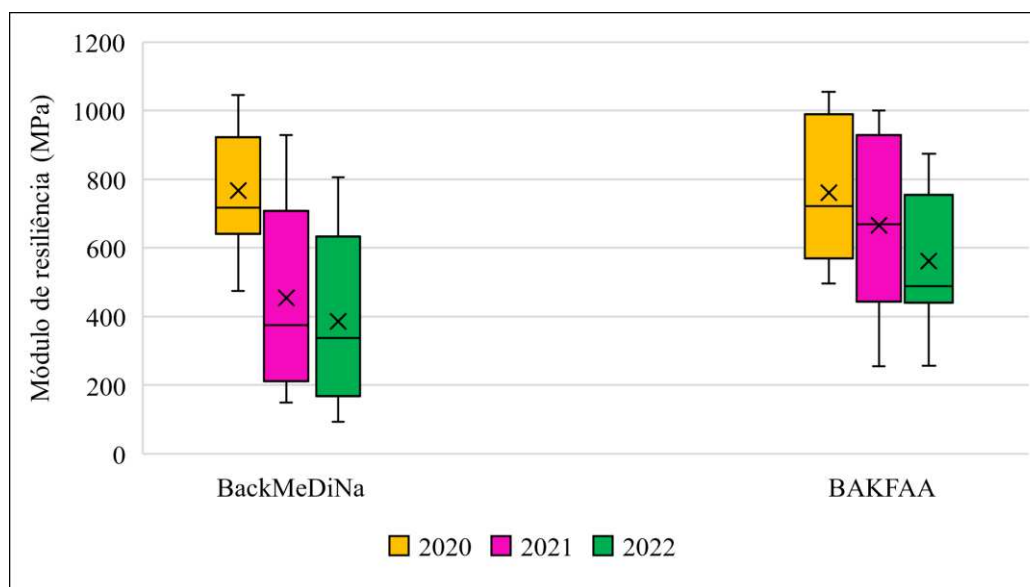
	BackMeDiNa			BAKFAA		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
Média	766,6	454,9	385,3	760,9	666,2	560,8
Desvio Padrão	182,5	264,3	224,4	191,8	232,1	176,5
Módulo característico	949,1	719,2	609,7	952,7	898,3	737,3
Módulo mínimo	475,0	150,0	94,0	497,0	255,0	257,0
Módulo máximo	1046,0	928,0	805,0	1055,0	1000,0	874,0
C.V	24%	58%	58%	25%	35%	31%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Subleito

No que diz respeito aos módulos retroanalisados para camada de subleito, a Figura 54 indica que os dados nos anos de 2021 e 2022 foram mais dispersos que os dados em 2020, além disso não foi obtido nenhum ponto *outlier*.

Figura 54 - Diagramas de caixa para os módulos retroanalisados da camada de subleito: trecho 2

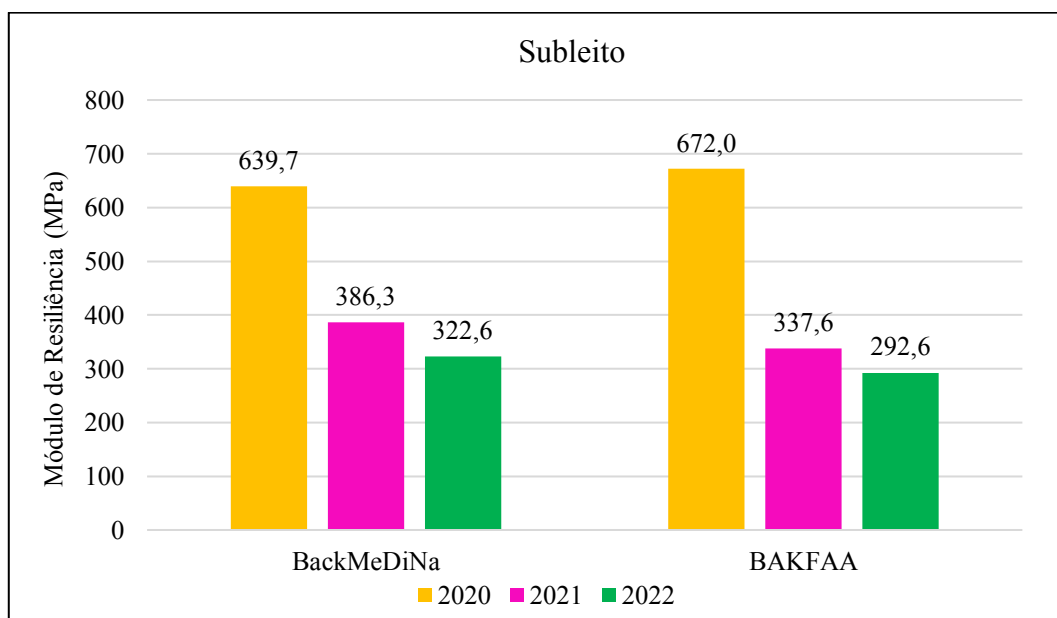


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 55, traz a média dos MR obtidos com os dois *softwares*, no decorrer dos três anos de monitoramento. Observa-se que os valores obtidos com o BackMeDiNa em 2020, 2021 e 2022 coincidem com os dados encontrados pelo BAKFAA, apresentando pequenas diferenças percentuais na ordem de 4,8%, 14,4% e 11,02%. Isso indica uma coerência consistente entre os dados. No ano de 2020, o módulo de resiliência para a camada de subleito foi de 639,7 e 672,0 MPa, respectivamente, para o BackMeDiNa e o BAKFAA. Em 2021, esses valores foram de 386,3 e 337,6, e, por fim, em 2022, registraram-se 322,6 e 292,6 MPa para ambos os programas, respectivamente.

A camada de subleito teve seus resultados e comportamentos parecidos com a camada de sub-base. Os valores iniciais em 2020, são completamente distantes dos encontrados na literatura para o tipo de material constituinte, porém, nos anos seguintes, esses valores diminuem e se aproximam mais da realidade, apesar de serem módulos relativamente altos para a camada de subleito. Essas diferenças indicam que a camada está sofrendo as solicitações do tráfego, as ações do intemperismo e, provavelmente, como disse Rocha (2020), submetidas à esforços de tração.

Figura 55 - Comparativo para os MR médios da camada de subleito



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

As análises estatísticas foram realizadas e seus resultados são apresentados na Tabela 39, onde observa-se:

- os valores de desvio padrão para os MR retroanalizados no BackMeDiNa variaram entre 175,1 e 212,0 MPa, e para o BAKFAA entre 170,5 e 207,7 MPa;

- os módulos característicos apresentam a mesma tendência dos valores médios;
- os valores máximos e mínimos, para os dois *softwares*, nos anos de 2020, 2021 e 2022 são parecidos, apontando a coerência entre os programas;
- os coeficientes de variação, no ano de 2020 foram os menores sendo iguais a 29 e 31%, em 2021 iguais a 45 e 51%, e em 2022 foram obtidos os maiores coeficientes iguais a 66 e 64%.

Tabela 36 - Módulos retroanalizados da camada de subleito: trecho 2

	BackMeDiNa			BAKFAA		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
Média	639,7	386,3	322,6	672,0	337,6	292,6
Desvio Padrão	188,3	175,1	212,0	207,7	170,5	188,6
Módulo característico	828,0	561,4	534,7	879,7	508,2	481,2
Módulo mínimo	338,0	131,0	75,0	303,0	101,0	80,0
Módulo máximo	951,0	771,0	771,0	977,0	698,0	780,0
C.V	29%	45%	66%	31%	51%	64%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.3.3. Relação entre módulos retroanalizados e módulos obtidos em laboratório

Com o propósito de realizar uma análise comparativa e avaliar a correspondência entre os módulos retroanalizados pelos softwares BackMeDiNa e BAKFAA e os obtidos por meio de ensaios de laboratório, foi decidido utilizar os valores médios das amostras extraídas, abrangendo a totalidade do módulo do segmento. Essa abordagem foi adotada devido à restrição em relação à quantidade limitada de amostras disponíveis para análise.

Infelizmente, como delineado na seção correspondente da metodologia, para o trecho 1, as análises comparativas se limitaram à camada de revestimento asfáltico durante os três anos de monitoramento. Por outro lado, para o trecho 2, tornou-se possível realizar comparações abrangendo as camadas de revestimento asfáltico, base e sub-base.

4.3.3.1. Trecho 1

Com base na Tabela 37, verifica-se, para os dois softwares, que os valores do módulo de resiliência retroanalizados, em 2019, apresentaram diferenças baixíssimas quando comparadas ao módulo obtido em laboratório. No ano seguinte, os módulos encontrados tenderam a aumentar, de modo que o módulo obtido através das amostras extraídas não cresceu

na mesma proporção que o módulo retroanalisado. Esse fator gerou diferenças de 8,24% e 11,07%, maiores que em 2019, porém ainda pequenas. Por fim, no último ano, o módulo de resiliência das amostras extraídas foi reduzido, diferentemente do que ocorreu na retroanálise.

Essas diferenças, consideráveis, podem ser justificadas por duas causas: pelo valor do percentual de área trincada levantada em 2022 que foi de 29,7%, ou seja, quando o %AT aumenta, significa que o revestimento está sendo degradado pela repetição das cargas impostas pelos veículos e assim, o módulo de resiliência tende a diminuir, como observado na pesquisa desenvolvida por Costa *et al.* (2015), em que trechos monitorados com trincas transversais e longitudinais reduziram o MR do revestimento; e, pelo valor médio considerado no MR da retroanálise, visto que em algumas estacas o MR apresentou comportamento diferente de todo o trecho. Rocha (2020), em sua pesquisa, também observou que módulos mais baixos, indicaram segmentos mais flexíveis e deteriorados, corroborando com os valores de área de trincada superiores à 24%.

Tabela 37 - Módulos retroanalisados e obtidos em laboratório: revestimento (trecho 1)

Ano	BackMeDiNa			BAKFAA		
	Retroanálise	Laboratório	%	Retroanálise	Laboratório	%
2019	8121,5	7670	-5,88%	7832,1	7670	-2,06%
2021	8457,6	7760	-8,24%	8726,3	7760	-11,07%
2022	9279,1	6342	-31,65%	8967,2	6342	-20,27%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.3.3.2. Trecho 2

A Tabela 38, apresenta uma comparação entre os módulos obtidos por meio de retroanálise e os obtidos em laboratório para a camada de revestimento asfáltico. É importante destacar que, no ano de 2020, os valores de módulo obtidos em laboratório foram resultantes de corpos de prova moldados de acordo com o traço de projeto, uma vez que a extração de amostras não foi autorizada devido à liberação do trecho. Dessa forma, verifica-se que no primeiro ano, a retroanálise realizada no BackMeDiNa se aproximou mais do MR de projeto, com uma diferença percentual de apenas 2,89%.

A partir do segundo ano de monitoramento, os valores de módulo de resiliência obtidos em laboratório foram determinados a partir de amostras extraídas. Nota-se que esses valores são menores em comparação ao ano de 2020, mas há uma coerência, visto que a tendência do módulo foi aumentar com o passar do tempo. Comparando os valores *in situ* e da retroanálise, percebe-se que o software BAKFAA forneceu valores médios mais próximos dos valores de

laboratório. Em resumo, as pequenas diferenças observadas sugerem que as retroanálises realizadas em ambos os softwares demonstraram eficácia.

Tabela 38 - Módulos retroanalizados e obtidos em laboratório: revestimento (trecho 2)

Ano	BackMeDiNa			BAKFAA		
	Retroanálise	Laboratório	%	Retroanálise	Laboratório	%
2020	4980,0	5124	2,89%	4626,8	5124	10,74%
2021	5431,7	4926	-9,31%	4912,0	4926	0,28%
2022	5550,4	5196	-6,38%	4985,5	5196	4,22%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os módulos de resiliência da camada de base e sub-base foram determinados por meio de ensaios laboratoriais utilizando materiais coletados no trecho de estudo. Como mencionado anteriormente, a análise revelou que os valores dos módulos de resiliência da camada de base se mantiveram praticamente constantes ao longo dos anos de monitoramento. Diante dessa constância, procedeu-se à obtenção da média desses valores com o propósito de estabelecer uma base de comparação com os resultados obtidos por meio de ensaios laboratoriais.

As discrepâncias identificadas nos módulos de resiliência da camada de base revelaram-se insignificantes, sobretudo no caso do BackMeDiNa, onde as diferenças foram particularmente mínimas, igual a 1,54%. É relevante ressaltar que a disparidade de 9,17% observada no módulo médio do BAKFAA poderia ter sido ainda menor, se não fosse pelo fato de que, no ano de 2020, o valor do módulo retroanalizado apresentou uma considerável variação em relação aos valores dos demais anos.

Tabela 39 - Módulos retroanalizados e obtidos em laboratório: base e sub-base (trecho 2)

Camada	BackMeDiNa			BAKFAA		
	Retroanálise	Laboratório	%	Retroanálise	Laboratório	%
Base	16178,25	15928	-1,54%	14468,36	15928	9,17%
Sub-base	766,6	815	6,31%	760,9	815	7,11%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

No que diz respeito à camada de sub-base, as amostras de solo coletadas correspondem ao primeiro ano de monitoramento. Portanto, para fins de comparação, os resultados dessas amostras foram confrontados com as retroanálises realizadas no ano de 2020, como evidenciado na Tabela 39. Esse procedimento foi adotado devido à disponibilidade limitada de amostras representativas da camada de sub-base nos anos subsequentes.

As discrepâncias entre os valores retroanalizados e aqueles obtidos em laboratório no ano de 2020 também se mostraram reduzidas e praticamente equivalentes entre si, com diferenças percentuais de 6,31% e 7,11%, para o BackMeDiNa e para o BAKFAA, respectivamente. Essa concordância reforça a eficácia da técnica de retroanálise, mais uma vez demonstrando sua utilidade no contexto da análise de pavimentos.

Rocha (2020), também comparou valores de módulo resiliência retroanalizados e obtidos em laboratório, entretanto o autor não comparou com o módulo médio de todo o segmento, e sim, a cada estaca. Os módulos retroanalizados, para camada de revestimento asfáltico, foram inferiores aos obtidos em laboratório, já para as camadas subsequentes, os módulos da retroanálise se mostraram superiores. As diferenças são atribuídas à presença de trincas ao longo da rodovia e ao fato das distintas condições de contorno do ensaio triaxial dinâmico em relação as observadas em campo.

4.3.4. Correlações entre deflexões máximas e módulos de resiliência retroanalizados

Visando a busca de modelos de regressão, foram feitas comparações entre valores de módulo de resiliência equivalentes obtidos pelos softwares BackMeDiNa e BAKFAA com as deflexões máximas medidas com o equipamento viga Benkelman, para cada camada estrutural do pavimento, a fim de verificar a existência de correlações entre as variáveis e o tipo de influência de uma variável na outra.

Dessa forma, para cada trecho e camada, foram calculados o coeficiente de correlação Pearson (r), criado o gráfico de dispersão com o modelo de regressão e o coeficiente de determinação, bem como a análise de significância dos dados com um nível de confiança de 95%. De acordo com Montgomery e Ruger (2018), valores de coeficientes de Pearson maiores que 0,8 indicam uma correlação “forte”; valores entre 0,5 e 0,8 indicam correlações “moderadas”; e, coeficientes abaixo de 0,5 são consideradas “fracas”.

Por fim, para correlações fortes e significativas, avaliou através da análise de resíduos se os modelos de regressão obtidos são realmente adequados. Myung *et al.* (2003), explicam que a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) é um dos critérios quantitativos para selecionar o melhor modelo. Quanto menor for o valor da SQR, mais próximos estão os valores estimados dos valores reais. Assim, foi calculado a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE – Root Mean Square Error) que indica o desvio médio entre os valores reais e os previstos, que é justamente o resíduo.

Nery (2020), em sua pesquisa, obteve correlações significantes e fortes entre as deflexões máximas e os módulos retroanalizados pelo BackMeDiNa com dados de viga Benkelman. No Quadro 2, abaixo, verifica-se as equações de regressão, e observa-se que foram encontradas mais equações para as camadas granulares do que para o revestimento asfáltico, da mesma forma que nesse estudo, como será evidenciado a seguir.

Quadro 2 - Modelos de regressão para cada camada do pavimento.

Camada	Modelo	R ²
Revestimento Asfáltico	$y = -327,06x + 22709$	0,64
Base	$y = -23,602x + 1686,3$	0,62
	$y = -38,242x + 1767$	0,71
Sub-base	$y = -16,7x + 1150,8$	0,63
	$y = -25,981x + 1181$	0,64
	$y = -3,7158x + 299,97$	0,65
Subleito	$y = -4,4394x + 337,58$	0,60
	$y = -5,9284x + 366,86$	0,62

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

4.3.4.1. Trecho 1

No trecho 1, foi possível determinar as correlações entre as deflexões obtidas com a viga Benkelman e os módulos retroanalizados pelos softwares BackMeDiNa e BAKFAA. Em todas as análises, as variáveis tiveram uma associação negativa, ou seja, à medida que os valores de deflexões diminuem os módulos de resiliência aumentam, esse resultado também foi encontrado por Nery (2020).

As correlações para camada de revestimento asfáltico não foram satisfatórias, quando se compara as outras camadas, visto que os coeficientes de determinação resultaram em valores baixos. Assim, apenas uma equação modelo foi determinada com 57% de representação da variação do MR em função das deflexões, sendo esses módulos obtidos pelo BAKFAA.

Para as camadas de sub-base e subleito, foram encontradas relações moderadas, fortes e significativas, para os dois softwares, com valores de coeficientes de determinação (R²) que chegam até 87%. Percebe-se que todas as regressões realizadas com os dados de MR do BAKFAA são mais significantes e assertivas do que com os dados do BackMeDiNa. Essa constatação corrobora com os resultados encontrados anteriormente e pode ser explicada

quando associadas aos valores dos erros RMS (%) obtidos nas retroanálises do BackMeDiNa, que foram muito maiores quando comparados ao do BAKFAA.

Verifica-se, através das Equações 11, 12, 13 e 14 as melhores correlações obtidas a partir da regressão linear entre duas variáveis.

Revestimento:

$$M_{r_{\text{BAKFAA}}} = - 47,677D_0 + 9448,6 \quad R^2 = 0,57 \quad (11)$$

Sub-base:

$$M_{r_{\text{BackMeDiNa}}} = -8,0893D_0 + 633,04 \quad R^2 = 0,75 \quad (12)$$

$$M_{r_{\text{BAKFAA}}} = - 9,5375D_0 + 712,75 \quad R^2 = 0,87 \quad (13)$$

Subleito:

$$M_{r_{\text{BAKFAA}}} = - 4,4136 D_0 + 361,32 \quad R^2 = 0,83 \quad (14)$$

- Revestimento asfáltico

Inicialmente, foram determinados os coeficientes de Pearson (r) para avaliar se havia correlação entre as variáveis e de que maneira estavam relacionadas. Em seguida, o F de significação foi obtido para comprovar a probabilidade dessa relação ser significativa. A Tabela 40, mostra as correlações obtidas para camada de revestimento asfáltico para os dois softwares.

Percebe-se, com exceção do ano 2021 para o BackMeDiNa que não obteve correlação, que todos os coeficientes obtidos para os dois softwares resultaram em valores negativos, ou seja, as variáveis estão inversamente relacionadas de modo que à medida que os valores da deflexão aumentam, os valores de módulo resiliência diminui. Entretanto, das cinco correlações obtidas, quatro se apresentaram “fracas”, resultado que é confirmado com a não significância.

Apenas para as leituras de 2019 e os módulos retroanalizados pelo BAKFAA foi possível encontrar uma correlação moderada e significativa, com valor F ($F_{\text{significância}}$) bem inferior a $\alpha = 0,05$. Mesmo sabendo que a equação de regressão não seria utilizável, os gráficos de dispersão foram feitos para identificar melhor o comportamento dos dados e verificar os coeficientes de determinação.

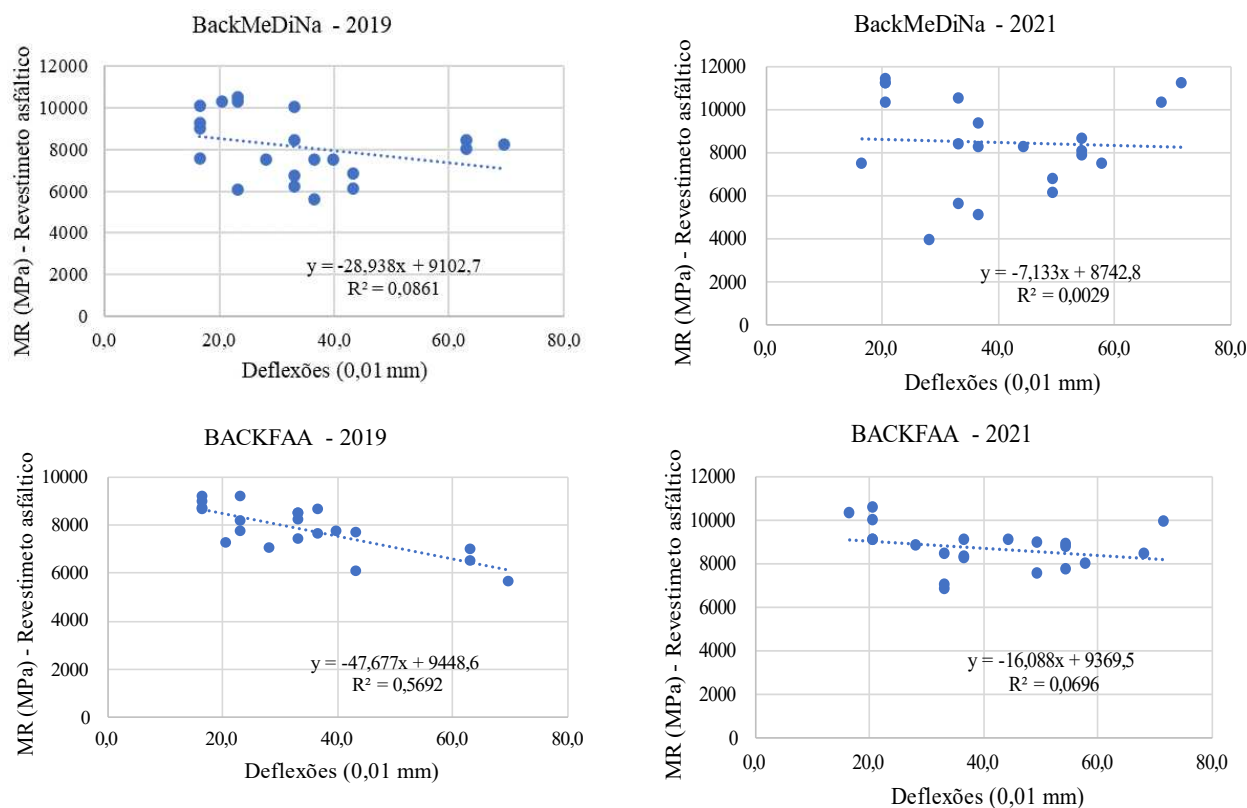
Tabela 40 - Análise de correlação e significância do revestimento asfáltico: trecho 1

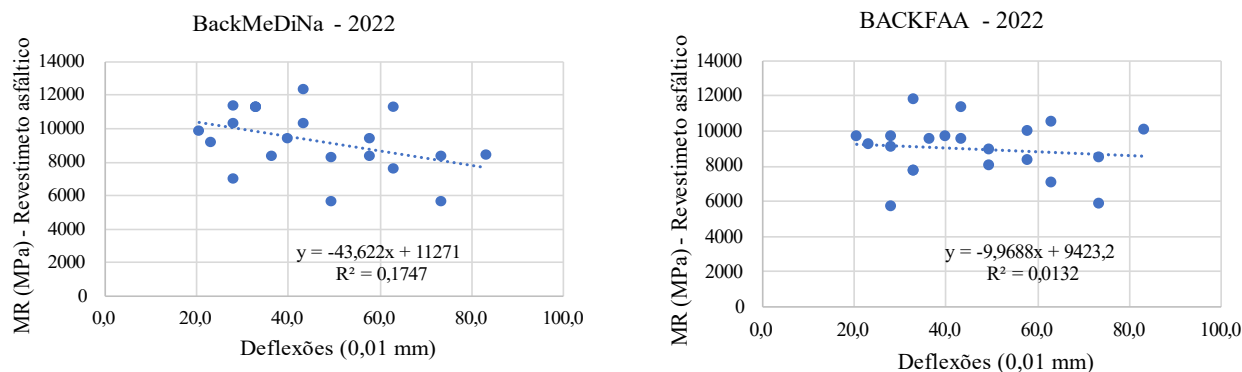
	BackMeDiNa				BACKFAA			
	r	Correlação	F	Resultado	r	Correlação	F	Resultado
2019	-0,294	fraca negativa	0,254	não signif.	-0,754	moderada negativa	6,54E-05	significativa
2021	0,00	não há	0,899	não signif.	-0,264	fraca negativa	0,311	não signif.
2022	-0,418	fraca negativa	0,049	significativa	-0,115	fraca negativa	0,630	não signif.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 56 apresenta os gráficos de regressão, onde confirma-se a associação negativa e os coeficientes de determinação com valores muito baixo, indicando a proporção reduzida ou nula em que o módulo de resiliência varia em função da deflexão. A única equação de regressão que obteve resultado significativo foi a correlação com o BAKFAA, em 2019, com R^2 igual a aproximadamente 0,57. Embora o R^2 indique uma estimativa entre o modelo e a variável, e o F indique que a associação é estatisticamente significativa, a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE – *Root Mean Square Error*), que consiste no desvio padrão dos resíduos, foi calculada e obteve-se um RMSE de 576,11 MPa. Ou seja, os valores previstos pela equação de regressão possuem desvio médio de 576,11 MPa em relação ao valor real. Essa análise pode ser visualizada na Figura 57, em que há um distanciamento (resíduo) entre os valores reais e os previstos.

Figura 56 - Gráficos de dispersão do revestimento asfáltico: trecho 1



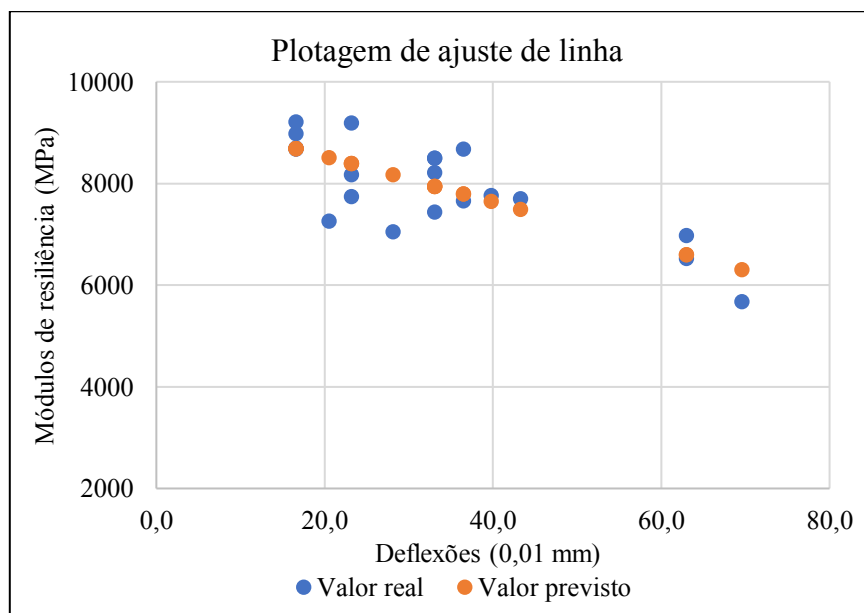


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Portanto, para o revestimento asfáltico só houve uma equação de regressão significativa, considerada moderada e que apresentou um desvio médio do resíduo de 576,11 MPa, conforme a Equação 11.

$$Mr_{\text{BAKFAA}} = -47,677D_0 + 9448,6 \quad R^2 = 0,57 \quad (11)$$

Figura 57 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA - 2019



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Sub-base

A Tabela 41 indica que diferentemente do revestimento asfáltico, todos os coeficientes de correlação de Pearson (r), com exceção do ano 2022 para os dois softwares, obtiveram valores acima de 0,80, representando uma correlação forte. Como na análise anterior, as variáveis se mostram inversamente relacionadas e com valores considerados excelentes de F de significância.

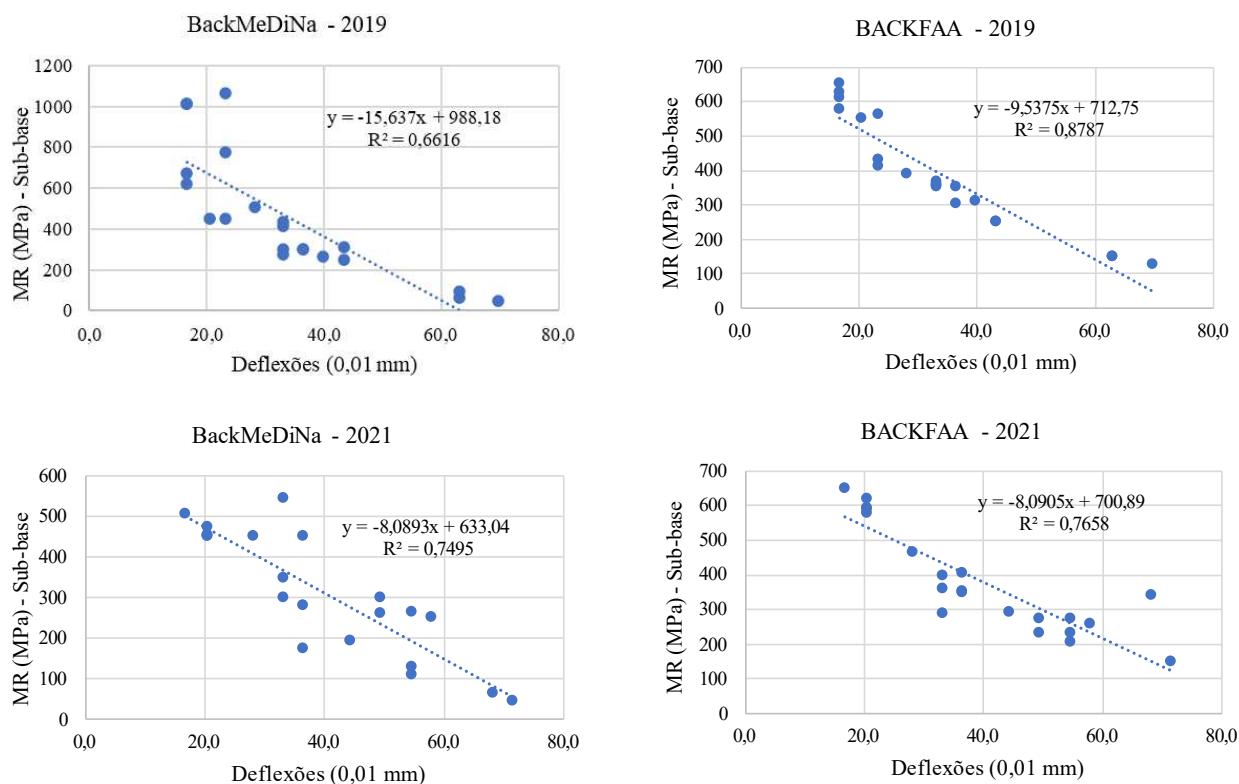
Tabela 41 - Análise de correlação e significância da sub-base: trecho 1

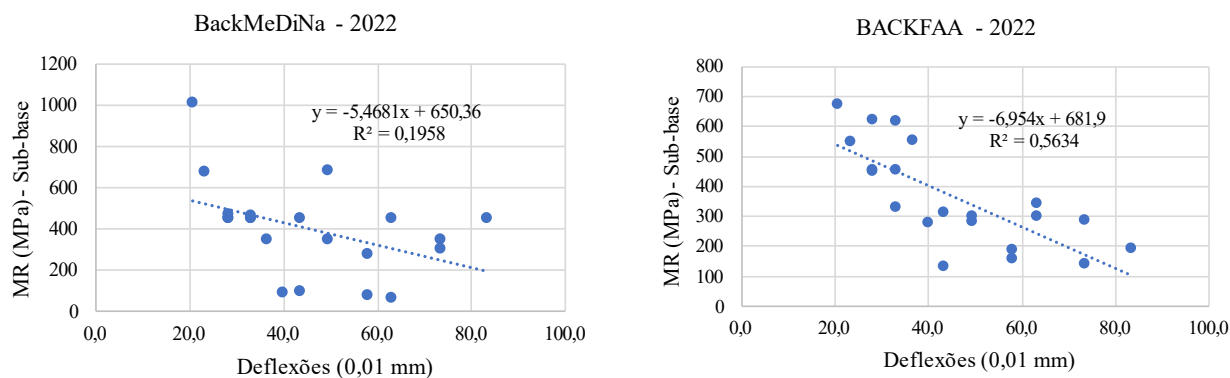
	BackMeDiNa				BACKFAA			
	r	Correlação	F	Resultado	r	Correlação	F	Resultado
2019	-0,813	forte negativa	1,46E-05	significativa	-0,937	forte negativa	1,12E-09	significativa
2021	-0,866	forte negativa	8,07E-07	significativa	-0,875	forte negativa	4,46E-07	significativa
2022	-0,442	fraca negativa	3,35E-02	significativa	-0,751	moderada negativa	1,39E-04	significativa

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

De acordo com os gráficos de regressão linear da Figura 58, verifica-se a forte correlação devido a inclinação negativa das linhas de tendência. Os valores de R^2 variaram de 0,19 a 0,87. O melhor coeficiente para os módulos de resiliência obtidos com o BackMeDiNa, foi relativo ao ano de 2021 com R^2 igual a 0,75. Já para o BAKFAA, foi no ano de 2019 com R^2 de 0,87. Percebe-se que mesmo obtendo um resultado significativo, a correlação obtida em 2022, no BackMeDiNa foi fraca.

Figura 58 - Gráficos de dispersão da sub-base: trecho 1





Fonte: Elaborado pela autora (2023).

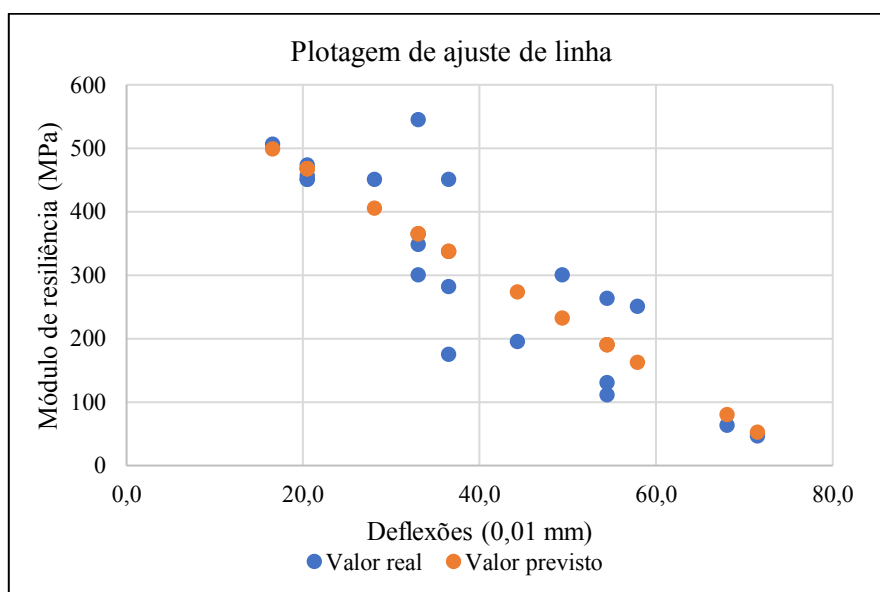
Assim, optou-se por escolher as melhores correlações para descrever a equação de regressão que mais se adequa a estimativa de valores de módulo de resiliência para base em estruturas de pavimento parecidas com a estudada nesta pesquisa, no software BackMeDiNa e BAKFAA. Assim, obteve-se as Equações 12 e 13:

$$MR_{\text{BackMeDiNa}} = -8,0893D_0 + 633,04 \quad R^2 = 0,75 \quad (12)$$

$$Mr_{\text{BAKFAA}} = -9,5375D_0 + 712,75 \quad R^2 = 0,87 \quad (13)$$

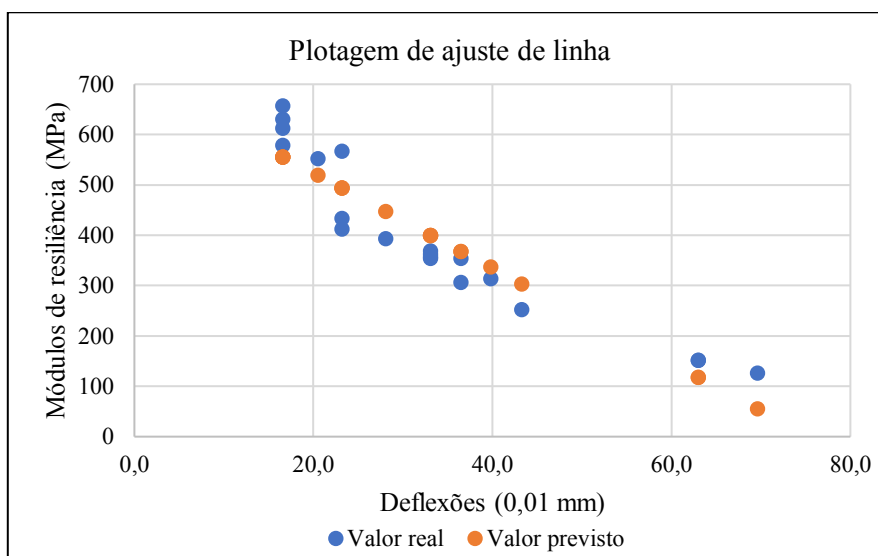
Em seguida, calculou-se RMSE e obteve-se, respectivamente, valores 79,0 MPa e 54,7 MPa para as Equações 16 e 17. Ou seja, os valores previstos pelas equações de regressão possuem um pequeno desvio médio em relação ao valor real, como demonstra as Figuras 59 e 60.

Figura 59 - Valor previsto x valor calculado: BackMeDiNa – 2021



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 60 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA – 2019



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Subleito

Para camada de subleito, como era esperado, todas as correlações foram negativas indicando que quanto maior o módulo de resiliência, menor será a deflexão. As regressões realizadas com os MR retroanalizados pelo BackMeDiNa obtiveram correlações moderadas, já para o BAKFAA todas as correlações foram consideradas fortes. Em relação a significância, todos os modelos obtiveram nível de confiança de 95%, conforme a Tabela 42.

Tabela 42 - Análise de correlação e significância do subleito: trecho 1

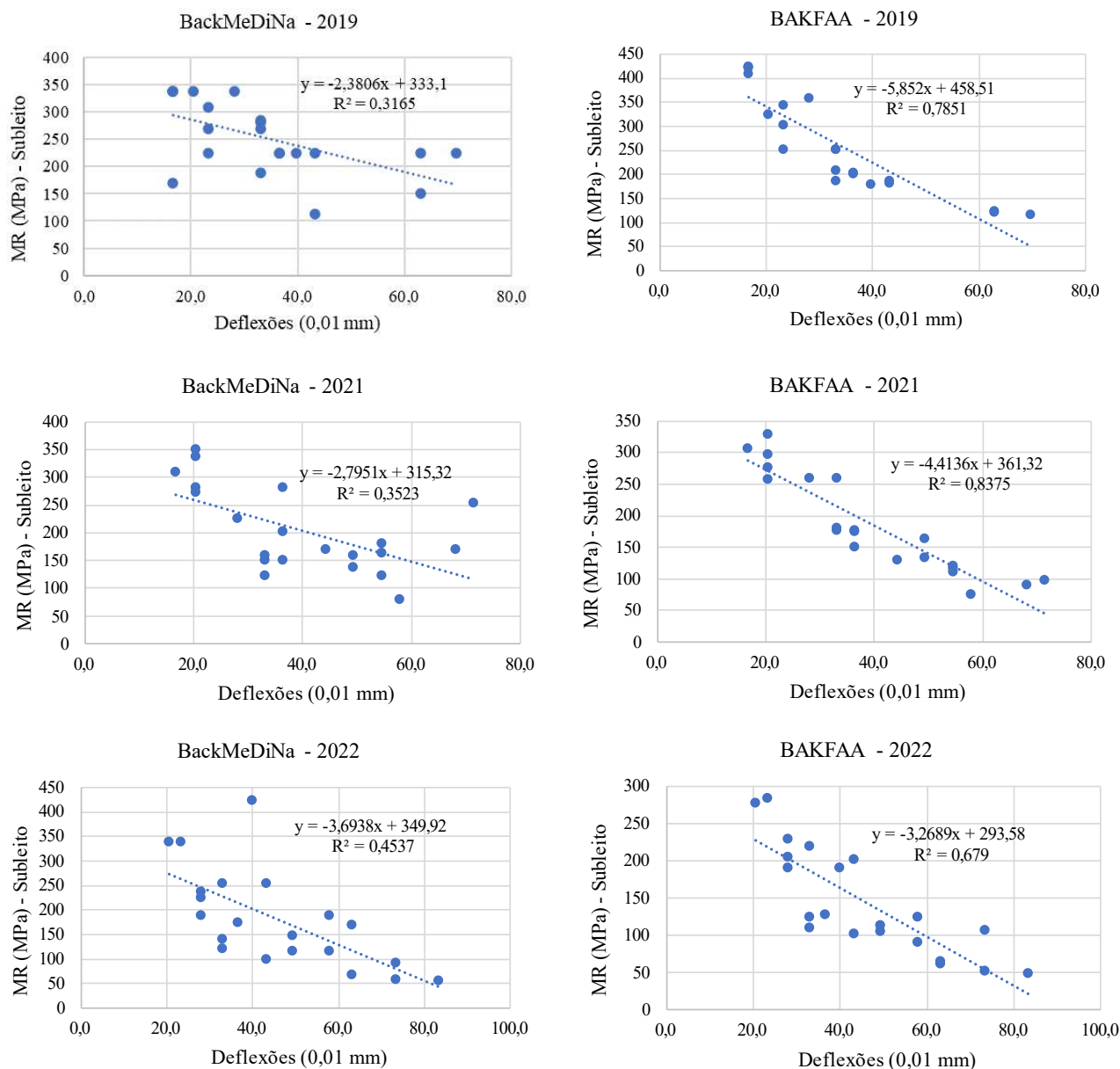
	BackMeDiNa				BACKFAA			
	r	Correlação	F	Resultado	r	Correlação	F	Resultado
2019	-0,563	moderada negativa	8,44E-03	significativa	-0,886	forte negativa	2,36E-07	significativa
2021	-0,594	moderada negativa	6,61E-03	significativa	-0,915	forte negativa	1,36E-08	significativa
2022	-0,674	moderada negativa	1,15E-03	significativa	-0,824	forte negativa	7,39E-06	significativa

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Observando os gráficos de regressão, dispostos na Figura 61, nota-se que a inclinação das retas de tendência são diretamente proporcionais ao valor, em módulo, do coeficiente de Pearson (r), ou seja, quanto mais próximo de 1 r esteja, mais próximo ao valor ideal de 45 graus será a inclinação. Os valores do coeficiente de determinação para as regressões feitas com MR do BackMeDiNa, foram baixas (0,31, 0,35 e 0,45) indicando que as deflexões não representam o comportamento da variabilidade que ocorre com os módulos de resiliência. Por outro lado,

analisando as regressões com os MR do BAKFAA, verifica-se valores mais representativos, principalmente para os dados do ano de 2021 com R^2 igual a 0,83.

Figura 61 - Gráficos de dispersão do subleito: trecho 1



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

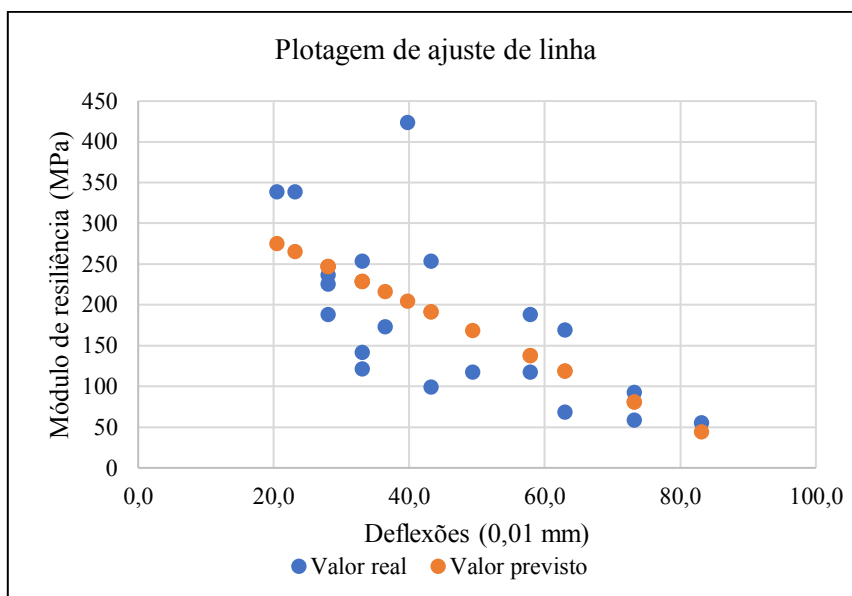
Assim, as melhores equações que definem o comportamento para os dois softwares são as seguintes:

$$MR_{\text{BackMeDiNa}} = -3,6938 D_0 + 349,92 \quad R^2 = 0,45 \quad (14)$$

$$Mr_{\text{BAKFAA}} = -4,4136 D_0 + 361,32 \quad R^2 = 0,83 \quad (15)$$

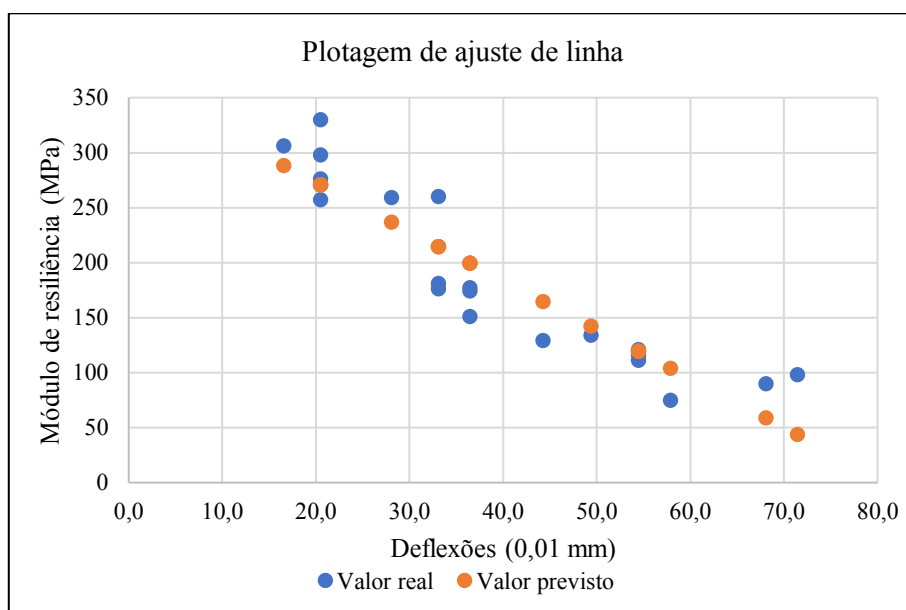
Entretanto, percebe-se que a Equação 14 possui coeficiente de determinação menor que 0,50. A partir da análise dos resíduos é possível ter noção da diferença entre os valores reais e os obtidos pela equação de regressão, assim nas Figuras 62 e 63 são representadas essas diferenças e percebe-se a dispersão dos dados à medida que o R^2 e o r são menores que 1. Para melhor entender a dimensão dos resíduos, o RMSE foi calculado e os valores foram de 73,1 e 31,36 MPa, para as Equações 14 e 15.

Figura 62 - Valor previsto x valor calculado: BackMeDiNa (2022)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 63 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA (2021)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.3.4.2. Trecho 2

No trecho 2, assim como no trecho 1, todas as análises tiveram uma correlação negativa, indicando a coerência dos módulos retroanalisados, mesmo com os tipos de materiais das camadas do pavimento diferentes. Entretanto, na maioria das regressões, os valores de R^2 foram baixos e não significativas, ou seja, apresentaram níveis de confiança abaixo de 95%. Esses resultados são explicados pelo pequeno número de observações, sendo 13 dados para cada análise.

Não foi possível obter equações de regressão para camada de revestimento asfáltico e sub-base, mesmo obtendo correlações moderadas, com significância, os valores dos coeficientes de determinação foram abaixo de 0,50. Para camada de base, foi encontrada apenas uma equação com R^2 maior que 0,50, com os dados de MR obtidos pelo BAKFAA. Por fim, foram determinadas modelos de regressão que descrevem a variação dos MR do subleito em função das deflexões máximas. Da mesma maneira que o trecho 1, os erros obtidos nas retroanálises do BackMeDiNa foram maiores, assim as correlações com os dados do mesmo, são estatisticamente menos relacionadas que as obtidas com os dados do BAKFAA.

Portanto, para o trecho 2, foram identificadas as seguintes equações de regressão para camada de base e subleito:

Base:

$$MR_{\text{BAKFAA}} = - 506,87 D_0 + 23904 \quad R^2 = 0,76 \quad (16)$$

Subleito:

$$MR_{\text{BackMeDiNa}} = -13,282 D_0 + 618,91 \quad R^2 = 0,63 \quad (17)$$

$$MR_{\text{BAKFAA}} = -57,611 D_0 + 1227,1 \quad R^2 = 0,80 \quad (18)$$

- Revestimento asfáltico

Segundo a Tabela 43, foram consideradas moderadas as correlações realizadas para os MR obtidos com o BackMeDiNa nos anos de 2020 e 2021. No ano de 2022, como o coeficiente de Pearson é praticamente igual a zero, significa que não há nenhum tipo de correlação entre as variáveis. Essa constatação pode ser observada na Figura 62, com a inclinação da reta de tendência igual a zero. Em relação a análise de significância, os resultados se mostraram significativos, mas com resultados próximos a $\alpha = 0,05$. As correlações verificadas para os módulos obtidos com o BAKFAA, também foram moderadas negativas, porém não foi

verificada significância para os modelos de regressão provavelmente devido ao número reduzido de objetos.

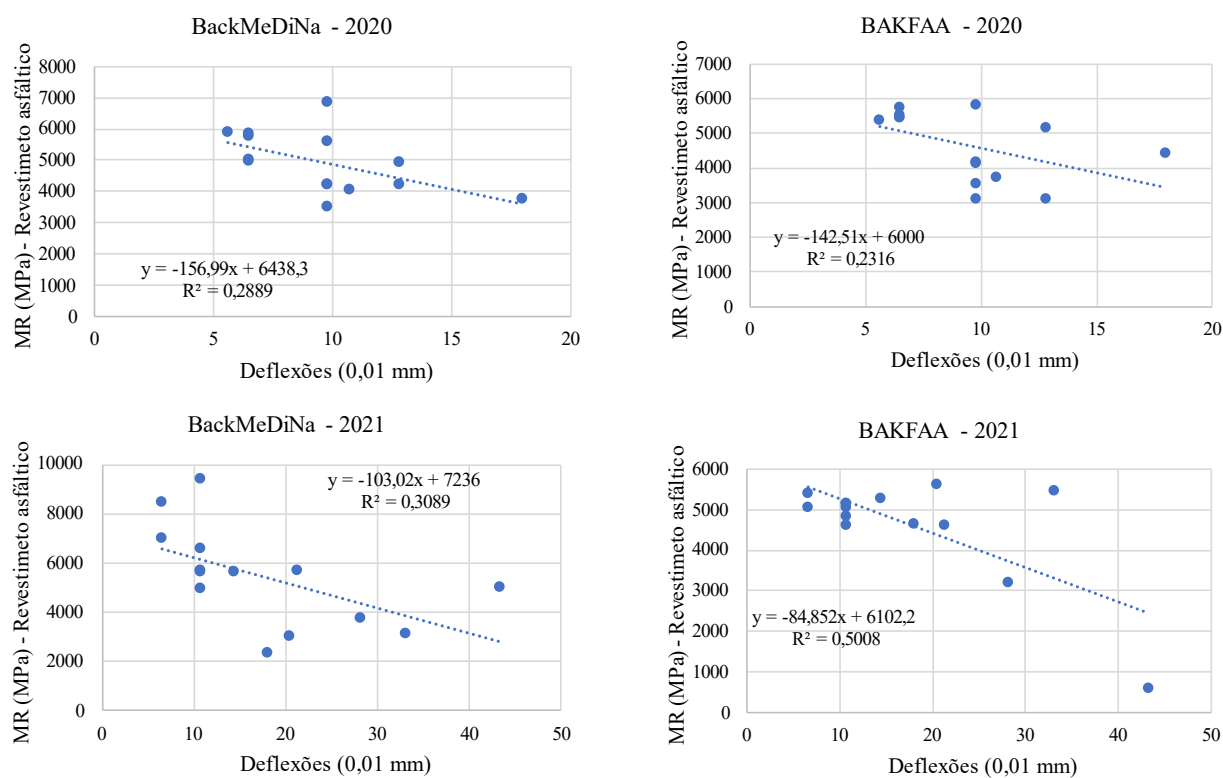
Tabela 43 - Análise de correlação e significância do revestimento asfáltico: trecho 2

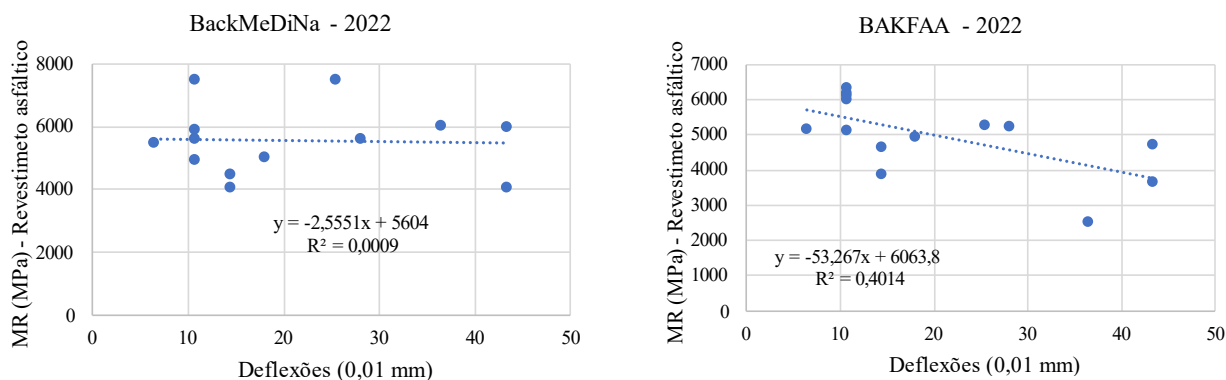
	BackMeDiNa				BACKFAA			
	r	Correlação	F	Resultado	r	Correlação	F	Resultado
2020	-0,546	moderada negativa	0,036	significativa	-0,481	fraca negativa	0,069	não signif.
2021	-0,556	moderada negativa	0,007	significativa	-0,712	moderada negativa	0,231	não signif.
2022	-0,030	não há	0,733	-	-0,634	moderada negativa	0,046	não signif..

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Mesmo não obtendo resultados satisfatórios, os gráficos de regressão foram gerados e os comportamentos das correlações podem ser visualizados na Figura 64. Percebe-se a dispersão dos poucos dados e, conseqüentemente, baixas inclinações. Os valores do coeficiente de determinação (R^2) variaram de 0 (para a regressão que não obteve correlação) até o valor máximo de 0,50, referente a correlação que não possuiu significância. Portanto, em virtude dos insatisfatórios resultados, não foi possível obter uma equação de regressão que explicasse a variação dos MR em função dos valores de deflexão para camada de revestimento asfáltico com os valores de módulo resiliência retroanalizados pelo BackMeDiNa e BAKFAA.

Figura 64 - Gráficos de dispersão do revestimento asfáltico: trecho 2





Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Base

Diferentemente das correlações encontradas para a camada de revestimento asfáltico, as regressões realizadas para camada de base foram significativas, excluindo a de 2022 para o BackMeDiNa. A Tabela 44 apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) obtidos na análise do MR do BAKFAA calculados com os dados de deflexão máxima. Considerando, na análise de variância, os resultados significativos, as correlações se classificam como forte ou moderadas e negativas.

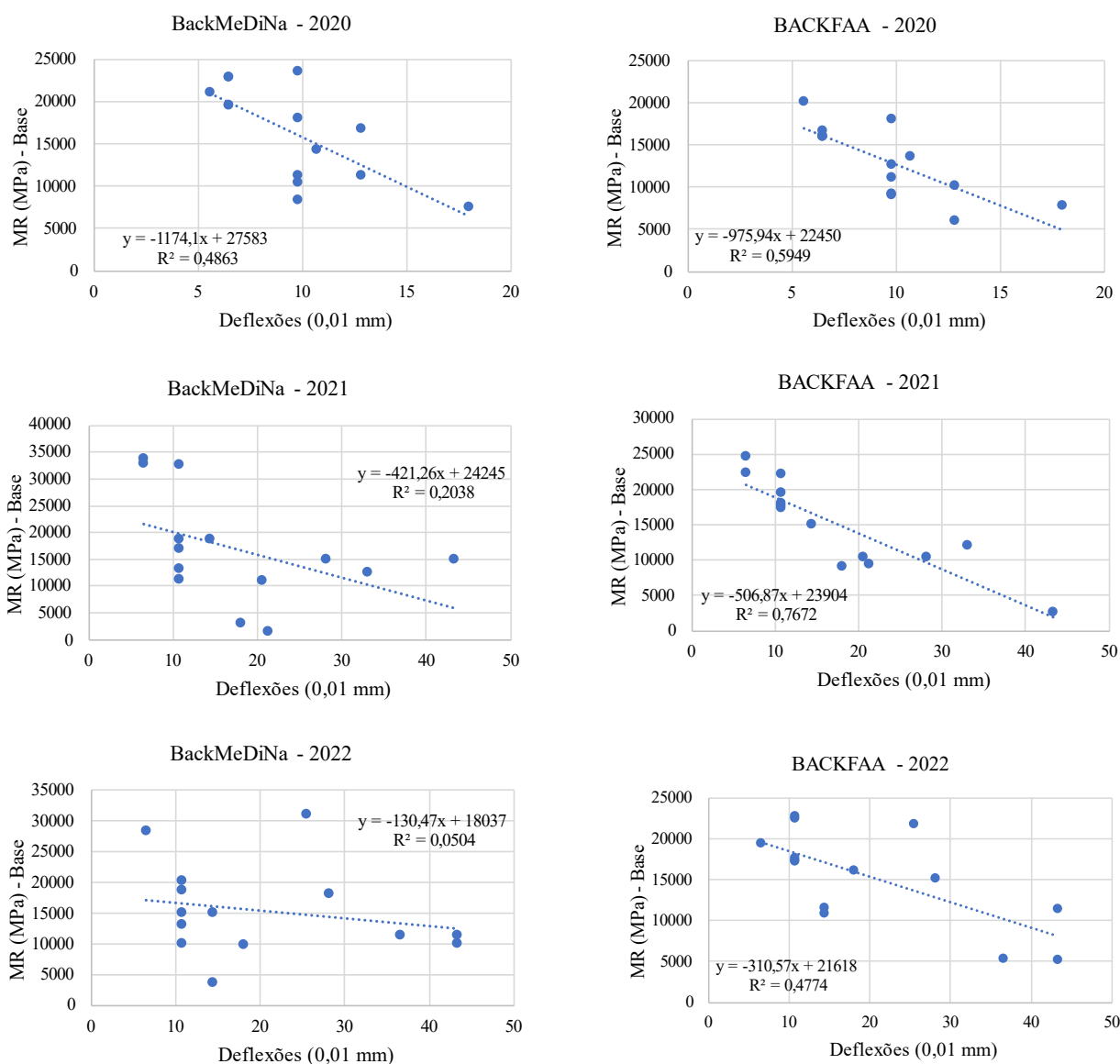
Tabela 44 - Análise de correlação e significância da base: trecho 2

	BackMeDiNa				BACKFAA			
	r	Correlação	F	Resultado	r	Correlação	F	Resultado
2020	-0,697	moderada negativa	0,006	significativa	-0,771	moderada negativa	5,19E-04	significativa
2021	-0,451	fraca negativa	0,049	não signif.	-0,876	forte negativa	8,03E-04	significativa
2022	-0,225	fraca negativa	0,584	não signif.	-0,691	moderada negativa	3,69E-02	significativa

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Figura 65 estão detalhados os gráficos de dispersão, juntamente com as equações de regressão e os valores dos coeficientes de determinação. Foi constatado que a única correlação significativa, para o BackMeDiNa, apresentou R^2 igual a 0,48, ano de 2020. Além desse valor ser inferior ao valor mínimo recomendado ($R^2 = 0,50$), eles se apresentam bem dispersos. Mesmo assim, a equação de regressão e o cálculo do RMSE foi realizado com o objetivo de quantificar o resíduo médio. Em relação as correlações com MR do BAKFAA, a melhor regressão (2021) apresentou R^2 igual a 0,76, o que traz resultados mais próximos dos valores reais.

Figura 65 - Gráficos de dispersão da base: trecho 2



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

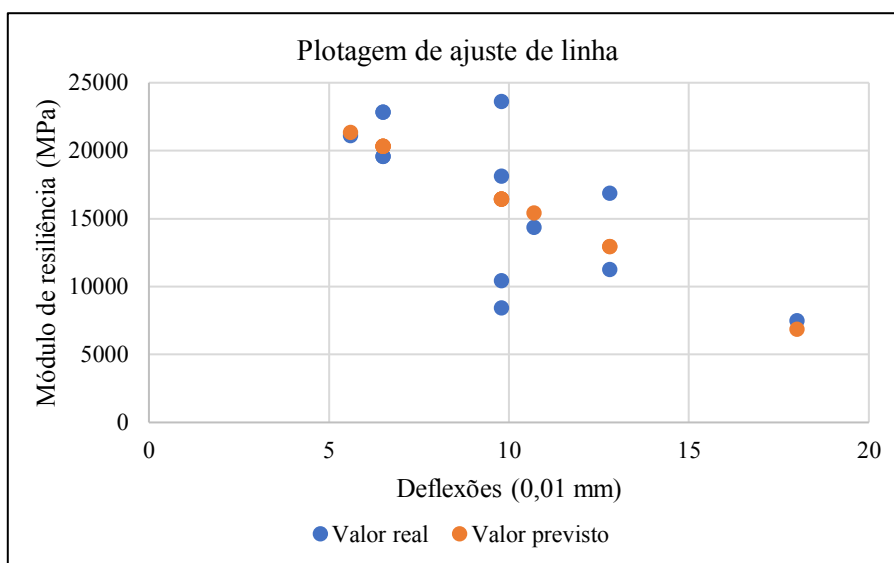
Então, as Equações 16 e 17 foram definidas com base nos maiores valores de R^2 e menores de F ($F_{\text{significância}}$). Além disso, como mencionado anteriormente, calculou-se o RMSE e obteve-se, respectivamente para a Equação 16 e 17, valores de resíduo médio iguais a 3.071 e 2.433 MPa. Dessa maneira, constata-se que quanto maior for o valor do coeficiente de determinação, menor será o desvio médio de resíduos numa equação de regressão, ou seja, a assertividade é maior.

$$MR_{\text{BackMeDiNa}} = - 1174,1 D_0 + 27583 \quad R^2 = 0,48 \quad (16)$$

$$MR_{\text{BACKFAA}} = - 506,87 D_0 + 23904 \quad R^2 = 0,76 \quad (17)$$

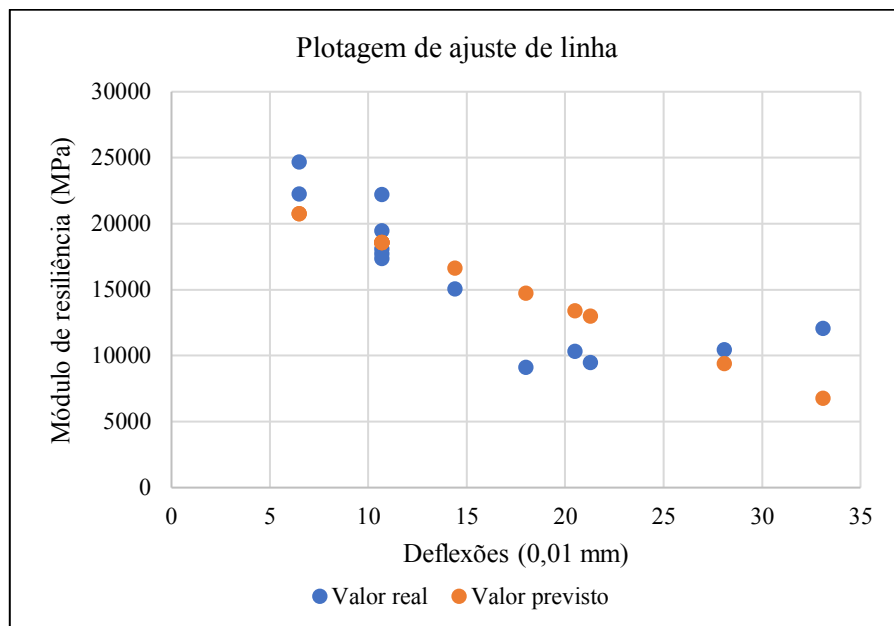
Os gráficos indicados na Figura 66 e 67, obtido através dos valores reais e previstos com a equação de regressão, demonstram como os desvios médios dos resíduos estão associados ao R^2 .

Figura 66 - Valor previsto x valor calculado: BackMeDiNa (2021)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 67 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA (2021)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Sub-base

As correlações para camada de sub-base seguiram a mesma tendência que a camada de base, se classificando como fracas ou moderadas. Apenas a regressão do ano 2021 com módulos

do BackMeDiNa e do ano de 2020 com o BAKFAA apresentaram resultados significativos. É importante observar na Tabela 45 que os valores do coeficiente de Pearson (r) são baixos e o F ($F_{\text{significância}}$) são próximos ao valor de $\alpha = 0,05$, indicando a baixa significância.

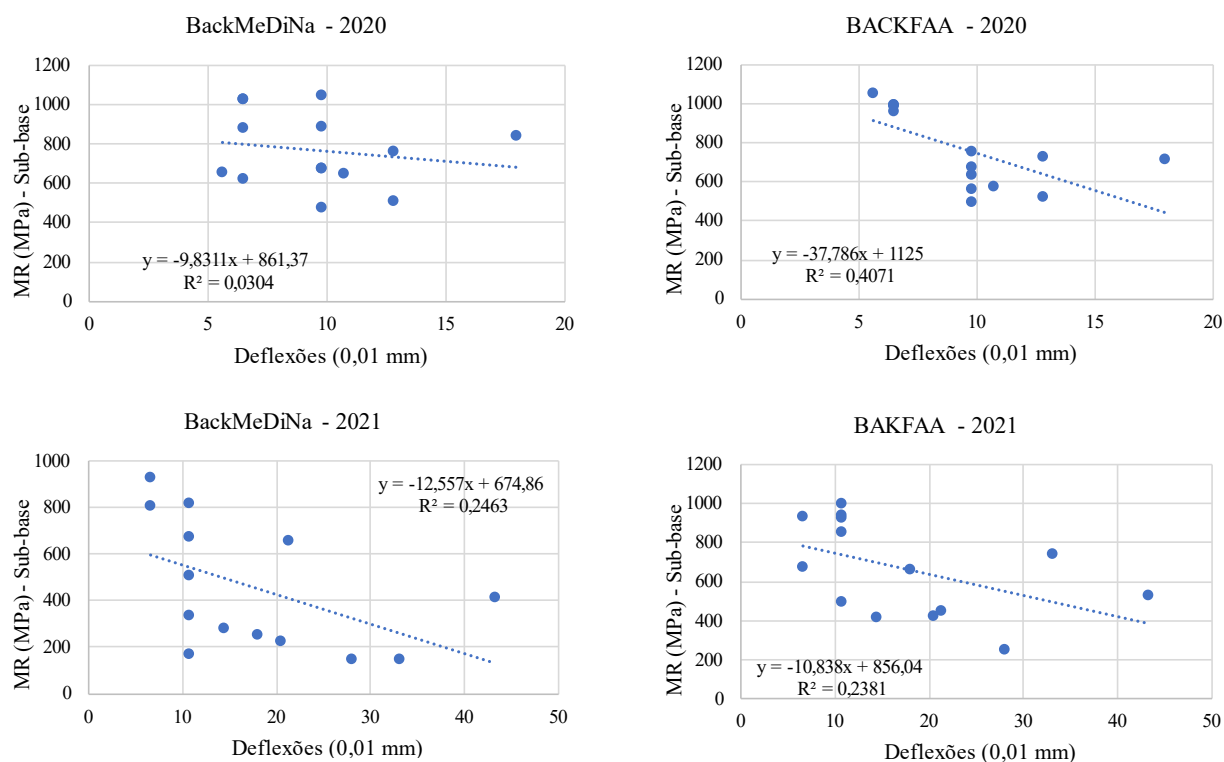
Tabela 45 - Análise de correlação e significância da sub-base: trecho 2

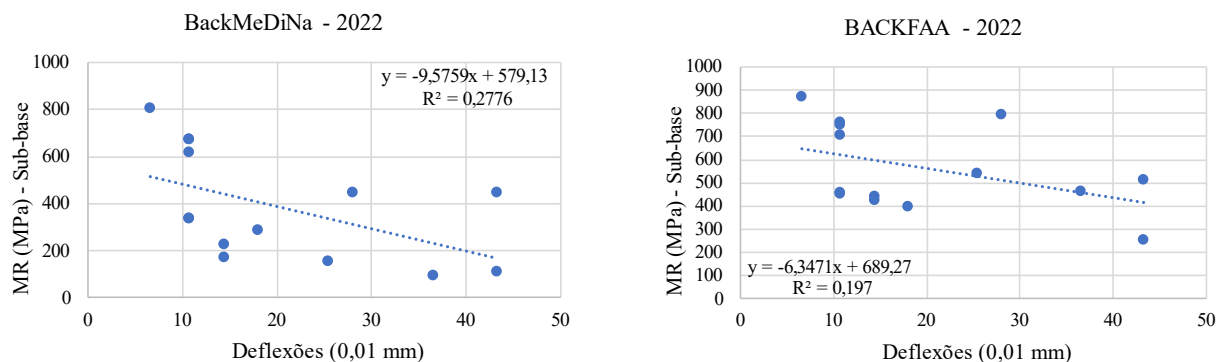
	BackMeDiNa				BACKFAA			
	r	Correlação	F	Resultado	r	Correlação	F	Resultado
2020	-0,174	fraca negativa	0,556	não signif.	-0,638	moderada negativa	0,017	significativa
2021	-0,496	moderada negativa	0,018	significativa	-0,488	fraca negativa	0,065	não signif.
2022	-0,527	moderada negativa	0,135	não signif.	-0,444	fraca negativa	0,100	não signif.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando a Figura 68, que detalha os gráficos de dispersão, percebe-se as pequenas inclinações das retas de tendência, bem como os valores do coeficiente de determinação (R^2) menores que 0,50. Esses resultados eram esperados, visto que apenas duas correlações se mostram significativas e ainda assim moderadas. Portanto, para camada de sub-base, não foi possível a obtenção de modelos de regressão confiáveis, que relacione as deflexões de viga Benkelman com os módulos retroanalizados, nos dois *softwares*.

Figura 68 - Gráficos de dispersão da sub-base: trecho 2





Fonte: Elaborado pela autora (2023).

- Subleito

Para todos os dados analisados, ao se confrontar os dados de deflexão e MR, obteve-se correlações negativas, moderadas para o BackMeDiNa e fortes para o BAKFAA, conforme a Tabela 46. Os resultados da significância indicam valores bem distantes de α , com nível de confiança de 95%. Apenas para os dados obtidos em 2020, pelo BackMeDiNa, foi encontrado uma correlação fraca e sem significância.

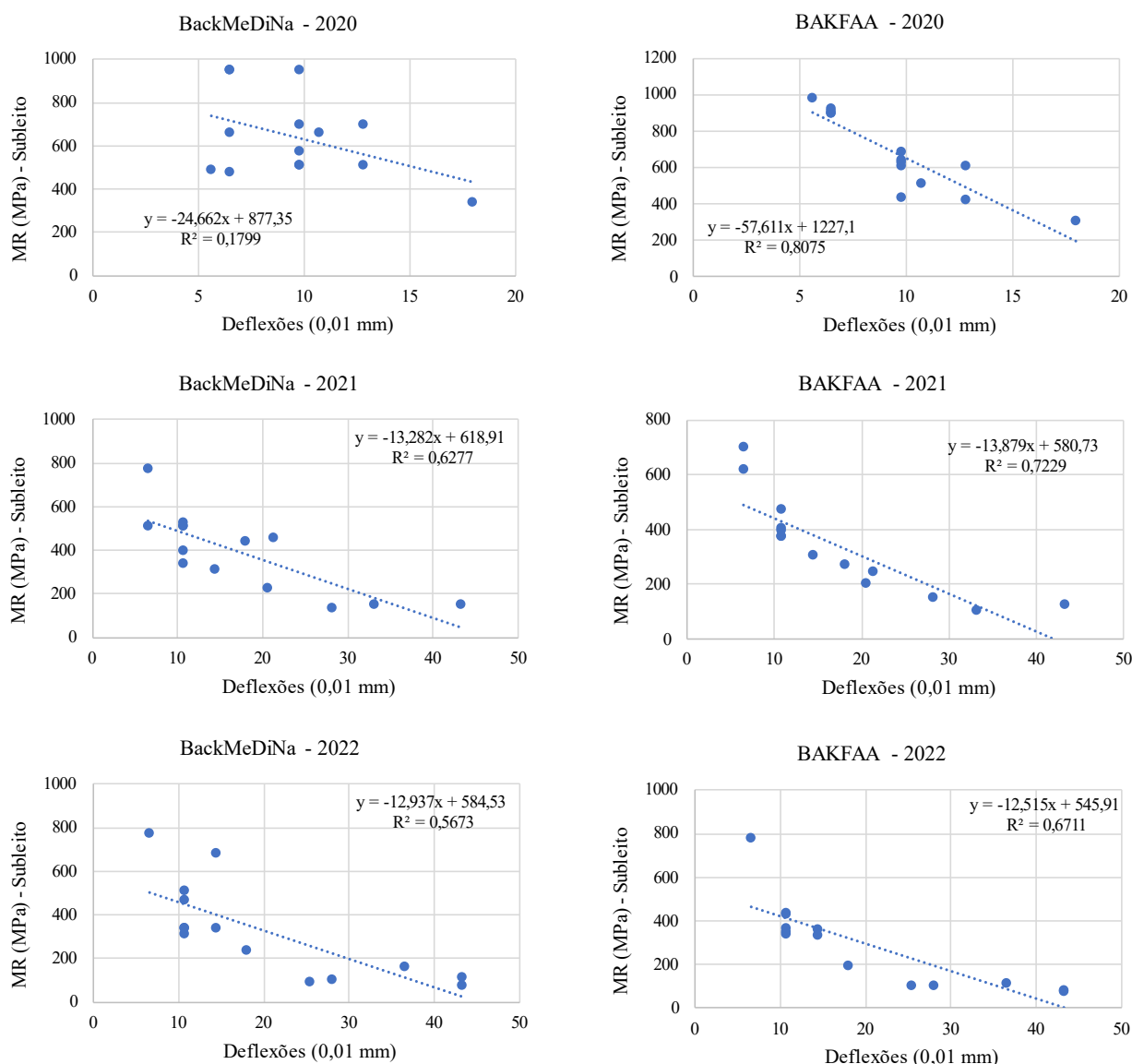
Tabela 46 - Análise de correlação e significância do subleito: trecho 2

	BackMeDiNa				BACKFAA			
	r	Correlação	F	Resultado	r	Correlação	F	Resultado
2020	-0,424	fraca negativa	0,143	não signif.	-0,899	forte negativa	1,3E-06	significativa
2021	-0,792	moderada negativa	1,22E-03	significativa	-0,850	forte negativa	3,61E-05	significativa
2022	-0,753	moderada negativa	3,62E-03	significativa	-0,819	forte negativa	8,11E-04	significativa

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando a Figura 69, nota-se que todos os valores de R^2 são maiores que 0,50. Entretanto, a melhor correlação obtida para o BackMeDiNa foi para o ano de 2021 com R^2 igual a 0,63. Já para o BAKFAA, alcançou-se um coeficiente de determinação de 0,80, ou seja, significa que 80,7% da variação do módulo de resiliência pode ser explicada pelo modelo de regressão.

Figura 69 - Gráficos de dispersão do subleito: trecho 2



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

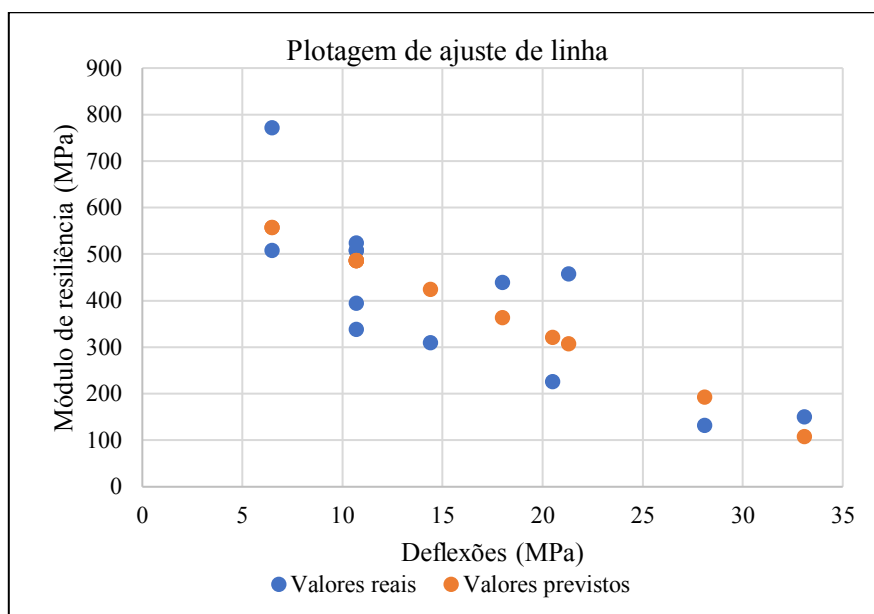
Dessa forma, as equações 18 e 19 foram definidas como mostra abaixo. O RMSE também foi calculado e os valores do desvio médio do resíduo foram iguais a 102,66 e 67,62 MPa.

$$MR_{\text{BackMeDiNa}} = -13,282 D_0 + 618,91 \quad R^2 = 0,63 \quad (18)$$

$$MR_{\text{BAKFAA}} = -57,611 D_0 + 1227,1 \quad R^2 = 0,80 \quad (19)$$

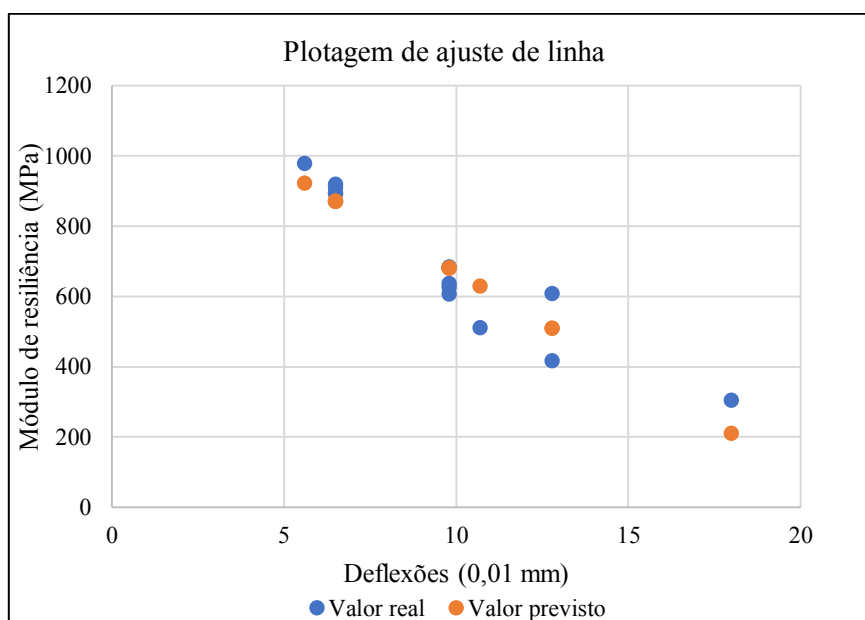
Os gráficos representados nas Figuras 70 e 71, construídos com base nos valores observados e estimados utilizando a equação de regressão, ilustram a relação entre os desvios médios dos resíduos e o coeficiente de determinação R². Ou seja, comparando-se as duas Figuras, percebe-se que valores maiores de R² obtém-se dados previstos mais assertivos.

Figura 70 - Valor previsto x valor calculado: BackMeDiNa (2021)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 71 - Valor previsto x valor calculado: BAKFAA (2020)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.4. AVALIAÇÃO DE VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO PELO MEDINA

Neste tópico, procede-se as análises referentes à vida útil do pavimento sob o critério de fadiga e de deformação permanente, seguindo os limiares máximos de 30% de área trincada e ATR de 2,5 mm como parâmetros. Nas análises, foram empregados os módulos de resiliência retroanalizados que foram obtidos pelo BackMeDiNa, apenas para verificar a influência dos

valores de módulo resiliência nos critérios de dimensionamento comparando-os com os obtidos *in situ*.

4.4.1. Trecho 1

No contexto do trecho 1, devido à indisponibilidade de parâmetros de módulo de resiliência para as camadas de sub-base e subleito, adotou-se uma abordagem baseada no modelo linear para a análise da vida útil do pavimento em relação ao percentual de área trincada. Essa análise foi conduzida levando em consideração o volume de tráfego e os valores de módulo retroanalizados no ano de 2019. Desse modo, por meio do software MeDiNa, estimou-se a evolução do percentual de área trincada (%AT) até o ano de 2029, considerando um horizonte de projeto de 10 anos, conforme apresentado na Tabela 47. Verifica-se que, de acordo com os resultados, a estrutura dimensionada não satisfaz o critério de fadiga, indicando que chegará ao final da vida útil com toda área trincada. Contudo, é crucial ressaltar que esses resultados são extremamente específicos para este trecho, devido às particularidades dos materiais presentes em cada camada do pavimento.

Tabela 47 - Percentual de área trincada obtida pelo MeDiNa: trecho 1

Módulo de resiliência (MPa)		BackMeDiNa
		Revestimento
	Sub-base	458,0
	Subleito	252,4
	%AT	99%

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Uma vez que o software MeDiNa oferece uma previsão do percentual de área trincada ao longo de um período de 10 anos, realizou-se uma comparação com os valores reais encontrados na rodovia, os quais estão resumidos na Tabela 48. A expectativa de que os valores obtidos pelo MeDiNa se aproximassem dos resultados reais foi suprida, principalmente para o ano de 2022 em que houve uma diferença de apenas 5,4% entre o valor encontrado *in loco* e o previsto pelo MeDiNa. Em relação ao ano de 2019 e 2021 os valores se mostraram mais distantes em função da análise ter sido iniciada a partir do ano de 2019, ou seja, como se o tráfego tivesse sido liberado nesse período. Além disso, mesmo com o cálculo do Volume Médio Diário (VMD) tendo se baseado em dados de apenas um dia de monitoramento, concluiu-se que o MeDiNa previu resultados próximos aos valores reais utilizando módulos obtidos da retroanálise.

Tabela 48 - Comparativo entre % área trincada: trecho 1

	% AT - <i>in loco</i>	% AT - BackMeDiNa
2019	25,0	3,0
2021	28,2	15,3
2022	29,7	24,3

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.4.2. Trecho 2

No trecho 2, foram realizadas avaliações quanto aos critérios de fadiga e deformação permanente. Essa análise foi conduzida levando em consideração o volume de tráfego e os valores de módulo retroanalizados no ano de 2020, estimando a evolução do %AT e o ATR até o ano de 2030. Os resultados indicam que, ao final da vida útil, o pavimento apresentará um %AT máximo de 9,1% e ATR de 0,8 mm, conforme a Tabela 49.

Tabela 49 - Percentual de área trincada e ATR obtida pelo MeDiNa: trecho 2

		BackMeDiNa
		Revestimento
Módulo de resiliência (MPa)	Base	-
	Sub-base	766,6
	Subleito	639,7
	%AT	9,1 %
	ATR	0,8 mm

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os resultados disponibilizados pelo MeDiNa, para os 10 anos de vida útil do pavimento, puderam ser comparados com mais precisão com os valores obtidos em campo, já que os monitoramentos começaram no mesmo ano em que o tráfego foi liberado. O comparativo foi feito com os resultados mensais do %AT e do ATR dimensionados a partir dos módulos provenientes do BackMeDiNa.

A Tabela 50, revela que desde o primeiro ano de funcionamento até o último ano de monitoramento, não foram identificadas trincas ou fissuras no revestimento asfáltico, o que contrasta com as previsões do MeDiNa, que apontou um %AT de 3,6% para o ano de 2022. Por outro lado, no que diz respeito à deformação permanente, o programa se mostrou mais conservador, indicando um afundamento na trilha de roda interna de 2,36 mm em 2022. Essas diferenças podem ser explicadas devido à adaptação dos parâmetros utilizados na camada de base e no valor utilizado para subleito, pois pode estar superestimado ou subestimado.

Tabela 50 - Comparativo entre % área trincada e ATR: trecho 2

	% AT - <i>in loco</i>	% AT - MeDiNa	ATR - <i>in loco</i>	ATR - MeDiNa
2020	0,0	1,05	0,00	0,00
2021	0,0	2,72	1,64	0,07
2022	0,0	3,59	2,36	0,13

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

O principal objetivo desta pesquisa foi realizar uma avaliação estrutural de trechos de rodovias através de retroanálise de bacias de deflexão levantadas com a viga Benkelman e com amostras extraídas *in situ*. É importante destacar que a retroanálise, apesar de gerar algumas incertezas no meio técnico devido às considerações de materiais homogêneos e lineares feitas pelos softwares de análise elástica, se mostrou uma abordagem útil para estimar e avaliar as propriedades das camadas dos pavimentos existentes. Os resultados obtidos pelo processo de retroanálise, no geral, se mostraram superiores aos encontrados por ensaios de laboratório, mas consideravelmente parecidos, com diferenças que variaram entre 0,28% a 31,65%, em função do valor médio considerado na retroanálise e da diferença de temperatura em campo para a camada de revestimento. Para as camadas granulares, as diferenças são explicadas pelo fato do ensaio triaxial induzir condições de contorno distintas das observadas em campo.

As ações impostas pelo tráfego e a ação de intemperismo ao longo dos anos promoveram o desgaste do pavimento, fato comprovado pelas análises dos parâmetros da bacia de deflexão para os Trecho 1 e 2, que entraram em concordância com os dados do percentual de área trincada e do afundamento em trilha de roda. Isso ficou evidente ao considerar a avaliação da condição da camada de revestimento com base no Índice de Curvatura da Superfície (SCI) nos últimos dois anos no trecho 1. Nesse contexto, o SCI indicou uma condição "em alerta", o que se comprovou pelo percentual de área trincada igual a 29,7%. Da mesma forma, acontece no trecho 2, onde o revestimento não apresenta área trincada e o SCI avaliou o mesmo na condição "segura". A camada de base dos subtrechos homogêneos SH-01, das duas rodovias, se mostrou mais solicitada ao longo dos anos do que o SH-02, visto que o Índice de Danos à Base (BDI) aumenta, se classificando em condição "severa" para o trecho 1 e "em alerta" para o trecho 2.

Os modelos de regressão estabelecidos entre as deflexões e os módulos de resiliência retroanalizados no BackMeDiNa e BAKFAA, demonstraram, em geral, boas correlações ($R^2 > 0,50$). Foram obtidas regressões fortes e significativas com os módulos obtidos com o BAKFAA, resultando em equações com coeficientes de determinação relativamente altos, como por exemplo para camada de revestimento asfáltico, sub-base e subleito do trecho 1 e para o trecho 2, as camadas de base e subleito. Além disso, observou-se que, na maioria dos casos, um maior valor do módulo estava relacionado a uma menor deflexão, e vice-versa,

embora isso pudesse variar dependendo da fase em que as camadas se encontravam, ou seja, se estavam em fase de ruptura ou elástica.

Ao analisar a vida útil dos pavimentos e comparar os resultados fornecidos pelo software MeDiNa com aqueles obtidos *in situ*, observou-se uma notável proximidade entre o percentual de área trincada para o ano de 2022 do trecho 1, além de ter indicado que o pavimento não resistirá a fadiga até o fim de sua vida útil. O trecho 2 também apresentou pequenas disparidades, que podem ter sido causadas devido a adaptações de alguns ensaios.

De maneira geral, a metodologia desenvolvida por Theisen (2009), que permite a conversão do carregamento padrão, demonstrou ser altamente eficaz já que os valores retroanalizados se aproximaram consideravelmente dos obtidos em laboratório a partir de amostras extraídas. Os softwares BackMeDiNa e BAKFAA, que fundamentam seus cálculos na teoria da elasticidade, resultaram em valores de módulo de resiliência semelhantes para as diversas camadas dos trechos 1 e 2. No entanto, as retroanálises conduzidas com o BAKFAA apresentaram erros menores, resultados com menores dispersões e módulos de resiliência inferiores em comparação aos obtidos com o BackMeDiNa.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para futuras pesquisas a serem realizadas dentro do contexto abordado por esta dissertação, podem ser mencionadas:

- Realizar poços de inspeção em pontos estrategicamente definidos para cada subtrecho homogêneo, além de conduzir ensaios laboratoriais identificando à estaca em questão, a fim de aprimorar a precisão das correlações;
- Explorar a utilização de outros programas de retroanálise, objetivando-se verificar a variação dos módulos resiliência;
- Conduzir ensaios com os equipamentos FWD e LWD em pontos coincidentes com as localizações desta pesquisa, buscando estabelecer equações de regressão relevantes e comparando os resultados com os obtidos por meio do equipamento viga Benkelman;
- Realizar retroanálises considerando a correção da temperatura e das condições de aderência, a fim de avaliar a influência desses fatores nos resultados;
- Incluir ensaios de módulo de resiliência para a sub-base e subleito nos dois trechos, bem como ensaios de fadiga para a camada de base em BGTC no trecho 2;

- Acompanhar o aparecimento e a propagação de trincas no pavimento, comparando essas observações com os resultados previstos pelo software BackMeDiNa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERNAZ, C.A.V. **Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

ALVES, T. S. **Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários - Aplicação Prática do Radar de Prospecção e do Deflectómetro de Impacto**. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8574:1984 Pavimentos flexíveis e semirrígidos – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman**. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 16018: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Rio de Janeiro. 2011.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4123, Standard method of indirect tension test for resiliente modulus of bituminous mixtures**. USA, 1982.

AYYANCHIRA, M. M. **Introduction of Light Weight Deflectometer**. *International Journal of Engineering Research & Technology*, v. 3, n. 4, p. 303-305, Abril. 2014.

BACK, A. H. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas cimentadas do tipo BGTV utilizando duas rochas extrusivas representativas do estado do RS**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS, 2022.

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

BENEDETTO, A.; TOSTI, F.; DI DOMENICO, L.L. **Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer**. *Journal of Terramechanics*, v. 49, n. 1, p. 1-12, 2012.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA; L. M. G. D.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, 2ª edição. 2022.

BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com Viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BORGES, J. J. da Silva. **Avaliação do módulo de elasticidade, resistência de ponta e variação de volume em campo com e sem inundação em solo colapsível**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

BUENO, L. D. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

CALHOON, T. et al. **Using Falling Weight Deflectometer (FWD) and Ground Penetrating Radar (GPR) to monitor the effects of seasonal moisture variation on the structural capacity of pavements**. *Construction and Building Materials*, v. 351, p. 128831, 2022.

CAMARINI, G.C.; DA SILVA JUNIOR, C.A.P.; FONTENELE, H.B. **Avaliação de bacias de deflexões retroanalizadas pelo programa backmedina**. Palhoça. UNISUL, 2018.

CASTRO, G.D.S *et al.* Análise de correlações genéricas de deflexões na restauração rodoviária e o impacto nos investimentos públicos. *Engineering Sciences*, v. 7, n. 3, p. 53-63, 2019.

CAVALEIRO, E. A.; OLIVEIRA, F. H. L. de. **A interferência do módulo de resiliência do concreto asfáltico no período de projeto de pavimentos rodoviários**. *TRANSPORTES, [S. l.]*, v. 26, n. 1, p. 84–93, 2018.

CHANG, D.; ROESSET, J. M.; STOKOE II, K. H. **Nonlinear effects in falling weight deflectometer tests**. *Transportation Research Record*, v1355, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1992, pp. 1–7.

CHANG, J. LIN, J, CHUNG, W; CHEN, D. Evaluating the structural strength of flexible pavements in Taiwan Using the falling weight deflectometer. *The International Journal of Pavement Engineering*, 3 (3) (2002), pp. 131-141.

COMMURI, S. et al. Pavement evaluation using a portable lightweight deflectometer. *Oklahoma Transportation Center*, Midwest City, v. 11. p. 1-14, dez. 2012.

COSTA, G. M.; MENDONÇA, A. T.; ALBUQUERQUE, F. S.; ALBUQUERQUE, T. M. A. **Características mecânicas de materiais para pavimentos: estudo de caso laboratório x campo**. *Scientia Plena, [S. l.]*, v. 11, n. 11, 2015.

COSTA, S. C. F. E.; LUCENA, A. E. F. L.; PAIVA, W. **Análise e predição do comportamento resiliente de solos com adição de cimento empregando-se técnicas de inteligência artificial**. *Sistemas & Gestão*, 18(1), 2023.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: estudo de três solos do nordeste brasileiro**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2022** – Brasília: CNT: SEST SENAT, 2022. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>> .

DA SILVA, L.M.; SANTOS, R.O.G. Estudo comparativo: método empírico do DNIT e mecanístico-empírico (Medina) no dimensionamento de pavimentos flexíveis. **Engineering Sciences**, v. 9, n. 1, p. 114-124, 2021.

DAVIES, TOM. **Assessing the suitability of the loadman single-point falling weight deflectometer to tracking the change in strength in thin asphalt roads through spring thaw in Saskatchewan**. University of New Brunswick International Symposium on Thin Pavements, Surface Treatments, and Unbound Roads, New Brunswick, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT ME - 024/94. **Método de Ensaio – Pavimento – Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman**. Rio de Janeiro. 1994.

DNER. Norma 10/79 – PRO - Procedimento A - **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis**. MT/DNER/IPR. Rio de Janeiro, 1979.

DNER. Norma 11/79 – PRO - Procedimento B - **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis**. MT/DNER/IPR. Rio de Janeiro, 1979.

DNIT. **Elaboração de projeto executivo de engenharia para melhoramentos em rodovias com adequação de capacidade e segurança da BR-230/PB**. Volume 3 – Memória Justificativa Tomo III, 2016.

DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. IPR. Brasília-DF. 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes / IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNIT 133/2010 - ME: Pavimentação asfáltica - delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT ME 134/2018. **Método de Ensaio - Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência**. Rio de Janeiro. 2018.

_____. DNIT ME 135/2018. **Método de Ensaio – Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência**. Rio de Janeiro. 2018.

_____. DNIT ME 136/2018. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro. 2018.

_____. DNIT ME 181/2018. **Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência**. Rio de Janeiro. 2018.

_____. DNIT ME 183/2018. **Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada**. Rio de Janeiro. 2018.

_____. DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. Ed. Rio de Janeiro. 274p. (Publ. IPR, 719). 2006.

DUARTE, J. C.; SILVA, P. D. E. A.; FABRÍCIO, J. M. **Correlação entre Deflexões Características em Pavimentos Flexíveis Medidos com a Viga Benkelman e com o FWD– Falling Weight Deflectometer.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., vol.2, 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: RAPv, 1996., p. 637-64.

FERRI, S. **Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos.** 2013. 331 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

FLEMING, P. R.; FROST, M. W.; LAMBERT, J. P.; **Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, p. 80-87, 2004.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos –SisPav.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. de P.; UBALDO, M. de O.; FRITZEN, M. A.; LIMA, C. D. A. de; MOTTA, L. M. G da. **Análise de projeto de reforço utilizando o método M-E de dimensionamento nacional MeDiNa.** In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual de Utilização.** Versão 1.1.4. Rio de Janeiro, 2020.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos.** Tese de Doutorado—Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2016.

FRITZEN, M.A.; FRANCO, F.A.C.P.; NASCIMENTO, L.A.; *et al.* **Classificação de Misturas Asfálticas Quanto ao Desempenho à Fadiga.** 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2019.

FONSECA, L. F. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2a Etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.** Dissertação de Mestrado Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, mar. 2013.

GOURVÈS, R.; BARJOT, R. **Le pénétromètre dynamique léger Panda. Seminaire: De la geologie au calcul des ouvrages.** Grenoble, France, 1996.

GOMES, L. H. C. **Equivalência operacional entre equipamentos deflectométricos – estudo de caso em rodovia localizada em Ouro Branco.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

GONÇALVES, F.P. **O diagnóstico e a manutenção dos pavimentos.** Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 1999.

GUZZARLAPUDI, S.D.; ADIGOPULA, V.K.; KUMAR, R. Comparative studies of lightweight deflectometer and Benkelman beam deflectometer in low volume roads. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** (English Edition), v. 3, n. 5, p. 438-447, 2016.

HAN, B, et al. Accelerated Pavement Testing to Evaluate the Reinforcement Effect of Geogrids in Flexible Pavements. **Transportation Research Record**, vol. 2674, no. 10, 2020, pp. 134–145.

HARIYADI, E. S.; UTAMI, R. Predicting Bonding Condition Between Asphalt Pavement Layers from Measured and Computed Deflection using Layer Moduli Backcalculation. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 11, p. 1700–1709, 2015.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2.ed. Englewood Cliffs: Pearson/Prentice Hall. [S.l.]. 2004.

HORA, E. **Surface moduli determined with the falling weight deflectometer used as benchmarking tool**. SATC 2007 - In: 26TH ANNUAL SOUTHERN AFRICAN TRANSPORT CONFERENCE: The Challenges of Implementing Policy, Anais..., n. July, p. 284–293, 2007.

HORAK, E. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. **Journal of the South African Institution of Civil Engineers**, Joanesburgo, v. 50, n. 2, p. 2-9, 2008.

IRWIN, L. H. **Backcalculation: an overview and perspective**. 6^a International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Lisboa, Portugal, 2002.

PANDOLFO, D., K.; ECHEVERRIA, J., A., S.; SPECHT, L. P. **Análise mecânica de um pavimento flexível restaurado a partir do MR obtido em diferentes softwares de retroanálise com dados de viga Benkelman**. *Revista de Engenharia Civil IMED*, Passo Fundo, v. 3, n. 2, p. 71-86, dez. 2016.

LEPARK, F; ISACSSON, U; DAWSON, A. State of the art. I: resilient response of unbound aggregates. **Journal of Transportation Engineering ASCE**. Vol. 126 (1), Pág. 66-75. EUA, 2000.

LIMA, C. D. A. **Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

LIVNEH, M.; LIVNEH, N. A.; ELHADAD, E. Determining a pavement modulus from portable FWD testing. ASTM International - **Geotechnical Testing Journal**, Volume 20, Issue 4, 1997.

LOPES, R. A. **Avaliação de programas de retroanálise de bacias deflectométricas - aplicação a um trecho de uma rodovia federal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2019.

MABROUK, G. M; ELBAGALATI, O. S; DESSOUKY, S; Fuentes, L; WALUBITA, L. F. **Using ANN modeling for pavement layer moduli backcalculation as a function of traffic speed deflections.** Construction and Building Materials, Volume 315, 2022.

MACÊDO, F.N. **Retroanálise de Bacias de Deflexão Reais e Teóricas Obtidas por Métodos Estáticos e Dinâmicos.** Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, DF, 2003.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** 478 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

MACHADO, A. B. A. S. B. **Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos.** 2012. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa / Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2012.

MACHADO, T.F.O. **Projeto de reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF baseado no novo método de dimensionamento mecanístico empírico nacional.** Juiz de Fora – MG: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2019.

MACHADO, T. F. DE O., MARQUES, G. L. DE O., & ROCHA, M. L. Flexible pavement overlay design of UFJF ring road based on the new Brazilian mechanistic-empirical pavement design method. *REM - International Engineering Journal*, 73(4), 445–452, 2020.

MAGALHÃES, B. A. C. **Comparação de diferentes métodos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários.** Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2015.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica: efeito da compactação por impacto e giratória.** Tese (Doutorado) – Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2014.

MEDINA, J., MACÊDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G., ALBERNAZ, C.A.V. **Utilização de Ensaio Deflectométrico e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos.** 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG, set. 1994.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos.** 1ª ed. Editora UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** 3a ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 640p.

MELLO, L. B. **Estudo do módulo de resiliência de mistura de latossolo argiloso e brita para emprego em bases de pavimentos flexíveis.** Trabalho de Conclusão de Curso,

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, Rio Grande do Sul, 2019.

MOTTA, L. M. G; MEDINA, J. Investigação e desenvolvimento em mecânica dos pavimentos na COPPE – Brasil. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho** n°. 26. Pág. 85-97. Portugal, 2006.

METOGO, D. A. N. **Estudos laboratoriais e avaliação estrutural de um pavimento asfáltico construído com misturas de solo tropical, fosfogesso e cal.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

MURILLO, F. C. A.; BEJARANO, U. L. E. **Correlation between deflections measurements on flexible pavements obtained under static and dynamic load techniques.** Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris - França. pp. 393-398.

MONISMITH, C. L.; OGAWA, N; FREEME, C. R. **Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading.** In: Annual Meeting of TRB, 54th, 1975, Washington DC. Proceedings... [S.l.: s.n.], 1975. p. 1-17 apud FRANCO, F. A. C. P. Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV. 2007. 294f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** Rio de Janeiro: LTCF, 6ª ed., 2018.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MYUNG, In J.; PITT, Mark A; KIM, Woojae. **Model evaluation, testing and selection.** Columbus: Ohio State University, Department of Psychology, 2003.

NERY, C. C. Z. **Comparativo entre deflexões com viga Benkelman, FWD e LWD na avaliação estrutural e dimensionamento de reforço de pavimentos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Joinville, Santa Catarina, 2020.

NÓBREGA, E.S., **Comparação entre método de retroanálise em pavimentos asfálticos.** Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

NORBACK, C. **Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solo-brita.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2018.

PAI, R. R. et al. Structural evaluation of flexible pavement constructed with steel slag–fly ash–lime mix in the base layer. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 6, p. 04021097, 2021.

PANDOLFO, D.K.; ECHEVERRIA, J.A.S.; SPECHT, L.P. **Análise mecânica de um pavimento flexível restaurado a partir do MR obtido em diferentes softwares de retroanálise com dados de viga Benkelman**. *Revista de Engenharia Civil IMED*, v. 3, n. 2, p. 71-86, 2016.

PARKER JR, F. Estimation of paving materials design moduli from Falling Weight Deflectometer measurements. TRR 1293. **Transportation Research Board**, Washington (EUA), 1991.

PEREIRA, J. M. B. **Um Procedimento de Retroanálise de Pavimentos Flexíveis Baseado na Teoria do Ponto Inerte e em Modelagem Matemática**. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PREUSSLER, E.S., VALE, A.F., CARVALHO, R.L.E. **Caracterização da Condição Elástica do Subleito**. In: 32a Reunião Anual de Pavimentação. V. 1 pp. 331-336, Brasília, DF, Brasil, 2000.

PONTE, R. S, et al. Avaliação De Diferentes Metodologias Para Obtenção Do Módulo De Resiliência De Misturas Asfálticas. **Transportes (Rio De Janeiro)**, vol. 22, no. 2, 2014, pp. Transportes (Rio de Janeiro), 2014, Vol.22 (2).

RAMOS, C. R. **Estudo para o desenvolvimento de um catálogo de pavimentos flexíveis do município do RJ**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

REIS, A. C. D. C.; GUIMARÃES, A. C. R. **Estudo sobre a deformabilidade da camada de base da nova pista de pouso e decolagem do aeroporto de Guarulhos/SP**. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 2012.

ROCHA FILHO, N. R. **Estudo de Técnicas Pavimentos por Meio de Levantamentos para Avaliação Estrutural de Deflectométricos**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP, 1996.

ROCHA, M. L. **Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis**. Dissertação – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020.

ROCHA, M. L.; MARQUES, G. L. de O.; SILVA, R. C.; MOTTA, L. M. G. Influência da condição de aderência entre camadas no dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos. **TRANSPORTES, [S. l.]**, v. 29, n. 2, p. 2419, 2021.

ROCHA, M *et al.* Influence of Seed Layer Moduli on Backcalculation Procedure and on Overlay Design of Flexible Pavements. **Transportation Research Record**, vol. 2676, no. 5, 2022, pp. 341–357.

ROCHA FILHO, N.R., RODRIGUES, R.M. **A Avaliação Estrutural dos Pavimentos por Meio de Levantamentos Deflectométricos**. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, BA, nov. 1996.

RODRIGUES, J. K. G. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível de base constituída de solo laterítico, através dos ensaios deflectométricos e pressiométricos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 1992.

RODRIGUES, T. N. **Estudo comparativo do CBR “in situ” e LWD para determinação da capacidade de suporte de subleitos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2017.

RODRIGUES, P.R.; DOS SANTOS, A.G.; ODEBRECHT, E. **Avaliação do potencial de uso do deflectômetro de impacto leve para medidas de deflexão em pavimentos urbanos**. *TRANSPORTES*, v. 28, n. 5, p. 70-82, 2020.

SILVA, L. M.; SANTOS, R. O. G. **Estudo comparativo: método empírico do DNIT e mecanístico-empírico (Medina) no dimensionamento de pavimentos flexíveis**. *Engineering Sciences*, v.9, n.1, p.114-124, 2021.

SALTAN, M, et al. **Backcalculation of Pavement Layer Moduli and Poisson’s Ratio Using Data Mining**. *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 3, 2011, pp. 2600–2608.

SALVIANO, W. R. A. **Análise do controle construtivo de um pavimento semirrígido por deflexão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2015.

SALVIATTO, V.H. *et al.* Índice de avaliação da condição de pavimentos flexíveis urbanos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 2, 2020.

SANJAY, R. et al. Comparative study on structural evaluation of flexible pavement using BBD and FWD. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, p. 608-615, 2022.

SANTOS, C. R. G. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANTOS, P. J. C. R dos. **Utilização de deflectômetro de peso leve (LWD) em pavimento rodoviário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio Janeiro, 2014.

SOUZA JÚNIOR, José Geraldo de. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2018.

SIVANESWARAN, N.; KRAMER, S.L.; MAHONEY, J.P. **Advanced Backcalculation**

Using a Nonlinear Least Squares Optimization Technique. *Transportation Research* (1991) Record, no 1293, p. 93-102.

SVENSON, M. **Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1980.

TUTKA, P.; NAGÓRSKI, R.; ZLOTOWSKA, M. **Backcalculation of flexible pavement moduli including interlayer bonding conditions – numerical analysis**. *Archives of Civil Engineering*, v. 68, n. 3, 2022.

THEISEN, K. M. et al. **Método de retroanálise de bacias obtidas por carregamento de eixo padrão através do uso de softwares adaptados para FWD**. In: Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes xxiii (ANPET). Vitória-ES. 2009. Anais... Vitória-ES, 12p.

TMR - Queensland Department of Transport and Main Roads / Pavements, Materials & Geotechnical Branch. **Pavement rehabilitation manual**. Brisbane, 2012.

ULLIDTZ, P. *Pavement Analysis*. Elsevier, Amsterdam, 1987, p. 254-282.

VELLASCO, B. Q. **Análise crítica do controle construtivo de pavimentos com a viga de Benkelman: aplicação ao caso da ampliação do Aeroporto Internacional Tom Jobin no Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

YOU, L.; YAN, K.; LIU, N. Assessing artificial neural network performance for predicting interlayer conditions and layer modulus of multi-layered flexible pavement. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 14, p. 487-500, 2020.

ZHANG, J., FAN, Z., PEI, J., LI, R., CHANG, M. Multiscale validation of the applicability of micromechanical models for asphalt mixture. **Advances in Materials Science and Engineering**, 937126, pp. 1-8, 2015.

APÊNDICE A – RESUMO DOS DADOS DOS TRECHOS

Tabela 51 - Resumo das informações do Trecho 1 (PB 138)

Características		
Fase de monitoramento	Pós-execução	
Liberação do tráfego	01/06/2015	
Tempo em serviço (anos)	7	
Tempo em serviço (meses)	103	
Características		
Município/Estado	Catolé do Boa Vista/PB	
Extensão (metros)	400	
Início	Estaca	43
Fim	Estaca	63
Número de faixas	2	
Faixa monitorada	Direita	
Composição estrutural		
Camada	Material	Espessura (mm)
Revestimento	CAUQ CAP 50/70	50
Base	Solo + 30% Areia	200
Sub-base	Solo	200
Subleito	Solo	-

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 52 - Resumo das informações do Trecho 2 (BR 230/PB)

Características		
Fase de monitoramento	Pós-execução	
Liberação do tráfego	01/10/2020	
Tempo em serviço (anos)	2	
Tempo em serviço (meses)	26	
Características		
Município/Estado	Cabedelo/PB	
Extensão (metros)	260	
Início	Estaca	340
Fim	Estaca	353
Número de faixas	3	
Faixa monitorada	Direita	
Composição estrutural		
Camada	Material	Espessura (mm)
Revestimento Superior	CAUQ CAP 55/75	70
Revestimento Inferior	TSD	25
Base	BGTC	150
Sub-base	Solo	150
Subleito	Solo	-

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE B – DADOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN

Tabela 53 - Deflexões trecho 1 (PB 138)

Bacias de Deflexões (0,01 mm)							
ESTACA	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	125 cm	300 cm
ANO 1 - 2019							
43	43,3	28,1	14,4	8,2	6,5	3,4	0,0
44	43,3	20,5	16,6	6,5	3,4	2,3	0,0
45	69,6	49,4	23,2	10,7	5,6	2,3	0,0
46	23,2	15,8	8,2	5,6	3,4	2,3	0,0
47	63,0	49,4	23,2	9,8	4,1	2,3	0,0
48	36,5	25,4	12,8	6,5	3,4	2,3	0,0
49	39,8	25,4	14,4	7,6	4,1	2,3	0,0
50	33,1	20,5	12,8	8,2	6,5	5,0	0,0
51	63,0	43,3	21,3	11,9	6,5	4,1	0,0
52	33,1	20,5	8,2	5,2	4,1	2,3	0,0
53	36,5	25,4	11,9	5,6	3,4	2,3	0,0
54	23,2	15,8	10,7	8,9	4,1	2,3	0,0
55	33,1	16,6	11,9	6,5	4,1	2,3	0,0
56	23,2	12,8	8,2	5,6	3,4	2,3	0,0
57	16,6	11,9	7,6	4,1	2,3	1,5	0,0
58	33,1	15,8	11,9	5,6	3,4	2,3	0,0
59	16,6	11,9	7,6	5,6	3,4	2,3	0,0
60	16,6	8,2	5,6	3,4	2,3	1,5	0,0
61	16,6	10,7	6,5	5,6	2,3	1,5	0,0
62	20,5	11,9	7,6	4,1	2,3	1,5	0,0
63	28,1	10,7	6,5	4,1	2,3	1,5	0,0
ANO 2 - 2021							
43	49,4	25,4	14,4	9,8	7,6	5,6	0,0
44	57,9	49,4	33,1	21,3	14,4	9,8	0,0
45	68,1	57,9	33,1	14,4	7,6	3,4	0,0
46	54,5	36,5	20,5	10,7	7,6	4,1	0,0
47	71,5	57,9	23,2	9,8	4,1	2,3	0,0
48	54,5	39,8	20,5	10,7	6,5	3,4	0,0
49	44,3	33,1	16,6	10,7	7,6	4,1	0,0
50	49,4	25,4	16,6	11,9	8,2	6,5	0,0
51	54,5	28,1	20,5	14,4	10,7	6,5	0,0
52	36,5	20,5	14,4	10,7	8,2	5,6	0,0
53	33,1	18,0	12,8	8,2	6,5	4,1	0,0
54	36,5	28,1	16,6	8,2	4,1	2,3	0,0
55	28,1	14,4	8,2	6,5	4,1	3,4	0,0
56	36,5	23,2	12,8	8,2	5,6	4,1	0,0
57	33,1	21,3	16,6	14,4	11,9	8,2	0,0
58	20,5	14,4	8,2	5,6	3,4	2,3	0,0
59	33,1	23,2	16,6	10,7	7,6	5,6	0,0
60	20,5	14,4	9,8	6,5	4,1	3,4	0,0
61	20,5	15,8	8,2	4,1	3,4	2,3	0,0
62	20,5	10,7	7,6	5,6	4,1	3,4	0,0
63	16,6	12,8	9,8	6,5	4,1	3,4	0,0
ANO 3 - 2022							

43	49,4	23,2	15,8	10,7	8,2	5,6	0,0
44	63,0	49,4	36,5	25,4	10,7	3,4	0,0
45	83,2	68,1	49,4	36,5	28,1	10,7	0,0
46	57,9	39,8	20,5	10,7	5,6	3,4	0,0
47	73,3	43,3	25,4	16,6	12,8	8,2	0,0
48	57,9	43,3	28,1	14,4	8,2	5,6	0,0
49	73,3	63,0	43,3	33,1	23,2	12,8	0,0
50	49,4	33,1	21,3	14,4	10,7	6,5	0,0
51	63,0	43,3	33,1	25,4	20,5	16,6	0,0
52	43,3	33,1	15,8	7,6	4,1	2,3	0,0
53	43,3	28,1	25,4	20,5	16,6	14,4	0,0
54	33,1	25,4	21,3	16,6	14,4	10,7	0,0
55	36,5	23,2	14,4	9,8	6,5	4,1	0,0
56	39,8	23,2	7,6	3,4	2,3	1,5	0,0
57	33,1	20,5	10,7	6,5	4,1	2,3	0,0
58	28,1	18,0	10,7	7,6	4,1	3,4	0,0
59	33,1	25,4	18,0	12,8	9,8	7,6	0,0
60	28,1	18,0	14,4	11,9	9,8	8,2	0,0
61	28,1	14,4	8,2	5,6	4,1	3,4	0,0
62	23,2	10,7	7,6	4,1	3,4	2,3	0,0
63	20,5	10,7	8,2	4,1	3,4	2,3	0,0

Tabela 54 - Deflexões trecho 2 (BR 230/PB)

Bacias de Deflexões (0,01 mm)							
ESTACA	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	125 cm	300 cm
ANO 1 - 2020							
340	9,8	7,6	5,6	4,1	1,5	0,0	0,0
341	9,8	6,5	4,1	2,3	1,5	0,0	0,0
342	12,8	6,5	4,1	2,3	1,5	0,0	0,0
343	9,8	5,6	4,1	2,3	1,5	0,0	0,0
344	9,8	6,5	2,3	1,5	0,0	0,0	0,0
345	9,8	6,5	3,4	1,5	0,0	0,0	0,0
346	6,5	3,4	2,3	1,5	0,0	0,0	0,0
347	6,5	4,1	2,3	1,5	0,0	0,0	0,0
348	12,8	10,7	6,5	3,4	1,5	0,0	0,0
349	6,5	4,1	2,3	1,5	0,0	0,0	0,0
350	6,5	4,1	2,3	1,5	0,0	0,0	0,0
351	5,6	3,4	2,3	1,5	0,0	0,0	0,0
352	10,7	7,6	4,1	2,3	1,5	0,0	0,0
353	18,0	12,8	6,5	3,4	1,5	0,0	0,0
ANO 2 - 2021							
340	43,3	28,1	14,4	7,6	4,1	3,4	0,0
341	18,0	14,4	7,6	3,4	2,3	1,5	0,0
342	28,1	20,5	15,8	12,8	10,7	7,6	0,0
343	33,1	28,1	18,0	11,9	7,6	4,1	0,0
344	10,7	9,8	6,5	4,1	3,4	2,3	0,0
345	20,5	16,6	11,9	7,6	5,6	3,4	0,0
346	10,7	7,6	5,6	4,1	3,4	2,3	0,0
347	10,7	8,2	5,6	3,4	2,3	1,5	0,0
348	10,7	8,2	5,6	2,3	1,5	0,0	0,0

349	6,5	4,1	3,4	2,3	1,5	0,0	0,0
350	14,4	10,7	7,6	5,6	4,1	3,4	0,0
351	6,5	5,6	4,1	3,4	2,3	1,5	0,0
352	21,3	15,8	10,7	6,5	3,4	1,5	0,0
353	10,7	8,2	6,5	4,1	3,4	1,5	0,0
ANO 3 - 2022							
340	43,3	33,1	28,1	16,6	9,8	6,5	0,0
341	18,0	15,8	11,9	7,6	5,6	3,4	0,0
342	36,5	23,2	14,4	10,7	7,6	5,6	0,0
343	43,3	33,1	25,4	20,5	16,6	12,8	0,0
344	10,7	8,2	5,6	3,4	2,3	1,5	0,0
345	28,1	23,2	18,0	14,4	12,8	10,7	0,0
346	10,7	7,6	5,6	4,1	3,4	1,5	0,0
347	10,7	7,6	6,5	5,6	4,1	3,4	0,0
348	14,4	11,9	5,6	2,3	1,5	0,0	0,0
349	6,5	4,1	3,4	2,3	1,5	0,0	0,0
350	14,4	10,7	7,6	5,6	4,1	2,3	0,0
351	10,7	8,2	6,5	4,1	3,4	2,3	0,0
352	25,4	21,3	18,0	16,6	14,4	12,8	0,0
353	10,7	9,8	7,6	4,1	3,4	1,5	0,0

APÊNDICE C – DEFLEXÕES DE VIGA BENKELMAN ADAPTADAS PARA FWD

Tabela 55 - Bacias deflectométricas adaptadas: techo 1

Bacias de Deflexões (0,01 mm)							
ESTACA	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	15 cm	29 cm	52 cm	76 cm	101 cm	125 cm	300 cm
ANO 1 - 2019							
43	21,7	14,1	7,2	4,1	3,3	1,7	0,0
44	21,7	10,3	8,3	3,3	1,7	1,2	0,0
45	34,8	24,7	11,6	5,4	2,8	1,2	0,0
46	11,6	7,9	4,1	2,8	1,7	1,2	0,0
47	31,5	24,7	11,6	4,9	2,1	1,2	0,0
48	18,3	12,7	6,4	3,3	1,7	1,2	0,0
49	19,9	12,7	7,2	3,8	2,1	1,2	0,0
50	16,6	10,3	6,4	4,1	3,2	2,5	0,0
51	31,5	21,7	10,7	6,0	3,3	2,1	0,0
52	16,6	10,3	4,1	2,6	2,1	1,2	0,0
53	18,3	12,7	6,0	2,8	1,7	1,2	0,0
54	11,6	7,9	5,4	4,4	2,1	1,2	0,0
55	16,6	8,3	6,0	3,3	2,1	1,2	0,0
56	11,6	6,4	4,1	2,8	1,7	1,2	0,0
57	8,3	6,0	3,8	2,1	1,2	0,8	0,0
58	16,6	7,9	6,0	2,8	1,7	1,2	0,0
59	8,3	6,0	3,8	2,8	1,7	1,2	0,0
60	8,3	4,1	2,8	1,7	1,2	0,8	0,0
61	8,3	5,4	3,3	2,8	1,2	0,8	0,0
62	10,3	6,0	3,8	2,1	1,2	0,8	0,0
63	14,1	5,4	3,3	2,1	1,2	0,8	0,0
ANO 2 - 2021							
43	24,7	12,7	7,2	4,9	3,8	2,8	0,0
44	29,0	24,7	16,6	10,7	7,2	4,9	0,0
45	34,1	29,0	16,6	7,2	3,8	1,7	0,0
46	27,3	18,3	10,3	5,4	3,8	2,1	0,0
47	35,8	29,0	11,6	4,9	2,1	1,2	0,0
48	27,3	19,9	10,3	5,4	3,3	1,7	0,0
49	22,2	16,6	8,3	5,4	3,8	2,1	0,0
50	24,7	12,7	8,3	5,9	4,1	3,3	0,0
51	27,3	14,1	10,3	7,2	5,4	3,3	0,0
52	18,3	10,3	7,2	5,4	4,1	2,8	0,0
53	16,6	9,0	6,4	4,1	3,3	2,1	0,0
54	18,3	14,1	8,3	4,1	2,1	1,2	0,0
55	14,1	7,2	4,1	3,3	2,1	1,7	0,0
56	18,3	11,6	6,4	4,1	2,8	2,1	0,0
57	16,6	10,6	8,3	7,2	6,0	4,1	0,0
58	10,3	7,2	4,1	2,8	1,7	1,2	0,0
59	16,6	11,6	8,3	5,4	3,8	2,8	0,0
60	10,3	7,2	4,9	3,3	2,1	1,7	0,0
61	10,3	7,9	4,1	2,1	1,7	1,2	0,0
62	10,3	5,4	3,8	2,8	2,1	1,7	0,0
63	8,3	6,4	4,9	3,3	2,1	1,7	0,0
ANO 3 - 2022							

43	24,7	11,6	7,9	5,4	4,1	2,8	0,0
44	31,5	24,7	18,3	12,7	5,4	1,7	0,0
45	41,6	34,1	24,7	18,3	14,1	5,4	0,0
46	29,0	19,9	10,3	5,4	2,8	1,7	0,0
47	36,7	21,7	12,7	8,3	6,4	4,1	0,0
48	29,0	21,7	14,1	7,2	4,1	2,8	0,0
49	36,7	31,5	21,7	16,6	11,6	6,4	0,0
50	24,7	16,6	10,7	7,2	5,4	3,3	0,0
51	31,5	21,7	16,6	12,7	10,3	8,3	0,0
52	21,7	16,6	7,9	3,8	2,1	1,2	0,0
53	21,7	14,1	12,7	10,3	8,3	7,2	0,0
54	16,6	12,7	10,7	8,3	7,2	5,4	0,0
55	18,3	11,6	7,2	4,9	3,3	2,1	0,0
56	19,9	11,6	3,8	1,7	1,2	0,8	0,0
57	16,6	10,3	5,4	3,3	2,1	1,2	0,0
58	14,1	9,0	5,4	3,8	2,1	1,7	0,0
59	16,6	12,7	9,0	6,4	4,9	3,8	0,0
60	14,1	9,0	7,2	6,0	4,9	4,1	0,0
61	14,1	7,2	4,1	2,8	2,1	1,7	0,0
62	11,6	5,4	3,8	2,1	1,7	1,2	0,0
63	10,3	5,4	4,1	2,1	1,7	1,2	0,0

Tabela 56 - Bacias deflectométricas adaptadas: trecho 2

Bacias de Deflexões (0,01 mm)							
ESTACA	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	15 cm	29 cm	52 cm	76 cm	101 cm	125 cm	300 cm
ANO 1 - 2020							
340	4,9	3,8	2,8	2,1	0,8	0,0	0,0
341	4,9	3,3	2,1	1,2	0,8	0,0	0,0
342	6,4	3,3	2,1	1,2	0,8	0,0	0,0
343	4,9	2,8	2,1	1,2	0,8	0,0	0,0
344	4,9	3,3	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0
345	4,9	3,3	1,7	0,8	0,0	0,0	0,0
346	3,3	1,7	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0
347	3,3	2,1	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0
348	6,4	5,4	3,3	1,7	0,8	0,0	0,0
349	3,3	2,1	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0
350	3,3	2,1	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0
351	2,8	1,7	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0
352	5,4	3,8	2,1	1,2	0,8	0,0	0,0
353	9,0	6,4	3,3	1,7	0,8	0,0	0,0
ANO 2 - 2021							
340	21,7	14,1	7,2	3,8	2,1	1,7	0,0
341	9,0	7,2	3,8	1,7	1,2	0,8	0,0
342	14,1	10,3	7,9	6,4	5,4	3,8	0,0
343	16,6	14,1	9,0	6,0	3,8	2,1	0,0
344	5,4	4,9	3,3	2,1	1,7	1,2	0,0
345	10,3	8,3	6,0	3,8	2,8	1,7	0,0
346	5,4	3,8	2,8	2,1	1,7	1,2	0,0
347	5,4	4,1	2,8	1,7	1,2	0,8	0,0
348	5,4	4,1	2,8	1,2	0,8	0,0	0,0

349	3,3	2,1	1,7	1,2	0,8	0,0	0,0
350	7,2	5,4	3,8	2,8	2,1	1,7	0,0
351	3,3	2,8	2,1	1,7	1,2	0,8	0,0
352	10,7	7,9	5,4	3,3	1,7	0,8	0,0
353	5,4	4,1	3,3	2,1	1,7	0,8	0,0
ANO 3 - 2022							
340	21,7	16,6	14,1	8,3	4,9	3,3	0,0
341	9,0	7,9	6,0	3,8	2,8	1,7	0,0
342	18,3	11,6	7,2	5,4	3,8	2,8	0,0
343	21,7	16,6	12,7	10,3	8,3	6,4	0,0
344	5,4	4,1	2,8	1,7	1,2	0,8	0,0
345	14,1	11,6	9,0	7,2	6,4	5,4	0,0
346	5,4	3,8	2,8	2,1	1,7	0,8	0,0
347	5,4	3,8	3,3	2,8	2,1	1,7	0,0
348	7,2	6,0	2,8	1,2	0,8	0,0	0,0
349	3,3	2,1	1,7	1,2	0,8	0,0	0,0
350	7,2	5,4	3,8	2,8	2,1	1,2	0,0
351	5,4	4,1	3,3	2,1	1,7	1,2	0,0
352	12,7	10,7	9,0	8,3	7,2	6,4	0,0
353	5,4	4,9	3,8	2,1	1,7	0,8	0,0

**APÊNDICE D – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS COM O
BackMeDiNa**

Tabela 57 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 1 (2019)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)			Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Subleito	
43	campo	216,5	140,7	72,2	40,8	32,5	17,0	6115	309	113	16,30%
	retro	215,0	125,0	61,0	37,0	27,0	22,0				
44	campo	216,5	102,5	83,0	32,5	17,0	11,5	6875	250	225	32,20%
	retro	205,0	109,0	49,0	31,0	23,0	18,0				
45	campo	348,0	247,0	116,0	53,5	28,0	11,5	8250	50	225	35,30%
	retro	372,0	194,0	58,0	27,0	21,0	18,0				
46	campo	116,0	79,0	41,0	28,0	17,0	11,5	10313	450	225	31,40%
	retro	167,0	101,0	51,0	32,0	23,0	18,0				
47	campo	315,0	247,1	116,0	49,0	20,5	11,5	8438	63	225	30,20%
	retro	335,0	174,0	55,0	28,0	22,0	18,0				
48	campo	182,5	127,0	64,0	32,5	17,0	11,5	7500	300	225	29,60%
	retro	192,0	106,0	50,0	31,0	23,0	18,0				
49	campo	199,0	127,0	72,0	38,0	20,5	11,5	7500	263	225	28,30%
	retro	200,0	109,0	50,0	31,0	23,0	18,0				
50	campo	165,5	102,5	63,9	41,0	32,3	25,1	6250	300	188	18,30%
	retro	218,0	124,0	60,0	37,0	27,0	22,0				
51	campo	315,0	216,5	106,5	59,5	32,7	20,7	8063	93	150	21,50%
	retro	346,0	193,0	78,0	45,0	34,0	28,0				
52	campo	165,5	102,5	41,0	26,0	20,5	11,5	6735	277	285	15,30%
	retro	173,0	88,0	38,0	24,0	18,0	15,0				
53	campo	182,5	127,2	59,5	28,0	17,0	11,5	5625	300	225	29,50%
	retro	196,0	105,0	49,0	31,0	23,0	18,0				
54	campo	116,0	79,1	53,5	44,4	20,5	11,5	10505	776	270	22,30%
	retro	127,0	80,0	43,0	27,0	19,0	15,0				
55	campo	165,5	83,0	59,5	32,5	20,5	11,5	10040	434	270	19,80%
	retro	150,0	86,0	42,0	26,0	19,0	15,0				
56	campo	116,0	64,0	41,0	28,0	17,0	11,5	6092	1064	309	9,30%
	retro	108,0	68,0	38,0	24,0	17,0	13,0				
57	campo	83,0	59,5	38,0	20,5	11,5	7,5	10125	675	338	32,10%
	retro	114,0	67,0	34,0	21,0	15,0	12,0				
58	campo	165,5	79,0	59,5	28,0	17,0	11,5	8438	413	281	19,40%
	retro	151,0	84,0	40,0	25,0	18,0	15,0				
59	campo	83,0	59,5	38,0	28,0	17,0	11,5	7594	1013	338	16,00%
	retro	103,0	64,0	34,0	21,0	15,0	12,0				
60	campo	83,0	41,0	28,0	17,0	11,5	7,5	9000	619	169	27,60%
	retro	165,0	117,0	71,0	45,0	32,0	25,0				
61	campo	83,0	53,5	32,5	28,0	11,5	7,5	9281	1013	338	31,80%
	retro	102,0	64,0	34,0	21,0	15,0	12,0				
62	campo	102,5	59,5	38,2	20,5	11,5	7,5	10313	450	338	31,00%
	retro	129,0	71,0	33,0	21,0	15,0	12,0				
63	campo	140,5	53,6	32,5	20,5	11,5	7,5	7500	506	338	29,20%
	retro	130,0	66,0	33,0	21,0	15,0	12,0				

Tabela 58 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 1 (2021)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)			Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Subleito	
43	campo	247,0	127,0	72,0	49,0	38,0	28,0	6750	261	158	6,60%
	retro	221,0	135,0	78,0	51,0	36,0	28,0				
44	campo	289,5	247,0	165,5	106,5	72,0	49,0	7500	250	79	10,70%
	retro	314,0	221,0	147,0	104,0	76,0	58,0				
45	campo	340,5	289,5	165,5	72,0	38,0	17,0	10313	63	169	28,90%
	retro	419,0	254,0	103,0	47,0	30,0	23,0				
46	campo	272,5	182,5	102,5	53,5	38,0	20,5	8063	130	163	15,70%
	retro	305,0	177,0	83,0	49,0	33,0	26,0				
47	campo	357,5	289,5	116,0	49,0	20,5	11,5	11250	46	253	21,40%
	retro	443,0	267,0	96,0	33,0	17,0	14,0				
48	campo	272,5	199,0	102,7	53,5	32,5	17,0	8625	111	181	20,80%
	retro	315,0	181,0	79,0	43,0	29,0	23,0				
49	campo	221,5	165,5	83,0	53,5	38,0	20,5	8269	195	169	13,50%
	retro	244,0	145,0	76,0	48,0	33,0	25,0				
50	campo	247,0	127,0	83,0	59,4	41,0	32,5	6125	300	138	6,80%
	retro	221,0	141,0	88,0	60,0	42,0	32,0				
51	campo	272,5	140,5	102,5	72,0	53,5	32,5	7890	263	123	10,20%
	retro	245,0	160,0	98,0	67,0	47,0	36,0				
52	campo	182,5	102,5	72,0	53,5	41,0	28,0	5063	450	150	7,60%
	retro	175,0	116,0	78,0	55,0	39,0	30,0				
53	campo	165,5	90,0	64,0	41,0	32,5	20,5	5625	300	150	29,50%
	retro	176,0	116,0	78,0	55,0	39,0	30,0				
54	campo	182,5	140,5	83,0	41,0	20,5	11,5	9375	175	281	26,60%
	retro	212,0	115,0	49,0	28,0	19,0	15,0				
55	campo	140,5	72,0	41,0	32,5	20,5	17,0	3938	450	225	20,80%
	retro	144,0	87,0	54,0	36,0	26,0	20,0				
56	campo	182,5	116,0	64,0	41,0	28,0	20,6	8269	281	201	2,70%
	retro	189,0	112,0	62,0	40,0	28,0	21,0				
57	campo	165,5	106,4	83,0	72,0	59,5	41,0	10479	544	123	12,30%
	retro	175,0	127,0	90,0	66,0	49,0	38,0				
58	campo	102,5	72,0	41,0	28,0	17,0	11,5	10313	450	338	10,90%
	retro	117,0	67,0	37,0	24,0	17,0	13,0				
59	campo	165,5	116,0	83,0	53,5	38,0	28,0	8372	348	159	7,20%
	retro	189,0	122,0	76,0	52,0	37,0	28,0				
60	campo	102,5	72,0	49,0	32,5	20,5	17,0	11391	473	274	10,60%
	retro	125,0	76,0	45,0	30,0	21,0	16,0				
61	campo	102,5	79,0	41,0	20,5	17,0	11,5	11250	456	351	11,20%
	retro	114,0	66,0	36,0	23,0	16,0	12,0				
62	campo	102,5	53,5	38,0	28,0	20,5	17,0	11250	450	281	10,70%
	retro	100,0	62,0	39,0	26,0	19,0	14,0				
63	campo	83,0	64,0	49,0	32,7	20,5	17,0	7500	506	309	23,80%
	retro	126,0	76,0	44,0	29,0	20,0	15,0				

Tabela 59 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 1 (2022)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)			Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Subleito	
43	campo	247,0	116,0	79,0	53,5	41,0	28,0	5625	683	148	11,90%
	retro	204,0	138,0	80,0	50,0	36,0	28,0				
44	campo	315,0	247,0	182,5	127,0	53,5	17,0	7594	66	169	29,10%
	retro	375,0	200,0	71,0	38,0	29,0	24,0				
45	campo	416,0	340,5	247,0	182,5	140,5	53,5	8438	450	55	24,30%
	retro	443,0	337,0	217,0	143,0	101,0	78,0				
46	campo	289,5	199,0	102,5	53,5	28,0	17,0	9375	78	188	24,70%
	retro	322,0	176,0	65,0	35,0	27,0	22,0				
47	campo	366,5	216,5	127,0	83,0	64,2	41,0	5625	300	92	7,10%
	retro	352,0	232,0	128,0	80,0	57,0	45,0				
48	campo	289,5	216,5	140,5	72,0	41,0	28,0	8344	278	117	17,60%
	retro	295,0	190,0	100,0	62,0	44,0	35,0				
49	campo	366,5	315,0	216,5	165,5	116,0	64,0	8344	345	58	16,10%
	retro	453,0	334,0	206,0	133,0	93,0	72,0				
50	campo	247,0	165,5	106,5	72,0	53,5	32,5	8269	348	117	11,90%
	retro	280,0	184,0	101,0	63,0	45,0	36,0				
51	campo	315,0	216,5	165,5	127,0	102,5	83,0	11250	450	68	20,20%
	retro	373,0	279,0	176,0	114,0	80,0	62,0				
52	campo	216,5	165,5	79,0	38,0	20,5	11,5	12375	94	253	27,50%
	retro	250,0	136,0	49,0	26,0	20,0	16,0				
53	campo	216,5	140,5	127,0	102,5	83,0	72,0	10313	450	99	33,90%
	retro	291,0	205,0	121,0	77,0	54,0	42,0				
54	campo	165,5	127,0	106,5	83,0	72,0	53,5	11250	450	121	31,40%
	retro	251,0	173,0	99,0	62,0	44,0	34,0				
55	campo	182,5	116,0	72,0	49,0	32,5	20,5	8344	345	173	14,20%
	retro	217,0	132,0	67,0	41,0	30,0	24,0				
56	campo	199,0	116,0	38,0	17,0	11,5	7,5	9387	90	423	20,70%
	retro	225,0	103,0	27,0	14,0	12,0	10,0				
57	campo	165,5	102,5	53,5	32,5	20,7	11,5	11250	450	253	19,00%
	retro	154,0	91,0	45,0	28,0	20,0	16,0				
58	campo	140,5	89,8	53,5	38,0	20,5	17,0	11391	473	236	11,60%
	retro	158,0	96,0	49,0	30,0	22,0	18,0				
59	campo	165,5	127,0	90,0	64,0	49,0	38,0	11250	467	141	22,50%
	retro	225,0	151,0	84,0	53,0	37,0	30,0				
60	campo	140,5	90,0	72,0	59,5	49,0	41,0	10313	450	188	30,60%
	retro	188,0	118,0	62,0	38,0	28,0	22,0				
61	campo	140,5	72,0	41,0	28,0	20,5	17,0	7000	450	225	22,10%
	retro	171,0	100,0	51,0	31,0	23,0	18,0				
62	campo	116,0	53,5	38,0	20,5	17,0	11,5	2500	675	338	11,00%
	retro	106,0	63,0	33,0	21,0	15,0	12,0				
63	campo	102,5	53,5	41,0	20,5	17,0	11,5	9844	1013	338	11,80%
	retro	102,0	64,0	34,0	21,0	15,0	12,0				

Tabela 60 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 2 (2020)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)				Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Sub-base	Subleito	
340	campo	49,0	38,0	28,0	20,5	7,5	0,0	3516	11250	886	507	23,70%
	retro	52,0	39,0	25,0	16,0	11,0	0,0					
341	campo	49,0	32,5	20,5	11,5	7,5	0,0	11250	23625	675	507	30,80%
	retro	42,0	34,0	24,0	17,0	12,0	0,0					
342	campo	64,0	32,5	20,5	11,5	7,5	0,0	4219	16875	760	697	19,40%
	retro	38,0	29,0	19,0	12,0	8,0	0,0					
343	campo	49,0	28,0	20,5	11,5	7,5	0,0	5625	10415	675	697	9,20%
	retro	44,0	32,0	19,0	11,0	8,0	0,0					
344	campo	49,0	32,5	11,7	7,5	1,0	0,0	6883	18130	1046	570	17,80%
	retro	45,0	31,0	14,0	5,0	1,0	0,0					
345	campo	49,0	32,5	17,0	7,5	5,0	0,0	4219	8438	475	951	11,30%
	retro	41,0	28,0	15,0	8,0	5,0	0,0					
346	campo	32,5	17,0	11,5	7,5	5,0	0,0	5026	19587	625	475	9,90%
	retro	27,0	19,0	12,0	7,0	5,0	0,0					
347	campo	32,5	20,5	11,5	7,5	5,0	0,0	5863	22845	1029	951	9,70%
	retro	26,0	20,0	12,0	8,0	5,0	0,0					
348	campo	64,0	53,5	32,5	17,0	7,5	0,0	4922	11250	507	507	26,10%
	retro	54,0	41,0	26,0	16,0	11,0	0,0					
349	campo	32,5	20,5	11,5	7,5	5,0	0,0	5788	22845	1029	951	9,70%
	retro	26,0	20,0	12,0	8,0	5,0	0,0					
350	campo	32,5	20,5	11,5	7,5	5,0	0,0	4962	19587	883	658	7,20%
	retro	28,0	20,0	12,0	8,0	5,0	0,0					
351	campo	28,0	17,0	11,5	7,5	5,0	0,0	5906	21094	653	489	8,70%
	retro	26,0	19,0	12,0	8,0	5,0	0,0					
352	campo	53,5	38,0	20,5	11,5	7,5	0,0	4061	14344	646	658	13,70%
	retro	42,0	32,0	20,0	13,0	8,0	0,0					
353	campo	90,0	64,0	32,5	17,0	7,5	0,0	3750	7500	844	338	25,30%
	retro	82,0	57,0	37,0	24,0	16,0	0,0					

Tabela 61 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 2 (2021)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)				Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Sub-base	Subleito	
340	campo	216,5	140,5	72,0	38,0	20,5	17,0	5000	15000	413	150	25,10%
	retro	200,0	120,0	69,0	38,0	21,0	15,0					
341	campo	90,0	72,0	38,0	17,0	11,5	7,5	2334	3129	252	439	13,10%
	retro	91,0	60,0	31,0	17,0	12,0	9,0					
342	campo	140,5	102,5	79,0	64,0	53,5	38,0	3750	15000	150	131	7,40%
	retro	125,0	110,0	86,0	65,0	49,0	38,0					
343	campo	165,5	140,5	90,0	59,5	38,0	20,5	3125	12500	150	150	28,10%
	retro	122,0	105,0	79,0	58,0	42,0	32,0					
344	campo	53,5	49,0	32,5	20,5	17,0	11,5	9375	18750	675	338	13,70%
	retro	58,0	49,0	35,0	25,0	18,0	14,0					
345	campo	102,5	83,0	59,5	38,0	28,0	17,0	3000	10938	225	225	8,50%
	retro	96,0	79,0	56,0	39,0	27,0	20,0					
346	campo	53,5	38,0	27,9	20,5	17,0	11,5	5666	32704	818	394	7,50%

	retro	45,0	39,0	29,0	21,0	16,0	12,0					
347	campo	53,5	41,1	28,0	17,0	11,5	7,5	5625	13125	338	507	3,70%
	retro	53,0	42,0	27,0	17,0	11,0	8,0					
348	campo	53,5	41,0	28,0	11,5	7,5	0,0	4922	11250	507	507	26,10%
	retro	51,0	39,0	25,0	16,0	11,0	0,0					
349	campo	32,5	20,5	17,0	11,5	7,5	0,0	6963	32870	805	771	8,50%
	retro	29,0	23,0	16,0	11,0	8,0	0,0					
350	campo	72,0	53,5	38,0	28,0	20,5	17,0	5625	18750	281	309	6,40%
	retro	66,0	55,0	40,0	28,0	20,0	15,0					
351	campo	32,5	28,0	20,5	17,0	11,5	7,5	8438	33750	928	507	14,80%
	retro	38,0	32,0	23,0	17,0	12,0	9,0					
352	campo	106,5	79,0	53,5	32,5	17,0	7,5	5658	1500	658	457	14,30%
	retro	107,0	82,0	48,0	26,0	14,0	9,0					
353	campo	53,5	41,0	32,5	20,5	17,0	7,5	6563	16875	169	523	16,10%
	retro	54,0	43,0	29,0	18,0	12,0	9,0					

Tabela 62 - Módulos retroanalizados com BackMeDiNa - trecho 2 (2022)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)				Erro (RMS)	
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Sub-base	Subleito		
340	campo	216,5	165,5	140,5	83,0	49,0	32,5						
	retro	149,0	131,0	102,0	76,0	57,0	44,0	6000	11250	113	113	24,70%	
341	campo	90,0	79,0	59,5	38,0	28,0	17,0	5000	9750	285	233	7,20%	
	retro	94,0	77,0	54,0	37,0	26,0	19,0						
342	campo	182,5	116,0	72,0	53,5	38,0	28,2	6025	11375	94	158	15,50%	
	retro	123,0	106,0	80,0	57,0	41,0	31,0						
343	campo	216,5	165,5	127,0	102,5	83,0	64,0	4050	10000	450	75	6,40%	
	retro	195,0	174,0	139,0	108,0	83,0	65,0						
344	campo	53,5	41,0	28,0	17,0	11,5	7,5	5894	13125	338	507	3,70%	
	retro	54,0	42,0	27,0	17,0	11,0	8,0						
345	campo	140,5	116,0	90,0	72,0	64,0	53,5	5625	18000	450	100	7,50%	
	retro	135,0	122,0	100,0	80,0	62,0	50,0						
346	campo	53,5	38,0	27,9	20,5	17,0	7,5	4922	18750	338	465	17,30%	
	retro	51,0	41,0	28,0	19,0	13,0	10,0						
347	campo	53,5	38,0	32,5	28,0	20,5	17,0	5625	15000	675	309	7,30%	
	retro	49,0	43,0	34,0	27,0	20,0	16,0						
348	campo	72,0	59,5	28,0	11,5	7,5	5,0	4493	3678	173	682	13,50%	
	retro	74,0	49,0	23,0	12,0	7,0	6,0						
349	campo	32,5	20,5	17,0	11,5	7,5	0,0	5471	28246	805	771	7,10%	
	retro	30,0	23,0	16,0	11,0	7,0	5,0						
350	campo	72,0	53,5	38,0	28,0	20,5	11,5	4050	15000	225	338	8,30%	
	retro	69,0	56,0	39,0	26,0	18,0	13,0						
351	campo	53,5	41,0	32,5	20,5	17,0	11,5	7500	20250	619	338	14,90%	
	retro	57,0	48,0	35,0	25,0	18,0	14,0						
352	campo	127,0	106,5	90,0	83,0	71,9	64,0	7500	31125	154	90	8,10%	
	retro	125,0	116,0	100,0	83,0	68,0	56,0						
353	campo	53,5	49,0	38,0	20,5	17,0	7,5	9375	10000	675	338	33,20%	
	retro	67,0	54,0	37,0	25,0	17,0	13,0						

**APÊNDICE E – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS COM O
BAKFAA**

Tabela 63 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 1 (2019)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)			Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Subleito	
43	campo	216,5	140,7	72,2	40,8	32,5	17,0	6060	253	181	10,41%
	retro	211,8	124,0	68,9	44,4	30,9	23,7				
44	campo	216,5	102,5	83,0	32,5	17,0	11,5	7694	252	185	14,75%
	retro	206,7	123,4	67,9	43,6	30,3	23,3				
45	campo	348,0	247,0	116,0	53,5	28,0	11,5	5666	126	116	21,72%
	retro	363,8	216,7	111,5	69,1	47,7	36,7				
46	campo	116,0	79,0	41,0	28,0	17,0	11,5	9180	566	252	7,11%
	retro	119,5	75,7	47,6	32,4	23,0	17,7				
47	campo	315,0	247,1	116,0	49,0	20,5	11,5	6513	151	123	27,04%
	retro	319,8	194,3	103,5	65,3	45,2	34,7				
48	campo	182,5	127,0	64,0	32,5	17,0	11,5	8662	353	200	13,94%
	retro	168,0	104,1	61,4	40,7	28,6	21,9				
49	campo	199,0	127,0	72,0	38,0	20,5	11,5	7752	313	180	11,65%
	retro	188,2	116,3	68,4	45,3	31,8	24,3				
50	campo	165,5	102,5	63,9	41,0	32,3	25,1	8492	362	185	8,07%
	retro	172,3	108,8	65,8	44,2	31,2	23,9				
51	campo	315,0	216,5	106,5	59,5	32,7	20,7	6965	151	121	15,52%
	retro	320,3	197,0	105,6	66,7	46,2	35,5				
52	campo	165,5	102,5	41,0	26,0	20,5	11,5	8492	368	208	11,56%
	retro	162,3	99,9	59,0	39,1	27,5	21,0				
53	campo	182,5	127,2	59,5	28,0	17,0	11,5	7650	306	204	12,02%
	retro	180,2	107,8	61,0	39,7	27,7	21,3				
54	campo	116,0	79,1	53,5	44,4	20,5	11,5	8160	412	343	12,04%
	retro	123,5	68,5	36,8	23,4	16,2	12,5				
55	campo	165,5	83,0	59,5	32,5	20,5	11,5	8202	353	252	8,71%
	retro	152,1	88,9	49,6	32,0	22,3	17,1				
56	campo	116,0	64,0	41,0	28,0	17,0	11,5	7732	433	303	6,96%
	retro	126,9	72,8	41,1	26,7	18,6	14,3				
57	campo	83,0	59,5	38,0	20,5	11,5	7,5	9204	578	424	6,74%
	retro	93,6	52,6	29,5	19,0	13,2	10,2				
58	campo	165,5	79,0	59,5	28,0	17,0	11,5	7430	357	252	9,64%
	retro	152,2	88,3	49,5	32,0	22,3	17,1				
59	campo	83,0	59,5	38,0	28,0	17,0	11,5	8976	612	408	7,06%
	retro	92,4	52,9	30,4	19,8	13,8	10,6				
60	campo	83,0	41,0	28,0	17,0	11,5	7,5	8670	630	420	5,80%
	retro	89,9	51,2	29,5	19,2	13,4	10,3				
61	campo	83,0	53,5	32,5	28,0	11,5	7,5	8686	656	424	5,41%
	retro	87,6	50,2	29,2	19,1	13,3	10,2				
62	campo	102,5	59,5	38,2	20,5	11,5	7,5	7251	552	324	5,83%
	retro	108,5	63,7	37,8	25,0	17,5	13,5				
63	campo	140,5	53,6	32,5	20,5	11,5	7,5	7038	393	357	8,86%
	retro	125,6	67,5	35,6	22,4	15,5	11,9				

Tabela 64 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 1 (2021)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)			Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Subleito	
43	campo	247,0	127,0	72,0	49,0	38,0	28,0	7542	232	163	11,92%
	retro	227,8	138,3	76,9	49,6	34,6	26,5				
44	campo	289,5	247,0	165,5	106,5	72,0	49,0	7966	260	75	23,32%
	retro	313,2	224,4	151,8	108,4	79,1	60,9				
45	campo	340,5	289,5	165,5	72,0	38,0	17,0	8472	341	90	59,85%
	retro	253,1	181,7	125,0	90,2	66,2	51,1				
46	campo	272,5	182,5	102,5	53,5	38,0	20,5	8925	273	116	20,14%
	retro	244,7	164,6	103,3	70,7	50,4	38,6				
47	campo	357,5	289,5	116,0	49,0	20,5	11,5	9941	151	98	37,08%
	retro	338,2	226,0	129,6	83,7	58,4	44,6				
48	campo	272,5	199,0	102,7	53,5	32,5	17,0	8749	206	121	17,41%
	retro	271,9	176,2	102,5	67,4	47,3	36,2				
49	campo	221,5	165,5	83,0	53,5	38,0	20,5	9104	292	129	14,41%
	retro	224,3	149,1	92,7	63,1	44,9	34,4				
50	campo	247,0	127,0	83,0	59,4	41,0	32,5	8989	273	134	15,28%
	retro	228,1	149,5	90,8	61,2	43,3	33,1				
51	campo	272,5	140,5	102,5	72,0	53,5	32,5	7727	232	111	19,09%
	retro	271,2	178,7	109,2	73,8	52,3	40,0				
52	campo	182,5	102,5	72,0	53,5	41,0	28,0	9104	348	174	9,96%
	retro	180,0	115,1	69,8	47,0	33,2	25,4				
53	campo	165,5	90,0	64,0	41,0	32,5	20,5	7012	289	260	9,94%
	retro	168,8	93,8	49,0	30,7	21,3	16,4				
54	campo	182,5	140,5	83,0	41,0	20,5	11,5	8242	408	151	16,28%
	retro	179,9	120,1	77,9	54,2	38,9	29,8				
55	campo	140,5	72,0	41,0	32,5	20,5	17,0	8845	468	259	7,60%
	retro	129,8	79,2	47,2	31,4	22,1	16,9				
56	campo	182,5	116,0	64,0	41,0	28,0	20,6	8290	355	177	8,64%
	retro	177,6	112,5	68,4	46,0	32,5	24,9				
57	campo	165,5	106,4	83,0	72,0	59,5	41,0	8456	362	181	18,94%
	retro	174,1	110,3	67,1	45,1	31,9	24,4				
58	campo	102,5	72,0	41,0	28,0	17,0	11,5	10598	596	298	5,38%
	retro	107,2	66,6	40,7	27,4	19,4	14,8				
59	campo	165,5	116,0	83,0	53,5	38,0	28,0	6828	397	176	10,73%
	retro	170,1	108,2	67,9	46,3	32,9	25,2				
60	campo	102,5	72,0	49,0	32,5	20,5	17,0	9966	580	257	7,46%
	retro	116,5	74,2	46,6	31,7	22,6	17,3				
61	campo	102,5	79,0	41,0	20,5	17,0	11,5	9090	622	276	7,75%
	retro	109,3	68,9	43,4	29,6	21,0	16,1				
62	campo	102,5	53,5	38,0	28,0	20,5	17,0	9104	592	330	5,55%
	retro	103,1	61,8	37,0	24,6	17,3	13,3				
63	campo	83,0	64,0	49,0	32,7	20,5	17,0	10303	649	306	9,42%
	retro	101,6	63,5	39,4	26,7	18,9	14,5				

Tabela 65 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 1 (2022)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)			Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Subleito	
43	campo	247,0	116,0	79,0	53,5	41,0	28,0	8925	301	105	30,04%
	retro	246,4	170,8	111,7	78,2	56,4	43,3				
44	campo	315,0	247,0	182,5	127,0	53,5	17,0	10510	302	62	36,03%
	retro	322,3	245,2	175,5	130,1	97,3	75,7				
45	campo	416,0	340,5	247,0	182,5	140,5	53,5	10100	194	49	35,71%
	retro	437,6	332,6	231,6	168,4	124,4	96,2				
46	campo	289,5	199,0	102,5	53,5	28,0	17,0	10041	158	124	15,42%
	retro	298,3	191,8	104,3	65,6	45,4	34,7				
47	campo	366,5	216,5	127,0	83,0	64,2	41,0	5862	143	107	14,92%
	retro	352,6	216,9	118,5	75,6	52,5	40,3				
48	campo	289,5	216,5	140,5	72,0	41,0	28,0	8324	190	90	24,06%
	retro	323,9	219,0	133,9	90,4	64,1	49,0				
49	campo	366,5	315,0	216,5	165,5	116,0	64,0	8492	287	52	32,48%
	retro	369,1	283,9	207,7	156,1	117,8	92,2				
50	campo	247,0	165,5	106,5	72,0	53,5	32,5	8046	284	113	12,42%
	retro	245,6	165,6	105,6	72,9	52,2	40,0				
51	campo	315,0	216,5	165,5	127,0	102,5	83,0	7105	343	65	23,47%
	retro	305,7	229,7	167,2	124,9	93,8	73,3				
52	campo	216,5	165,5	79,0	38,0	20,5	11,5	11333	132	202	19,87%
	retro	264,2	157,2	70,7	39,1	26,3	20,5				
53	campo	216,5	140,5	127,0	102,5	83,0	72,0	9553	312	101	27,19%
	retro	247,0	173,8	115,2	81,4	59,0	45,3				
54	campo	165,5	127,0	106,5	83,0	72,0	53,5	11793	456	109	21,49%
	retro	200,5	146,9	102,9	75,1	55,5	43,0				
55	campo	182,5	116,0	72,0	49,0	32,5	20,5	9529	556	127	17,01%
	retro	171,2	123,9	87,8	64,3	47,7	37,0				
56	campo	199,0	116,0	38,0	17,0	11,5	7,5	9720	278	191	18,47%
	retro	190,7	117,1	65,4	42,3	29,5	22,6				
57	campo	165,5	102,5	53,5	32,5	20,7	11,5	7732	331	220	7,23%
	retro	167,1	99,3	56,3	36,7	25,6	19,6				
58	campo	140,5	89,8	53,5	38,0	20,5	17,0	5690	451	229	6,37%
	retro	141,8	86,0	52,8	35,5	25,0	19,2				
59	campo	165,5	127,0	90,0	64,0	49,0	38,0	7746	621	124	11,70%
	retro	165,9	121,4	88,1	65,3	48,8	38,0				
60	campo	140,5	90,0	72,0	59,5	49,0	41,0	9738	624	191	14,74%
	retro	130,7	89,3	60,3	42,8	31,0	23,9				
61	campo	140,5	72,0	41,0	28,0	20,5	17,0	9104	455	204	13,93%
	retro	146,8	94,1	58,7	40,0	28,4	21,8				
62	campo	116,0	53,5	38,0	20,5	17,0	11,5	9248	549	283	8,80%
	retro	114,9	70,6	42,9	28,8	20,3	15,6				
63	campo	102,5	53,5	41,0	20,5	17,0	11,5	9720	673	277	8,02%
	retro	104,7	67,1	42,9	29,5	21,1	16,1				

Tabela 66 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 2 (2020)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)				Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Sub-base	Subleito	
340	campo	49,0	38,0	28,0	20,5	7,5	0,0	5838	18052	637	433	5,67%
	retro	50,9	41,2	28,6	19,5	13,6	10,3					
341	campo	49,0	32,5	20,5	11,5	7,5	0,0	4121	11110	757	636	3,51%
	retro	45,5	33,3	20,2	12,6	8,6	6,6					
342	campo	64,0	32,5	20,5	11,5	7,5	0,0	3090	6050	729	607	4,97%
	retro	57,4	38,1	20,6	12,3	8,6	6,8					
343	campo	49,0	28,0	20,5	11,5	7,5	0,0	4162	12612	561	606	9,20%
	retro	46,7	34,9	21,7	13,6	9,2	7,0					
344	campo	49,0	32,5	11,7	7,5	1,0	0,0	3552	9104	676	626	5,75%
	retro	49,1	35,1	20,7	12,6	8,6	6,7					
345	campo	49,0	32,5	17,0	7,5	5,0	0,0	3121	9180	497	683	3,61%
	retro	48,7	34,2	19,6	11,6	7,8	6,1					
346	campo	32,5	17,0	11,5	7,5	5,0	0,0	5523	16092	959	909	3,49%
	retro	32,2	23,6	14,4	9,8	6,1	4,7					
347	campo	32,5	20,5	11,5	7,5	5,0	0,0	5468	15933	994	892	2,77%
	retro	32,5	23,8	14,5	9,0	6,1	4,7					
348	campo	64,0	53,5	32,5	17,0	7,5	0,0	5151	10201	520	416	6,14%
	retro	61,8	47,7	30,8	19,9	13,6	10,3					
349	campo	32,5	20,5	11,5	7,5	5,0	0,0	5747	16746	988	918	2,62%
	retro	31,5	23,2	14,1	8,8	6,0	4,6					
350	campo	32,5	20,5	11,5	7,5	5,0	0,0	5468	15933	994	892	2,77%
	retro	32,5	23,8	14,5	9,0	6,1	4,7					
351	campo	28,0	17,0	11,5	7,5	5,0	0,0	5382	20200	1055	977	2,67%
	retro	28,0	21,0	13,3	8,4	5,7	4,4					
352	campo	53,5	38,0	20,5	11,5	7,5	0,0	3734	13635	572	510	5,00%
	retro	53,3	39,0	25,3	16,3	11,1	8,2					
353	campo	90,0	64,0	32,5	17,0	7,5	0,0	4418	7804	714	303	10,14%
	retro	80,6	62,0	40,8	26,9	18,6	14,2					

Tabela 67 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 2 (2021)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)				Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Sub-base	Subleito	
340	campo	216,5	140,5	72,0	38,0	20,5	17,0	598	2525	533	123	21,92%
	retro	207,3	154,1	98,9	64,4	44,8	34,6					
341	campo	90,0	72,0	38,0	17,0	11,5	7,5	4636	9090	662	268	9,67%
	retro	83,4	66,8	45,6	30,8	21,6	16,4					
342	campo	140,5	102,5	79,0	64,0	53,5	38,0	3184	10406	255	151	12,93%
	retro	124,3	105,1	77,9	56,1	40,6	30,8					
343	campo	165,5	140,5	90,0	59,5	38,0	20,5	5468	12030	743	101	23,22%
	retro	148,4	131,2	104,4	80,4	61,4	48,1					
344	campo	53,5	49,0	32,5	20,5	17,0	11,5	7618	19428	1000	373	4,17%
	retro	53,2	44,1	31,8	22,4	16,0	12,2					
345	campo	102,5	83,0	59,5	38,0	28,0	17,0	5610	10303	424	202	7,43%
	retro	98,8	82,2	59,3	41,7	29,7	22,6					
346	campo	53,5	38,0	27,9	20,5	17,0	11,5	5050	17690	927	396	4,17%

347	retro	53,4	43,4	30,5	21,1	14,9	11,3	5151	18045	945	404	4,07%
	campo	53,5	41,1	28,0	17,0	11,5	7,5					
348	retro	52,3	42,5	29,9	20,7	14,6	11,1	5151	17341	858	472	5,84%
	campo	53,5	41,0	28,0	11,5	7,5	0,0					
349	retro	48,0	38,3	26,2	17,6	12,3	9,3	6875	24647	936	698	3,65%
	campo	32,5	20,5	17,0	11,5	7,5	0,0					
350	retro	33,1	26,3	17,8	11,9	8,3	6,3	5285	15009	420	306	4,88%
	campo	72,0	53,5	38,0	28,0	20,5	17,0					
351	retro	68,7	56,6	40,2	27,9	19,7	14,8	5050	22220	676	618	3,01%
	campo	32,5	28,0	20,5	17,0	11,5	7,5					
352	retro	36,6	29,4	20,4	13,9	9,7	7,3	4610	9459	450	242	10,04%
	campo	106,5	79,0	53,5	32,5	17,0	7,5					
353	retro	90,1	73,0	50,7	34,6	24,2	18,3	4832	22183	498	373	4,36%
	campo	53,5	41,0	32,5	20,5	17,0	7,5					
	retro	54,0	44,8	32,6	23,0	16,4	12,4					

Tabela 68 - Módulos retroanalizados com BAKFAA - trecho 2 (2022)

Estaca	Bacia de deflexão	Deflexões (0,001 mm)						Módulo de Resiliência (MPa)				Erro (RMS)
		D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	Revest.	Base	Sub-base	Subleito	
340	campo	216,5	165,5	140,5	83,0	49,0	32,5	3642	5255	515	80	24,40%
	retro	217,8	186,2	140,0	102,4	75,1	57,7					
341	campo	90,0	79,0	59,5	38,0	28,0	17,0	4958	16174	400	198	7,97%
	retro	89,4	76,5	58,0	42,6	31,2	23,9					
342	campo	182,5	116,0	72,0	53,5	38,0	28,2	2525	5307	463	114	22,32%
	retro	175,1	144,4	103,3	72,4	51,7	29,4					
343	campo	216,5	165,5	127,0	102,5	83,0	64,0	4729	11446	257	85	24,97%
	retro	173,2	153,8	123,1	95,3	73,0	57,2					
344	campo	53,5	41,0	28,0	17,0	11,5	7,5	6125	17242	455	433	3,56%
	retro	52,7	42,6	29,4	19,8	13,7	10,3					
345	campo	140,5	116,0	90,0	72,0	64,0	53,5	5224	15150	796	104	15,29%
	retro	136,9	122,1	98,6	77,2	59,7	47,2					
346	campo	53,5	38,0	27,9	20,5	17,0	7,5	6187	17414	459	437	3,88%
	retro	52,2	42,2	29,1	19,6	13,6	10,2					
347	campo	53,5	38,0	32,5	28,0	20,5	17,0	6321	22442	707	343	5,64%
	retro	53,9	45,8	34,3	25,0	18,2	13,9					
348	campo	72,0	59,5	28,0	11,5	7,5	5,0	3866	10828	424	364	7,88%
	retro	68,0	53,2	35,2	23,0	15,8	11,9					
349	campo	32,5	20,5	17,0	11,5	7,5	5,0	5172	19491	874	780	2,58%
	retro	34,0	25,8	16,6	10,6	7,2	5,5					
350	campo	72,0	53,5	38,0	28,0	20,5	11,5	4636	11609	445	336	4,50%
	retro	69,4	55,3	37,5	25,0	17,3	13,1					
351	campo	53,5	41,0	32,5	20,5	17,0	11,5	6015	22739	750	367	4,04%
	retro	52,6	44,0	32,2	23,0	16,5	12,5					
352	campo	127,0	106,5	90,0	83,0	71,9	64,0	5276	21873	541	102	17,04%
	retro	125,9	114,1	94,9	76,5	60,6	48,8					
353	campo	53,5	49,0	38,0	20,5	17,0	7,5	5121	17673	765	353	4,89%
	retro	58,1	47,7	34,1	23,8	16,9	12,8					