CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO CARLOS ATAYDE PAIVA RAMALHO

ANÁLISE DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: COMPARATIVO ENTRE BASE GRANULAR E BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO ATRAVÉS DE DEFLECTOMETRIA (ESTUDO DE CASO DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116)

Belo Horizonte
2026

ANÁLISE DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: COMPARATIVO ENTRE BASE GRANULAR E BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO ATRAVÉS DE DEFLECTOMETRIA (ESTUDO DE CASO DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Flávio Renato de Góes Padula
Coorientador: Leonardo Barbosa Amaral

Belo Horizonte
2026

Ramalho, João Carlos Atayde Paiva
R166a Análise da resposta estrutural de pavimentos flexíveis: comparativo entre base granular e brita graduada tratada com cimento através de deflectometria (estudo de caso de um trecho da rodovia BR-116) / João Carlos Atayde Paiva Ramalho. – 2026.
55 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Civil.
Orientador: Flávio Renato de Góes Padula.
Coorientador: Leonardo Barbosa Amaral.
Bibliografia: f. 54-55.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Pavimentos betuminosos – Rodovias – Teses. 2. Rodovias – Camadas de base – Teses. 3. Materiais granulares – Teses. 4. Ensaios destrutivos – Teses. 5. Pavimentos – Desempenho – Teses. I. Padula, Flávio Renato de Góes. II. Amaral, Leonardo Barbosa. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 625.85

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - NG

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 4/2026 - DEC (11.56.07)

Nº do Protocolo: 23062.034467/2026-71

Belo Horizonte-MG, 03 de julho de 2026.

JOÃO CARLOS ATAYDE PAIVA RAMALHO

ANÁLISE DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: Comparativo entre base granular e brita graduada tratada com cimento através de deflectometria (Estudo de caso de um trecho da rodovia BR-116)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Gameleira, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 16 de junho de 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Flávio Renato de Goes Padula - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Thiago Luiz Coelho Morandini
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Weber Guadagnin Moravia
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

BELO HORIZONTE
2026

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 14:10)
FLAVIO RENATO DE GOES PADULA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEC (11.56.07)
Matrícula: ###536#9

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 08:42)
THIAGO LUIZ COELHO MORANDINI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEC (11.56.07)
Matrícula: ###172#6

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 20:07)
WEBER GUADAGNIN MORAVIA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEC (11.56.07)
Matrícula: ###565#8

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 13:54)
JOAO CARLOS ATAYDE PAIVA RAMALHO
DISCENTE
Matrícula: 2021######3

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **4**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **03/07/2026** e o código de verificação: **097d8b1ee1**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Av. Amazonas, 7675 – Bairro Nova Gameleira – Belo Horizonte - MG
Departamento de Engenharia Civil - Prédio 12 - Telefone: (31) 3319-6810 – secretaria@civil.cefetmg.br

TERMO DE ACEITE FINAL - ORIENTADOR

Titulo do TCC:	ANÁLISE DA RESPOSTA ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS:
	COMPARATIVO ENTRE BASE GRANULAR E BRITA GRADUADA TRATADA
	COM CIMENTO ATRAVÉS DE DEFLECTOMETRIA
	(ESTUDO DE CASO DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116)
Data defesa:	16/06/2026
Discente:	João Carlos Atayde Paiva Ramalho
Orientador:	Dr. Flávio Renato de Goés Padula

Eu, João Carlos Atayde Paiva Ramalho declaro que todas as sugestões de correção e melhoria indicadas pela banca de avaliação de meu Trabalho de Conclusão de Curso e acordadas com meu Prof. Orientador foram implementadas no texto e entregues ao mesmo, Prof. Flávio Renato de Goés Padula para validação final.

De acordo: Belo Horizonte, 24 de junho de 2026,

João Carlos Atayde

Assinatura do Discente

Declaro ter recebido e conferido a versão final do texto e que as sugestões de correção e melhorias indicadas pela banca e acatadas por mim foram implementadas.

gov.br Documento assinado digitalmente
FLAVIO RENATO DE GOES PADULA
Data: 24/06/2026 16:46:01-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

De acordo: Belo Horizonte, 24 de junho de 2026,

_____

Assinatura do Orientador

AGRADECIMENTOS

Bom, não poderia iniciar meus agradecimentos sem manifestar a minha gratidão a Deus. Sem Ele, essa caminhada teria sido impossível; por isso, início esse registro da maneira mais clichê possível, mas repito: senão fosse a graça e a misericórdia d'Ele durante todos os dias, nada disso estaria acontecendo.

Em seguida, à dona Carmem e ao Sr. Aquiles, vovó e vovô, a primeira foi a responsável por me ensinar tudo, desde as operações mais básicas até a importância de uma vida "rompendo em fé"; do meu avô ganhei os meus melhores princípios e valores. Uma pena que, para ele, fique como uma homenagem póstuma, mas para estes dois a minha gratidão e dívida eterna. Sei que não segui o caminho da advocacia que tanto queriam, todavia já sou chato por natureza; como advogado só iria complicar ainda mais as coisas.

Dona Raquel, mamãe, também compartilha dessa frustração — torço para que o Peth e/ou o Bim resolvam essa bronca — mas agradeço por sempre ter me apoiado, pelas mensagens de encorajamento e por, como sempre, se colocar como uma fundação inabalável, na qual tudo tem jeito e solução. Tio Marcelo e tia Soraya dispensam comentários: mimaram e fizeram tudo que podiam e não podiam, conseguindo — apesar da distância — estar sempre presentes.

Novy e Isa, companheiros do dia a dia, do almoço de todas as tardes de sábado, responsáveis por diversas vezes, mesmo sem saber, me motivarem a persistir, resistir e lutar por aquilo que tanto sonhava — além de me levarem diversas vezes para assistir ao mais temido, vulgo nosso Galo. Por fim, Juju, companheira, aconselhadora e, com certeza, uma excelente ouvinte. Não posso deixar de te agradecer por todo apoio e paciência. Obrigado por me lembrar corriqueiramente de que uma certa senhora sábia diz: "tudo passa" — e não é que passou mesmo?

Para finalizar esses agradecimentos, preciso citar aqueles que me apresentaram a Engenharia Rodoviária, área pela qual me apaixonei e na qual espero contribuir de forma significativa para o meu país. Dessa forma, deixo a minha gratidão ao Lucas César, Leonardo Amaral, Caroline Alves, Matheus Delazzari e Jonathan Ribeiro; são profissionais que respeito e admiro muito.

Menções a amigos como Gabriel Lugui, Gabriel Romualdo, João Vilaça, Vinícius Mozzer, Ithalo Mendes, Giovanna Wadge, Elian El Hanna, Tiago Soares e Bertapeli, sem sombra de dúvidas os melhores engenheiros do Brasil logo, logo.

RESUMO

Este trabalho analisa a resposta estrutural de pavimentos asfálticos submetidos a intervenções de restauração, comparando o desempenho de uma base granular convencional com o de uma base estabilizada por brita graduada tratada com cimento. O objetivo principal consiste em avaliar a influência do material da camada de base no comportamento mecânico do sistema rodoviário por meio da interpretação de parâmetros deflectométricos. A metodologia adota um delineamento de estudo de caso focado em um trecho de 24,96 quilômetros da rodovia federal BR-116, localizada no estado da Bahia, dividido em segmentos de pista simples com base granular e pista dupla com base cimentada. A pesquisa utiliza medições não destrutivas obtidas pelo equipamento deflectômetro de impacto para realizar a análise estatística da deflexão máxima e do raio de curvatura da bacia de deformação. O estudo também aplica o procedimento de retroanálise mecanística com auxílio computacional para quantificar os módulos de resiliência das camadas, seguido pelo cálculo da influência estrutural por meio do método das espessuras equivalentes. A avaliação dos dados demonstra que a adoção da camada cimentada reduz expressivamente os deslocamentos verticais globais do pavimento, alcançando uma deflexão máxima inferior à da base granular e apresentando um módulo de resiliência (MR) dezesseis vezes superior. A investigação revela, contudo, que a estrutura semirrígida exibe considerável variância no raio de curvatura, alternando bacias abertas com geometrias agudas e fechadas que indicam a presença de fissuras e severas concentrações de tensão na laje. A conclusão aponta que a substituição da base granular pela brita tratada com cimento instaura um forte efeito de laje que protege o solo de fundação contra deformações permanentes, mas altera o mecanismo de degradação primário da estrutura. O sistema semirrígido concentra os esforços de tração e cisalhamento na interface entre a laje e o revestimento asfáltico, o que indica um elevado potencial teórico de vulnerabilidade à fadiga precoce e reflexão de trincas, demandando estratégias específicas de mitigação de tensões no projeto de restauração.

Palavras-chave: Base granular. Brita graduada tratada com cimento (BGTC). Deflectometria. Pavimento semirrígido. Mecânica dos Pavimentos.

ABSTRACT

This study analyzes the structural response of asphalt pavements undergoing restoration interventions, comparing the performance of a conventional granular base with that of a stabilized cement-treated base (CTB). The primary objective is to evaluate the influence of the base layer material on the mechanical behavior of the road system through the interpretation of deflectometric parameters. The methodology adopts a case study approach focused on a 24.96-kilometer stretch of the BR-116 federal highway in the state of Bahia, divided into single-lane segments with a granular base and dual-lane segments with a cemented base. The research utilizes non-destructive measurements obtained by a Falling Weight Deflectometer (FWD) to perform statistical analysis of maximum deflection and the radius of curvature of the deflection basin. The study also applies a computer-aided mechanistic backcalculation procedure to quantify the resilient moduli of the layers, followed by the calculation of structural influence using the equivalent thickness method. Data evaluation demonstrates that the adoption of the cemented layer significantly reduces the overall vertical displacements of the pavement, achieving a lower maximum deflection than the granular base and yielding a resilient modulus (M_R) sixteen times higher. The investigation reveals, however, that the semi-rigid structure exhibits considerable variance in the radius of curvature, alternating between open basins and sharp, closed geometries that indicate the presence of cracks and severe stress concentrations in the slab. The conclusion points out that replacing the granular base with cement-treated base establishes a strong slab effect that protects the foundation soil against permanent deformations but alters the primary degradation mechanism of the structure. The semi-rigid system concentrates tensile and shear stresses at the interface between the slab and the asphalt surface, which indicates a high theoretical potential for vulnerability to premature fatigue and reflective cracking, requiring specific stress mitigation strategies in the restoration design.

Keywords: Granular base. Cement-treated base (CTB). Deflectometry. Semi-rigid pavement. Pavement Mechanics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Interface da Execução do BackMeDiNa 26
Figura 2 – Contextualização do Subtrecho em estudo na rodovia BR-116/BA 28
Figura 3 – Localização do Subtrecho em estudo na rodovia BR-116/BA 28
Figura 4 – Georreferenciamento dos Locais de Sondagens 29
Figura 5 – Linear de Espessuras – Pista Simples (Grupo 1) 30
Figura 6 – Linear de Espessuras – Pista Dupla (Grupo 2) 30
Figura 7 – Perfil Estratigráfico constatado nos Poços de Sondagem 31
Figura 8 – Distribuição Estatística (*Box-Plot*) da Deflexão Máxima 35
Figura 9 – Distribuição Estatística (*Box-Plot*) do Raio de Curvatura 35
Figura 10 – Perfil Longitudinal da Deflexão Máxima (D_0) nas faixas de projeto 36
Figura 11 – Perfil Longitudinal do Raio de Curvatura 38
Figura 12 – Perfil Estratigráfico constatado nos Poços de Sondagem 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos Ensaios de Laboratório – Pista Simples (Grupo 1) 32
Tabela 2 – Resumo dos Ensaios de Laboratório – Pista Dupla (Grupo 2) 33
Tabela 3 – Estatística Descritiva dos Parâmetros Deflectométricos 34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo dos Módulos de Resiliência Retroanalisados do Revestimento Asfáltico 40
Gráfico 2 – Comparativo dos Módulos de Resiliência Retroanalisados da Sub-Base 41
Gráfico 3 – Comparativo dos Módulos de Resiliência Retroanalisados do Subleito 42
Gráfico 4 – Comparativo dos Módulos de Resiliência Retroanalisados da Base Granular e BGTC 44
Gráfico 5 – Síntese dos Módulos de Resiliência de todas as camadas do pavimento em escala unificada 45
Gráfico 6 – Influência Estrutural Percentual de cada camada na absorção da deflexão total do pavimento 47
Gráfico 7 – Gráfico de Dispersão relacionando Deflexão Máxima e Raio de Curvatura 49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

BA – Bahia

BackMeDiNa / MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional (*Software*/Método)

BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento

BR – Rodovia Federal do Brasil

CBR – *California Bearing Ratio* (Índice de Suporte Califórnia)

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CDW – *Construction and Demolition Wastes* (Resíduos de Construção e Demolição)

CNT – Confederação Nacional do Transporte

D0 – Deflexão Máxima (ou Deflexão Recuperável Máxima)

DER/SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FHWA – *Federal Highway Administration*

FWD – *Falling Weight Deflectometer* (Deflectômetro de Impacto)

IG – Índice de Grupo

IP – Índice de Plasticidade ou Instrução de Projeto

ISC – Índice de Suporte Califórnia

LL – Limite de Liquidez

LVC – Levantamento Visual Contínuo

MR – Módulo de Resiliência

PD – Pista Dupla

PI – Poço de Inspeção

PS – Pista Simples

QA/QC – *Quality Assurance / Quality Control* (Garantia e Controle de Qualidade)

R – Raio de Curvatura

RMSE – *Root Mean Square Error* (Erro Quadrático Médio)

SAMI – *Stress Absorbing Membrane Interlayer* (Camada Intermediária de Absorção de Tensões)

SHRP – *Strategic Highway Research Program*

TRB – *Transportation Research Board*

VBA – *Visual Basic for Applications*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA 13
1.2. OBJETIVOS 14
1.2.1. Objetivo Geral 14
1.2.2. Objetivos Específicos 14
1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA 15
1.4. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA 16
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO 16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E O COMPORTAMENTO DO SISTEMA 17
2.2. MATERIAIS DE CAMADA DE BASE 18
2.2.1. Base Granular 18
2.2.2. BGTC 19
2.3. COMPORTAMENTO MECÂNICO E PATOLOGIAS 19
2.4. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL 20
2.4.1. Deflexão Recuperável 20
2.4.2. Raio de Curvatura 20
2.4.3. Avaliação das bacias deflectométricas pelo processo de Retroanálise 21
2.4.4. Método das Espessuras Equivalentes 22
3. MATERIAIS E MÉTODOS 22
3.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA 23
3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 23
3.2.1. Revisão Bibliográfica e Normativa 23
3.2.2. Levantamento Geotécnico e Definição da Estrutura 23
3.2.3. Definição dos Grupos Amostrais 24
3.2.4. Triagem e Tratamento da Base de Dados 24
3.2.5. Cálculo dos Parâmetros e Análise Comparativa 25

3.2.6. Procedimento de Retroanálise Mecanística 25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 27
4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E DO TRECHO MONITORADO 27
4.1.1. Localização e Contextualização do Subtrecho 27
4.1.2. Perfil Estratigráfico e Espessuras 29
4.1.3. Propriedades Físico-Mecânicas dos Materiais 31
4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DEFLECTOMÉTRICOS 34
4.2.1. Panorama Geral dos Dados 34
4.2.2. Análise da Deflexão Máxima (D_0) 36
4.2.3. Análise do Raio de Curvatura (R) 37
4.3. MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS 39
4.4. DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL INTEGRADO 48
4.4.1. Correlação Deflexão x Curvatura 49
4.4.2. Discussão sobre Mecanismos de Fadiga e Reflexão 49
5. CONCLUSÃO 51
5.1. SÍNTESE DO DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL 51
5.2. ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS 52
5.3. RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA PROJETOS RODOVIÁRIOS 53
5.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 54
REFERÊNCIAS 55

1. INTRODUÇÃO

O cenário logístico brasileiro — historicamente moldado pela interiorização do país em meados do século XX — exerce uma elevada dependência do modal rodoviário. Segundo dados recentes da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2024), o Brasil possui uma malha rodoviária que supera 1,7 milhão de quilômetros, por onde mais de 60% das cargas e 95% dos passageiros trafegam. No entanto, um contraste preocupante se observa: apenas cerca de 12,4% dessa extensão é pavimentada.

Dentro desse universo pavimentado, há uma ampla predominância dos pavimentos flexíveis, constituídos por revestimento asfáltico sobre camadas de base e sub-base granulares. Essa configuração, embora tradicional, enfrenta desafios crescentes diante do aumento da carga por eixo e do volume de tráfego pesado nas últimas décadas. É nesse contexto que a engenharia rodoviária, na busca por estruturas mais robustas e duráveis, passou a incorporar técnicas de estabilização de solos e materiais cimentados.

A presente pesquisa se insere justamente nessa fronteira técnica: a análise do comportamento estrutural de rodovias submetidas a intervenções de restauração. O foco recai sobre a rodovia BR-116, no estado da Bahia — um dos principais corredores de escoamento do Nordeste —, onde diferentes soluções de base foram aplicadas. O trabalho busca compreender, através de dados deflectométricos, como a escolha entre uma base granular convencional e uma base rígida cimentada (BGTC) impacta o desempenho do pavimento e a vida útil do revestimento asfáltico.

CONTEXTUALIZAÇÃO

A concepção clássica de pavimentos flexíveis no Brasil, fundamentada em décadas de experiência do extinto DNER, prioriza o uso de bases granulares. Conforme apontam Rocha e Rezende (2017), a estabilização de solos tropicais e o uso de agregados naturais sempre foram soluções atrativas economicamente. No entanto, o esgotamento local de jazidas com materiais granulares de qualidade satisfatória forçou uma evolução técnica das práticas habitualmente utilizadas. Simultaneamente, o incremento nos volumes e cargas do tráfego demandou projetos rodoviários com maior capacidade de suporte estrutural.

Mediante isso, a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) surge como uma alternativa de alto desempenho estrutural. Segundo Balbo e Cargnin (2023), materiais como a BGTC oferecem uma elevada rigidez e resistência à erosão, características desejáveis para rodovias de tráfego pesado. Contudo, essa rigidez introduz uma nova dinâmica ao sistema:

o pavimento deixa de se comportar como puramente flexível e passa a apresentar características de um sistema semirrígido.

É notório que a função principal de um pavimento rodoviário é a proteção do solo de fundação existente. Dessa forma, a mudança do regime flexível para o semirrígido traz consigo novos desafios ao projeto de pavimentação, visto que a adição de aglutinantes químicos, como o cimento, permite que haja uma redução dos esforços de compressão vertical atuantes no subleito — sendo eficaz para reduzir a chegada dessas tensões na camada de solo de fundação. Todavia, sua utilização também acarreta a alteração da distribuição das tensões atuantes na estrutura. A elevada rigidez da camada cria uma descontinuidade mecânica na interface com o revestimento, o que pode favorecer a reflexão de trincas e o aparecimento de fissuras por retração. Esse fenômeno é particularmente crítico na região estudada, onde Silva Filho *et al.* (2018) já observaram patologias precoces associadas à retração da base em trechos restaurados da BR-116.

Tal interação complexa foi também objeto de estudo de Andrade (2017), que comparou o comportamento de bases granulares e cimentadas. O autor destaca que, embora a base cimentada ofereça maior capacidade de carga, ela exige que o revestimento asfáltico tenha uma capacidade superior de dissipar esforços, sob pena de fadiga precoce. Portanto, a análise puramente da deflexão máxima, sem considerar a curvatura da bacia de deformação e a rigidez das camadas superiores, se mostra insuficiente para garantir o sucesso de uma restauração rodoviária.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A restauração de rodovias federais submetidas a tráfego pesado impõe um desafio técnico complexo: equilibrar a durabilidade da estrutura com a viabilidade econômica da intervenção. Nesse contexto, a escolha do material da base não é apenas uma decisão construtiva, mas um fator determinante para a vida útil do pavimento. Andrade (2017) destaca que a introdução de camadas cimentadas altera fundamentalmente a distribuição de tensões no sistema, criando uma descontinuidade de rigidez que não existe em pavimentos puramente granulares.

Essa mudança de paradigma é evidente na rodovia BR-116/BA, onde coexistem trechos restaurados com base granular e trechos com Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). A literatura técnica, incluindo os estudos internacionais de Taha *et al.* (2002), demonstra que a adição de pequenos percentuais de cimento pode elevar o módulo de resiliência da camada em níveis consideravelmente superiores aos dos agregados naturais. Balbo e Cargnin (2023) reforçam que essa rigidez transforma o pavimento em uma estrutura semirrígida, capaz de

reduzir as deflexões totais, mas que exige um comportamento diferenciado do revestimento asfáltico.

O problema reside no fato de que uma base com rigidez acentuada atua concentrando tensões de tração na fibra inferior do revestimento, refletindo trincas para a superfície. Silva Filho *et al.* (2018) já identificaram patologias precoces associadas à retração da base em segmentos desta mesma rodovia, sugerindo que a análise convencional de deflexão máxima pode estar mascarando uma condição crítica de fadiga. Diante dessa dicotomia, a pesquisa se orienta pelo seguinte questionamento: De que maneira a substituição da base granular pela BGTC altera a geometria da bacia de deformação — especificamente a relação entre a Deflexão Máxima e o Raio de Curvatura — e até que ponto essa rigidez adicional compromete o desempenho do revestimento asfáltico frente aos mecanismos de fadiga?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a influência do material da camada de base na resposta estrutural de um pavimento restaurado, confrontando o desempenho da base granular convencional com a de uma com brita graduada tratada com cimento (BGTC). A pesquisa foca na interpretação de parâmetros deflectométricos coletados na rodovia BR-116/BA, buscando compreender como o aumento da rigidez na base altera o comportamento mecânico do sistema.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, as seguintes etapas específicas foram definidas:

- Quantificar e comparar a deflexão máxima (D_0) entre os trechos de base granular e base estabilizada (BGTC), avaliando o impacto da adição de cimento na redução dos deslocamentos verticais globais;
- Avaliar o Raio de Curvatura (R) das bacias de deformação para caracterizar a geometria da resposta elástica e distinguir a mecânica de distribuição de tensões entre os sistemas flexível e semirrígido;
- Determinar, a partir do comportamento deflectométrico, os módulos de resiliência das camadas de base, quantificando o contraste de rigidez entre a solução convencional e a semirrígida;

- ❖ Correlacionar os parâmetros estruturais obtidos para diagnosticar os potenciais riscos de fadiga precoce e reflexão de trincas no revestimento asfáltico impostos pela elevada rigidez das bases cimentadas.

1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A Rodovia BR-116, principal eixo de integração logística entre o Sul e o Nordeste brasileiro, desempenha um papel fundamental no escoamento de safras e produtos industrializados. Diante da severidade do tráfego atuante, as intervenções de restauração não podem se limitar a repor a condição funcional, devendo também garantir a capacidade estrutural do pavimento a longo prazo. Nesse cenário, o investimento público em técnicas eficazes torna-se imprescindível.

O ponto central desta discussão reside na escolha tecnológica entre manter uma base granular ou adotar uma base estabilizada, especificamente a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). Enquanto as bases granulares privilegiam a deformabilidade elástica e a distribuição de cargas — característica inerente aos pavimentos flexíveis, conforme descrito por Silva Filho et al. (2018) —, a incorporação de cimento reclassifica a estrutura como um sistema semirrígido. Segundo Balbo e Cargnin (2023), embora a BGTC apresente um módulo de resiliência superior, essa elevada rigidez altera significativamente a distribuição de tensões no sistema.

A relevância técnica deste estudo reside na necessidade de diagnosticar potenciais falhas estruturais. A simples redução da deflexão máxima, frequentemente interpretada como indicador definitivo de qualidade, pode encobrir a propensão à fadiga nas camadas superiores. Por meio do processamento e interpretação de dados deflectométricos (FWD) e da retroanálise mecanística, foi possível aprofundar a avaliação empírica e detalhar a física que rege o comportamento mecânico das estruturas flexíveis e semirrígidas. No contexto local, Silva Filho *et al.* (2018) alertam para a ocorrência de trincas por retração e reflexão em bases cimentadas na região do semiárido baiano, indicando que a falta de dissipação de esforços pode acelerar a degradação do revestimento.

Portanto, a justificativa desta pesquisa baseia-se na necessidade de promover análises fundamentadas em evidências de campo. Ao correlacionar os dados reais de deflexão e de Raio de Curvatura — à luz dos critérios de avaliação da DNER-PRO 011/79 e das diretrizes deflectométricas da DNER-PRO 273/96 —, este trabalho visa fornecer subsídios técnicos para que projetistas e executores decidam, com maior segurança, qual solução de base oferece a melhor relação custo-benefício e durabilidade para a malha rodoviária federal.

Em paralelo aos aspectos mecânicos e estruturais, a tomada de decisão sobre as soluções de base para pavimentos esbarra em um desafio ambiental e econômico premente: a exaustão das fontes primárias de matéria-prima. A execução de obras rodoviárias de grande magnitude demanda um volume expressivo de agregados virgens, acelerando vertiginosamente o esgotamento das jazidas naturais. Conforme apontam Almeida et al. (2018), a exploração intensiva desses recursos não renováveis tem sido alvo de restrições da legislação ambiental, cenário que agrava a escassez dos materiais convencionais e impulsiona diretamente a elevação de seus custos operacionais. Dessa forma, a avaliação da relação custo-benefício e da durabilidade de uma estrutura viária não deve ignorar o declínio das jazidas tradicionais, reforçando a urgência de se validar técnicas e materiais que aliem alto desempenho mecânico à sustentabilidade na infraestrutura rodoviária.

1.4. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

O desenvolvimento deste trabalho, por fundamentar-se em um estudo de caso, respeita fronteiras experimentais e metodológicas específicas. O reconhecimento desses limites é essencial para balizar a interpretação dos resultados e evitar generalizações indevidas.

A pesquisa restringe-se geograficamente a um trecho da rodovia BR-116 na Bahia. As condições climáticas e pedológicas singulares da região do semiárido influenciam o comportamento dos materiais e impedem a extrapolação automática das conclusões para rodovias situadas em contextos ambientais distintos sem as devidas adaptações.

No aspecto metodológico, a avaliação concentra-se na interpretação de dados não destrutivos obtidos via *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Embora este procedimento siga as diretrizes da norma DNER-PRO 273/96 e forneça uma leitura precisa da bacia de deformação, o estudo não contempla a realização de ensaios destrutivos, como a extração de testemunhos para verificação de resistência à compressão. A análise limita-se, portanto, à resposta elástica do sistema traduzida pela deflexão e pelo Raio de Curvatura.

Por fim, o escopo comparativo foca exclusivamente nas soluções de base granular e brita graduada tratada com cimento (BGTC). Outras técnicas de estabilização ou materiais alternativos, ainda que relevantes na literatura, não integram o objeto de análise desta pesquisa.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para facilitar a compreensão da pesquisa, partindo da contextualização inicial até as conclusões técnicas, a presente monografia se encontra estruturada em cinco capítulos distintos:

- Capítulo 1 – Introdução: Apresenta o cenário atual da infraestrutura rodoviária, define o problema de pesquisa e os objetivos, geral e específicos, que o estudo alcançar pretende. Também são expostas a justificativa, a relevância do tema e as limitações metodológicas do trabalho;
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Fundamenta a discussão teórica necessária para a análise. Nele, os conceitos sobre pavimentos flexíveis e semirrígidos são discutidos, à luz das normas do DNIT e DNER. O capítulo também explora o estado da arte sobre as características da base granular e da BGTC, aprofundando-se na mecânica da deflexão e no conceito de Raio de Curvatura;
- Capítulo 3 – Materiais e Método: Descreve o roteiro procedimental da pesquisa. Detalha-se o estudo de caso na rodovia BR-116/BA, as características dos trechos monitorados e o método de interpretação dos dados deflectométricos, estabelecendo os critérios para a comparação entre as diferentes soluções de base;
- Capítulo 4 – Resultados e Discussão: Dedicado à análise técnica dos dados. Nesta etapa, os índices de deflexão e curvatura obtidos em campo são confrontados, permitindo correlacionar a rigidez dos dois tipos de base, com o desempenho do revestimento em ambos os casos, a fim de se validar as hipóteses levantadas;
- Capítulo 5 – Conclusão: Encerra o trabalho com a síntese das descobertas. As respostas para os questionamentos propostos na pesquisa são apresentadas, juntamente com as considerações finais sobre a viabilidade técnica das soluções estudadas e sugestões para futuras investigações na área de restauração rodoviária.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A garantia da durabilidade de uma obra rodoviária transcende a qualidade do revestimento superficial. Para compreender o desempenho de uma rodovia restaurada, é necessário analisar profundamente as propriedades mecânicas dos materiais que compõem suas camadas e a forma como estes interagem sob as solicitações do tráfego. Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que norteiam o comportamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos, além de estabelecer os critérios de avaliação estrutural preconizados pelas normas técnicas vigentes.

2.1. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E O COMPORTAMENTO DO SISTEMA

O pavimento flexível é definido classicamente como uma estrutura multicamadas destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos. O seu funcionamento mecânico

baseia-se na dissipação progressiva das tensões através das camadas granulares, de modo que a carga chegue ao subleito em níveis compatíveis com a sua capacidade de suporte.

Diferente das estruturas rígidas de concreto, onde uma placa de alta rigidez absorve a maior parte dos esforços por flexão, o pavimento flexível trabalha através da deformação elástica do conjunto. Peres *et al.* (2023) explicam que, nesse sistema, a carga é transmitida grão a grão através dos pontos de contato dos agregados, gerando uma distribuição de tensões que se espalha em profundidade na forma de um cone.

Essa característica de deformabilidade implica que todas as camadas constituintes, do revestimento ao subleito, contribuem para a deflexão total da superfície. Conforme ressaltam Rocha e Rezende (2017), a eficiência desse sistema depende diretamente do módulo de resiliência dos materiais empregados. Nesse contexto, a camada de base atua como o elemento estrutural primário, sendo responsável por reduzir a magnitude das tensões verticais e proteger o solo de fundação contra deformações permanentes excessivas.

2.2. MATERIAIS DE CAMADA DE BASE

A função da camada de base em um pavimento rodoviário transcende o simples suporte de carga. Conforme destaca Aranha (2013), este elemento estrutural atua como a principal barreira de proteção do subleito, sendo responsável por absorver a maior parte das tensões verticais provenientes do tráfego e dissipá-las para as camadas inferiores em níveis admissíveis. No contexto da engenharia brasileira, a escolha do material de base define a filosofia de funcionamento da estrutura, polarizando-se entre tecnologias granulares e cimentadas.

2.2.1. Base Granular

A base granular representa a solução convencional da pavimentação flexível, normatizada pela especificação DNIT 141/2022-ES. Esta camada é constituída por solos estabilizados granulometricamente, misturas de brita (brita graduada simples) e de solo-brita, cujo mecanismo de resistência deriva exclusivamente da coesão, do atrito interno e do imbricamento entre as partículas.

O comportamento mecânico desse material é descrito como resiliente e tensão-dependente. Andrade (2017) explica que a rigidez de uma base granular não é constante, mas aumenta conforme o nível de confinamento lateral imposto pelas camadas sobrejacentes. Tabosa e Silva (2019) complementam que, embora o uso de solos e agregados naturais seja atrativo do ponto de vista econômico, esses materiais apresentam limitações físicas intrínsecas.

Rocha e Rezende (2017) alertam que, sob tráfego pesado, o módulo de resiliência de bases puramente granulares pode ser insuficiente para impedir deformações excessivas no revestimento asfáltico, comprometendo a vida útil da restauração.

2.2.2. BGTC

Como alternativa para superar as limitações de rigidez dos agregados naturais, emprega-se a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). Definida pela norma DNIT 142/2022-ES, essa solução consiste na adição de cimento Portland e água a uma mistura de agregados, promovendo reações de hidratação que alteram a microestrutura do material.

Segundo Nguyen *et al.* (2019), os produtos da hidratação do cimento preenchem os vazios e criam pontes de ligação entre os agregados, transformando um material que antes respondia apenas por atrito em um compósito coeso. Wang *et al.* (2023) observam que essa modificação química confere à camada uma significativa resistência à tração na flexão e à compressão simples.

Essa mudança física impacta diretamente o comportamento macroscópico da rodovia. Taha *et al.* (2002) demonstram que a estabilização com cimento pode elevar o módulo de elasticidade da base para valores consideravelmente superiores aos do agregado virgem. Balbo e Cargnin (2023) reforçam que essa rigidez elevada faz com que a camada atue como uma laje semirrígida, reduzindo significativamente a deflexão total, mas introduzindo uma nova dinâmica de distribuição de esforços que exige cuidados específicos quanto à retração e fadiga.

2.3. COMPORTAMENTO MECÂNICO E PATOLOGIAS

A introdução de uma camada de elevada rigidez sob o revestimento asfáltico altera significativamente a distribuição de tensões no pavimento. Enquanto as bases granulares dissipam a carga através dos contatos entre partículas e amortecem as deformações, a base em BGTC comporta-se estruturalmente como uma laje. Essa mudança no mecanismo de suporte reduz a deflexão vertical, mas impõe novas e severas exigências ao revestimento.

A principal patologia associada a esse sistema é a reflexão de trincas. Silva Filho *et al.* (2018), ao analisarem trechos restaurados na BR-116/BA, destacam que a retração hidráulica inerente ao processo de cura do cimento gera fissuras transversais na base. Devido à aderência entre as camadas e à concentração de tensões nessas descontinuidades, essas trincas tendem a se propagar para a superfície asfáltica sob a ação repetida do tráfego, comprometendo a estanqueidade do pavimento.

Essa dinâmica exige uma análise comparativa cuidadosa. Andrade (2017) observa que, diferentemente da degradação gradual e previsível das bases granulares (que falham por deformação permanente), as bases cimentadas podem induzir uma ruptura precoce do revestimento se este não possuir resistência à fadiga suficiente para suportar os esforços de tração na flexão. Portanto, a análise isolada da deflexão máxima pode levar a interpretações imprecisas, pois uma estrutura rígida pode apresentar baixos deslocamentos e, ainda assim, estar sujeita a um processo acelerado de fratura.

2.4. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

A avaliação estrutural de pavimentos em serviço é realizada predominantemente por métodos não destrutivos, que permitem inferir as propriedades mecânicas das camadas sem alterar sua integridade física. Nesse contexto, a interpretação da bacia de deformação elástica constitui a principal ferramenta de engenharia para o diagnóstico da rodovia, balizada fundamentalmente por dois parâmetros: a deflexão máxima recuperável e o Raio de Curvatura.

2.4.1. Deflexão Recuperável

A deflexão recuperável corresponde ao deslocamento vertical máximo da superfície do pavimento sob a ação de uma carga padronizada. Este parâmetro reflete a resposta global do sistema multicamadas, sendo influenciado pela rigidez de todos os elementos constituintes e, preponderantemente, pela capacidade de suporte do subleito.

Atualmente, a aferição desse parâmetro é realizada preferencialmente através do *Falling Weight Deflectometer* (FWD). O procedimento, normatizado pela DNER-PRO 273/96, utiliza uma carga de impacto para simular o efeito da passagem de uma roda em movimento. É importante ressaltar que, embora deflexões elevadas indiquem diretamente uma estrutura com baixa capacidade de suporte, valores baixos de deflexão em bases cimentadas podem levar a um falso diagnóstico de segurança. Devido à alta rigidez da BGTC, o deslocamento vertical total tende a ser pequeno, o que pode mascarar concentrações críticas de tensão que ocorrem exclusivamente nas camadas superiores.

2.4.2. Raio de Curvatura

Para refinar o diagnóstico estrutural, utiliza-se o conceito de Raio de Curvatura. Estabelecido classicamente na metodologia da norma DNER-PRO 011/79, este parâmetro descreve a geometria da bacia de deformação nas imediações do ponto de aplicação da carga, funcionando como um indicador direto da rigidez do conjunto revestimento-base.

A análise do Raio de Curvatura (R) constitui um parâmetro fundamental para a estimativa do desempenho à fadiga do revestimento. Geometricamente, uma bacia de deformação aguda — caracterizada por um baixo valor de R — indica que a camada asfáltica está submetida a elevadas tensões de tração em sua fibra inferior, fenômeno modelado pela Teoria dos Sistemas em Camadas de Burmister (1943). Nesse contexto, a avaliação estrutural baseada nas diretrizes da norma DNER-PRO 011/79 estabelece que valores de Raio de Curvatura (R) inferiores a 100 metros indicam pavimentos com baixa capacidade estrutural. Para rodovias de tráfego pesado ($N > 10^7$), a ocorrência de raios abaixo desse limite sinaliza uma configuração crítica de curvatura, elevando expressivamente a probabilidade de propagação prematura de fissuras por fadiga no revestimento.

No comparativo proposto por este trabalho, a distinção é crucial: enquanto bases granulares tendem a apresentar bacias mais abertas e deformações distribuídas, as bases em BGTC podem apresentar raios de curvatura críticos em pontos de falha ou fissuração da base, mesmo que a deflexão máxima (D_0) permaneça baixa. Portanto, a interpretação conjunta desses dois indicadores é a metodologia mais eficaz para diferenciar o comportamento mecânico das soluções estudadas.

2.4.3. Avaliação das bacias deflectométricas pelo processo de Retroanálise

A retroanálise é um procedimento iterativo que visa determinar as propriedades elásticas das camadas de um pavimento — especificamente o Módulo de Resiliência (MR) — a partir das bacias de deflexão medidas em campo. Conforme descreve o Manual do MeDiNa (DNIT, 2023), o processo baseia-se na busca por um conjunto de módulos teóricos que, quando inseridos em um modelo mecânico (geralmente baseado na Teoria de Burmister), gerem uma bacia de deflexão calculada que coincida, com o menor erro possível, com a bacia medida pelo FWD.

Diferente dos ensaios de laboratório, que analisam materiais isolados e sob condições controladas, a retroanálise permite uma avaliação não destrutiva da estrutura *in situ*, capturando a interação real entre as camadas e o estado de tensões atual da rodovia. De acordo com o FHWA (2017), a precisão deste método é sensível à qualidade dos dados de entrada, exigindo o conhecimento rigoroso das espessuras das camadas e a adoção de "módulos semente" coerentes para orientar a convergência do algoritmo.

O principal indicador da qualidade da retroanálise é o erro de ajuste (RMSE - *Root Mean Square Error*), que quantifica a diferença entre a resposta medida e a modelada.

Valores de erro reduzidos indicam que o modelo matemático representa fielmente a rigidez real das camadas, permitindo que o projetista identifique trechos com perda de suporte ou ganho de rigidez excessivo, como ocorre na presença de bases tratadas com aglutinantes químicos.

2.4.4. Método das Espessuras Equivalentes

O Método das Espessuras Equivalentes, proposto originalmente por Odemark em 1949, fundamenta-se na premissa de que uma camada de pavimento com espessura h_1 e módulo de elasticidade E_1 pode ser substituída por uma espessura equivalente h_e de um material de referência com módulo E_{ref}, desde que ambas promovam a mesma distribuição de tensões sobre a camada subjacente. A conversão matemática é regida pela equação:

$$h_e = h \times \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_{ref}}}$$

Onde:

h_e = Espessura equivalente da camada (m);

h = Espessura real da camada (m);

E_i = Módulo de Resiliência da camada retroanalisada (MPa); e

E_{ref} = Módulo de Resiliência do subleito adotado como referência (MPa).

Esse método permite homogeneizar o sistema multicamadas do pavimento, facilitando a compreensão da inércia estrutural de cada estrato e a quantificação da sua contribuição relativa na proteção das camadas de fundação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, e garantir a validade científica das conclusões, um roteiro metodológico rigoroso foi estabelecido. Este capítulo descreve o caminho percorrido pela pesquisa, detalhando a natureza da investigação e as ferramentas analíticas utilizadas para comparar o desempenho das diferentes soluções de pavimentação aplicadas na rodovia BR-116/BA.

Os "materiais" principais deste estudo não são amostras físicas manipuladas em laboratório, mas sim um banco de dados robusto de medições deflectométricas de campo, fornecidos por empresa especializada em consultoria rodoviária, referentes a trechos restaurados com base granular e com brita graduada tratada com cimento.

3.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA

Quanto à sua natureza, a pesquisa classifica-se como aplicada, pois busca gerar conhecimentos direcionados à solução de problemas práticos da engenharia rodoviária nacional. Em relação aos objetivos, define-se como exploratória e descritiva, uma vez que visa caracterizar o comportamento da resposta estrutural do pavimento e estabelecer correlações entre as variáveis de tipo de base, deflexão e curvatura.

A abordagem do problema é essencialmente quantitativa. O estudo fundamenta-se na análise estatística e comparativa de dados numéricos, com foco nas deflexões recuperáveis e nos raios de curvatura. A lógica de investigação adota o método indutivo, partindo da observação de dados particulares coletados nos trechos da BR-116 para inferir conclusões gerais sobre o comportamento mecânico das diferentes concepções de base.

Por fim, no que tange aos procedimentos técnicos, o trabalho enquadra-se como um Estudo de Caso. Essa escolha justifica-se pela necessidade de analisar o fenômeno em seu contexto real de operação, onde as variáveis ambientais e as solicitações de tráfego interagem de forma dinâmica e não podem ser isoladas como em experimentos controlados de laboratório.

3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para operacionalizar a pesquisa, o trabalho foi estruturado em etapas sequenciais lógicas, que partem da fundamentação teórica e culminam na análise crítica dos resultados. O roteiro detalhado a seguir descreve as fases de desenvolvimento do estudo.

3.2.1. Revisão Bibliográfica e Normativa

A etapa inicial consistiu no levantamento do estado da arte e das especificações técnicas pertinentes. A fundamentação baseou-se nas diretrizes do DNIT e do extinto DNER, com ênfase nas normas DNER-PRO 011/79 (avaliação estrutural), DNIT 141/2022 (base granular) e DNIT 142/2022 (base estabilizada). Complementarmente, foram analisados artigos científicos recentes que discutem a mecânica dos pavimentos e a interação entre camadas, fornecendo os critérios teóricos necessários para a interpretação dos fenômenos observados.

3.2.2. Levantamento Geotécnico e Definição da Estrutura

Para a viabilização da modelagem mecanística e execução da retroanálise, o conhecimento preciso da espessura de cada estrato e das características do solo de fundação é indispensável. Os dados geométricos das camadas (revestimento, base e sub-base) e os parâmetros de caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa foram extraídos de levantamentos geotécnicos e ensaios laboratoriais realizados e cedidos pela Strata Engenharia.

O procedimento consistiu na análise de poços de inspeção a céu aberto executados pela referida empresa, os quais permitiram a identificação visual e a medição direta das espessuras de execução ao longo do trecho. Estes valores foram adotados como parâmetros fixos de entrada no *software* BackMeDiNa, reduzindo as incertezas inerentes ao modelo matemático.

Adicionalmente, os resultados dos ensaios de laboratório — incluindo granulometria, limites de consistência e o Índice de Suporte Califórnia (CBR) do subleito — serviram como balizadores fundamentais para verificar a coerência física dos módulos retroanalisados. Essa integração entre os dados de campo da Strata Engenharia e a modelagem computacional garantiu que a caracterização mecânica do pavimento respeitasse rigorosamente as condições reais do suporte e a constituição física dos materiais aplicados na rodovia.

3.2.3. Definição dos Grupos Amostrais

O universo da pesquisa foi delimitado a um segmento de 24,96 km da rodovia BR-116/BA, avaliado no sentido Teofilândia – Feira de Santana (faixa da direita). Para viabilizar uma análise comparativa equitativa, o trecho — compreendido entre os quilômetros 374,88 e 399,84 — foi estratificado em dois grupos homogêneos com exata extensão de 12,48 km cada, refletindo diferentes concepções de projeto:

- Grupo 1 (km 374,88 ao 387,36): Segmento em pista simples, cuja estrutura classifica-se como flexível, utilizando Base Granular;
- Grupo 2 (km 387,36 ao 399,84): Segmento contíguo em pista dupla, caracterizado pelo emprego de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) na camada de base, configurando um pavimento de comportamento semirrígido.

Para garantir a equivalência estatística das solicitações de carga entre os grupos, a coleta de dados no trecho de Pista Dupla (Grupo 2) foi deliberadamente restrita à Faixa 2 (faixa externa). Essa decisão metodológica fundamenta-se no conceito de faixa de projeto, uma vez que o tráfego pesado e de menor velocidade — responsável pela maior parcela do dano acumulado e pela fadiga estrutural — concentra-se majoritariamente nesta faixa. Assim, a comparação com a Pista Simples (Grupo 1) torna-se metodologicamente adequada, isolando o comportamento das bases sob o efeito do tráfego comercial e mitigando o viés da distribuição de veículos leves nas faixas internas.

3.2.4. Triagem e Tratamento da Base de Dados

O acervo técnico, composto pelas leituras brutas dos geofones do *Falling Weight Deflectometer* (FWD), foi submetido a um processo sistemático de triagem.

Inicialmente, verificou-se a consistência das medições e expurgaram-se os valores espúrios (*outliers*) decorrentes de falhas pontuais nos sensores. Em seguida, procedeu-se à normalização das leituras. Como o revestimento asfáltico é um material termoviscossensível, as deflexões medidas foram corrigidas para uma temperatura de referência, mitigando a influência do clima local na resposta elástica. Simultaneamente, as bacias de deformação foram padronizadas para uma carga de referência de 41 kN (equivalente ao semieixo padrão de 8,2 tf). Esse tratamento assegura que as diferenças de deflexão observadas sejam atribuídas exclusivamente à rigidez das camadas de base, validando a comparação estatística.

3.2.5. Cálculo dos Parâmetros e Análise Comparativa

Na etapa final, procedeu-se ao processamento dos dados validados. Utilizando os algoritmos preconizados pela norma DNER-PRO 011/79 e as leituras da bacia de deformação, foram calculados os dois indicadores estruturais centrais: a Deflexão Máxima (D_0) e o Raio de Curvatura (R). De posse desses valores, realizou-se o confronto gráfico e estatístico entre os dois grupos, buscando evidenciar as diferenças de rigidez e o potencial de cada tipo de base na dissipação de esforços e proteção do revestimento.

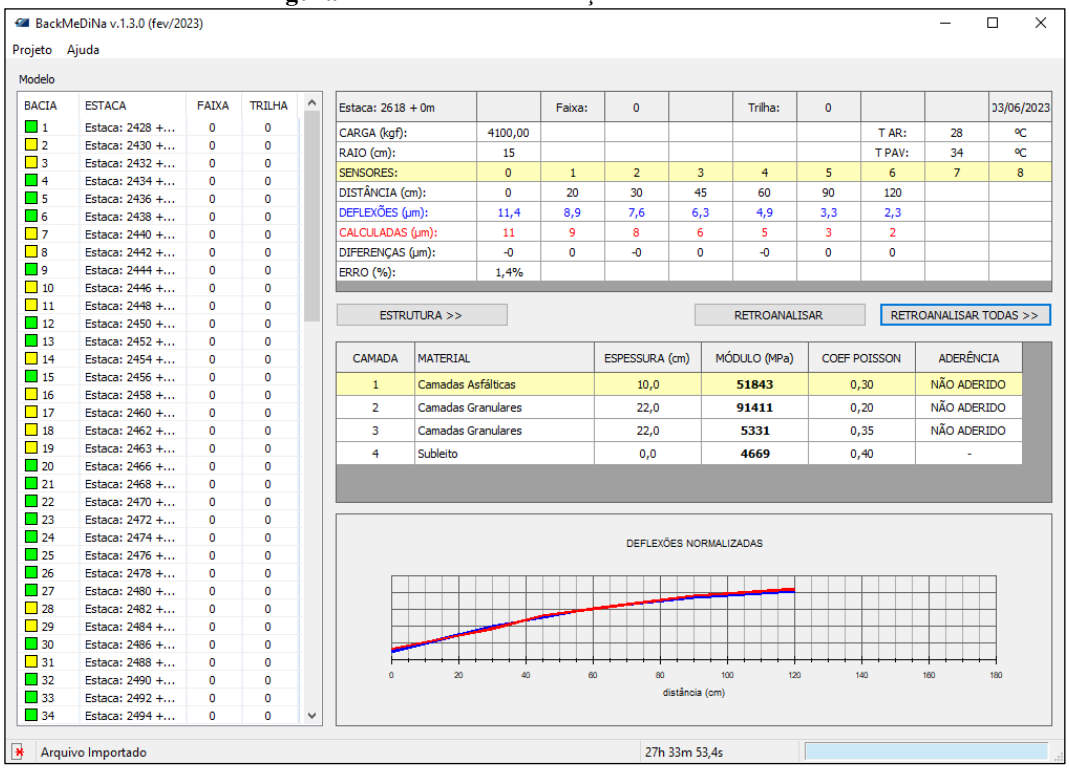
Faz-se necessário ressaltar, contudo, que a análise comparativa entre os grupos supracitados reconhece as particularidades geométricas e estruturais de cada trecho. Embora existam variáveis distintas — como a variação de suporte do subleito e a distribuição geométrica do tráfego (Pista Simples frente à Pista Dupla) —, a resposta mecânica instantânea pode ser isolada e avaliada devido à normalização da carga do FWD a 41 kN.

Ressalta-se, porém, que as comparações futuras sobre a evolução do dano por fadiga e reflexão de trincas deverão ponderar que a pista simples concentra o tráfego nos mesmos eixos de roda, enquanto a pista dupla distribui o espectro de cargas, induzindo ritmos de degradação estrutural distintos sob tráfego real. Tais discrepâncias são tratadas como condições de contorno intrínsecas ao objeto de estudo, permitindo avaliar como diferentes soluções de restauração reagem a substratos distintos e isolar a predominância mecânica da rigidez da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) na preservação da integridade estrutural do pavimento.

3.2.6. Procedimento de Retroanálise Mecanística

Para transcender a avaliação qualitativa das deflexões e obter a quantificação da rigidez das camadas, adotou-se o procedimento de retroanálise utilizando o *software* BackMeDiNa. A escolha desta ferramenta justifica-se pelo seu alinhamento com o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), apresentando maior aderência ao comportamento mecânico dos materiais e solos tropicais brasileiros.

Figura 1 – Interface da Execução do BackMeDiNa



Fonte: Autoria Própria, 2026.

O programa utilizou algoritmos iterativos fundamentados na Teoria da Elasticidade Linear para ajustar os módulos de resiliência teóricos até a convergência com a bacia medida em campo. Para balizar o início das iterações e garantir a coerência físico-matemática do modelo, os módulos semente das camadas granulares e do subleito foram arbitrados com base nas diretrizes da Instrução de Projeto IP-DE-P00/001 (DER/SP, 2006). A modelagem estrutural foi processada agrupando-se os dados em segmentos definidos pela semelhança do perfil geotécnico e pelo método construtivo (Pista Simples vs. Pista Dupla, logo Grupo 1 vs. 2).

Visando assegurar a integridade do diagnóstico, aplicou-se um controle sistemático de qualidade no processamento das bacias deflectométricas, fundamentado nas metodologias de avaliação estrutural não-destrutiva detalhadas por Marques (2002). Este protocolo consistiu na verificação da consistência das medições, compatibilidade entre sensores e precisão das espessuras adotadas via sondagens da Strata Engenharia. Alinhado ao Manual do BackMeDiNa (DNIT, 2023), adotou-se como critério de corte o Erro Quadrático Médio (RMSE), expurgando-se da amostra bacias com erro de ajuste superior a 10%.

Com os módulos validados, procedeu-se à quantificação da contribuição estrutural de cada estrato através do Método das Espessuras Equivalentes de Odemark, detalhado na Seção 2.4.4. A aplicação do método foi automatizada por meio de rotina computacional em ambiente Excel/VBA, permitindo o processamento sistemático de todos os pontos de coleta.

A influência estrutural percentual foi determinada pela razão entre a espessura equivalente (h_e) de cada camada e o somatório total das espessuras equivalentes do pacote estrutural, permitindo confrontar a contribuição estrutural da Base Granular frente à Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo dedica-se à apresentação, ao tratamento estatístico e à análise crítica dos dados coletados na rodovia BR-116/BA. Inicialmente, é estabelecida a caracterização física e geotécnica do subtrecho monitorado. Em seguida, os parâmetros deflectométricos (Deflexão e Raio de Curvatura) e os Módulos de Resiliência retroanalisados são confrontados, visando avaliar quantitativa e qualitativamente o impacto estrutural da substituição da base granular por brita graduada tratada com cimento (BGTC).

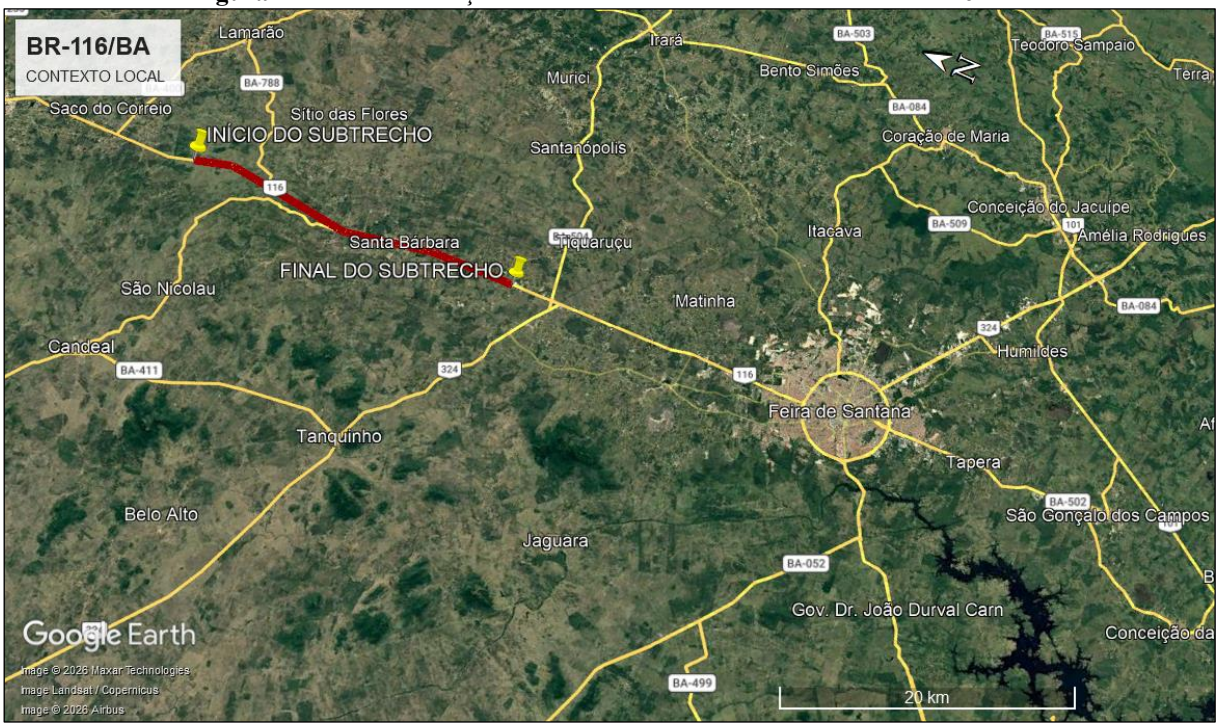
4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E DO TRECHO MONITORADO

A avaliação de estruturas em serviço requer, preliminarmente, a compreensão das condições de contorno e dos materiais preexistentes, assegurando que o suporte do subleito não atue como variável de confusão na análise comparativa das bases.

4.1.1. Localização e Contextualização do Subtrecho

O objeto de estudo compreende um segmento de 24,96 km da rodovia BR-116, localizado na região semiárida do estado da Bahia. A Figura 2 ilustra o enquadramento geográfico do trecho, estendendo-se do entroncamento com a BR-349 (Teofilândia) em direção a Feira de Santana.

Figura 2 – Contextualização do Subtrecho em estudo na rodovia BR-116/BA



Fonte: Google Earth, 2026.

Figura 3 – Localização do Subtrecho em estudo na rodovia BR-116/BA



Fonte: Google Earth, 2026.

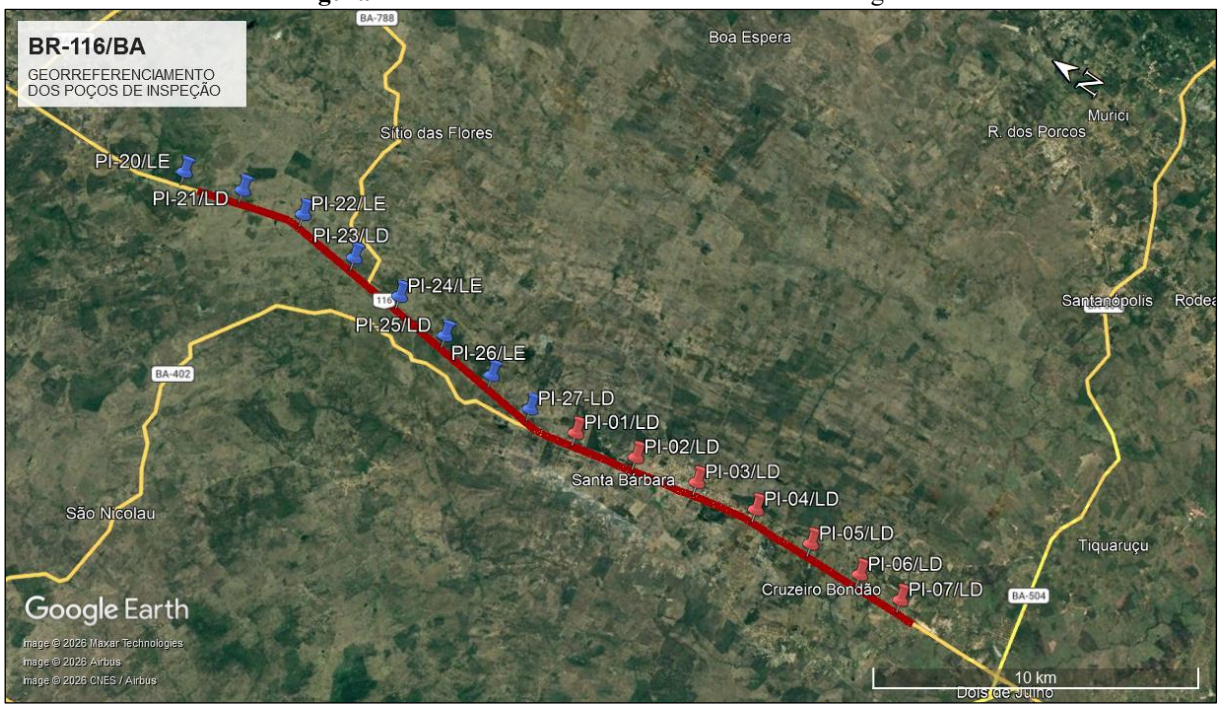
Nesta extensão, selecionaram-se as faixas do lado direito (sentido Feira de Santana), caracterizadas como as faixas de projeto devido à maior concentração de veículos comerciais e sobrecargas de eixo.

O traçado analisado divide-se em duas configurações estruturais distintas e contíguas: o trecho em Pista Simples (PS), do km 374,88 ao km 387,36, cuja restauração manteve a camada de Base Granular; e o trecho em Pista Dupla (PD), do km 387,36 ao km 399,84, restaurado com Base em BGTC.

4.1.2. Perfil Estratigráfico e Espessuras

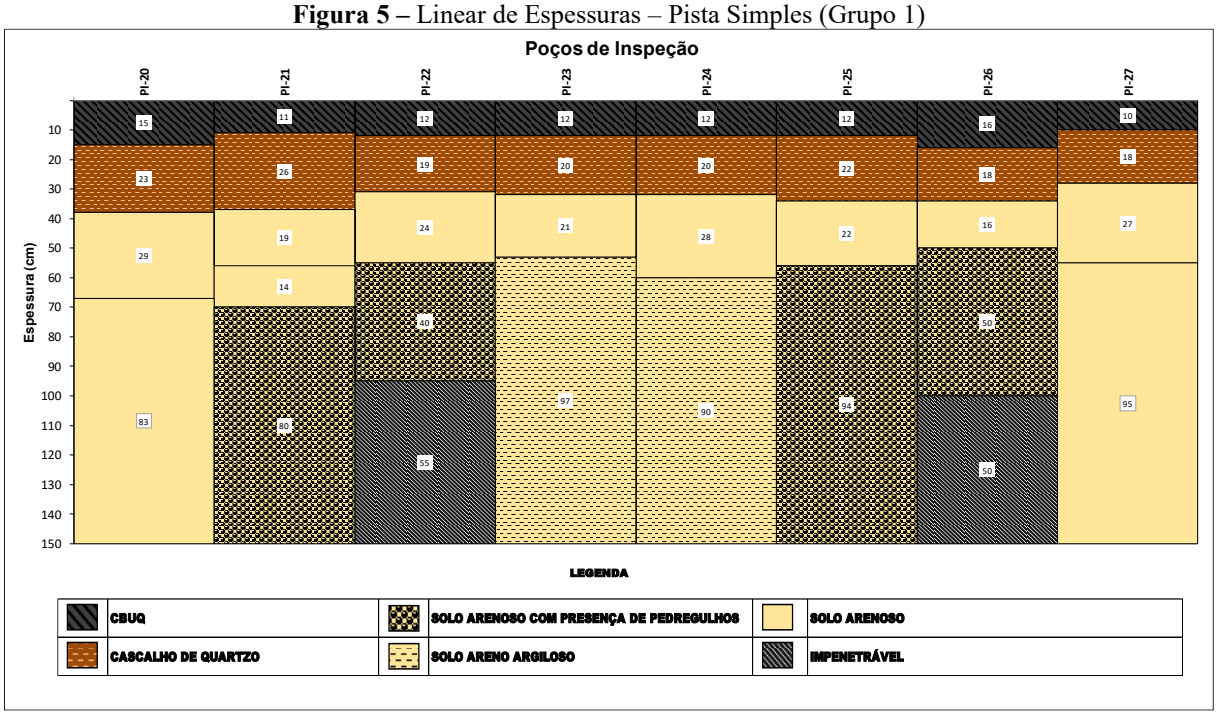
Para caracterizar a geometria do sistema multicamadas, realizou-se a compilação do cadastro de sondagens executado ao longo da via.

Figura 4 – Georreferenciamento dos Locais de Sondagens



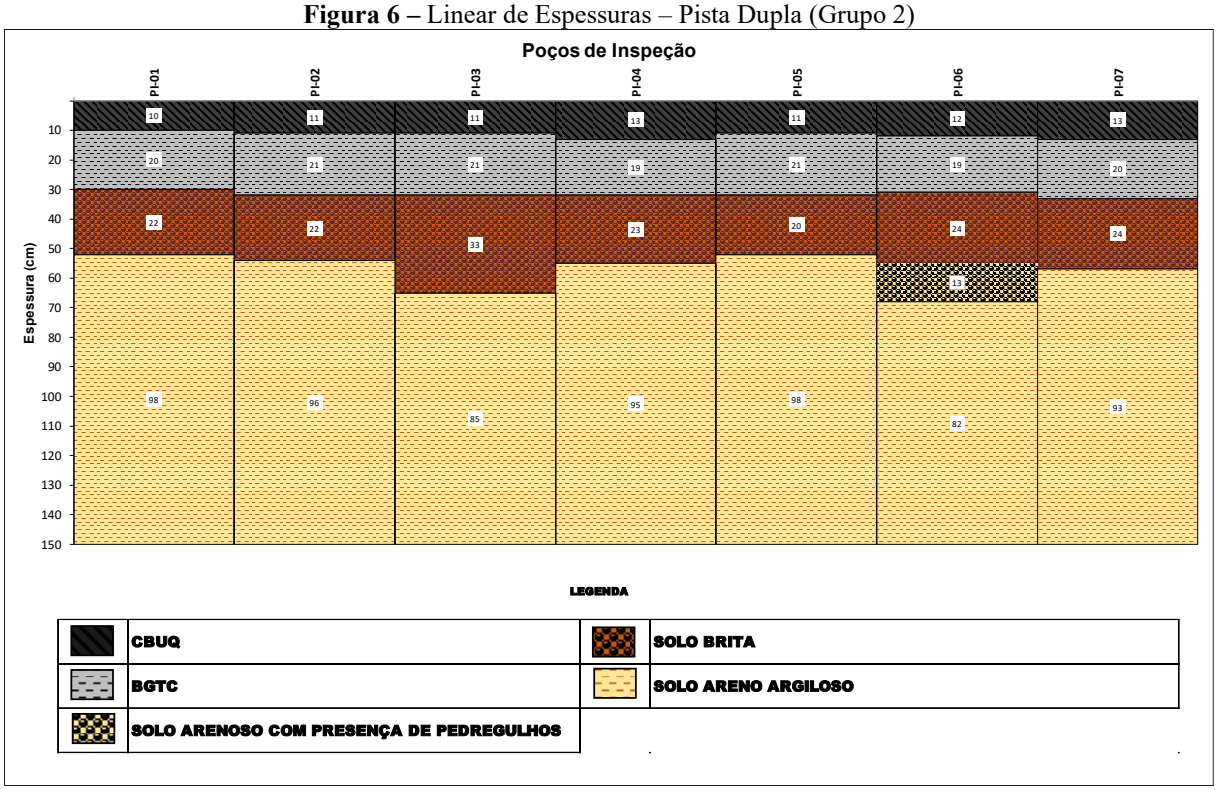
Fonte: Google Earth, 2026.

Figura 5 – Linear de Espessuras – Pista Simples (Grupo 1)



Fonte: Strata Engenharia, 2024.

Figura 6 – Linear de Espessuras – Pista Dupla (Grupo 2)



Fonte: Strata Engenharia, 2024.

Analisando a Figura 7 apresenta o relatório fotográfico típico dos poços de sondagem, evidenciando as transições de materiais. Nota-se a diferença de coloração e textura entre a base granular convencional — representada pela foto à esquerda — e a camada cimentada, bem como as espessuras do concreto asfáltico em cada concepção.

Figura 7 – Perfil Estratigráfico constatado nos Poços de Sondagem

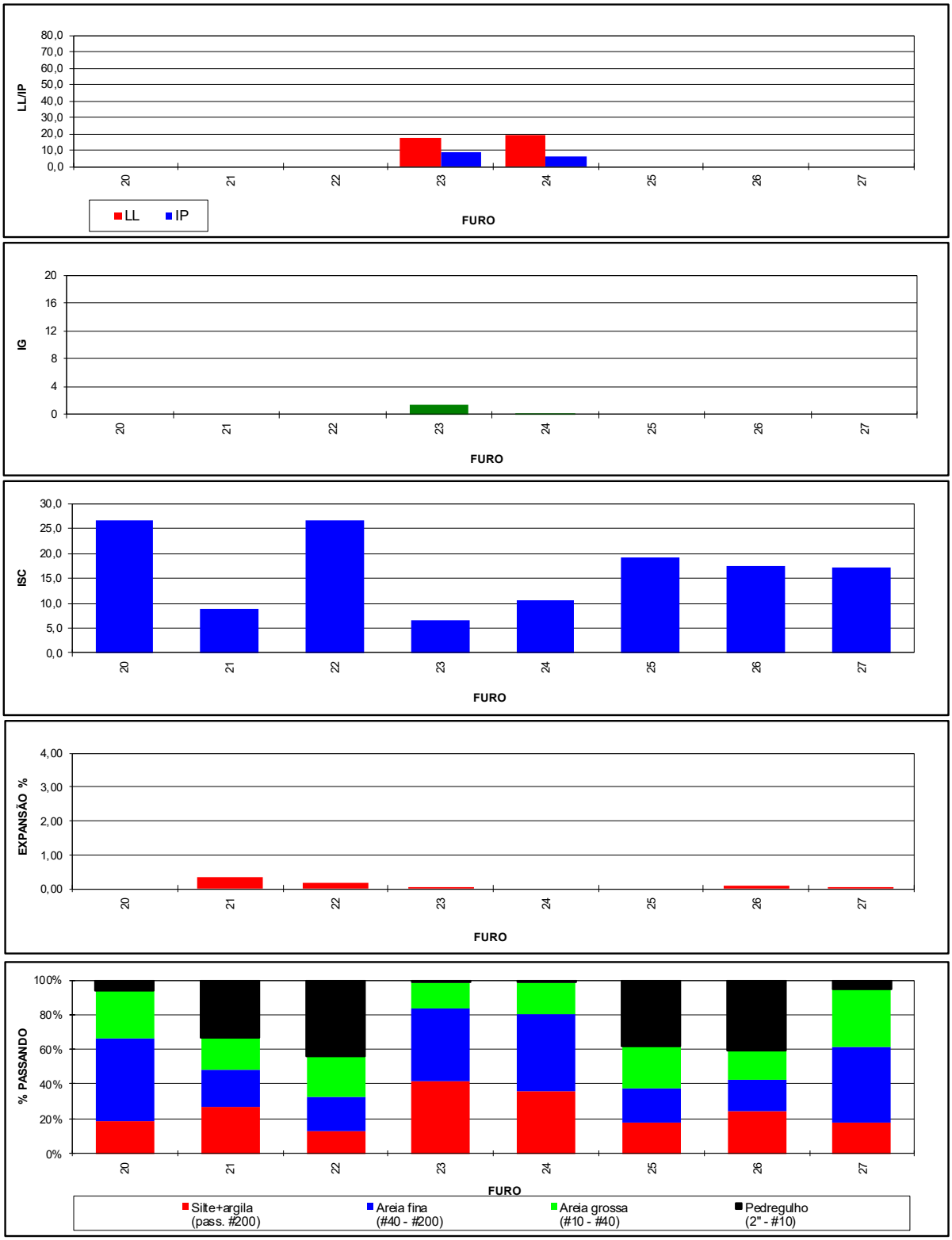


Fonte: Equipe de Campo Strata Engenharia, 2023.

4.1.3. Propriedades Físico-Mecânicas dos Materiais

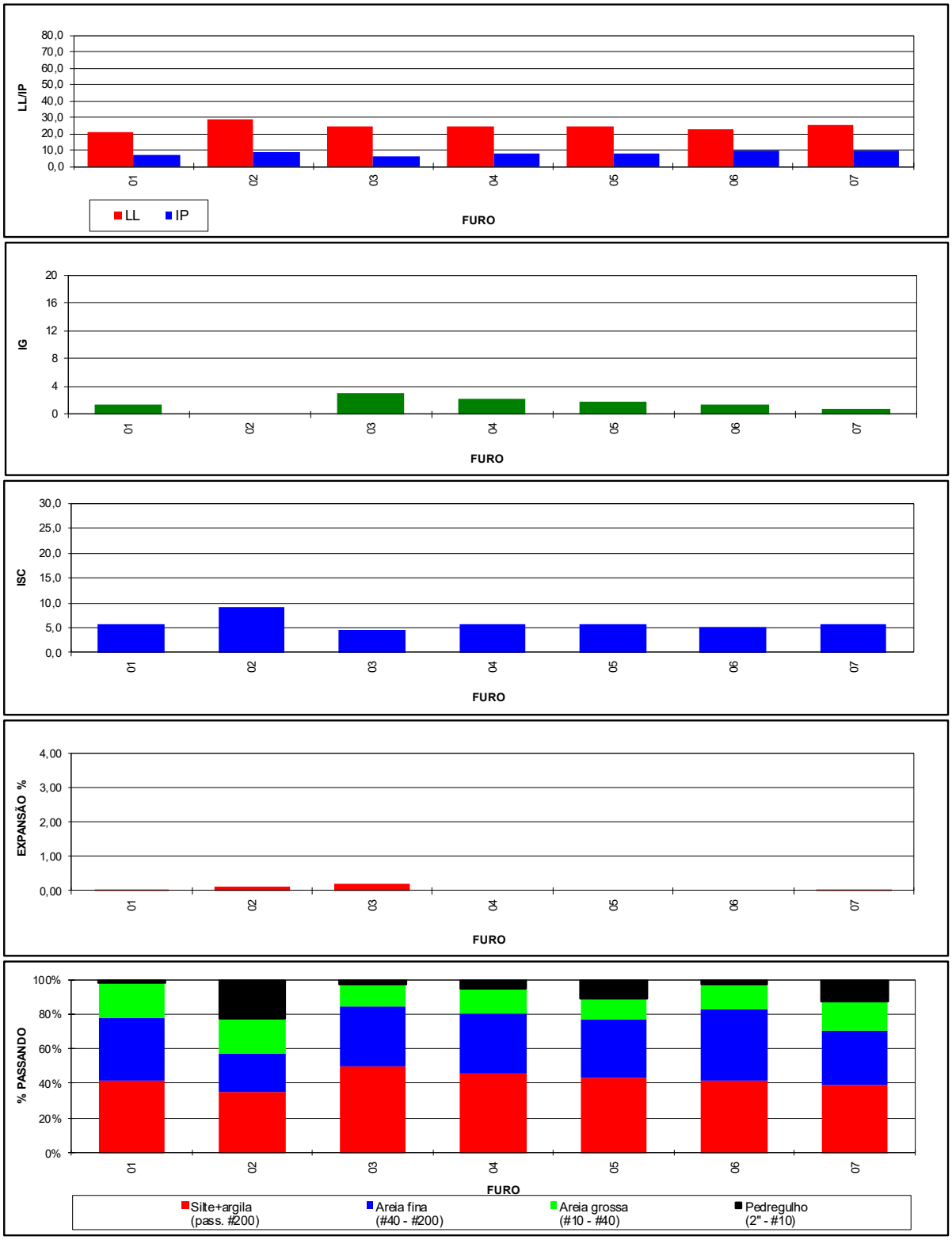
Visando compreender as condições de suporte da fundação da rodovia, os materiais granulares e o solo do subleito foram submetidos a ensaios de caracterização e resistência. Os valores médios obtidos estão sumarizados na Tabela 1 e na Tabela 2 para o pavimento flexível e semirrígido flexível, respectivamente.

Tabela 1 – Resumo dos Ensaios de Laboratório – Pista Simples (Grupo 1)



Fonte: Laboratório Strata Engenharia, 2023.

Tabela 2 – Resumo dos Ensaios de Laboratório – Pista Dupla (Grupo 2)



Fonte: Laboratório Strata Engenharia, 2023.

A análise dos dados laboratoriais revela uma assimetria nas condições de suporte ao longo dos 24,96 km estudados. Constata-se que o trecho correspondente à Pista Simples (Base Granular) repousa sobre um solo de fundação com maior capacidade de suporte, apresentando índices de suporte (CBR) médios superiores aos encontrados no trecho em Pista Dupla (BGTC).

Essa constatação geotécnica é de suma importância para a interpretação dos resultados deflectométricos a seguir. Ao constatar que o pavimento com base flexível possui o melhor solo de fundação, elimina-se a hipótese de que eventuais baixas deflexões no trecho cimentado sejam mérito do subleito. Pelo contrário, qualquer ganho de rigidez estrutural no trecho de BGTC dar-se-á apesar de seu subleito ser comparativamente inferior.

4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DEFLECTOMÉTRICOS

Com a infraestrutura caracterizada, processaram-se os dados extraídos dos levantamentos com *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Conforme mencionado anteriormente, para neutralizar a termoviscossensibilidade do revestimento asfáltico e padronizar as respostas elásticas, as deflexões foram matematicamente corrigidas para a carga padrão de 41 kN e temperatura de referência.

A análise comparativa a seguir concentra-se estritamente nas faixas de projeto de cada subtrecho, correspondentes à faixa única do lado direito, no segmento de pista simples, e à faixa mais externa no segmento de pista dupla, a qual concentra o maior volume de veículos comerciais carregados e, consequentemente, onde as solicitações estruturais são mais severas. Dessa forma, avaliaram-se os registros da Faixa 1 para o trecho em Pista Simples (Base Granular, Grupo 1) e da Faixa 2 para o trecho em Pista Dupla (BGTC, Grupo 2).

4.2.1. Panorama Geral dos Dados

Antes de avaliar o comportamento longitudinal do pavimento, procedeu-se à análise estatística descritiva das bacias de deformação para compreender a distribuição dos dados em cada grupo amostral.

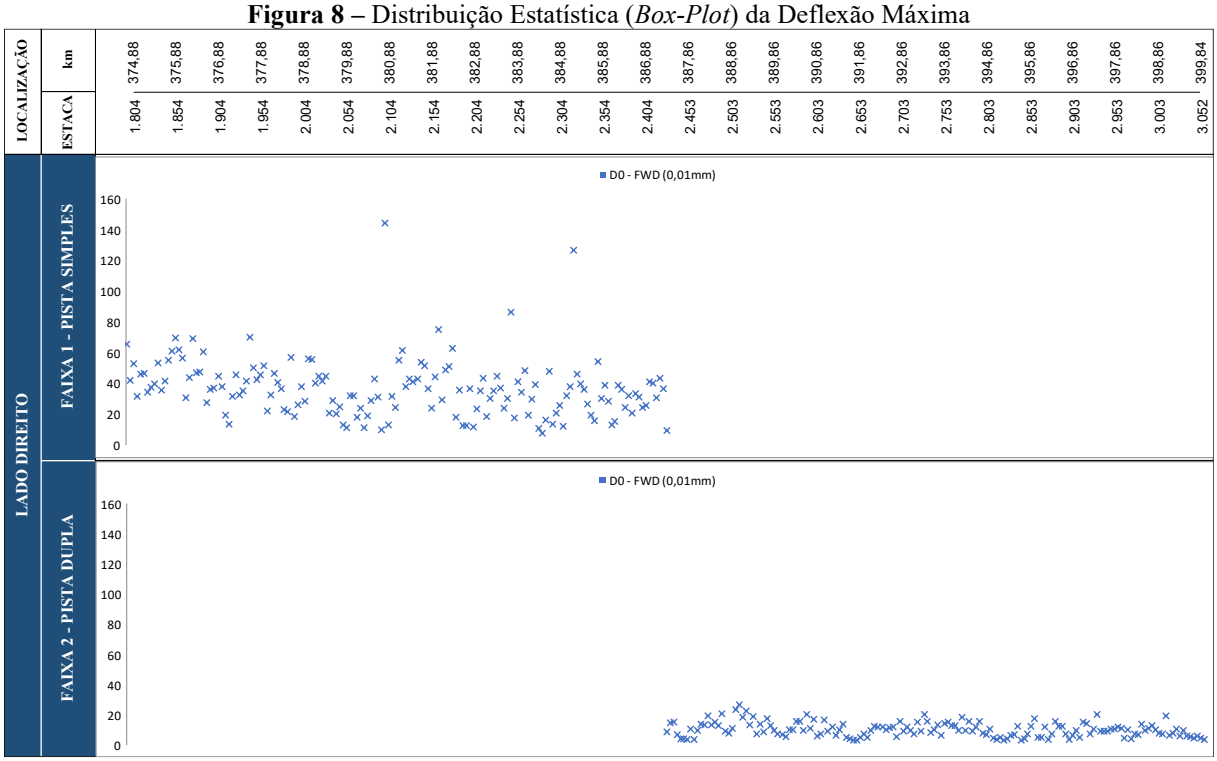
Tabela 3 – Estatística Descritiva dos Parâmetros Deflectométricos

PISTA SIMPLES			**PISTA DUPLA**		
D_0 (10^{-2}mm)			D_0 (10^{-2}mm)		
Média	Mediana	Desvio Padrão	Média	Mediana	Desvio Padrão
37,28	36,70	17,64	13,62	13,10	6,68
R (m)			R (m)		
Média	Mediana	Desvio Padrão	Média	Mediana	Desvio Padrão
291,60	206,19	417,96	871,60	678,16	618,15

Fonte: Autoria Própria, 2026.

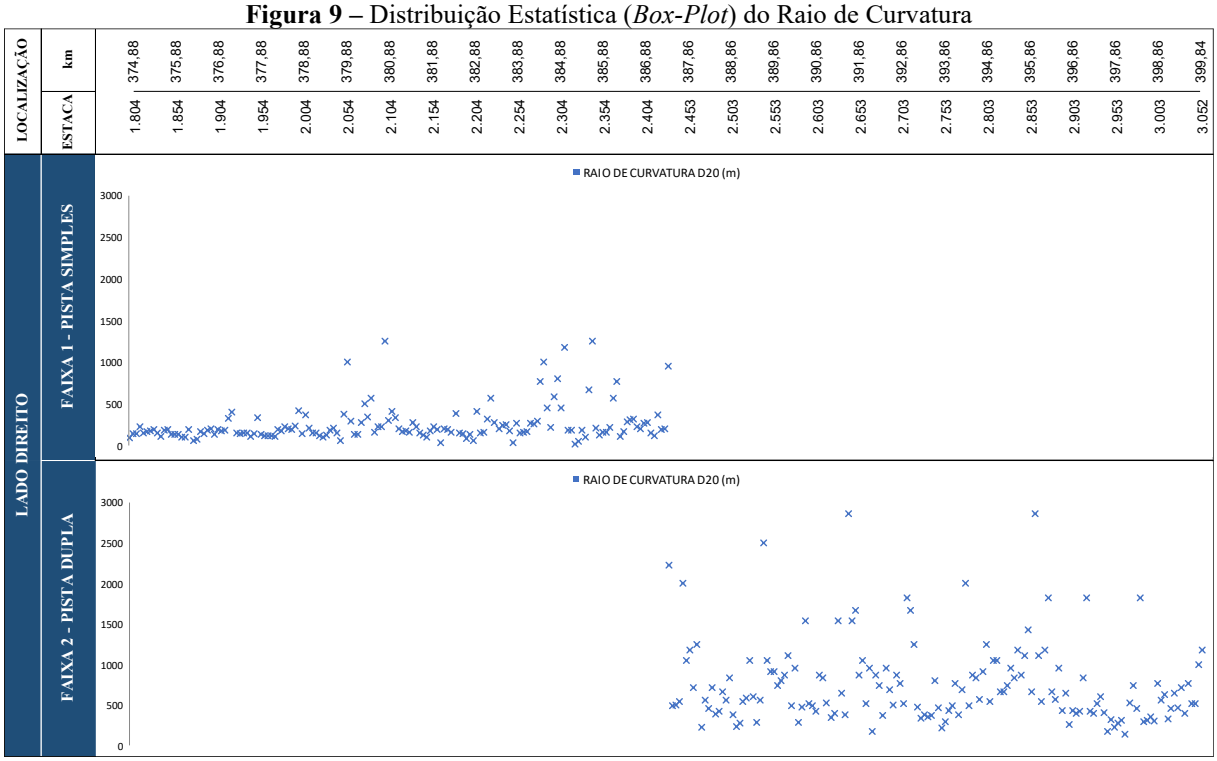
Para facilitar a visualização da dispersão e identificar a tendência central de cada solução de base, os dados foram plotados em diagramas de caixa (*Box-Plot*), representados na Figura 8 e na Figura 9.

Figura 8 – Distribuição Estatística (*Box-Plot*) da Deflexão Máxima



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 9 – Distribuição Estatística (*Box-Plot*) do Raio de Curvatura



Fonte: Autoria Própria, 2026.

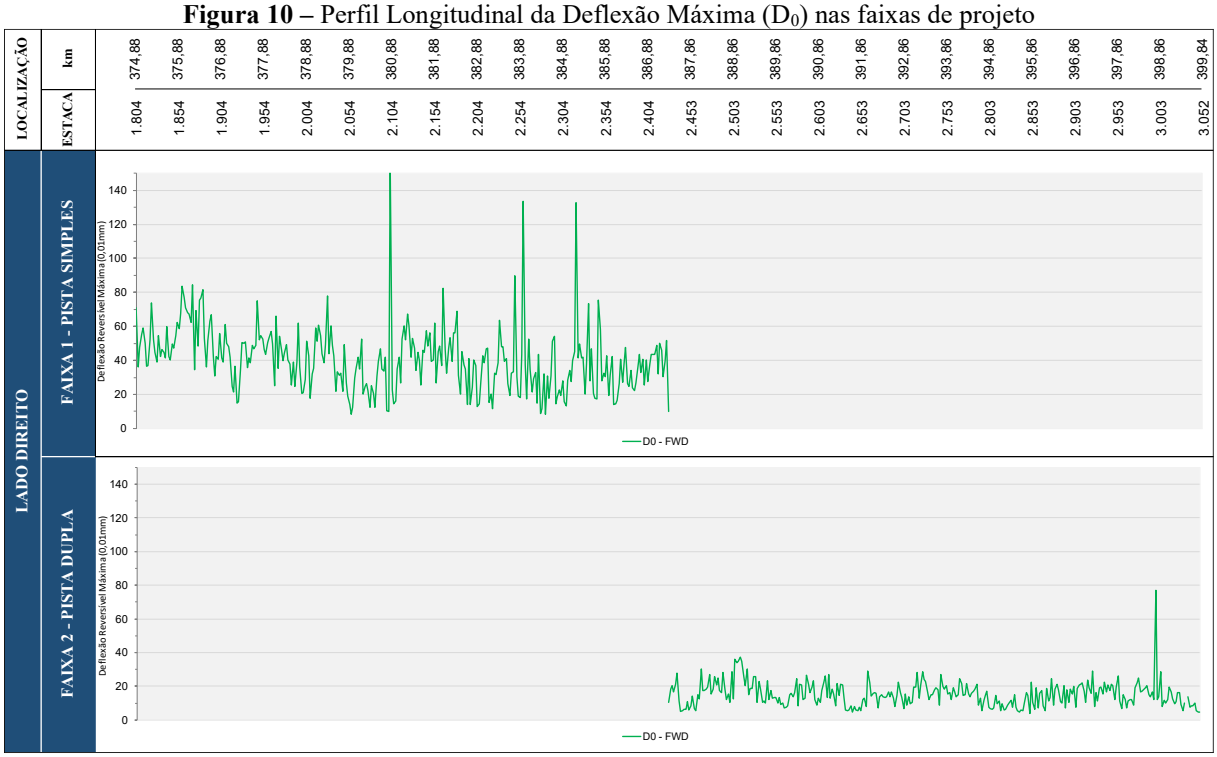
A análise preliminar das distribuições evidencia uma divergência mecânica entre as concepções estruturais. A população de dados referente ao trecho em BGTC apresenta valores medianos de deflexão inferiores aos da base granular, acompanhados de uma variância (dispersão) estatisticamente menor.

Ademais, ao se analisarem os resultados do raio de curvatura em ambos os intervalos, constata-se uma significativa discrepância dos valores, cenário em que o segmento com a base em BGTC apresenta resultados estatisticamente superiores. Essa constatação estatística inicial aponta para um ganho expressivo de rigidez no trecho cimentado, configurando a premissa que será detalhada na avaliação longitudinal da rodovia.

4.2.2. Análise da Deflexão Máxima (D_0)

A deflexão máxima (D_0), lida pelo geofone posicionado sob o centro de aplicação da carga, mensura o deslocamento vertical elástico instantâneo do pacote estrutural. Para avaliar o comportamento dessa variável em sua extensão, os dados foram plotados sequencialmente ao longo do estaqueamento da rodovia, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Perfil Longitudinal da Deflexão Máxima (D_0) nas faixas de projeto



Fonte: Autoria Própria, 2026.

A leitura gráfica do perfil longitudinal corrobora a magnitude apontada pela estatística descritiva. Observa-se uma redução expressiva nos níveis de deflexão a partir do km 387,36, estaca que demarca o início do segmento em Pista Dupla. Enquanto a Base Granular apresentou uma mediana de deflexão de 36,70 x 10^{-2}mm, o trecho cimentado reduziu esse patamar para 13,10 x 10^{-2}mm — uma contenção de deslocamento vertical da ordem de 64%.

É imperativo destacar a relevância analítica deste resultado frente à caracterização geotécnica prévia: o trecho em BGTC apresenta deslocamentos verticais significativamente inferiores mesmo estando apoiado sobre um subleito de menor capacidade de suporte (CBR) quando comparado à fundação do trecho de Base Granular.

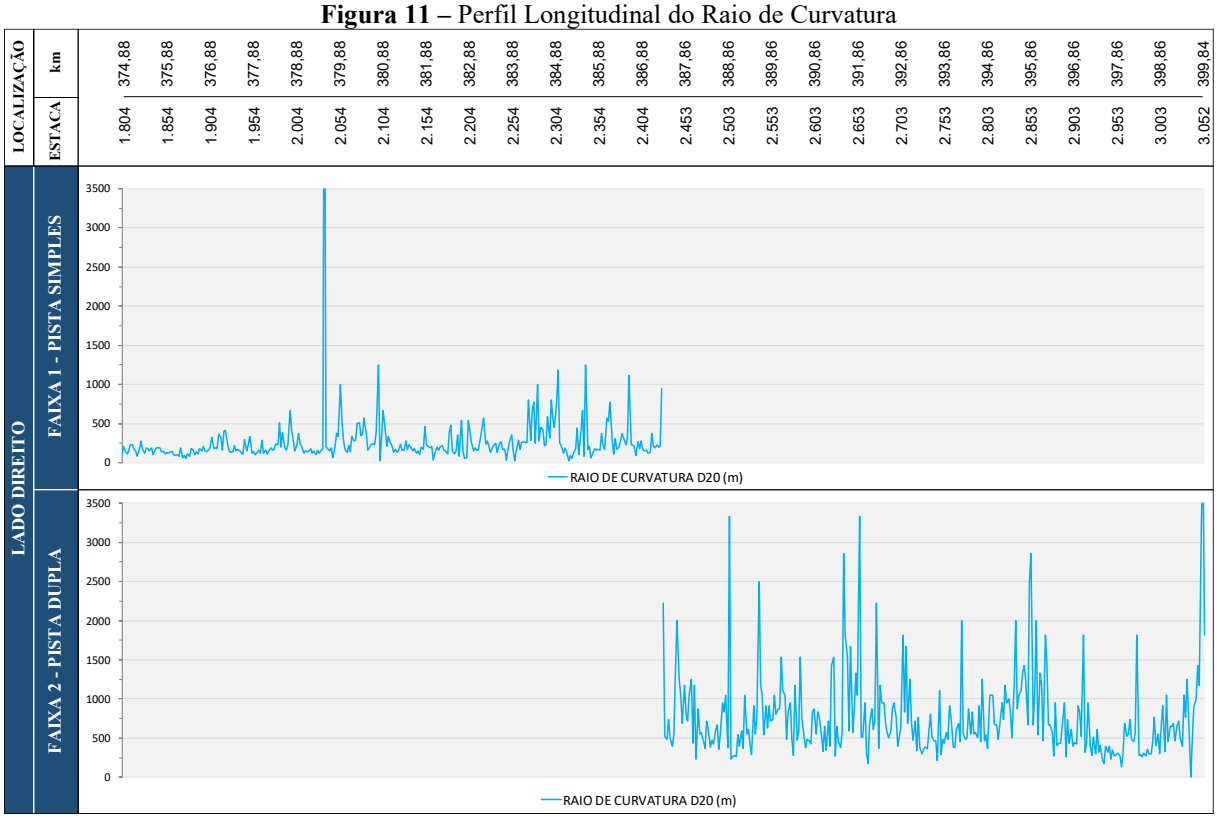
Tal fenômeno indica que o subleito não atua como o fator predominante para as baixas leituras deflectométricas registradas no trecho semirrígido. Pelo contrário, a resposta estrutural corrobora o que Balbo e Cargnin (2023) descrevem sobre o comportamento de bases cimentadas, evidenciando o predomínio do "efeito laje". A cimentação eleva a rigidez da mistura a ponto de a base atuar como uma placa contínua, distribuindo as tensões verticais por uma área vasta e mitigando as deficiências intrínsecas da fundação, o que explica a acentuada queda também no desvio padrão (de 17,64 para 6,68).

Ademais, deve-se destacar que, em estruturas de pavimentação flexíveis, a ocorrência de deslocamentos verticais é um fenômeno intrínseco e esperado da mecânica do sistema. Diferente das soluções cimentadas, o pavimento granular dissipa a energia das cargas de tráfego por meio do rearranjo e da resiliência das partículas de agregado. Portanto, as deflexões mais elevadas observadas no Grupo 1 não indicam, necessariamente, uma falha estrutural, mas sim a operação do regime elástico convencional, desde que tais deformações se mantenham dentro dos limites admissíveis de fadiga do revestimento asfáltico.

4.2.3. Análise do Raio de Curvatura (*R*)

Apesar da sensível melhora na deflexão máxima global do pavimento, a avaliação da integridade estrutural do revestimento asfáltico requer a análise da bacia de deformação. O Raio de Curvatura (*R*) descreve a geometria dessa bacia e é o parâmetro balizador das tensões de tração atuantes na fibra inferior da camada asfáltica.

Figura 11 – Perfil Longitudinal do Raio de Curvatura



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Ao contrastar as soluções de base, nota-se uma alteração significativa no comportamento do parâmetro geométrico. O trecho em Pista Simples (Base Granular) exibiu uma média de raio de 291,60m. Já O trecho em Pista Dupla (BGTC) apresentou média de 871,60 m, o que indicaria bacias de deformação com maiores raios de curvatura. Contudo, o desvio padrão de 618,15 m aponta para variações abruptas, alternando raios de alta magnitude com raios curtos.

Esse fenômeno é característico de bases tratadas com cimento, conforme alertam Balbo e Cargnin (2023) ao discutirem o desempenho da BGTC convencional. A elevada rigidez global da camada propicia e pode ocultar a presença de descontinuidades físicas (fissuras de retração de secagem, inerentes à hidratação do material). Quando a carga móvel incide diretamente sobre uma dessas descontinuidades (ou nas imediações de uma placa fraturada), a laje perde sua capacidade de transferência de carga pontual. Consequentemente, o revestimento asfáltico sofre uma deflexão aguda e localizada, impondo severas tensões de tração na mistura betuminosa — configurando um cenário de alto risco para o surgimento de trincas por reflexão e fadiga precoce.

Diferente do que se poderia supor pela maior capacidade de fluxo da Pista Dupla, a severidade dos parâmetros detectados no Grupo 2 não pode ser atribuída a uma atenuação do tráfego.

Como a amostragem focou na faixa de tráfego pesado, os baixos valores de Raio de Curvatura (R) e a alta variabilidade observada confirmam que, mesmo na faixa de maior solicitação, a base de BGTC introduz um mecanismo de ruptura distinto, onde a rigidez da camada se torna o fator crítico para a integridade do revestimento, independentemente da geometria global da via.

4.3. MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS

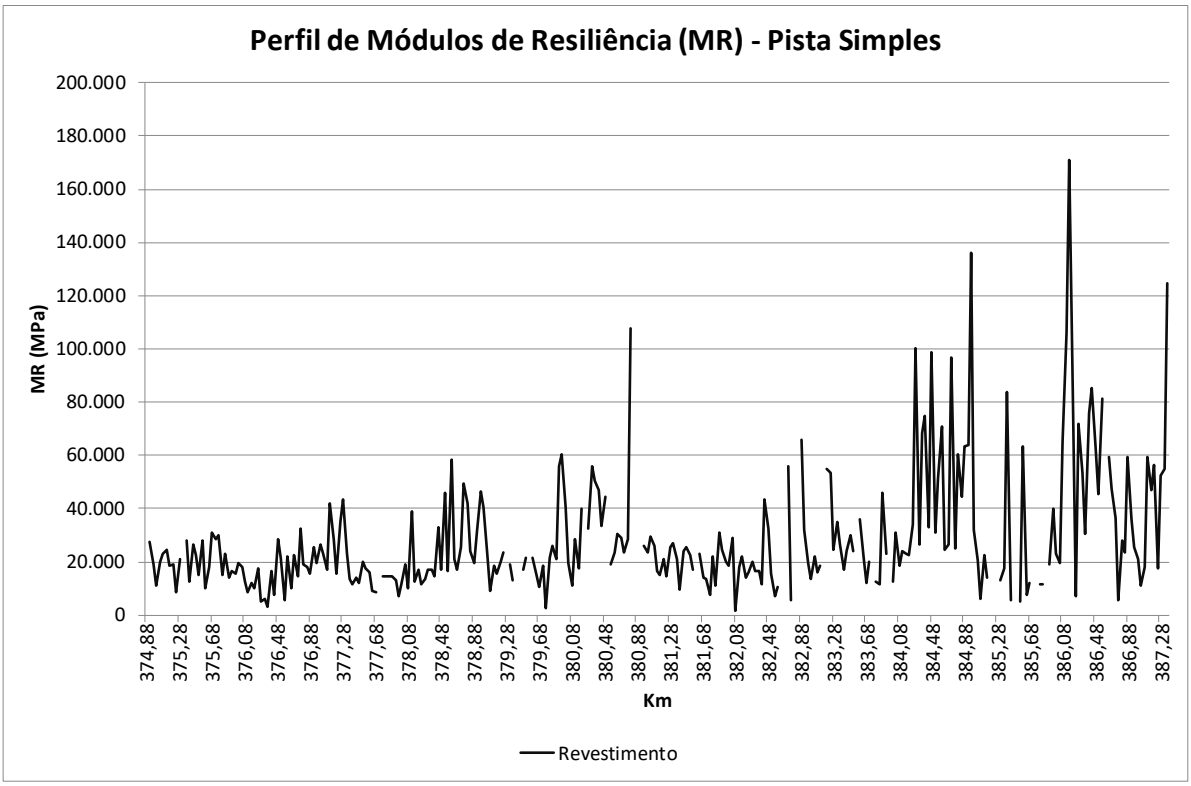
O tratamento prévio dos dados resultou em um baixo índice de descarte de bacias deflectométricas. O critério de convergência físico-matemática (RMSE < 10%) resultou na exclusão de 8,62% das bacias no trecho em Pista Simples (Grupo 1) e 2,56% no trecho em Pista Dupla (Grupo 2). Este baixo percentual de rejeição indica a consistência estatística da modelagem estrutural e assegura que o diagnóstico subsequente represente de forma representativa o estado de rigidez e a capacidade de suporte da rodovia.

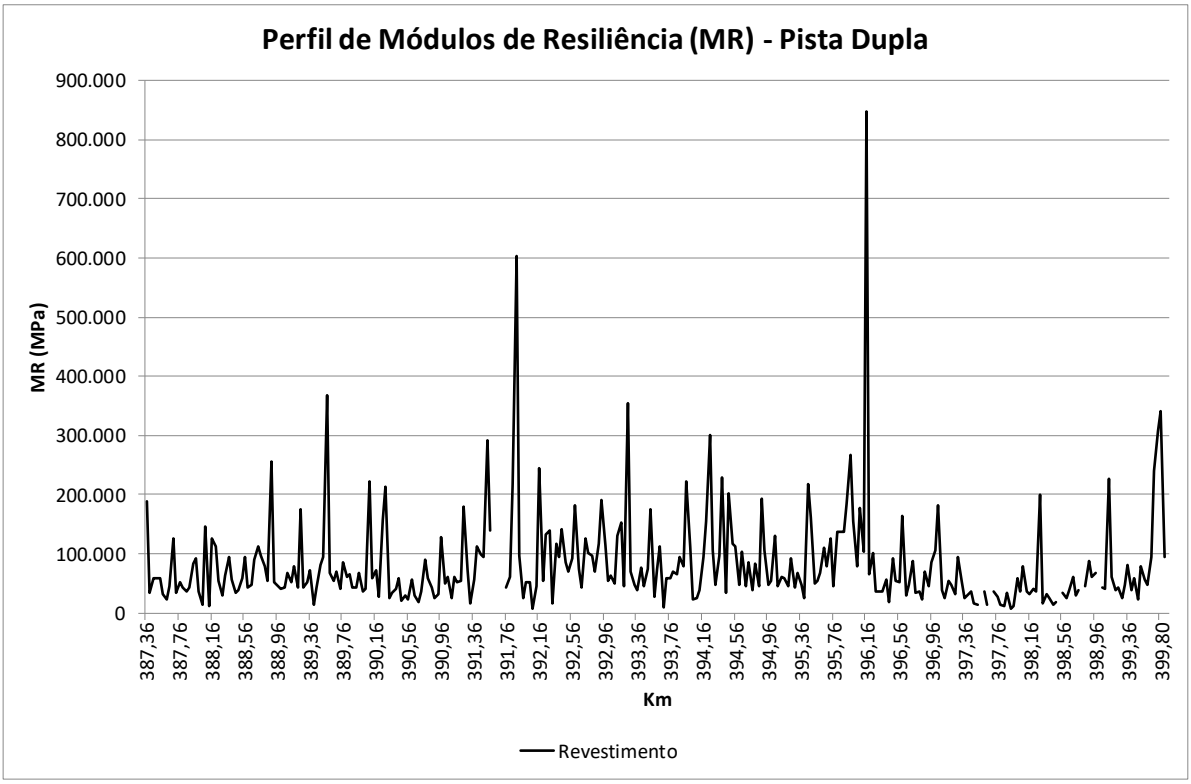
Ao consolidar os resultados da retroanálise, observa-se um contraste imediato entre as magnitudes dos Módulos de Resiliência (MR) das camadas de base. Enquanto o trecho em Pista Simples, composto por Base Granular, apresentou uma mediana de módulos de 2.535 MPa — valor condizente com pavimentos flexíveis convencionais de desempenho satisfatório —, o trecho em Pista Dupla evidenciou o impacto da estabilização química.

Nesta última, a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) atingiu uma mediana de 40.776 MPa, patamar aproximadamente 16 vezes superior ao da solução granular.

Essa disparidade de rigidez é o fator determinante para as diferenças observadas no comportamento deflectométrico global. A magnitude dos módulos retroanalisados no Grupo 2 confirma a instauração de um regime semirrígido, onde a camada de base assume a função preponderante na absorção das tensões verticais. Contudo, essa elevada rigidez também é a origem da descontinuidade mecânica que, associada aos baixos raios de curvatura observados, sinaliza a vulnerabilidade do sistema ao trincamento por fadiga e reflexão, conforme discutido no diagnóstico integrado.

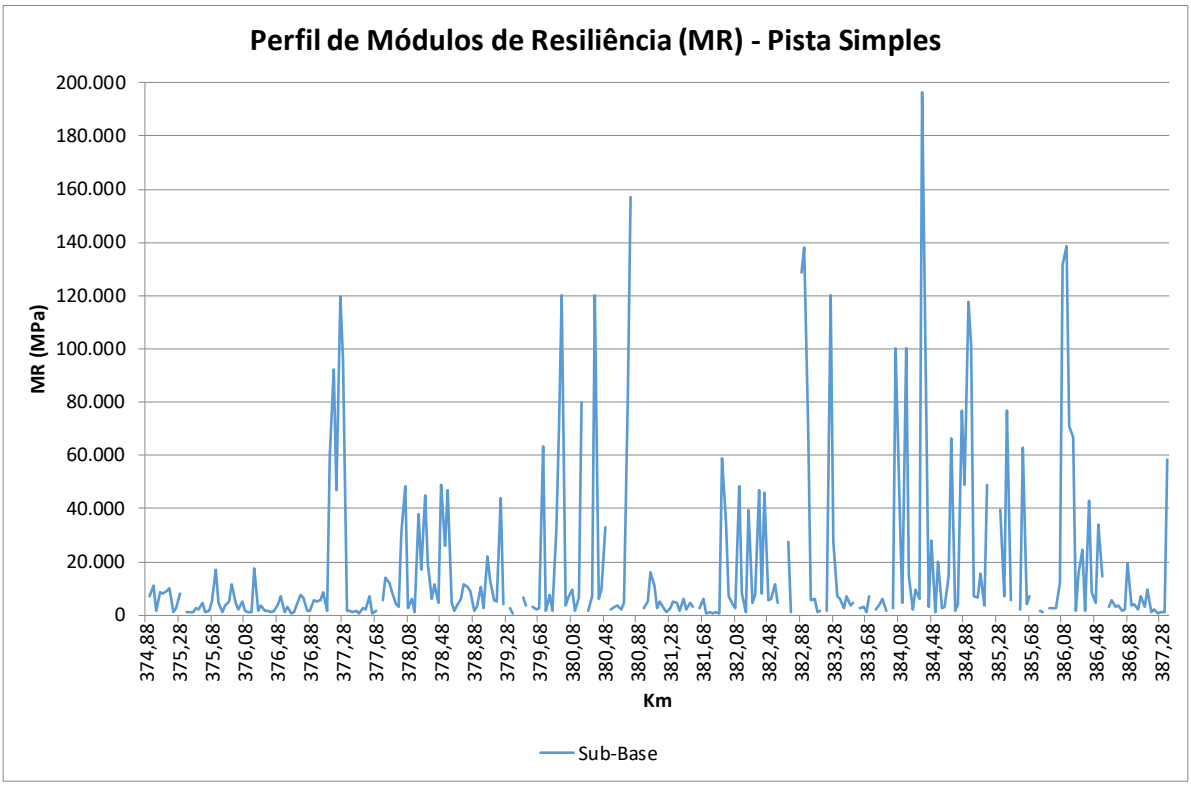
Gráfico 1 – Comparativo dos Módulos de Resiliência Retroanalisados do Revestimento Asfáltico

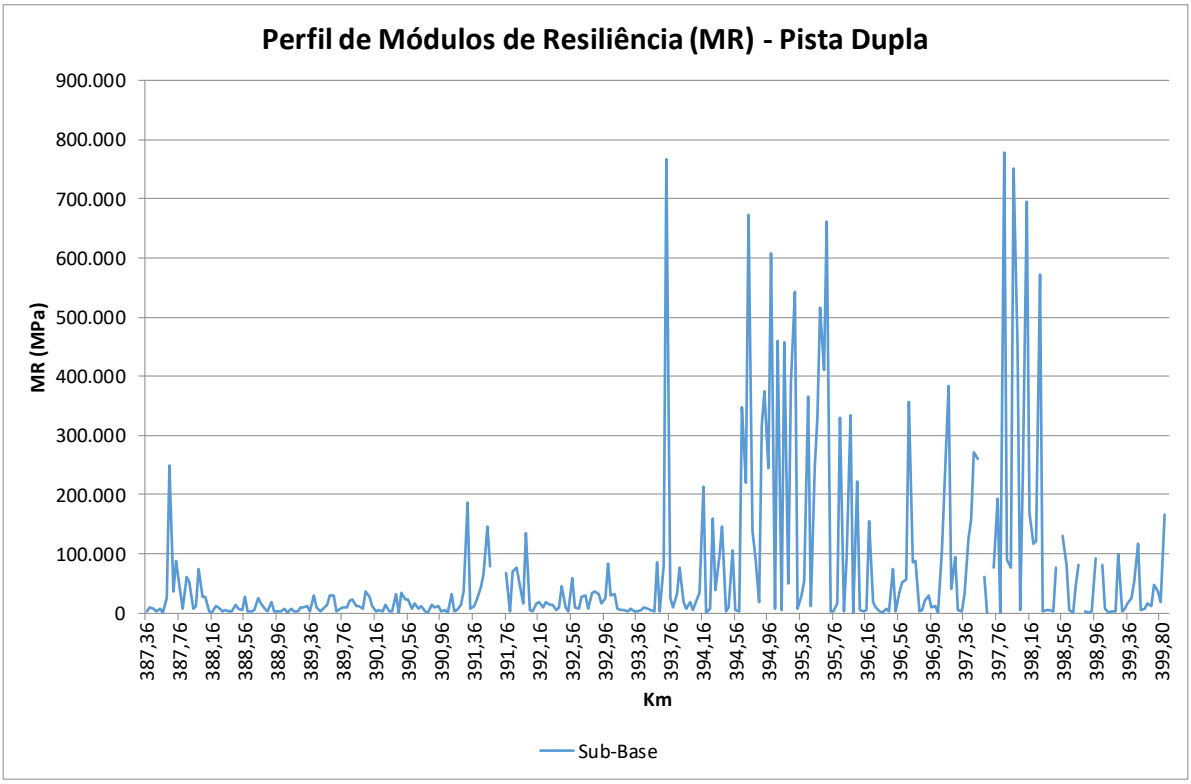




Fonte: Autoria Própria, 2026.

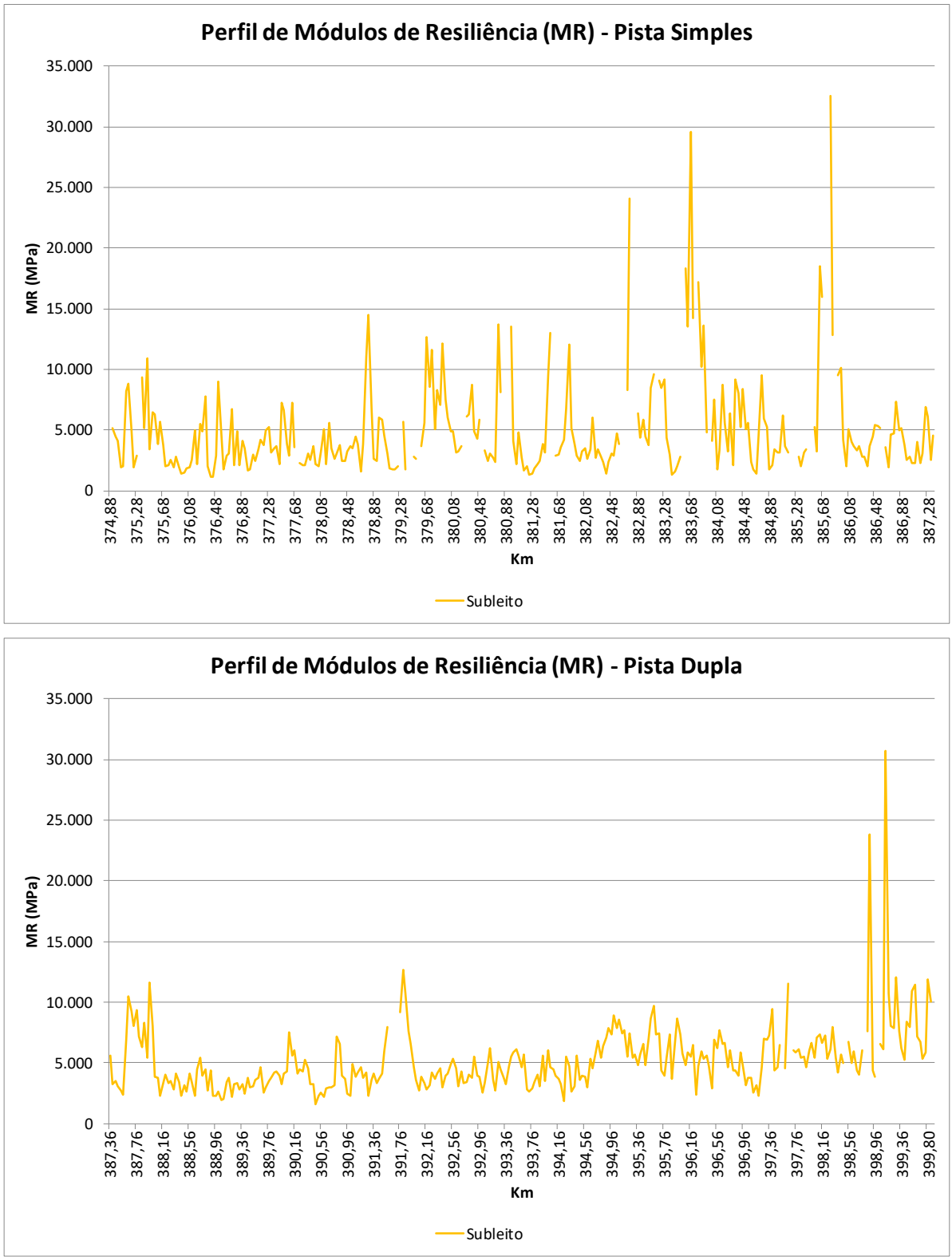
Gráfico 2 – Comparativo dos Módulos de Resiliência Retroanalisados da Sub-Base





Fonte: Autoria Própria, 2026.

Gráfico 3 – Comparativo dos Módulos de Resiliência Retroanalisados do Subleito

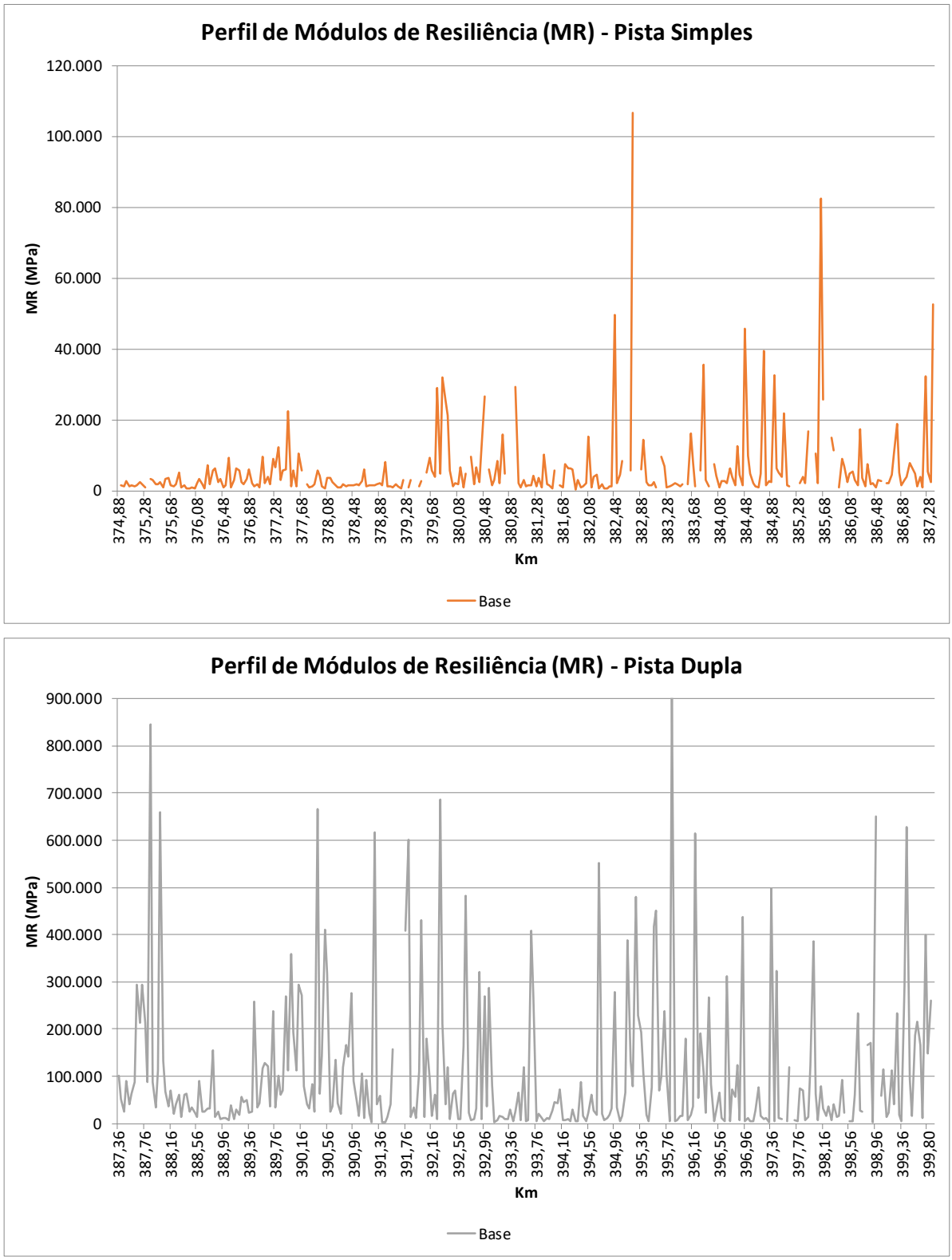


Fonte: Autoria Própria, 2026.

A leitura estratificada revela que a introdução da concepção semirrígida alterou a resposta mecânica de todo o pacote estrutural. Com exceção do subleito — que manteve a mesma ordem de grandeza em ambos os trechos —, observa-se que tanto o revestimento asfáltico quanto a sub-base do trecho em Pista Dupla atingiram módulos de resiliência significativamente superiores (cerca de três vezes maiores) quando comparados aos do trecho em Pista Simples. Esse ganho global de rigidez é reflexo do suporte mecânico provido pela camada cimentada, que atua restringindo as deformações elásticas dos estratos adjacentes. Fisicamente, a elevada inércia da BGTC minimiza a compressibilidade do sistema, resultando em uma diminuição da contribuição individual do revestimento asfáltico e da sub-base para a deflexão total do pavimento.

Contudo, embora o revestimento e a sub-base apresentem ganhos de rigidez, a principal divergência mecânica para a compreensão do comportamento deflectométrico da rodovia reside na camada de base, apresentado no Gráfico 4.

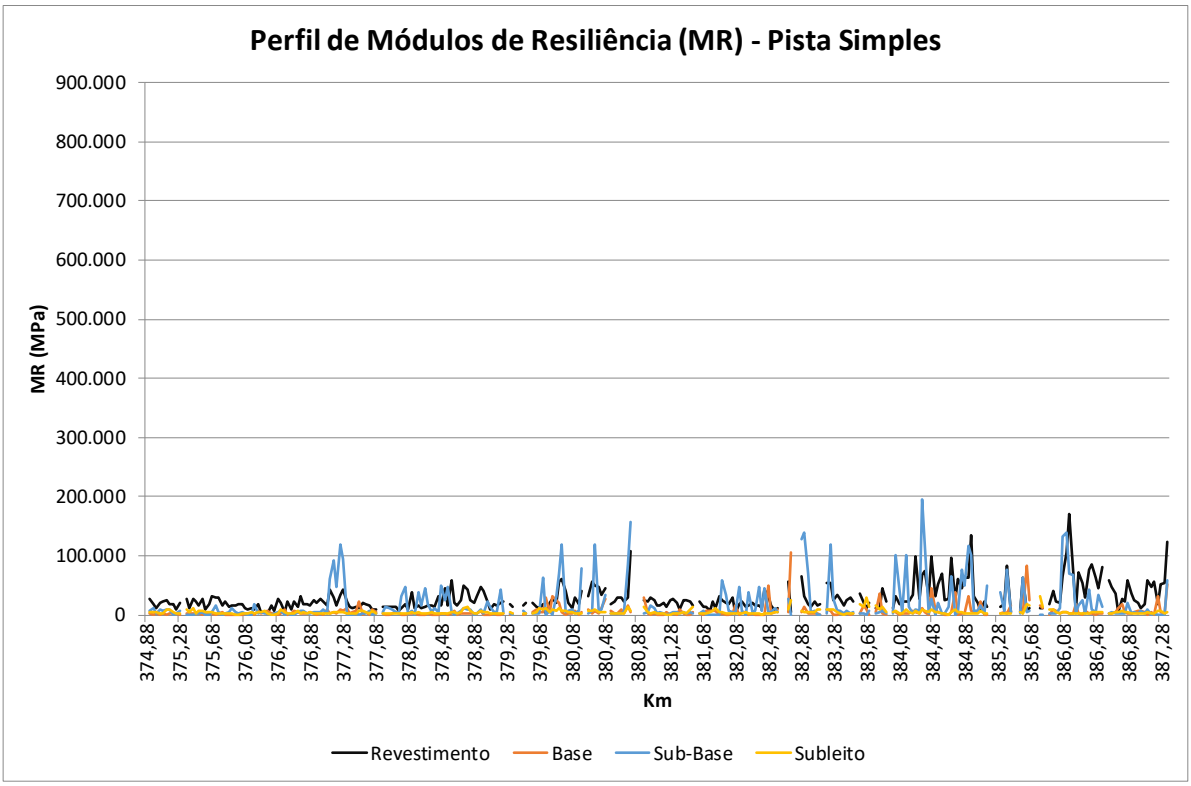
Gráfico 4 – Comparativo dos Módulos de Resiliência Retroanalisados da Base Granular e BGTC

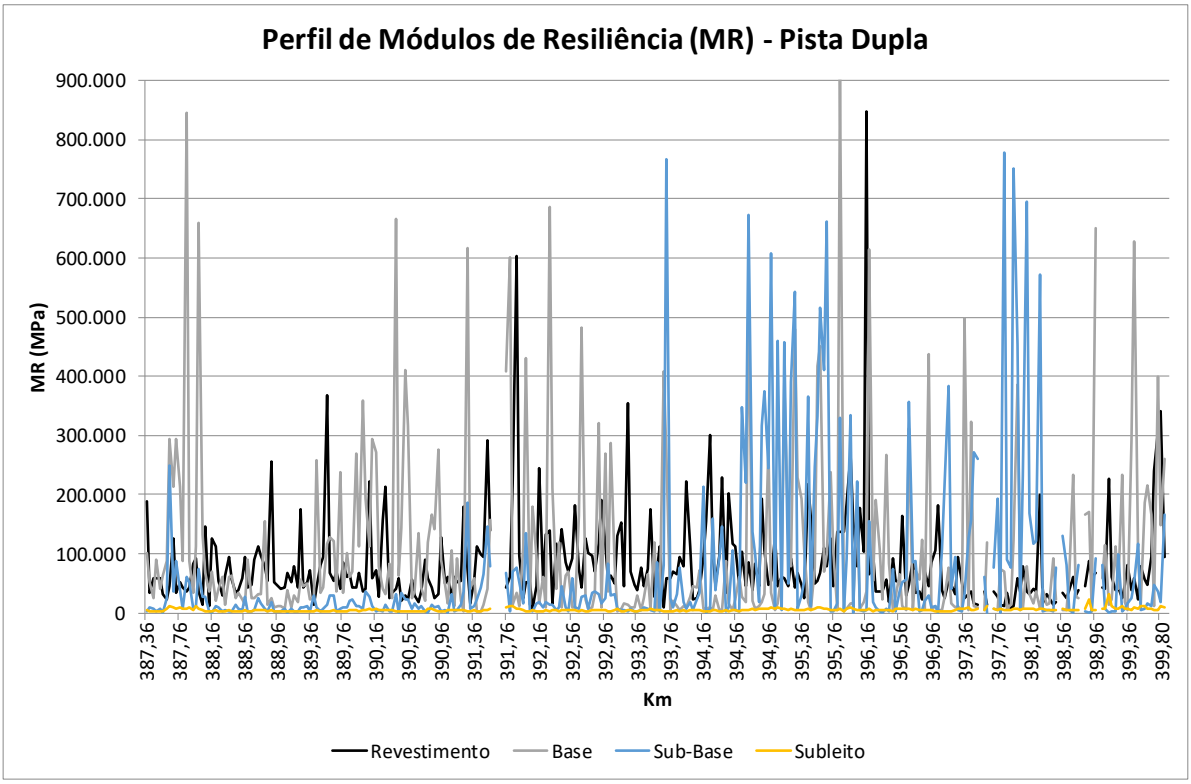


Fonte: Autoria Própria, 2026.

A consolidação visual desse comportamento mecânico é evidenciada ao plotarem-se todos os estratos estruturais de ambos os trechos sob uma mesma escala gráfica, conforme o Gráfico 5.

Gráfico 5 – Síntese dos Módulos de Resiliência de todas as camadas do pavimento em escala unificada





Fonte: Autoria Própria, 2026.

A representação em escala unificada evidencia o expressivo contraste de rigidez no trecho em Pista Dupla, onde a magnitude do módulo da camada de BGTC assume o papel determinante na resposta estrutural. Nota-se que, diante da escala de rigidez imposta pelo cimento, as contribuições dos demais estratos (revestimento, base granular remanescente e sub-base) apresentam magnitudes reduzidas e paritárias entre si, ocorrendo inclusive oscilações pontuais onde a rigidez da sub-base se sobrepõe à da base. Para a correta interpretação dessa dinâmica e da predominância da camada cimentada, faz-se necessário um contraponto teórico.

À luz da teoria do sistema elástico de múltiplas camadas (Teoria de Burmister), os valores retroanalisados pelo *software* não são propriedades intrínsecas e absolutas dos materiais, mas sim Módulos Elásticos Equivalentes. Eles representam a rigidez do material *in situ*, sob o estado de tensões específico e dinâmico imposto pelo arranjo estrutural no momento do ensaio. Portanto, caso esses mesmos materiais fossem extraídos e ensaiados isoladamente em laboratório (ensaios triaxiais dinâmicos), dificilmente alcançariam os exatos valores obtidos no campo.

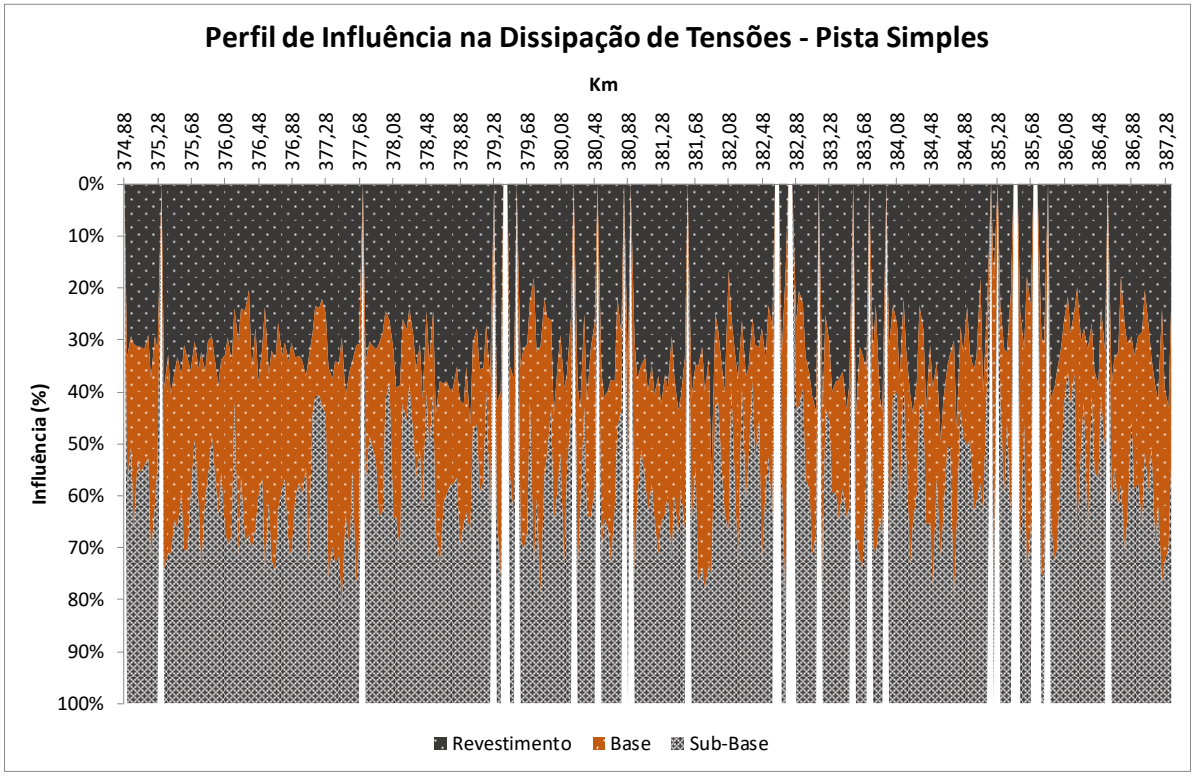
Um exemplo prático dessa dinâmica tensão-dependente ocorre no próprio subleito: no trecho semirrígido, devido à elevada capacidade da BGTC de absorver e distribuir as cargas (efeito laje), a parcela de tensão que atinge a fundação é consideravelmente atenuada. Em materiais granulares e solos finos que apresentam comportamento tensão-dependente, a redução da tensão desviadora propiciada pela rigidez da base cimentada resulta em um incremento do módulo de resiliência equivalente retroanalisado (HUANG, 2004; MEDINA; MOTTA, 2015). Esse fenômeno, fundamentado na mecânica dos pavimentos como *stress-softening* para solos finos e *stress-hardening* para materiais granulares, justifica os valores de módulo levemente superiores identificados no subleito e na sub-base do trecho em Pista Dupla, onde a base de BGTC atua dissipando as tensões antes que estas atinjam as camadas inferiores.

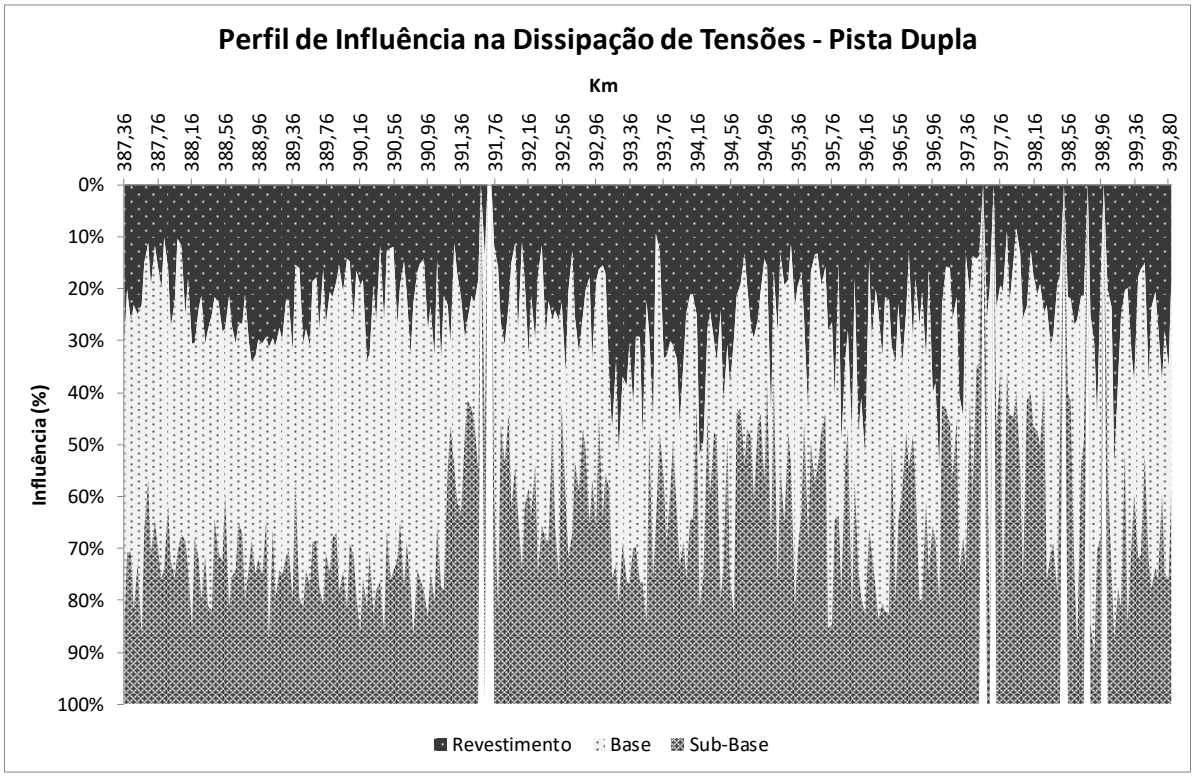
De forma análoga, o incremento observado no módulo do revestimento asfáltico decorre da sua reduzida participação na dissipação de tensões globais. Como a base cimentada apresenta uma rigidez significativamente superior, ela assume o papel estrutural preponderante, limitando as deformações elásticas nas camadas adjacentes. Esse cenário faz com que o revestimento atue sob baixos níveis de solicitação mecânica, o que se traduz, na modelagem de retroanálise, em patamares de rigidez mais elevados em comparação ao sistema flexível convencional.

Por serem valores equivalentes e fortemente influenciados pelo estado de tensões, a avaliação puramente numérica dos módulos pode soar abstrata. Assim, aplicando-se o Método de Odemark descrito na metodologia, converteu-se a rigidez e a espessura de cada estrato em contribuição estrutural percentual (influência) de cada camada na inércia do pacote estrutural,

tornando-se o parâmetro mais fidedigno para avaliar a distribuição de esforços na rodovia, conforme ilustrado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Influência Estrutural Percentual de cada camada na absorção da deflexão total do pavimento





Fonte: Autoria Própria, 2026.

A análise quantitativa da influência evidencia uma mudança radical na distribuição de esforços imposta pelo tipo de base. No trecho em Pista Simples (Base Granular), observa-se um sistema de dissipação de energia mais distribuído e cooperativo: o revestimento asfáltico contribui com cerca de 30% da absorção, a base granular com aproximadamente 25%, e o restante das tensões é dissipado pelas camadas de sub-base e subleito.

Em contrapartida, no trecho em Pista Dupla (BGTC), o revestimento asfáltico reduz sua contribuição para a faixa dos 20%, enquanto a camada cimentada assume a principal contribuição inercial do sistema estrutural, sendo responsável pela maior parcela da rigidez global do pavimento, saltando para cerca de 50% de influência estrutural, blindando o repasse de tensões verticais para a sub-base (que absorve os ≈30% restantes).

Essa predominância estrutural da BGTC é perfeitamente explicado à luz da Teoria das Espessuras Equivalentes de Odemark. Segundo o postulado, a rigidez de um sistema de múltiplas camadas pode ser convertida em uma única camada equivalente com base na relação entre os módulos de resiliência (E). Como o módulo de resiliência retroanalisado da BGTC é substancialmente superior ao das camadas adjacentes, sua espessura equivalente teórica atinge magnitude elevada. A base cimentada torna-se, portanto, o elemento de maior inércia do pavimento, atraindo para si a quase totalidade das tensões mecânicas geradas pelo tráfego.

Essa capacidade de atuar como o "escudo" do pavimento valida o seu excelente desempenho deflectométrico de superfície (D_0). Contudo, simultaneamente, reforça o principal alerta desta pesquisa: ao concentrar tamanha rigidez e atrair os esforços, todo o trabalho de tração na flexão fica confinado na interface geométrica entre a laje e o revestimento asfáltico. Quando ocorrem as inevitáveis fissuras de retração na BGTC, esse acúmulo de energia dissipa-se de forma abrupta, justificando os curtos Raios de Curvatura encontrados no subtrecho e evidenciando a iminência de fraturas por reflexão.

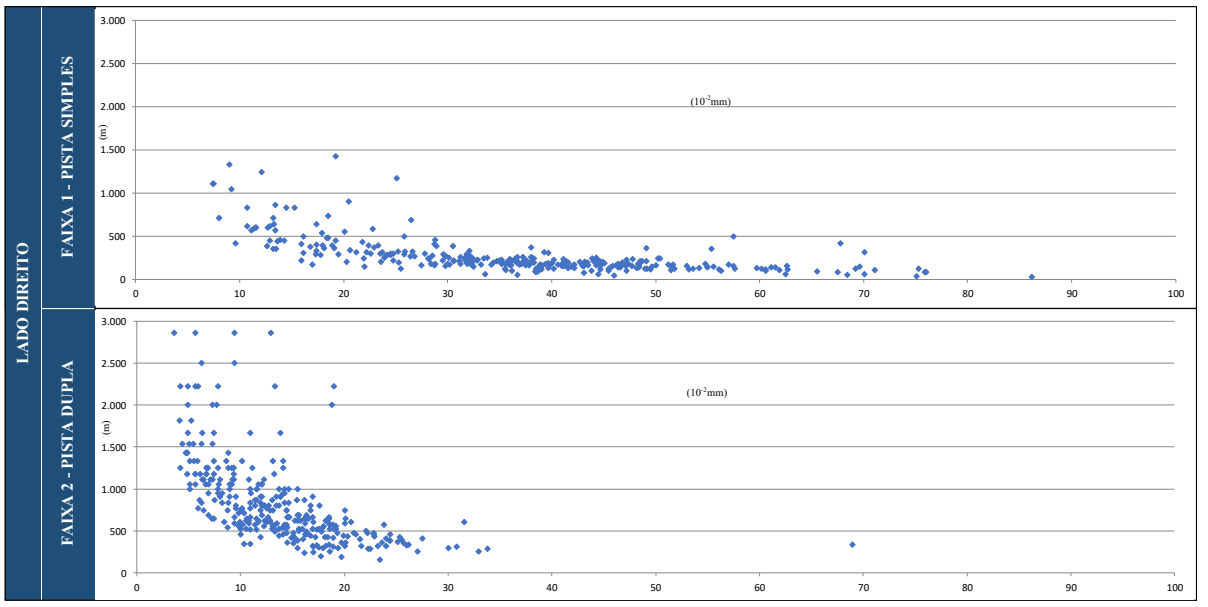
4.4. DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL INTEGRADO

A caracterização isolada dos parâmetros deflectométricos e a retroanálise mecanística evidenciaram a superioridade da BGTC no que tange à inércia estrutural e mitigação de deslocamentos verticais. Contudo, para um diagnóstico preciso da "saúde" do revestimento asfáltico e previsão da vida útil, é imperativo analisar a interação simultânea entre o afundamento global e a geometria da bacia de deformação.

4.4.1. Correlação Deflexão x Curvatura

Para ilustrar essa dinâmica, os dados de campo monitorados foram plotados em um gráfico de dispersão (*Scatter Plot*), confrontando os valores de Deflexão Máxima (D_0, no eixo das abscissas) com os valores do Raio de Curvatura (*R*, no eixo das ordenadas).

Gráfico 7 – Gráfico de Dispersão relacionando Deflexão Máxima e Raio de Curvatura



Fonte: Autoria Própria, 2026.

A análise cruzada revela um cenário estrutural complexo e dicotômico. No grupo correspondente à Pista Simples (Base Granular), observa-se uma correlação elástica clássica: maiores deflexões tendem a ser acompanhadas por raios adequados àquela magnitude de deformação. É o comportamento típico de um pavimento flexível, que dissipa a energia por meio da deformação harmônica de todo o pacote estrutural.

Em contrapartida, a nuvem de pontos da Pista Dupla (BGTC) concentra-se em uma zona de baixíssimas deflexões, porém apresenta grande variância no eixo das ordenadas, com leituras de Raio de Curvatura severamente reduzidos em estacas específicas. Essa configuração geométrica – deflexão global próxima a zero associada a uma bacia de raio de curvatura reduzido – é o indicativo físico direto de concentração de tensões, corroborando a análise levantada pela modelagem mecanística anterior.

4.4.2. Discussão sobre Mecanismos de Fadiga e Reflexão

Os resultados obtidos convergem de forma direta para a literatura técnica revisada. A adoção da concepção semirrígida atendeu com elevada eficiência aos requisitos de suporte estrutural global da via, mitigando as deflexões excessivas observadas no modelo granular.

Conforme atestado pela Teoria de Odemark na seção anterior, a camada cimentada atua na restrição da transferência de tensões, mitigando o acúmulo de deformações permanentes (afundamento de trilha de roda) no subleito. No entanto, essa elevação de rigidez modificou o mecanismo primário de degradação do pavimento.

Em estruturas flexíveis convencionais (Base Granular), o mecanismo primário de falha está associado ao esgotamento plástico das camadas granulares e do solo, manifestando-se macroscopicamente através de afundamentos nas trilhas de roda.
Já na estrutura semirrígida estudada, a elevada rigidez da BGTC praticamente anula a deformação permanente nas camadas inferiores, deslocando a falha estrutural para um mecanismo de ruptura por tração na flexão. Dessa forma, a degradação deixa de ser um processo de deformação acumulada e passa a ser regida pela fadiga da camada cimentada e a consequente reflexão de trincas para o revestimento asfáltico.

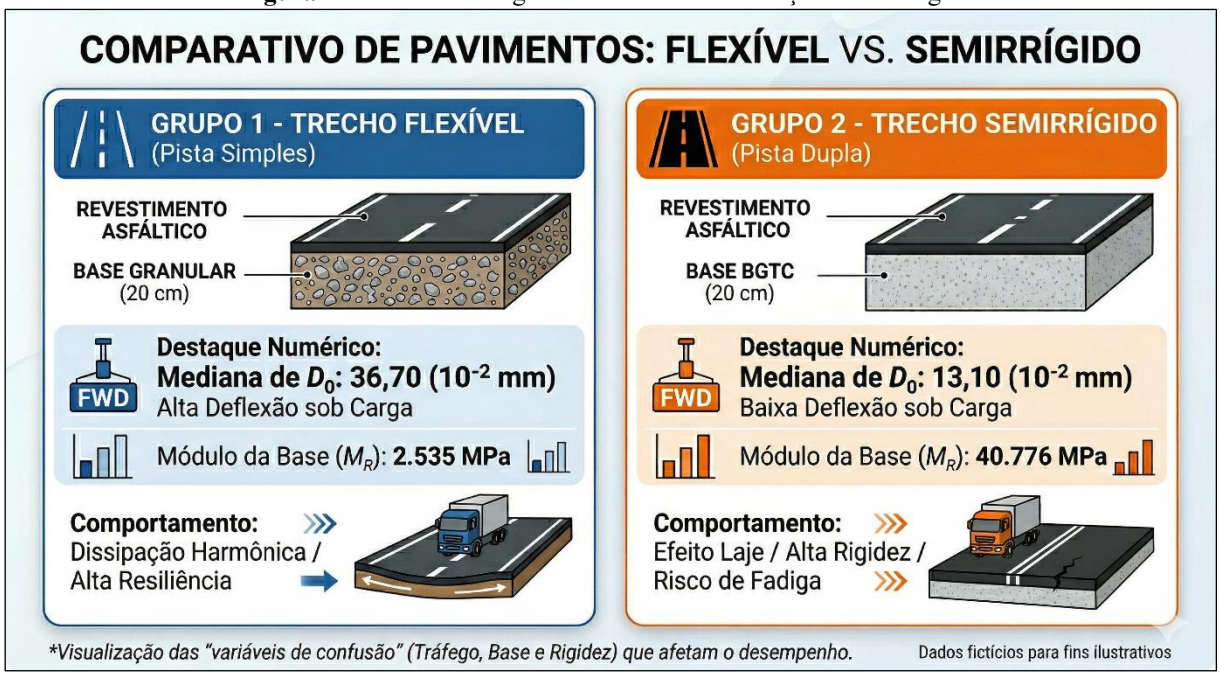
O estudo de Silva Filho *et al.* (2018), ao analisar especificamente o comportamento do pavimento composto por BGTC na duplicação da BR-116, elucida que a retração hidráulica (inerente à perda de umidade durante o processo de cura do cimento) e as tensões de origem térmica geram microfissuras e descontinuidades transversais na camada cimentada. O revestimento asfáltico, ancorado sobre essa base de elevada inércia, encontra-se superconfinado. Quando a carga móvel atua sobre ou nas imediações dessas fissuras pré-existentes na laje, ocorrem picos de tensão de tração na fibra inferior do concreto asfáltico. Esse fenômeno físico de concentração de tensões é evidenciado pelas reduções acentuadas no Raio de Curvatura (R) registradas no perfil longitudinal e na análise de dispersão.

Corroborando essa dinâmica, Andrade (2017) observa que estruturas com bases cimentadas e trincadas aceleram significativamente o processo de fadiga no revestimento caso não haja um dimensionamento adequado para suportar tais esforços de tração. Diferentemente do pavimento flexível convencional (Base Granular), cuja falha se dá de forma gradual por esgotamento plástico, o pavimento semirrígido está sujeito à falha por propagação de trincas de baixo para cima (trincamento por reflexão). O trabalho de Balbo e Cargnin (2023) reforça que o "efeito laje", embora promova eficiente distribuição das tensões verticais de compressão, transfere o esforço crítico de cisalhamento e flexão para a interface entre a base e o revestimento.

Portanto, o diagnóstico estrutural integrado conclui que a baixa deflexão (D0) atestada na superfície do subtrecho em BGTC não descarta a ocorrência de falhas estruturais.

Tal comportamento físico indica, na verdade, um potencial de fadiga prematura do revestimento betuminoso exigindo da camada asfáltica uma resistência à tração na flexão consideravelmente superior àquela demandada em concepções flexíveis tradicionais, sob pena de redução drástica da vida útil do trecho duplicado devido à severidade da reflexão de trincas.

Figura 12 – Perfil Estratigráfico constatado nos Poços de Sondagem



Fonte: Imagem Gerada por IA, 2026.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa propôs-se a investigar a resposta estrutural de pavimentos rodoviários submetidos a diferentes concepções de base, utilizando como objeto de estudo um trecho restaurado da rodovia BR-116/BA. Por meio do processamento e interpretação de dados deflectométricos (FWD) e da retroanálise mecanística, foi possível aprofundar a avaliação empírica e detalhar os princípios físicos que regem o comportamento mecânico das estruturas flexíveis e semirrígidas.

5.1. SÍNTESE DO DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL

Em atendimento ao objetivo geral desta pesquisa, a análise comparativa evidenciou que a substituição do material granular convencional pela Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) altera estruturalmente a mecânica de dissipação de energia do pavimento. O aumento expressivo da rigidez na camada de base instaura o "efeito laje", conferindo à estrutura uma elevada inércia capaz de proteger as camadas de fundação contra deformações plásticas.

Contudo, o diagnóstico integrado aponta que a maior capacidade de suporte a cargas verticais resulta em uma transição do mecanismo primário de degradação estrutural. O sistema deixa de falhar por afundamento progressivo de trilha de roda e passa a estar criticamente suscetível à fratura frágil, concentrando os esforços de tração na interface com o revestimento asfáltico. Os resultados indicam uma propensão teórica à fadiga precoce por reflexão de trincas, fenômeno que, embora fundamentado na resposta mecânica instantânea, exige monitoramento de campo contínuo para a plena confirmação de sua taxa de propagação e severidade.

5.2. ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Fundamentado em um modelo de retroanálise de alta confiabilidade — que apresentou índices de descarte de bacias inferiores a 9% — o desdobramento da pesquisa permitiu alcançar plenamente os objetivos específicos delineados, conforme as seguintes constatações numéricas e analíticas:

- Quantificação da deflexão máxima (D0): A adição de cimento mostrou-se eficiente contenção dos deslocamentos verticais. Enquanto o trecho em Base Granular apresentou uma mediana de deflexão de 36,70 x 10-2mm, a adoção da BGTC reduziu esse patamar para 13,10 x 10-2mm, configurando uma mitigação global de deformação da ordem de 64%, mesmo o trecho estando apoiado sobre um subleito de suporte inferior;
- Avaliação do Raio de Curvatura (R): A geometria da bacia de deformação no parâmetro determinante para distinguir as mecânicas de distribuição de tensões. O trecho flexível apresentou deformação harmônica; já a BGTC, embora com bacias globalmente mais abertas, exibiu um elevado desvio padrão (618,15m). Essa alta variância evidenciou a existência de descontinuidades na laje (fissuras), gerando bacias de pequeno raio de curvatura e deformações localizadas sob a aplicação da carga;
- Determinação do contraste de rigidez (Retroanálise): O processamento no software BackMeDiNa quantificou a discrepância mecânica entre as soluções. A base granular apresentou uma mediana de módulo de resiliência de 2.535 MPa, enquanto a BGTC obteve o valor de 40.776 MPa (cerca de 16 vezes maior). Aplicando-se o conceito de espessuras equivalentes, constatou-se que a base cimentada assume a principal contribuição estrutural, passando de 25% (na concepção granular) para aproximadamente 50% de influência na inércia total do pacote estrutural;
- Correlação e diagnóstico de fadiga: A correlação gráfica final entre a Deflexão e o Raio de Curvatura consolidou a tese de risco. A concentração de leituras com D0 próximo a zero simultâneas a raios de curvatura acentuadamente reduzidos evidenciou o grau de

confinamento do revestimento. Nessas condições, as tensões de cisalhamento e tração na flexão são maximizadas, indicando uma vulnerabilidade estrutural à reflexão de trincas. Essa constatação, baseada na análise de bacias com pequenos raios de curvatura, caracteriza um cenário de risco potencial que deve ser objeto de avaliações futuras para confrontar as previsões mecanicistas com o desempenho real da rodovia.

5.3. RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA PROJETOS RODOVIÁRIOS

Sob a ótica da engenharia prática, os resultados deste estudo servem como um alerta para projetos de pavimentação e restauração. A adoção de bases de elevada rigidez como a BGTC é tecnicamente recomendada para eixos de tráfego pesado e proteção de subleitos deficientes. No entanto, sua especificação não deve ser feita de forma isolada.

Recomenda-se aos projetistas que a utilização de bases cimentadas seja obrigatoriamente acompanhada de estratégias de mitigação de tensões para a camada de rolamento. Tais estratégias incluem a adoção de misturas asfálticas com ligantes modificados por polímero (de maior flexibilidade), o aumento da espessura do revestimento betuminoso ou a interposição de camadas anti-reflexão de trincas (SAMI - *Stress Absorbing Membrane Interlayer*) entre a BGTC e a camada asfáltica.

Adicionalmente às soluções aplicadas na interface das camadas, intervenções diretas na própria base cimentada têm se provado eficazes no controle do trincamento. Nguyen *et al.* (2026) destacam a técnica de pré-microfissuração (*pre-microcracking*) da base de brita tratada com cimento durante a fase construtiva. Essa abordagem consiste na indução controlada de microfissuras na camada de base, geralmente utilizando rolos compactadores vibratórios nos primeiros dias após a execução e antes da aplicação do revestimento asfáltico. Ao promover uma malha de microfissuras, o método alivia as tensões residuais de retração por secagem, inibindo a formação de fissuras transversais de grande abertura que atuam como severos concentradores de tensão.

Os autores constatam que, embora a técnica reduza pontualmente a rigidez elástica instantânea da base, a integridade estrutural e a capacidade de suporte global do sistema são preservadas, anulando o risco sem comprometer o efeito laje. Complementarmente, a literatura reforça o uso de geossintéticos revestidos (*bituminous-coated glass fiber*) com alta resistência à tração para compor o sistema de mitigação, absorvendo os esforços críticos de cisalhamento e flexão oriundos da camada subjacente.

5.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como o conhecimento no campo da mecânica dos pavimentos encontra-se em constante evolução, as delimitações deste estudo abrem margem para futuras investigações. Nesse sentido, sugere-se o monitoramento visual contínuo do trecho duplicado da BR-116/BA avaliado. A realização de um Levantamento Visual Contínuo (LVC) ao longo dos próximos anos permitirá atestar, na prática, a taxa de propagação e a severidade da reflexão das trincas na superfície do revestimento asfáltico.

Complementarmente, recomenda-se a utilização dos módulos retroanalisados nesta pesquisa como dados de entrada primários para o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Essa abordagem possibilitará simular computacionalmente a vida útil de fadiga — expressa em número de eixos padrão equivalente (N) — da camada asfáltica apoiada sobre ambas as concepções de base, confrontando a previsão teórica do *software* com o desempenho real da rodovia.

Por fim, afigura-se de grande valor científico e prático a condução de estudos laboratoriais com corpos de prova extraídos da própria estrutura. O ensaio desses materiais em equipamento triaxial de cargas dinâmicas permitiria confrontar os módulos de resiliência intrínsecos medidos em laboratório com os módulos elásticos equivalentes obtidos em campo por meio da retroanálise, refinando ainda mais a compreensão sobre o estado de tensões atuante em pavimentos semirrígidos.

Adicionalmente, recomenda-se a realização de estudos específicos sobre o impacto do gradiente térmico vertical no comportamento de pavimentos semirrígidos na região da BR-116/BA. Sugere-se a instrumentação do trecho com sensores de temperatura em diferentes profundidades da camada de BGTC para quantificar as tensões de empenamento provocadas pela variação térmica diária. Tal investigação permitiria correlacionar a abertura de frestas e a oscilação do Raio de Curvatura (R) com os ciclos de expansão e contração térmica, refinando os modelos de previsão de vida útil e auxiliando na escolha de materiais de interface que minimizem a reflexão de trincas induzidas pelo clima local.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado**. 2017. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ARANHA, A. L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BALBO, J. T.; CARGNIN, A. Britas graduadas tratadas com cimento de alto desempenho (BGTCAD): ensaio sobre (e entre) o "velho" e o "novo com diálogo triádico reformulado. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 3, p. 1-40, 2023.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual do MeDiNa**: método de dimensionamento nacional de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro: IPR, 2023. (Publicação IPR).

BURMISTER, D. M. The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. **Proceedings of the Highway Research Board**, v. 23, p. 126-144, 1943.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Anuário CNT do transporte 2024**. Brasília: CNT, 2024. Disponível em: https://www.cnt.org.br. Acesso em: dez. 2025.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER/SP). **IP-DE-P00/001**: Projeto de pavimentação - Instrução de projeto. São Paulo: DER/SP, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 011/79**: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: procedimento. Rio de Janeiro: DNER, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 273/96**: Pavimento flexível - Avaliação estrutural com o deflectômetro de impacto (FWD): procedimento. Rio de Janeiro: DNER, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2022 – ES**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço. Brasília: DNIT, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 142/2022 – ES**: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento: especificação de serviço. Brasília: DNIT, 2022.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Pavement Backcalculation**: Guidelines for Professional Practice. Washington, DC: FHWA-HIF-17-024, 2017.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.

LIMA, J. L. B.; PINHEIRO, E. C. N. M.; OLIVEIRA, R. P. de. Resíduos de construção civil reaproveitados em obras de pavimentação de vias. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 10, p. 69220-69242, out. 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n10-280.

MARQUES, J. R. F. **Dimensionamento de reforço mediante retroanálise de avaliações estruturais não-destrutivas**. 2002. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

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

NGUYEN, P.; PHAM, P. N.; CUONG, N.; TRAN, T. T. Pre-microcracking of cement-treated bases to reduce reflective cracks on asphalt pavement: A comprehensive review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 24, e06135, 2026. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e06135.

NGUYEN, P. T. et al. Micromechanical analysis of cement-treated base materials. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 210, p. 300-310, 2019.

ODEMARK, N. **Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements According to the Theory of Elasticity**. Stockholm: Statens Väginstitut, 1949. (Meddelande 77).

PERES, L. L.; MONGE, A. G.; BARBOZA, C. S.; OMIDO, A. R. Análise do potencial de aplicação de material fresado estabilizado com cimento Portland na restauração de pavimentos. **Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales**, Dourados, v. 16, n. 8, 2023.

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, p. 1-25, 2017.

SILVA FILHO, A. M. da; FERREIRA, E. A.; MATOS FILHO, G. C.; PEREIRA, D. Análise comportamental do pavimento composto de base com brita graduada tratada com cimento na duplicação da BR 116 do Km 446+625 ao Km 473+400. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 3, v. 1, ed. 1, p. 20-37, jan. 2018. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/pavimento-composto. Acesso em: 20 dez. 2025.

TABOSA, J. H. R. C.; SILVA, T. M. T. Tratamento de solo com adição de cimento portland: análise de propriedades para aplicação em pavimentação de baixo custo. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 12, p. 28879-28895, dez. 2019.

TAHA, R. et al. Evaluation of Cement-Treated Base Mixtures for Road Construction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 248-254, 2002.

WANG, L. et al. Insight into mechanical properties and damaging evolution of base materials incorporating 80% phosphogypsum for pavement application. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 401, p. 132791, 2023.