



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

MARIA BEATRIZ BARBOSA FERREIRA

**RETROANÁLISE DE VIAS AFETADAS PELO EFEITO DA
SUBSIDÊNCIA DO SOLO**

RECIFE, 2023

MARIA BEATRIZ BARBOSA FERREIRA

RETROANÁLISE DE VIAS AFETADAS PELO EFEITO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Área de concentração: Infraestrutura de transportes.

Orientador: Prof. Dr. Reuber Arrais Freire

RECIFE, 2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Ferreira, Maria Beatriz Barbosa.

Retroanálise de vias afetadas pelo efeito da subsidência do solo / Maria Beatriz Barbosa Ferreira. - Recife, 2023.

77 p. : il., tab.

Orientador(a): Reuber Arrais Freire

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Análise estrutural. 2. Retroanálise. 3. Subsidência. 4. Parâmetros de bacia. 5. Módulo de resiliência. I. Freire, Reuber Arrais. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MARIA BEATRIZ BARBOSA FERREIRA

RETROANÁLISE DE VIAS AFETADAS PELO EFEITO DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Área de concentração: Infraestrutura de transportes.

Aprovado em: 06/ 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Reuber Arrais Freire (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Lucas Feitosa de A. Lima Babadopulos (Examinador Externo)
Universidade Federal do Ceará - UFC

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão ao meu estimado orientador Prof. Reuber Freire por todo o suporte, parceria e compreensão que ofereceu ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação e sabedoria foram cruciais para o sucesso deste projeto, para o meu crescimento profissional, acadêmico e por acender a chama da ciência em mim.

Desejo manifestar minha gratidão a Stone Consultoria em Pavimentos por disponibilizar os dados essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, ao mesmo tempo que celebro a parceria valiosa que mantivemos ao longo dos anos da minha formação. Esta colaboração enriqueceu minha experiência acadêmica e me proporcionou uma visão valiosa do mundo profissional.

Também desejo estender meus sinceros agradecimentos aos meus queridos amigos e ao meu companheiro Edgar, que não apenas contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho, mas também estiveram ao meu lado nos momentos difíceis. Sua amizade e apoio foram fundamentais para superar desafios e manter o ânimo durante todo o processo.

À minha amada família, especialmente aos meus pais Paulo e Joana, meu irmão Carlos e minha filha Sophia, não tenho palavras suficientes para expressar minha gratidão. Obrigado por estarem sempre ao meu lado, me fornecendo o suporte necessário para que este momento fosse possível. Vocês me ensinaram desde cedo que posso ocupar o lugar que quiser neste mundo, e é graças ao amor e confiança que depositaram em mim que estou encerrando este ciclo tão importante na minha vida.

Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental na minha jornada acadêmica e pessoal, e este trabalho não teria sido concluído com sucesso sem a contribuição de todos. Estou profundamente agradecida por ter pessoas tão incríveis em minha vida. Obrigado mais uma vez por tudo que fizeram e continuam fazendo por mim.

RESUMO

As condições estruturais dos pavimentos podem ser influenciadas por uma série de elementos, inclusive a subsidência ou a fundação plástica do subleito, que se manifesta por meio do afundamento da superfície do solo, impactando o suporte das camadas que compõem a estrutura do pavimento. O objetivo deste trabalho foi a análise estrutural de pavimentos flexíveis de via localizada no nordeste brasileiro, com foco na investigação da ligação entre fenômeno de subsidência e o surgimento dos defeitos nos pavimentos. Para tal, foram analisados boletins de sondagens geotécnicas para reconhecimento da estrutura bem como as medidas de deflexões recuperáveis obtidas com o FWD (*Falling Weight Deflectometer*). Os parâmetros de bacia deflectométrica *Structural Curvature Index* (SCI), *Base Damage Index* (BDI), o *Base Curvature Index* (BCI) e o Raio de Curvatura (Rc) foram utilizados para identificação inicial da condição estrutural dos segmentos homogêneos. Foi utilizado o *software* BackMedina para realizar retroanálises com base nos dados das bacias deflectométricas. Os resultados obtidos na análise dos parâmetros, bem como dos módulos de resiliência, revelam condições estruturais desfavoráveis. Apesar de os resultados obtidos sugerirem que a subsidência do solo desempenha um papel significativo na deterioração da estrutura, os resultados, por si só, não são conclusivos o bastante para afirmar que a subsidência é o fator predominante responsável pela deterioração do pavimento.

Palavras-Chave: Análise estrutural, Retroanálise, Subsidência, Parâmetros de bacia, Módulo de Resiliência.

ABSTRACT

The structural conditions of pavements can be influenced by various factors, including subsidence or plastic deformation of the subgrade, manifested through the sinking of the ground surface, impacting the support of the layers that compose the pavement structure. The objective of this study was the structural analysis of flexible pavements located in the northeastern region of Brazil, with a focus on investigating the connection between subsidence phenomena and the emergence of pavement defects. To this end, geotechnical reports were analyzed for structural recognition, along with recoverable deflection measurements obtained using the Falling Weight Deflectometer (FWD). Deflection bowl parameters, including Structural Curvature Index (SCI), Base Damage Index (BDI), Base Curvature Index (BCI), and Radius of Curvature (Rc), were employed for the initial identification of the structural condition of homogeneous segments. The BackMedina software was used to conduct retro-analyses based on the deflection bowl data. The results obtained from the analysis of parameters, as well as resilience modulus, reveal unfavorable structural conditions. While the results suggest that soil subsidence plays a significant role in the deterioration of the structure, they alone are not conclusive enough to assert that subsidence is the predominant factor responsible for pavement deterioration.

Keywords: Structural analysis, Retroanalysis, Subsidence, deflectometric, Resilience modulus.

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1 - Representação dos deflectômetros de impacto.....	10
Figura 2 - Representação gráfica esquemática da bacia deflectométrica e os respectivos índices de curvatura.....	11
Figura 3 - Fases de vida de um Pavimento	13
Figura 4 - Mapa do trecho estudado.....	15
Figura 5 - Via em pista dupla e pavimento flexível.....	15
Figura 6 - Localização dos poços de sondagem.....	16
Figura 7 - Divisão de segmentos homogêneos.....	17
Figura 8 – Equipamento de FWD	20
Figura 9 - Fluxo de decisão.....	23
Figura 10 - Tutorial simplificado - BackMedina	24
Figura 11 - Condições de contorno para retroanálise.....	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Áreas com deflexões máximas acima da deflexão admissível – Segmento Homogêneo 03	26
Gráfico 2 – Áreas com deflexões máximas acima da deflexão admissível – Segmento Homogêneo	27
Gráfico 3 – Percentuais de área com deflexões máximas acima da deflexão admissível – Segmento Homogêneo 07	27
Gráfico 4 – <i>Structural Curvature Index</i> – SCI – Segmento Homogêneo 03	28
Gráfico 5 - <i>Structural Curvature Index</i> – SCI – Segmento Homogêneo 04	28
Gráfico 6 - <i>Structural Curvature Index</i> – SCI – Segmento Homogêneo 07	28
Gráfico 7 – <i>Base Damage Index</i> – BDI – Segmento Homogêneo 03	29
Gráfico 8 - <i>Base Damage Index</i> – BDI – Segmento Homogêneo 04	29
Gráfico 9 - <i>Base Damage Index</i> – BDI – Segmento Homogêneo 07	30
Gráfico 10 – <i>Base Curvature Index</i> – BCI – Segmento Homogêneo 03	30
Gráfico 11 - <i>Base Curvature Index</i> – BCI – Segmento Homogêneo 04	30
Gráfico 12 - <i>Base Curvature Index</i> – BCI – Segmento Homogêneo 07	31
Gráfico 13 – Raio de Curvatura - R_c – Segmento Homogêneo 03	32
Gráfico 14 - Raio de Curvatura - R_c – Segmento Homogêneo 04	33
Gráfico 15 - Raio de Curvatura - R_c – Segmento Homogêneo 07	34
Gráfico 16 – Bacias deflectométricas – Segmento Homogêneo 07 – Sentido Crescente	36
Gráfico 17 – Bacias de deflexões – Segmento Homogêneo 07 – Sentido Decrescente	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conceitos de degradação associados ao VSA	9
Tabela 2 – Classificação de IRI - DNIT.....	9
Tabela 3 – Resumo segmentos homogêneos.....	17
Tabela 4 – Resumo estrutura do pavimento – Sondagens 1 a 5.....	17
Tabela 5 – Resumo estrutura do pavimento – Sondagens 6 a 10.....	18
Tabela 6 – Resumo segmentos homogêneos.....	19
Tabela 7 – Coeficientes de Poisson adotados	19
Tabela 8 – Cálculo de Número N.....	21
Tabela 9 – Percentuais de área com deflexões máximas acima da deflexão admissível	26
Tabela 10 – Resultados da retroanálise com BackMedina – Condições 1, 2 e 3.....	39
Tabela 11 – Resultados da retroanálise com BackMedina – Condições 4, 5 e 6.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS

- AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas
- BGS – Brita graduada simples
- BCI – *Base Curvature Index*
- BDI – *Base Damage Index*
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- FWD - *Falling Weight Deflectometer*
- ICPF – Índice de Condição do Pavimento Flexível
- IES – Índice de Estado de Superfície
- IGGE – Índice de Gravidade Global Expandido
- IRI – *International Roughness Index* (Índice de Irregularidade Internacional)
- LVC – Levantamento Visual Contínuo
- LWD – *Light Weight Deflectometer*
- MR – Módulo de Resiliência
- PSI – *Present Serviceability Rating*
- Rc – Raio de Curvatura
- SCI – *Surface Curvature Index*
- SH – Segmento Homogêneo
- VSA – Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1 Justificativa e motivação.....	4
1.2 Objetivo geral.....	5
1.3 Objetivos específicos.....	5
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
2.1 Pavimentação.....	6
2.2 Sistema de Gerência de Pavimentos.....	7
2.3 Avaliação funcional de pavimentos flexíveis.....	7
2.3.1 Valor de Serventia Atual (VSA).....	8
2.3.2 Irregularidade Longitudinal.....	9
2.4 Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.....	9
2.4.1 <i>Falling Weight Deflectometer</i> – FWD.....	10
2.4.2 Bacia de deflexão.....	11
2.5 Retroanálise.....	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1 Características do local de estudo.....	14
3.2 Segmentação do trecho estudado.....	15
3.3 Determinação dos módulos de resiliência iniciais.....	19
3.4 Levantamento das deflexões recuperáveis.....	20
3.5 Análise de Tráfego.....	20
3.6 Critérios de escolha do trecho crítico.....	21
3.6.1 Análise da deflexão admissível.....	21
3.6.2 <i>Structural Curvature Index</i> (SCI).....	22
3.6.3 <i>Base Damage Index</i> (BDI).....	22
3.6.4 <i>Base Curvature Index</i> (BCI).....	22
3.6.5 Raio de Curvatura (Rc).....	22
3.6.6 Fluxo de decisão para retroanálise.....	23
3.6.7 Avaliação visual das bacias de deflexão.....	23
3.6.8 Retroanálise da bacia de deflexão do trecho selecionado.....	23
4. RESULTADOS.....	25
4.1 Análise das deflexões máximas.....	25
4.2 <i>Structural Curvature Index</i> (SCI).....	27
4.3 <i>Base Damage Index</i> (BDI).....	29
4.4 <i>Base Curvature Index</i> (BCI).....	30
4.5 Raio de Curvatura (Rc).....	31

4.6 Bacias de deflexão obtidas	35
4.7 Retroanálise da bacia de deflexão	38
5. CONCLUSÕES.....	42
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
APÊNDICE A – MAPA DE SITUAÇÃO	46
APÊNDICE B – LOCAÇÃO DAS SONDAGENS POR DIVISÃO DE SEGMENTOS HOMOGÊNOS.....	53
APÊNDICE C – GRÁFICOS DE DEFLEXÕES MÁXIMAS DE MAIS SEGMENTO	55
APÊNDICE D – RETROANÁLISES BACKMEDINA.....	58

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação de vias e estradas assume um papel de extrema importância na estruturação de um país, sendo um dos alicerces para o progresso tanto econômico quanto social. A construção e a manutenção de um sistema viário eficaz acarretam efeitos diretos na mobilidade, nas atividades comerciais, na logística e no bem-estar da sociedade.

O crescimento econômico e o avanço social de uma região demandam investimentos substanciais em sua infraestrutura de transporte. Investimentos estes que trazem impactos que vão muito além de facilitar e/ou possibilitar a locomoção de cargas ou pessoas. Segundo Andrade *et al.* (2015), é de fácil percepção a perda de atratividade das regiões, a diminuição da eficiência dos negócios, a restrição da expansão dos mercados e a queda geral da economia à medida que a qualidade da mobilidade regional decai.

Amarante (2007) destaca a importância de analisar como a implementação e o funcionamento das infraestruturas de transporte afetam a atividade econômica dos municípios. Essa análise pode servir como base para a elaboração de programas ou planos de desenvolvimento em níveis nacional e regional.

A conservação dos pavimentos flexíveis é essencial para a manutenção da infraestrutura viária de uma região. Isso assegura o prolongamento da vida útil, reduzindo os custos de operação e manutenção, promovendo a segurança viária, oferecendo conforto ao dirigir, mantendo níveis adequados de serviço e garantindo a eficiência do transporte.

Os sistemas de gerência de pavimentos são dispositivos utilizados para planejamento e priorização das intervenções as quais a estrutura deve receber, para que se mantenham os níveis de serventia adequados. Para isso, utiliza-se de bancos de dados que devem subsidiar a análise de condições do pavimento, bem como sua análise estrutural. Tais bancos de dados devem ser retroalimentados de modo a possibilitar a visualização da evolução da degradação dos pavimentos e, com isto, o planejamento e execução de intervenções nos momentos mais adequados.

A análise estrutural de pavimentos flexíveis permite avaliar a capacidade de suporte dos pavimentos, podendo esta ser classificada como destrutiva, como a abertura de poços de sondagens geotécnicas, ou não destrutiva, como os levantamentos de deflexões máximas recuperáveis com uso de, por exemplo, FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

As condições estruturais dos pavimentos podem ser afetadas por diversos fatores, como por exemplo a subsidência do subleito, onde há o rebaixo da superfície do solo de modo a afetar o suporte das camadas da estrutura do pavimento.

Este trabalho irá apresentar a análise estrutural de pavimentos flexíveis de rodovias onde está sendo observada a ocorrência do fenômeno da subsidência. Por meio da retroanálise das bacias de deflexões será investigada a relação da subsidência com a deterioração da estrutura do pavimento.

1.1 Justificativa e motivação

A infraestrutura viária representa um pilar essencial nas sociedades contemporâneas, desempenhando um papel de destaque no avanço econômico, social e ambiental. Entretanto, a integridade e a durabilidade desses pavimentos podem ser comprometidas diante de várias condições geotécnicas adversas, com destaque para a subsidência do solo.

A subsidência do solo, decorrente de fatores naturais como adensamento do terreno ou atividades antrópicas, emerge como um desafio significativo para a engenharia. A ocorrência deste fenômeno pode estar associada ao surgimento de uma gama de defeitos nos pavimentos, tais como fissuras, trincas e depressões, resultando em uma superfície irregular e desconfortável ao rolamento. Além do impacto na camada de rolamento, a subsidência pode também incidir na capacidade estrutural do pavimento, reduzindo a rigidez das camadas, dessa forma incrementando as deformações sofridas e, por conseguinte, reduzindo sua vida útil. A degradação de pavimentos devido à subsidência pode comprometer a segurança dos usuários das vias, levando a acidentes e prejuízos materiais.

A análise que será desenvolvida e apresentada neste trabalho pode contribuir para o desenvolvimento de metodologias de análise e projeto de pavimentos que levem em consideração a possibilidade de subsidência. Isso pode incluir a formulação de modelos de análise estrutural e métodos de dimensionamento que considerem os efeitos da subsidência, a identificação de soluções inovadoras para mitigar os efeitos deste fenômeno nos pavimentos, como materiais mais resistentes, técnicas de construção diferenciadas e estratégias de manutenção específicas.

1.2 Objetivo geral

O desenvolvimento deste trabalho tem por objetivo geral analisar o comportamento estrutural em pavimentos submetidos ao afundamento do subleito, mediante análise das características das bacias de deflexões e das respostas do pavimento oriundas da avaliação estrutural. Desta forma, visa compreender os efeitos desse fenômeno na integridade dos pavimentos e fornecer informações técnicas relevantes para subsidiar o projeto de reforço dessas estruturas.

1.3 Objetivos específicos

O propósito central deste estudo é conduzir uma análise abrangente das respostas dos pavimentos, particularmente na avaliação estrutural de pavimentos sujeitos a subsidência. Os objetivos específicos do estudo são apresentados a seguir.

- Investigar a estrutura do pavimento em estudo por meio de sondagens geotécnicas;
- Analisar os parâmetros das bacias deflectométricas, como o *Structural Curvature Index* (SCI), o *Base Damage Index* (BDI), e o *Base Curvature Index* (BCI) em pavimentos sob efeito de subsidência, buscando compreender o comportamento do pavimento submetido ao carregamento;
- Analisar o Raio de Curvatura (R_c) em pavimentos sob efeito de subsidência;
- Avaliar as retroanálises pelo software *BackMedina* a partir dos parâmetros das bacias deflectométricas obtidas com o FWD (*Falling Weight Deflectometer*);
- Investigar a correlação entre o surgimento dos defeitos e comprometimento da capacidade estrutural com o efeito da subsidência.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimentação

De acordo com Balbo (2007), o pavimento é uma construção heterogênea, formada por múltiplas camadas de materiais diversos compactados desde o subleito da via, projetada para suportar as exigências do tráfego de maneira eficiente. É concebido visando à durabilidade e eficácia, levando em conta a economia e prevendo distintos estágios de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, que são essenciais para a sua preservação.

Conforme Bernucci *et al.* (2022), um pavimento é uma construção composta por várias camadas de espessura definida, projetada com finalidade técnica e econômica para suportar as cargas geradas pelo tráfego de veículos e as condições climáticas. Seu objetivo é proporcionar aos usuários uma superfície de rolamento mais eficiente, oferecendo conforto, economia e segurança.

Diante do que já foi definido sobre pavimentos até então, podemos classificar a estrutura em três tipos: Pavimento Rígido, Pavimento Semi-rígido e Pavimento Flexível.

Pavimento rígido, segundo DNIT (2006), é caracterizado pela alta rigidez do revestimento em relação às camadas subjacentes, o que resulta na absorção quase total das tensões geradas pelo carregamento aplicado. Um exemplo clássico é um pavimento composto por lajes de concreto de cimento Portland.

Seguindo nas definições do DNIT (2006), pavimento semi-rígido caracteriza-se pela execução de uma base que utiliza um aglutinante com características cimentícias, como, por exemplo, uma camada de solo-cimento revestida por uma camada asfáltica.

Por fim, conforme DNIT (2006), no pavimento flexível, todas as camadas experimentam deformação elástica considerável sob a carga aplicada, resultando na distribuição em parcelas equivalentes da carga entre as camadas. Podemos citar como exemplo um pavimento composto por uma base de brita (BGS ou macadame) ou uma base de solo pedregulhoso, coberta por uma camada asfáltica.

Contudo, tais termos estão ficando cada vez menos comuns, pois podem-se fazer pavimentos asfálticos com grande distribuição de tensões, basta usar módulos de resiliência e espessuras mais elevados, o que impede a diferenciação em pavimentos rígidos e flexíveis. De

um modo geral, tornou-se comum atualmente diferenciar os pavimentos em pavimento de concreto de cimento Portland e pavimento em asfalto.

2.2 Sistema de Gerência de Pavimentos

Segundo DNIT (2011), um Sistema de Gerência de Pavimentos é composto por elementos interdependentes, incluindo planejamento, projeto, construção e manutenção de pavimentos, que funcionam de maneira integrada. Destacam-se como fatores externos a alocação de recursos financeiros, a disponibilidade dos dados requeridos pelo sistema e as orientações políticas e administrativas que direcionam as atividades.

Por definição de Bertollo (1997): “Um sistema de gerência de pavimentos apresenta como componentes principais o planejamento, projeto, construção, manutenção avaliação e pesquisa e tem como fatores externos as dotações orçamentárias e as políticas administrativas”

Ainda conforme Bertollo (1997), o inventário é o procedimento de coleta, ordenação e armazenamento dos dados fundamentais necessários para a implementação de um sistema de gestão de pavimentos. O nível de detalhamento do inventário pode variar de acordo com as necessidades de cada entidade. No entanto, todo e qualquer sistema de gestão de pavimentos demanda, no mínimo, um inventário básico da extensão e características da malha viária, visto que planejar de maneira eficaz ações de manutenção e reabilitação torna-se impossível sem esse conhecimento.

2.3 Avaliação funcional de pavimentos flexíveis

No âmbito do Sistema de Gerenciamento de Pavimentos (SGP), a obtenção de informações acerca da condição do pavimento desempenha um papel fundamental na formulação das decisões relacionadas à manutenção e reabilitação. Estas informações provêm de avaliações funcionais e estruturais, que serão detalhadamente abordadas nas seções subsequentes.

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), avaliação funcional de um pavimento está diretamente ligada à análise do estado de sua superfície e ao impacto desse estado na qualidade do rolamento e conforto dos usuários. Filho (2011) complementa dizendo que a realização de avaliações regulares das condições das rodovias pode desempenhar um papel fundamental na identificação de segmentos de estrada com níveis variados de deterioração, permitindo uma avaliação precisa da gravidade dos defeitos presentes.

Conforme DNIT (2011), dois parâmetros da avaliação bastante consistentes são amplamente utilizados para a realização da avaliação funcional, a saber: o Valor da Serventia

Atual (VSA), que se fundamenta em avaliações subjetivas fornecidas por técnicos especializados, e o Índice de Irregularidade Internacional (IRI), que é calculado através de medições de irregularidades longitudinais obtidas por aparelhos especialmente concebidos para esse propósito.

2.3.1 Valor de Serventia Atual (VSA)

Conforme Bernucci *et al.* (2022), a serventia é a capacidade de um pavimento, em um trecho específico, atender às necessidades do usuário em relação ao conforto de dirigir em um determinado momento.

De acordo com DNIT(2006), a capacidade de um pavimento em fornecer um nível específico de desempenho funcional é denominada de serventia do pavimento, podendo ser aferida por meio de avaliações subjetivas e/ou avaliações objetivas.

- Avaliações subjetivas – avaliação realizada através da participação de um conjunto de indivíduos identificados com a rodovia, que são previamente instruídos e preparados. O procedimento para realização deste tipo de avaliação está descrito na norma DNIT 009/2003 – PRO;
- Avaliações objetivas – determinada por meio de análises analíticas, utilizando dados de diversos parâmetros que representam as condições da superfície do pavimento, tais como *Present Serviceability Rating* (PSI), Valor de Serventia Atual (VSA), Levantamento Visual Contínuo (LVC), Índice de Gravidade Global Expandido (IGGE), Índice de Estado de Superfície (IES), Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF) e *International Roughness Index* (IRI).

Ainda de acordo com Bernucci *et al.* (2022), com o passar do tempo e/ou o aumento do tráfego, a serventia do pavimento tende a diminuir. Portanto, quando avaliamos um segmento ao longo dos anos, essa redução na serventia se traduz em uma avaliação do desempenho do pavimento.

De acordo com o exposto por DNIT (2011), o valor da Serventia Atual é uma classificação numérica que varia de 0 a 5, conforme apresentado na Tabela 1 a seguir, calculada a partir da média das avaliações de especialistas quanto ao conforto ao dirigir em um segmento específico da estrada em um ponto específico de sua vida útil.

Tabela 1 – Conceitos de degradação associados ao VSA

Padrão de conforto ao rolamento	Avaliação (faixa de notas)
Excelente	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

Fonte: DNIT (2011)

2.3.2 Irregularidade Longitudinal

Conforme definição do DNIT (2011), a irregularidade longitudinal é a soma das variações da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência. Essa irregularidade tem impacto na dinâmica dos veículos, no efeito das cargas, na qualidade e conforto ao rolamento e na drenagem superficial da via. A medida utilizada para avaliar essa irregularidade é conhecida como IRI (*International Roughness Index*, ou Índice de Irregularidade Internacional, em português), um índice estático expresso em m/km, que quantifica as discrepâncias da superfície do pavimento em relação ao seu projeto ideal.

Tabela 2 – Classificação de IRI - DNIT

Irregularidade Superficial	Classificação
$IRI < 3$	Bom
$3 \leq IRI < 4$	Regular
$4 \leq IRI < 5,5$	Mau
$IRI > 5,5$	Péssimo

Fonte: DNIT (2011)

Segundo Bernucci *et al.* (2022), na análise do IRI, a obtenção do perfil longitudinal do pavimento pode ser realizada por meio de uma variedade de dispositivos, tais como o Nível e Mira e os perfilômetros inerciais. Este indicador é comumente empregado em diversos países para monitorar e aprovar projetos de construção rodoviária, sendo também utilizado para aferir o desempenho e a qualidade do pavimento em termos de conforto e segurança ao rolamento.

2.4 Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis

Segundo DER-SP (2006), avaliação estrutural de pavimentos é a determinação da capacidade da estrutura de manter a sua integridade mediante às solicitações. A avaliação estrutural de pavimentos consiste na análise das medidas de deslocamentos verticais recuperáveis da superfície do pavimento quando submetido a determinado carregamento.

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), a avaliação estrutural destrutiva é caracterizada por sua abordagem que envolve a investigação detalhada da condição estrutural de todas as camadas que constituem o pavimento, geralmente por meio da abertura de trincheiras ou poços de sondagem. Esse método permite a coleta de amostras de cada material presente, incluindo o subleito, e a realização de ensaios de capacidade de carga. Devido à sua natureza intrusiva, o método destrutivo pode ser aplicado apenas em um número limitado de locais cuidadosamente selecionados, que são representativos de cada segmento a ser avaliado.

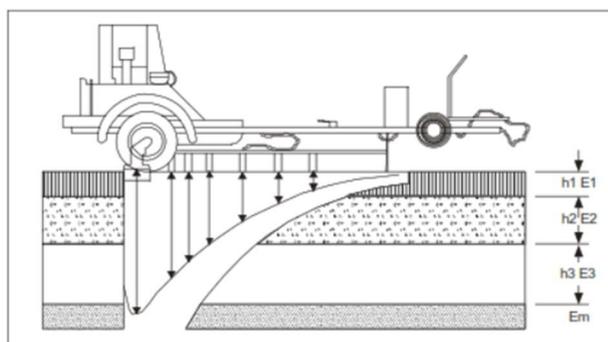
De acordo com Bernucci *et al.* (2022), o método de avaliação estrutural não destrutiva de pavimentos é aquele que se utiliza de medidas as quais não se faz necessária a abertura de poços de inspeção ou trincheiras no pavimento. Este método é representado por medidas de deflexão com equipamentos tais como FWD (*Falling Weight Deflectometer*), LWD (*Light Weight Deflectometer*) ou Viga Benkelman.

2.4.1 *Falling Weight Deflectometer* – FWD

De acordo com definição do DNIT (2006), todos os dispositivos que aplicam uma carga dinâmica de impacto ao pavimento estão categorizados como deflectômetros de impacto, conhecidos como FWD, que significa "*Falling Weight Deflectometer*".

Ainda conforme DNIT (2006), tais equipamentos utilizam um peso que é elevado até uma altura predefinida e depois solto em queda livre, atingindo uma placa posicionada sobre a superfície do pavimento. As respostas do pavimento ao impacto causado são capturadas pelos sensores (geofones) dispostos longitudinalmente a partir do centro da placa.

Figura 1 - Representação dos deflectômetros de impacto



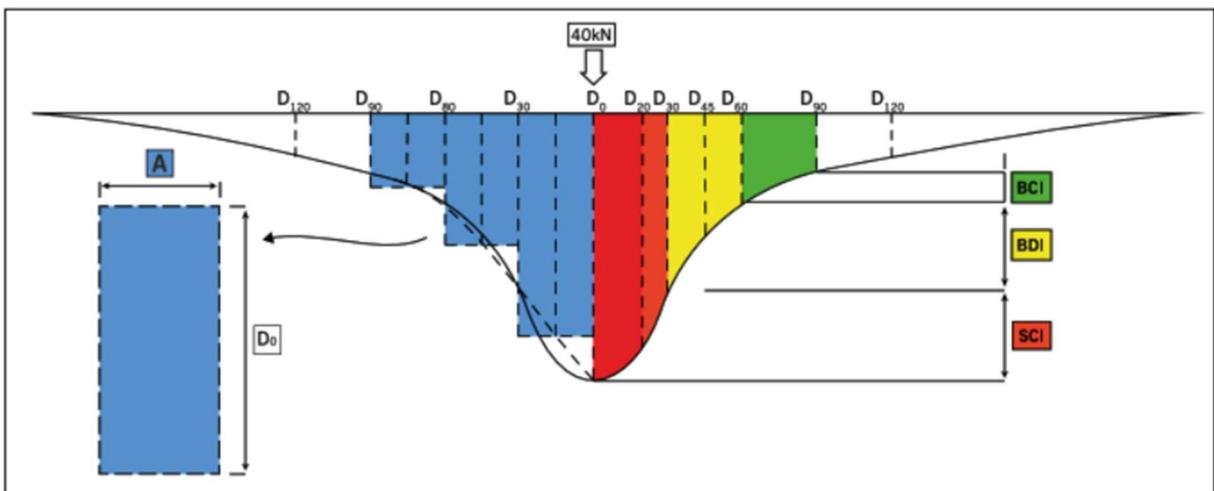
Fonte: DNIT (2006)

2.4.2 Bacia de deflexão

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), a bacia de deflexão é caracterizada quando se mede os deslocamentos elásticos ou recuperáveis em diversos locais do pavimento a partir do ponto de aplicação de carga, denominado este de D_0 .

Segundo Andrade *et al.* (2016), existem diversos parâmetros de bacia de deflexão na literatura, desenvolvidos para que seja possível obter as propriedades das camadas dos pavimentos, que complementam os resultados obtidos pelo parâmetro Rc (Raio de curvatura), adotado pelo DNER-PRO 011/79.

Figura 2 - Representação gráfica esquemática da bacia deflectométrica e os respectivos índices de curvatura



Fonte: Adaptado de Ferri, 2013 por Souza Jr, 2018.

Conforme Aavik e Talvik (2008), o parâmetro SCI (*Surface Curvature Index*) é obtido através da diferença entre o D_0 e D_{30} , como mostrado na Equação 1. Segundo Kim e Park (2002), este parâmetro apresenta um indicativo sobre a situação da condição do revestimento asfáltico. Conforme Andrade *et al.* (2016), valores de SCI maiores que 25×10^{-2} mm denotam revestimento com espessura muito pequena ou pouco resistente.

$$SCI = D_0 - D_{30} \quad (1)$$

Onde: SCI: é o valor do parâmetro (10^{-2} mm);

D_0 : deflexão máxima (10^{-2} mm);

D_{30} : deflexão a 30,0 cm do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm).

Já o parâmetro BDI (*Base Damage Index*), de acordo Aavik e Talvik (2008), é obtido por meio da diferença entre o D_{30} e D_{60} , como mostrado na Equação 2. Segundo Kim e Park (2002), este parâmetro apresenta um indicativo sobre as condições da camada de base. Conforme Andrade *et al.* (2016), valores de BDI maiores que 40×10^{-2} mm denotam estrutura pouco resistente ou com a presença de problemas estruturais.

$$BDI = D_{30} - D_{60} \quad (2)$$

Onde: BDI: é o valor do parâmetro (10^{-2} mm);

D_{30} : deflexão a 30,0 cm do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm);

D_{60} : deflexão a 60,0 cm do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm).

O parâmetro BCI (*Base Curvature Index*), segundo Aavik e Talvik (2008), é obtido através da diferença entre o D_{60} e D_{90} , como mostrado na Equação 3. De acordo com Kim e Park (2002), este parâmetro apresenta um indicativo sobre as condições subleito. Conforme Andrade *et al.* (2016), valores de BCI maiores que 10×10^{-2} mm denotam $CBR_{\text{subleito}} < 10\%$ e inferem problemas estruturais.

$$BCI = D_{60} - D_{90} \quad (3)$$

Onde: BCI: é o valor do parâmetro (10^{-2} mm);

D_{60} : deflexão a 60,0 cm do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm);

D_{90} : deflexão a 90,0 cm do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm).

De acordo com Andrade *et al.* (2016), o parâmetro Rc (Raio de curvatura), o único parâmetro de bacia adotado oficialmente no Brasil, indica a situação da capacidade da estrutura em distribuir os esforços solicitantes às camadas subjacentes. Trata-se do ponto de arqueamento da bacia de deflexões, mostrado na Equação 4. O DNER-PRO 011/79 estabelece que pavimentos com raio de curvatura menores que 100m indicam problemas estruturais.

$$Rc = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})} \quad (4)$$

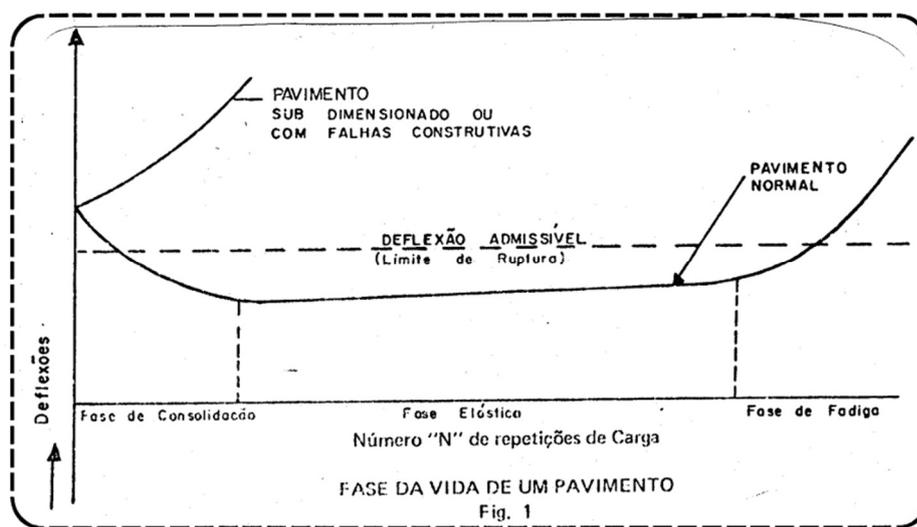
Onde: Rc: é o valor do parâmetro (m);

D_0 : deflexão máxima (10^{-2} mm);

D_{25} : deflexão a 25,0 cm do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm).

Conforme O DNER-PRO 011/79, a deflexão admissível é um parâmetro que indica o limite de ruptura da estrutura do pavimento submetido a fase de fadiga, conforme apresentado na Figura 2. A obtenção deste parâmetro é realizada por meio do desenvolvimento da Equação 5.

Figura 3 - Fases de vida de um Pavimento



Fonte: DNER-PRO 011 (1979)

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 * \log N \quad (5)$$

Onde: D_{adm} : é o valor do parâmetro (10^{-2} mm);

N: Número de repetição do eixo padrão (8,2 t).

2.5 Retroanálise

Segundo Nobrega (2013), a retroanálise de bacias deflectométricas consiste em um método de cálculo que possibilita a obtenção do módulo de resiliência das camadas do pavimento e do subleito.

Conforme Franco e Motta (2020), o BackMeDiNa é um *software* de retroanálise de bacias deflectométricas, obtidas com o FWD, a partir do cálculo interativo utilizando o módulo calculado através da análise elástica de múltiplas camadas. O cálculo é realizado variando os módulos de resiliência das camadas em torno de um valor central, até que se obtenha uma bacia de deflexões teórica mais próxima possível da bacia real medida em campo. Ele foi concebido para ser integrado como um componente nos programas MeDiNa e AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas).

Ainda segundo Franco e Motta (2020), o cálculo do erro na retroanálise é realizado utilizando o método da raiz do valor quadrático médio, também conhecido como RMS (*root mean square*). O RMS é determinado a partir das diferenças entre as deflexões calculadas e as deflexões medidas, como mostrado na Equação 6, onde valores menores que 5% indicam boa correlação na retroanálise, valores maiores que 5% e menores que 10% indicam correlação razoável e, por fim, valores acima de 10% indicam que a retroanálise não obteve uma correlação satisfatória.

$$Erro (RMS) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{calc} - d_{medido}}{d_{medido}} \right)^2 \quad (6)$$

Onde: N é a quantidade de deflexões medidas na bacia analisada.

É válido mencionar a importância das hipóteses de entrada da retroanálise, tais como as condições de aderência das camadas, coeficiente de Poisson, módulos de resiliência iniciais e temperatura, para a obtenção de resultados coerentes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo se dedica a explorar em detalhes da análise estrutural de uma via que está sujeita ao efeito da subsidência. Nele, a estrutura foi examinada por meio dos dados obtidos nas sondagens geotécnicas e das bacias deflectométricas obtidas usando o FWD, no intuito de estabelecer a relação entre a subsidência do solo e a degradação do pavimento e como esse fenômeno pode impactar a integridade de uma estrutura viária.

Os dados para a condução deste estudo foram adquiridos por meio do banco de dados da empresa Stone Consultoria em Pavimentos. O levantamento das deflexões com FWD foi conduzida pela equipe da empresa Future Motion Brasil, enquanto as sondagens geotécnicas foram executadas com pela equipe da JOV Engenharia. No contexto da análise de pavimentos, é de suma importância dispor de informações detalhadas e precisas sobre o trecho em estudo.

3.1 Características do local de estudo

A área de interesse do estudo de caso está localizada no litoral do nordeste brasileiro, onde foi verificado o fenômeno da subsidência causada por ação antrópica. O trecho analisado trata-se de uma rodovia estadual de pista dupla com duas faixas de tráfego em cada pista, construída em pavimento flexível sobre subleito arenoso, com extensão total de 7960 m e 398 estacas no total.

Figura 4 - Mapa do trecho estudado



Fonte: A autora (2023)

Figura 5 - Via em pista dupla e pavimento asfáltico



Fonte: A autora (2023)

3.2 Segmentação do trecho estudado

Em toda a extensão do trecho em estudo foram realizadas dez sondagens a pá e picareta, conduzidos pela empresa JOV Engenharia, para identificação da estrutura e dos materiais coletados e, posteriormente, definição da estrutura a se ser retroanalizada. É apresentada na Figura 6 a localização dos poços de sondagens realizados.

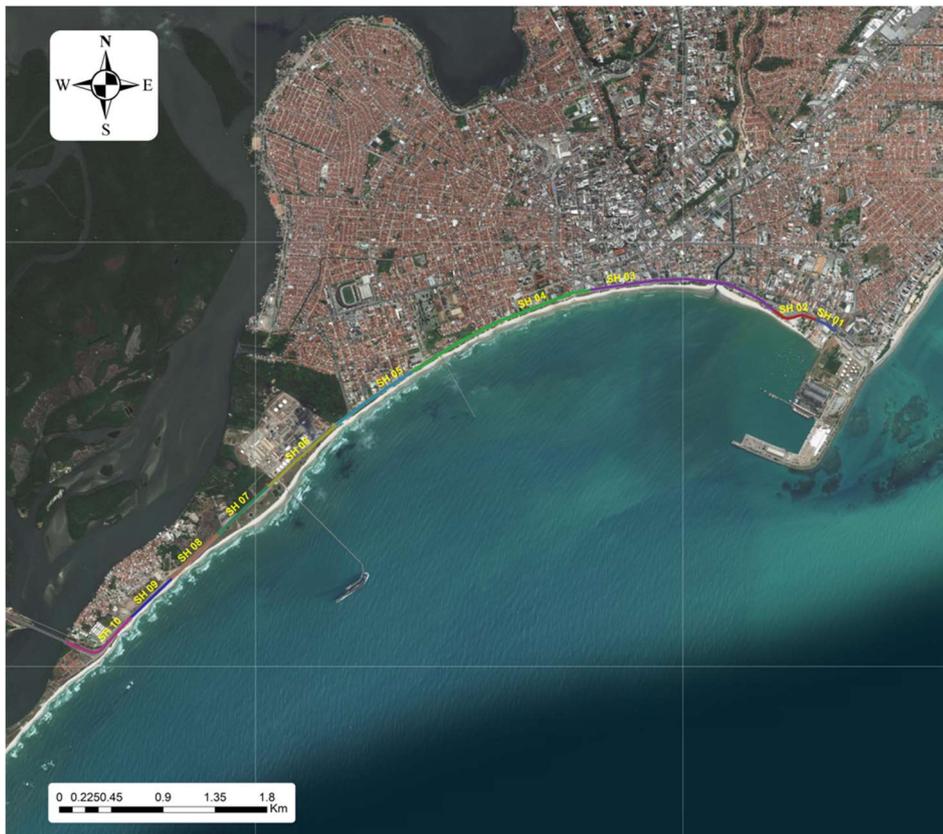
Para que fosse possível verificar as características do pavimento em determinado trecho da rodovia em estudo, foram definidos segmentos homogêneos de modo que as análises convergissem para o segmento mais deteriorado. Foi utilizado como critério para a definição destes segmentos homogêneos a presença de pelo menos um poço de sondagem, sendo assim possível a caracterização da estrutura em cada um dos segmentos estabelecidos. Foram definidos com crescente o sentido leste-oeste da rodovia e decrescente o sentido oeste-leste. É apresentada na Figura 7 a divisão dos segmentos homogêneos.

Figura 6 - Localização dos poços de sondagem



Fonte: A autora (2023)

Figura 7 - Divisão de segmentos homogêneos



Fonte: A autora (2023)

Tabela 3 – Resumo segmentos homogêneos

Segmentos Homogêneos	Estacas				Extensão (m)	Sondagem Associada	Localção Sondagens
	Inicial		Final				
SH 01	0	+ 0,00	10	+ 0,00	200	PS-01	E 02
SH 02	10	+ 0,00	30	+ 0,00	400	PS-02	E 13
SH 03	30	+ 0,00	112	+ 0,00	1640	PS-03	E 39
SH 04	112	+ 0,00	197	+ 0,00	1700	PS-04	E 221
SH 05	197	+ 0,00	237	+ 0,00	800	PS-05	E 255
SH 06	237	+ 0,00	277	+ 0,00	800	PS-06	E 303
SH 07	277	+ 0,00	307	+ 0,00	600	PS-07	E 307
SH 08	307	+ 0,00	334	+ 0,00	540	PS-08	E 354
SH 09	334	+ 0,00	359	+ 0,00	500	PS-09	E 362
SH 10	359	+ 0,00	398	+ 0,00	780	PS-10	E 12

Fonte: A autora (2023)

Tabela 4 – Resumo estrutura do pavimento – Sondagens 1 a 5

Camadas	Classificação Tátil - Visual	Espessura (cm)
PS-01 - Estaca 02		
Revest.	CBUQ	18
Camada Granular 01	Material britado c/ areia argilosa	20
Camada Granular 02	Areia siltosa c/ pouco pedregulho	50
Subleito	Areia silto argilosa	-

PS-02 - Estaca 13		
Revest.	CBUQ	5
Camada Granular 01	Pedregulho arenoso	20
Subleito	Areia siltosa c/ pouco pedregulho	-
PS-03 - Estaca 39		
Revest.	CBUQ	10
Camada Granular 01	BGS	5
Camada Granular 02	Areia silto argilosa	20
Camada Granular 03	Fresado c/ areia argilosa	5
Subleito	Areia Argilosa	-
PS-04 - Estaca 169		
Revest.	CBUQ	20
Camada Granular 01	Areia Argilosa	25
Camada Granular 02	Areia Argilosa	20
Subleito	Areia Argilosa	-
PS-05 - Estaca 221		
Revest.	CBUQ	20
Camada Granular 01	BGS	5
Camada Granular 02	Material britado c/ areia argilosa	25
Subleito	Argila arenosa	-

Fonte: A autora (2023)

Tabela 5 – Resumo estrutura do pavimento – Sondagens 6 a 10

Camadas	Classificação Tátil - Visual	Espessura (cm)
PS-06 - Estaca 255		
Revest.	CBUQ	20
Camada Granular 01	BGS c/ areia argilosa	5
Camada Granular 02	Argila arenosa	25
Subleito	Argila arenosa	-
PS-07 - Estaca 303		
Revest.	CBUQ	20
Camada Granular 01	Areia Argilosa	25
Camada Granular 02	Argila arenosa	20
Subleito	Areia fina	-
PS-08 - Estaca 307		
Revest.	CBUQ	13
Camada Granular 01	Areia argilosa	47
Subleito	Argila arenosa	-
PS-09 - Estaca 354		
Revest.	CBUQ	12
Camada Granular 01	Material britado c/ areia argilosa	13
Camada Granular 02	Argila arenosa	20
Camada Granular 03	Argila arenosa	25
Subleito	Areia fina	-
PS-10 - Estaca 362		
Revest.	CBUQ	10
Camada Granular 01	BGS	15
Camada Granular 02	Areia siltosa	20
Subleito	Areia fina	-

Fonte: A autora (2023)

3.3 Determinação dos módulos de resiliência iniciais

Para que fosse possível a realização da retroanálise, foi necessário estabelecer valores iniciais para os módulos a serem considerados, de acordo com referências da literatura. A Tabela 6 apresentada a seguir mostra os módulos iniciais adotados bem como suas referências.

Tabela 6 – Resumo dos módulos de Resiliência iniciais utilizados

Camadas	Referências Utilizadas	Módulos de Resiliência (MPa)
Revestimento asfáltico	Freire <i>et al.</i> (2023)	2000
Base granular	DNIT (2020)	400
Sub-base granular	DNIT (2020)	300
Subleito	Freire <i>et al.</i> (2023)	50

Fonte: A autora (2023)

Os módulos de resiliência considerados para o revestimento, que é composto por um concreto asfáltico, e para o subleito foram os mesmos utilizados por Freire *et al.* (2023). Como este estudo tem por objeto a análise de uma estrutura degradada, os valores de MR utilizados para estas camadas são referentes as condições de revestimento trincado e subleito degradado.

Já os valores de MR utilizado para as camadas de base e sub-base são os valores estabelecidos para camadas granulares do manual do DNIT (2020).

A adoção de tais módulos iniciais, baseados na literatura disponível, se fez necessária devido a não realização dos ensaios pertinentes nas amostras coletadas.

Os coeficientes de Poisson adotados para as retroanálises foram definidos pelo software para cada material selecionado e propostos no manual DNIT IPR-720 (2006).

Tabela 7 – Coeficientes de Poisson adotados

Material	Coeficientes μ	Adotado
CBUQ	0,15 a 0,45	0,30
Base e sub-base granular	0,30 a 0,40	0,35
Subleito	0,30 a 0,50	0,45

Fonte: DNIT (2006)

3.4 Levantamento das deflexões recuperáveis

Foram realizados pela empresa Future Motion Brasil os levantamentos de deflexões máximas recuperáveis do pavimento com o uso do FWD. O levantamento foi realizado nas duas pistas de tráfego com espaçamento de 20 metros em pistas alternadas.

O propósito do ensaio foi subsidiar à análise estrutural dos pavimentos, por meio da medição das bacias deflectométricas e da interpretação posterior dos módulos de resiliência, por meio das retroanálises, e dos parâmetros das bacias SCI, BDI, BCI e Rc. O equipamento utilizado foi do modelo 8002-314 FWD da fabricante Dynatest.

Figura 8 – Equipamento de FWD



Fonte: Future Motion Brasil (2022)

3.5 Análise de Tráfego

Com base no estudo de tráfego realizado pela empresa STONE Consultoria em Pavimentos (2022), o número N (USACE) adotado para os cálculos foi $4,33 \times 10^7$, como apresentado a seguir.

Tabela 8 – Cálculo de Número N

PROJEÇÃO DO "VMDA" E DO NÚMERO "N"							
ANO	Ônibus	Caminhões	VMDA Comercial	NÚMERO "N" - AASHTO		NÚMERO "N" - USACE	
				Anual	Acumulado	Anual	Acumulado
2022	676	1.529	2.205	1,28E+06		3,66E+06	
2023	696	1.575	2.271	1,32E+06	1,32E+06	3,77E+06	3,77E+06
2024	717	1.622	2.339	1,36E+06	2,67E+06	3,89E+06	7,66E+06
2025	739	1.671	2.409	1,40E+06	4,07E+06	4,00E+06	1,17E+07
2026	761	1.721	2.482	1,44E+06	5,51E+06	4,12E+06	1,58E+07
2027	784	1.773	2.556	1,48E+06	6,99E+06	4,25E+06	2,00E+07
2028	807	1.826	2.633	1,53E+06	8,52E+06	4,37E+06	2,44E+07
2029	831	1.880	2.712	1,57E+06	1,01E+07	4,51E+06	2,89E+07
2030	856	1.937	2.793	1,62E+06	1,17E+07	4,64E+06	3,36E+07
2031	882	1.995	2.877	1,67E+06	1,34E+07	4,78E+06	3,83E+07
2032	908	2.055	2.963	1,72E+06	1,51E+07	4,92E+06	4,33E+07
FATORES DE VEÍCULO -FV				FATOR CLIMÁTICO		FATOR DE CARREGAMENTO	
FV _{AASHTO}		FV _{USACE}		FR		FP	
3,18		9,10		1		0,5	
CRESCIMENTO ANUAL (%)		ANO INICIAL PARA CÁLCULO DO NÚMERO N					2023
3%		PERÍODO DE PROJETO PARA O CÁLCULO DO NÚMERO N (ANOS)					10

Fonte: STONE (2022)

3.6 Critérios de escolha do trecho crítico

A análise estrutural que foi desenvolvida neste trabalho seguiu alguns critérios com o objetivo de identificar o segmento mais degradado e, posteriormente, em qual estaca o pavimento refletiu as piores condições estruturais, na qual foi realizada a retroanálise da bacia de deflexão por meio do software BackMedina. Os critérios da análise estrutural para escolha da estaca posteriormente retroanalisada estão elencados a seguir.

3.6.1 Análise da deflexão admissível

Como preconizado na norma DNER-PRO 011/79, a deflexão admissível indica o valor ao qual o pavimento não sofre ruptura. Este foi o primeiro critério a ser analisado, onde os segmentos homogêneos que apresentaram maiores extensões de área com deflexão máxima maior que a admissível ($D_0 > D_{adm}$) tiveram os demais parâmetros da bacia de deflexões analisados.

Para a realização da avaliação estrutural não destrutiva foi realizado levantamento das bacias deflectométricas com FWD por toda extensão do trecho em estudo. O levantamento foi executado nas duas pistas, com espaçamento entre as medições de 20 metros em pistas alternadas.

A Equação 5 utilizada neste contexto para calcular a deflexão admissível do pavimento é derivada diretamente da norma DNER PRO 011/79. Conforme apresentado na Equação 5, foi definida a deflexão admissível para este estudo como apresentado abaixo.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 * \log N \quad (5)$$

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 * \log (4,33 * 10^7)$$

$$D_{adm} = 46,34 (10^{-2}\text{mm})$$

3.6.2 Structural Curvature Index (SCI)

Parâmetro calculado usando a bacia de deflexão, utilizado como indicador da condição do revestimento, dado pela Equação 1 onde D_0 e D_{30} são as deflexões obtidas no ponto de aplicação da carga e a 30cm do ponto de aplicação, respectivamente. De acordo com Horak (2008), estruturas com bom desempenho estrutural apresentam valores de *SCI* menores que 25(10^{-2}mm). Segmentos que apresentaram valores elevados de deflexões máximas foram para análise a partir do parâmetro *SCI*.

3.6.3 Base Damage Index (BDI)

Assim como o anterior, esse parâmetro é calculado a partir de dados da bacia de deflexão e foi utilizado como indicador das condições da camada de base, dado pela Equação 2, onde D_{30} e D_{60} são as deflexões obtidas no a 30cm e a 60cm do ponto de aplicação da carga, respectivamente. De acordo com Horak (2008), estruturas com bom desempenho estrutural apresentam valores de *BDI* menores que 40 (10^{-2}mm). Segmentos que apresentaram valores elevados de deflexões máximas foram para análise a partir do parâmetro *BDI*.

3.6.4 Base Curvature Index (BCI)

Parâmetro obtido por meio da bacia de deflexão, utilizado como indicador das condições do subleito, dado pela Equação 3, onde D_{60} e D_{90} são as deflexões obtidas no a 60cm e a 90cm do ponto de aplicação da carga, respectivamente. Conforme Horak (2008), estruturas com bom desempenho estrutural apresentam valores de *BCI* menores que 10 (10^{-2}mm). Segmentos que apresentaram valores elevados de deflexões máximas foram para análise a partir do parâmetro *BCI*.

3.6.5 Raio de Curvatura (Rc)

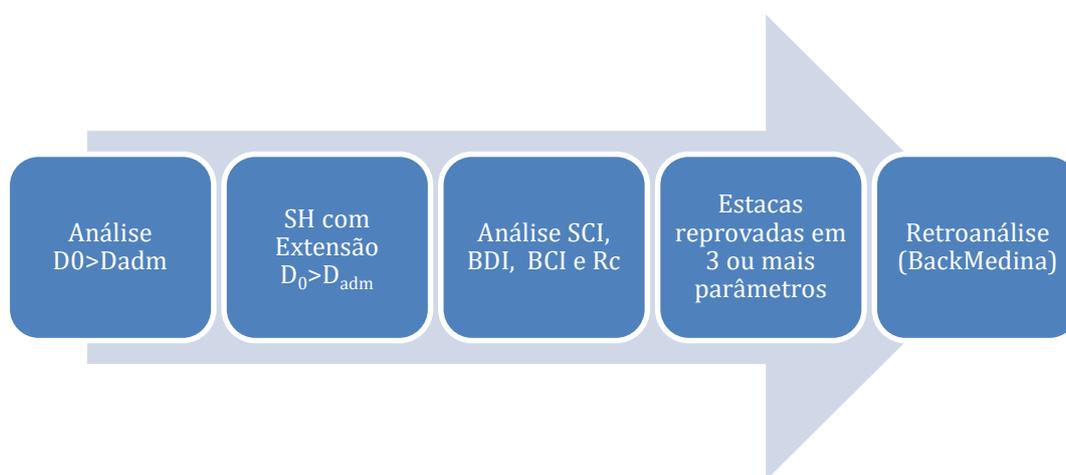
Parâmetro que indica a capacidade da estrutura de distribuir os esforços às camadas de suporte, dado pela Equação 4, onde D_0 e D_{25} são as deflexões obtidas no ponto de aplicação da

carga e a 25cm do ponto de aplicação, respectivamente. Segundo a norma DNER-PRO 011/79, estruturas com boas condições de suporte apresentam valores de raio de curvatura acima de 100m. Segmentos que apresentaram valores elevados de deflexões máximas foram para análise a partir do parâmetro R_c .

3.6.6 Fluxo de decisão para retroanálise

O fluxo de decisão foi definido tomando-se como base os valores limites de cada um dos parâmetros avaliados e a ocorrência concomitante de valores destes parâmetros de bacia acima dos valores admissíveis. O fluxo de decisão é apresentado abaixo.

Figura 9 - Fluxo de decisão



Fonte: A autora (2023)

3.6.7 Avaliação visual das bacias de deflexão

Após a análise dos parâmetros de bacia deflectométrica e definição das estacas que foram retroanalizadas, foi realizada avaliação visual das bacias com o objetivo de identificar possíveis anomalias no comportamento das curvas mediante aplicação das cargas.

3.6.8 Retroanálise da bacia de deflexão do trecho selecionado

A escolha das estacas para realização da retroanálise no software BackMedina foi determinada pela necessidade de compreender o comportamento dos MR da referida estrutura diante do comportamento das bacias deflectométricas. A retroanálise pelo BackMedina foi realizada conforme passo-a-passo apresentado a seguir.

Figura 10 - Tutorial simplificado - BackMedina

1

BackMeDiNa v.1.2.0 (julho/2020)

Projeto Ajuda

E287

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
<input type="checkbox"/> 1	Estaca: 287 + 0m	1	0

Estaca: 287 + 0m		Faixa: 1		Trilha: 0					13/04/2022
CARGA (kgf):	4089,00							T AR:	36 °C
RAIO (cm):	15							T PAV:	47 °C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	742	375	368	236	140	75	46		
CALCULADAS (µm):									
DIFERENÇAS (µm):									
ERRO (%):									

ESTRUTURA >> 2 7 RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	10,0	2000	0,30	NÃO ADERIDO
2	Camadas Granulares	25,0	400	0,40	NÃO ADERIDO
3	Camadas Granulares	20,0	300	0,40	NÃO ADERIDO
4	Subleito	0	50	0,45	-

3 4 5 6

DEFLEXÕES NORMALIZADAS

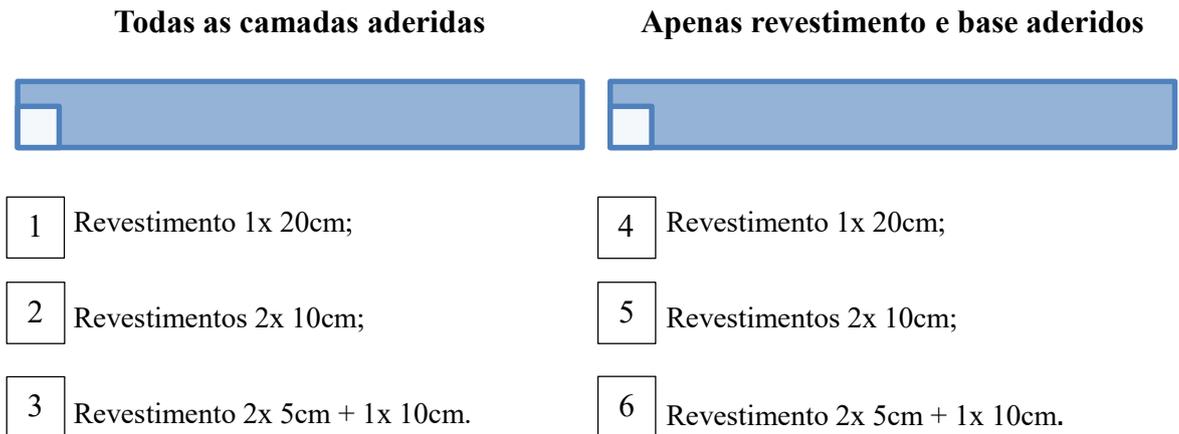
Arquivo Importado

Fonte: A autora (2023)

1. Ao abrir o programa, foi importado o arquivo de bacias de deflexões;
2. A estrutura foi ajustada conforme o cenário a ser analisado.
3. As espessuras das camadas foram ajustadas;
4. Os MR iniciais foram inseridos;
5. Os coeficientes de Poisson foram inseridos;
6. As condições de aderência foram definidas;
7. A estrutura foi retroanalísada.

As condições estabelecidas para a realização das retroanálises tiveram como objetivo a simulação de cenários que representem as possibilidades de recapamentos executados ao longo da vida útil do pavimento em estudo. As condições de contorno para a execução da retroanálise são apresentadas na figura a seguir.

Figura 11 - Condições de contorno para retroanálise



Fonte: A autora (2023)

4. RESULTADOS

4.1 Análise das deflexões máximas

Os levantamentos das deflexões no trecho em análise foram realizados em etapas distintas, ocorrendo nos seguintes dias: 06/03/2021, 18/11/2021 e 13/04/2022. Durante os levantamentos, a temperatura ambiente registrada pelos sensores do equipamento variou entre 26°C e 38°C aproximadamente, bem com a temperatura no pavimento que permaneceu entre 31°C e 51°C.

É importante considerar a possibilidade de falha nos sensores de temperatura ambiente, especialmente dado o contexto do local de estudo, que está situado à beira-mar, onde a temperatura média é por volta de 33°C.

Os valores das deflexões foram tabulados e comparados com o valor admissível calculado. A Tabela 9 mostra a extensão e o percentual em área dos trechos que apresentaram deflexão máxima maior que a deflexão admissível calculada.

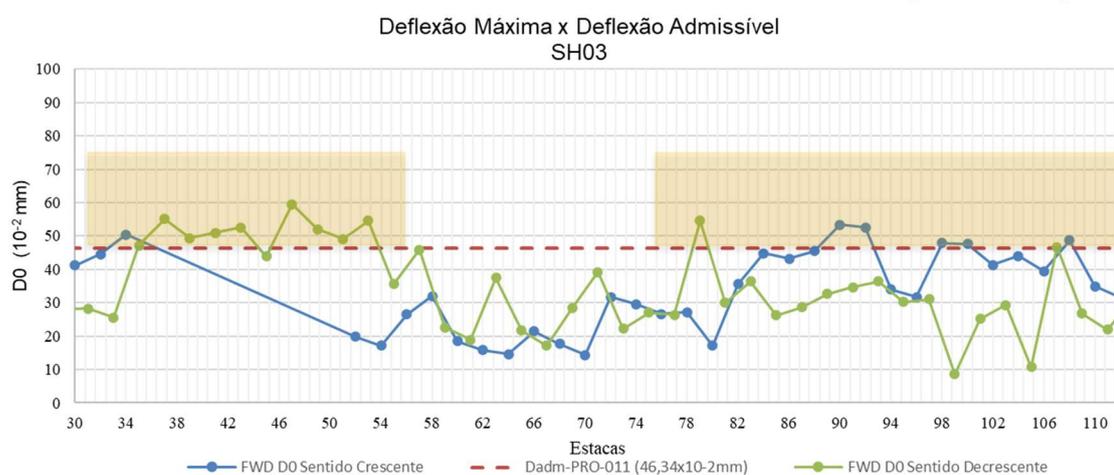
Tabela 9 – Percentuais de área com deflexões máximas acima da deflexão admissível

Segmentos Homogêneos	Estacas						Extensão (m)	Extensão $D_0 > D_{adm}$ (m)	Percentual em extensão $D_0 > D_{adm}$ (%)
	Inicial			Final					
SH 01	0	+	0,00	10	+	0,00	200	20	10%
SH 02	10	+	0,00	30	+	0,00	400	80	20%
SH 03	30	+	0,00	112	+	0,00	1640	340	21%
SH 04	112	+	0,00	197	+	0,00	1700	200	12%
SH 05	197	+	0,00	237	+	0,00	800	60	8%
SH 06	237	+	0,00	277	+	0,00	800	0	0%
SH 07	277	+	0,00	307	+	0,00	600	260	43%
SH 08	307	+	0,00	334	+	0,00	540	60	11%
SH 09	334	+	0,00	359	+	0,00	500	40	8%
SH 10	359	+	0,00	398	+	0,00	780	160	21%

Fonte: A autora (2023)

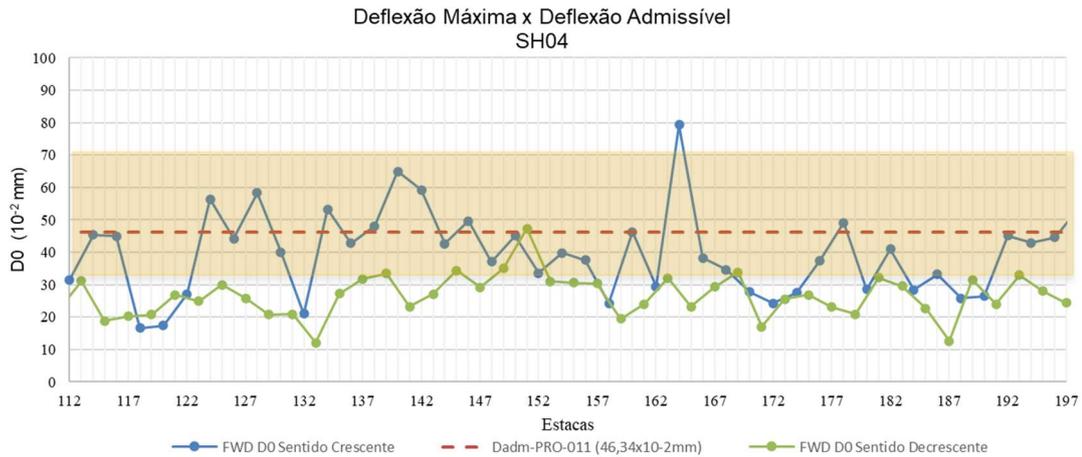
Após análise da Tabela 9, foi possível verificar que, em um total de 10 segmentos analisados, 9 deles apresentaram trechos com deflexão máxima acima do valor admissível. Os segmentos 03,04 e 07 foram os que apresentaram as maiores extensões com deflexões máximas acima do admissível. Isso ficou evidente nos Gráficos 1, 2 e 3 apresentados a seguir. Com isso análise estrutural segue com foco nestes três segmentos homogêneos.

Gráfico 1 – Áreas com deflexões máximas acima da deflexão admissível – Segmento Homogêneo 03



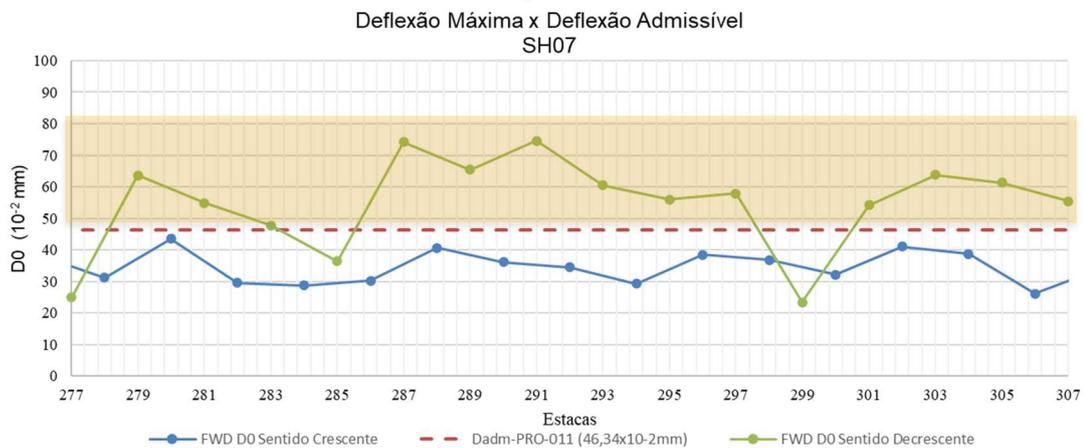
Fonte: A autora (2023)

Gráfico 2 – Áreas com deflexões máximas acima da deflexão admissível – Segmento Homogêneo 04



Fonte: A autora (2023)

Gráfico 3 – Percentuais de área com deflexões máximas acima da deflexão admissível – Segmento Homogêneo 07



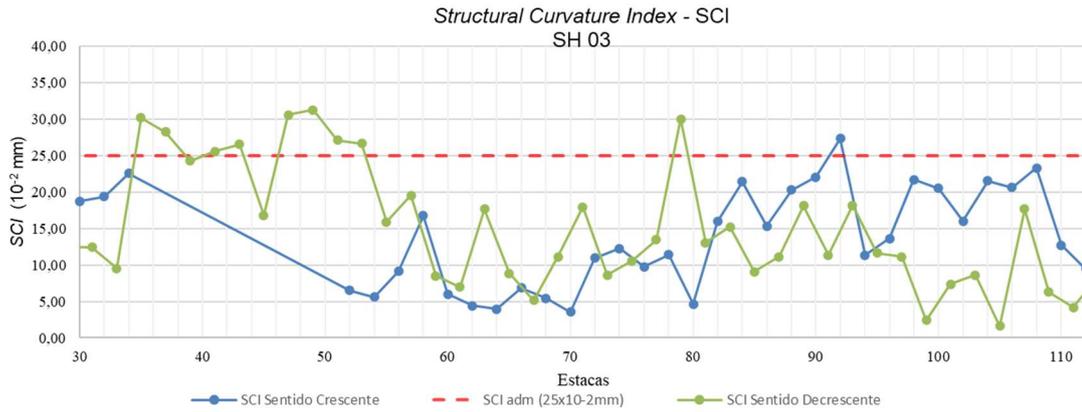
Fonte: A autora (2023)

A fim de aprofundar a investigação sobre estes segmentos, foi realizada análise mais abrangente dos parâmetros de bacia de deflexão. Os gráficos comparativos dos demais segmentos estão apresentados nos Anexos C desta monografia.

4.2 Structural Curvature Index (SCI)

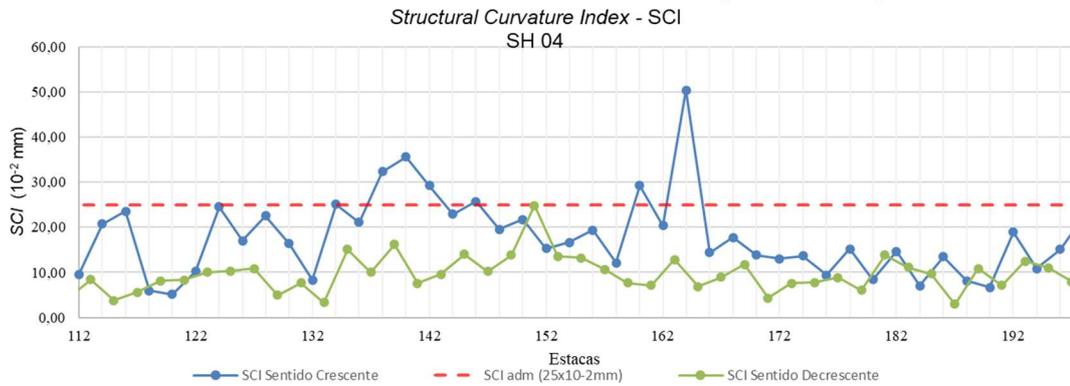
A análise estrutural prosseguiu com a avaliação do parâmetro da bacia de deflexão para os três segmentos definidos na análise anterior. Os Gráficos 4, 5 e 6, apresentados em seguida mostraram os resultados do SCI em cada um dos 3 segmentos definidos.

Gráfico 4 – *Structural Curvature Index* – SCI – Segmento Homogêneo 03



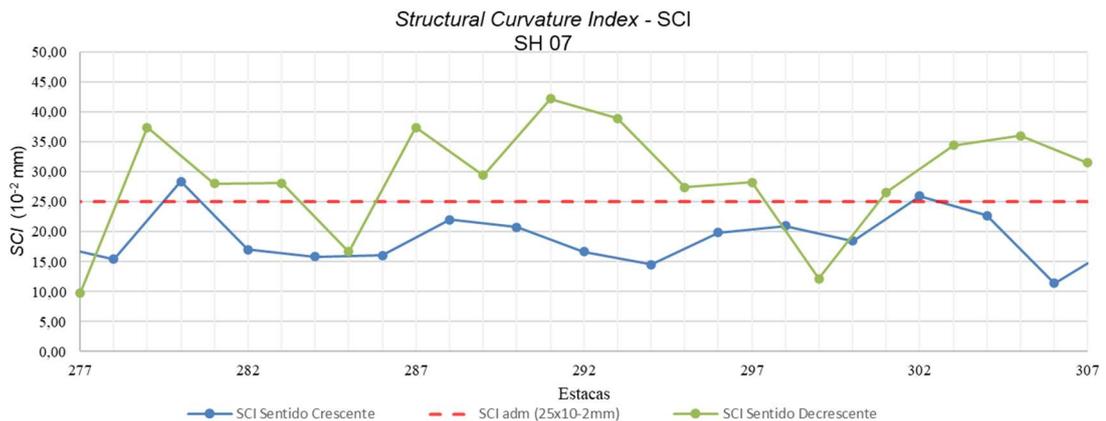
Fonte: A autora (2023)

Gráfico 5 - *Structural Curvature Index* – SCI – Segmento Homogêneo 04



Fonte: A autora (2023)

Gráfico 6 - *Structural Curvature Index* – SCI – Segmento Homogêneo 07



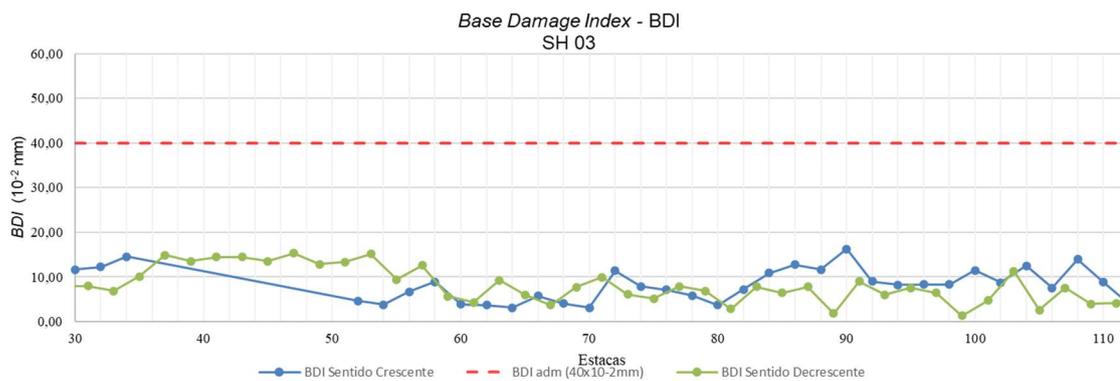
Fonte: A autora (2023)

Foi possível verificar nos gráficos que os segmentos analisados apresentaram estacas com valores de SCI acima do valor recomendado, indicando possível processo de deterioração do revestimento asfáltico. Ainda sobre a análise deste parâmetro, foi possível verificar que o gráfico do segmento 07 apresenta o comportamento semelhante ao gráfico comparativo entre deflexões máximas versus deflexão admissível.

4.3 Base Damage Index (BDI)

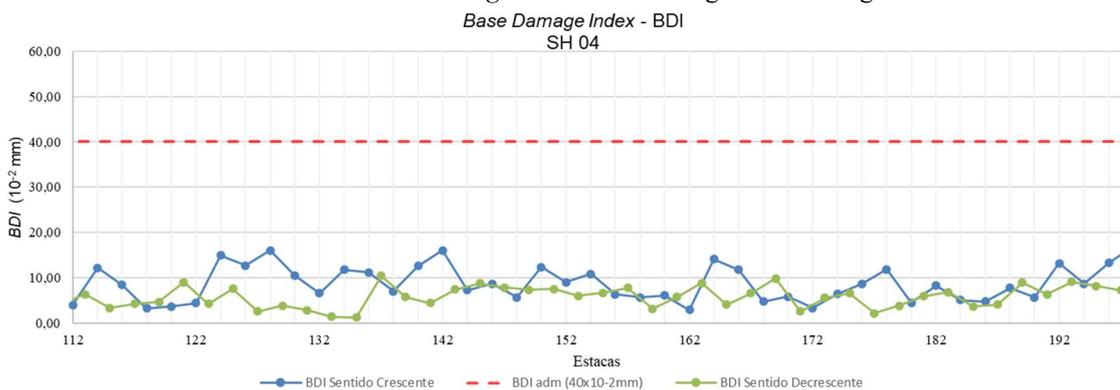
Dando continuidade à análise estrutural com a avaliação do parâmetro BDI, para os três segmentos definidos, os Gráficos 7, 8 e 9, apresentados em seguida, mostram os resultados obtidos para esse parâmetro em cada um dos 3 referidos segmentos.

Gráfico 7 – Base Damage Index – BDI – Segmento Homogêneo 03



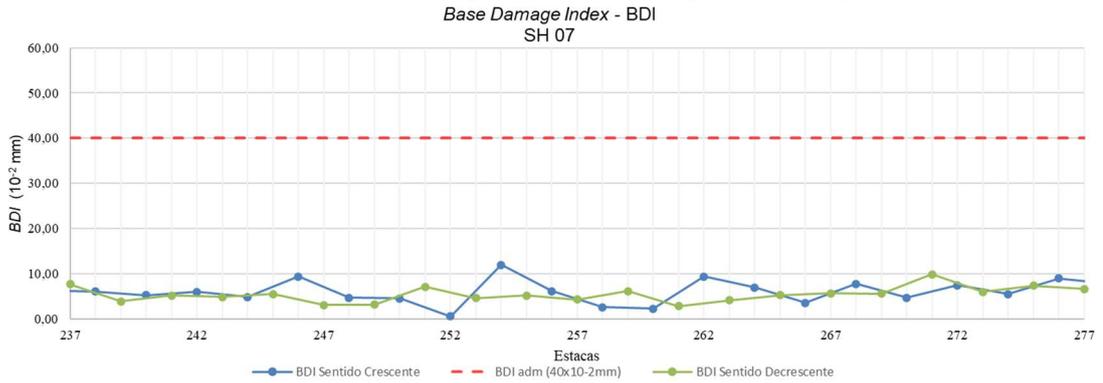
Fonte: A autora (2023)

Gráfico 8 - Base Damage Index – BDI – Segmento Homogêneo 04



Fonte: A autora (2023)

Gráfico 9 - Base Damage Index – BDI – Segmento Homogêneo 07



Os resultados obtidos do parâmetro BDI mostraram que, para os três segmentos analisados, os valores calculados estão dentro do limite de referência, sendo, portanto, um indicativo de boas condições da camada de base.

4.4 Base Curvature Index (BCI)

Seguindo à análise estrutural com a avaliação do parâmetro da bacia de deflexão BCI para os três segmentos, os Gráficos 10, 11 e 12, apresentados em seguida, mostram os resultados obtidos em cada um dos 3 segmentos.

Gráfico 10 – Base Curvature Index – BCI – Segmento Homogêneo 03

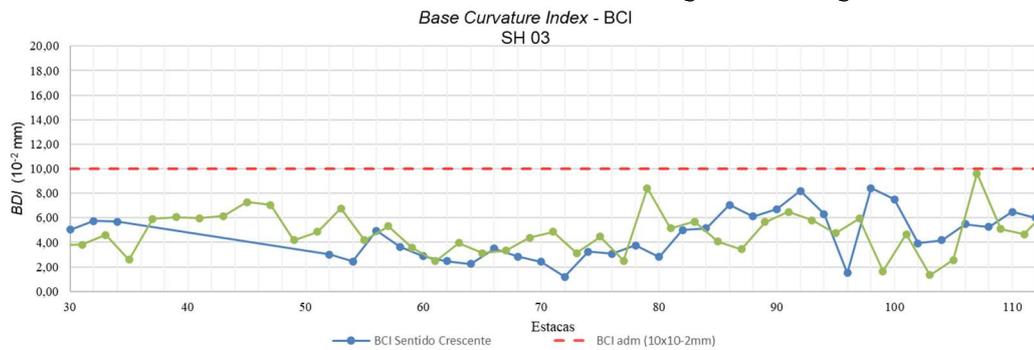
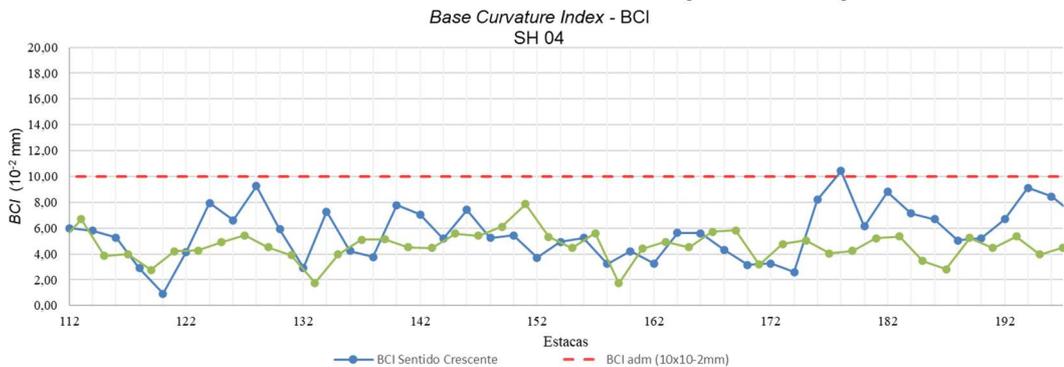
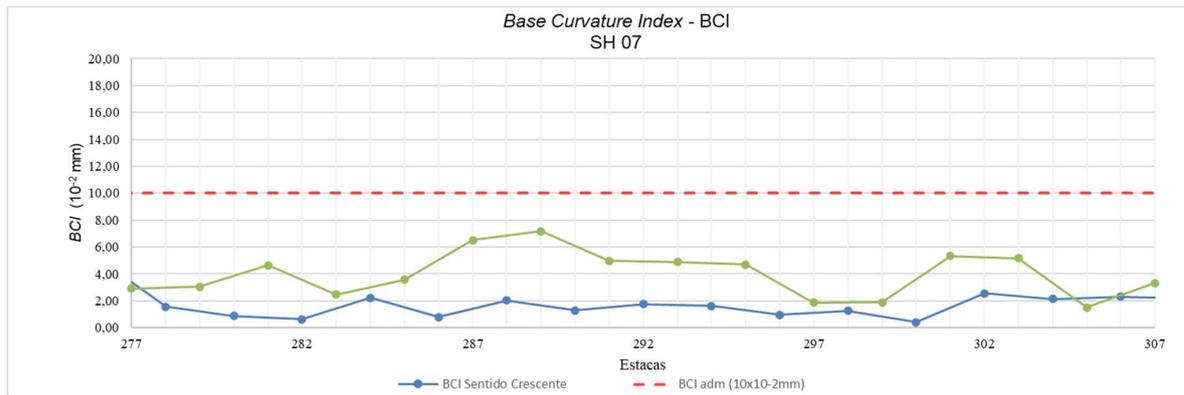


Gráfico 11- Base Curvature Index – BCI – Segmento Homogêneo 04



Fonte: A autora (2023)

Gráfico 12 - Base Curvature Index – BCI – Segmento Homogêneo 07



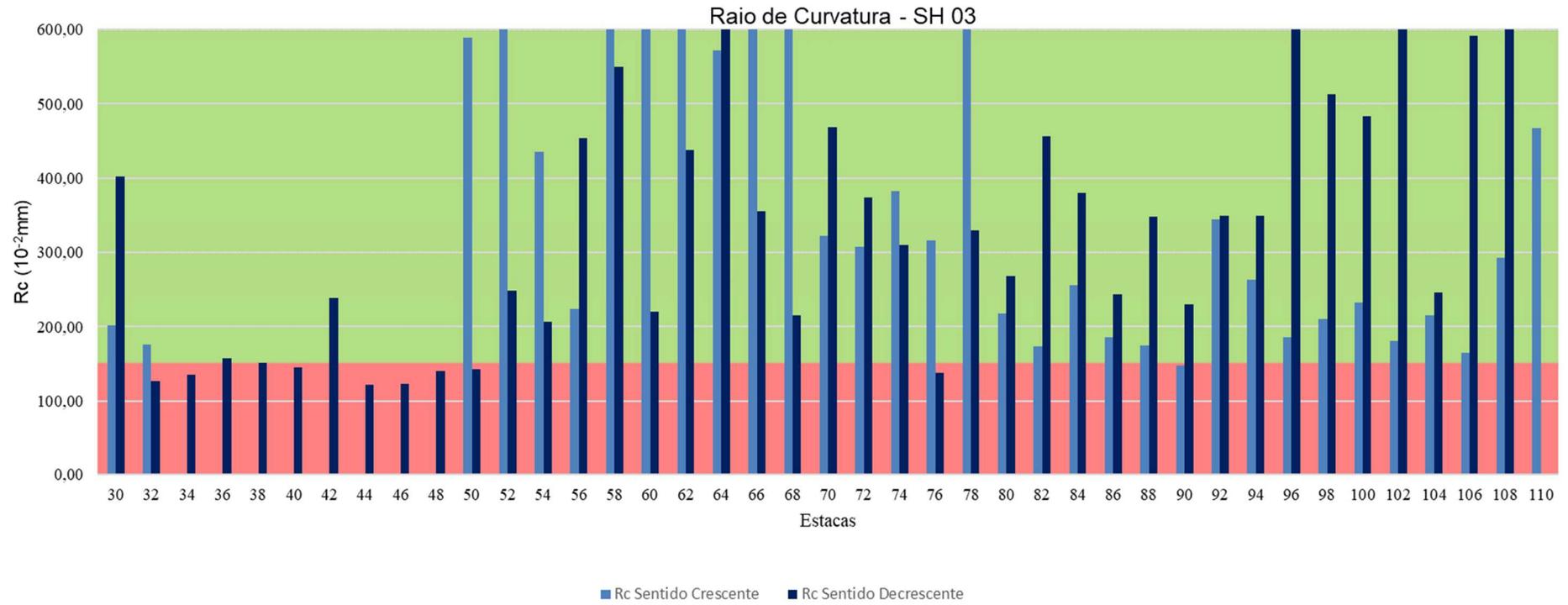
Fonte: A autora (2023)

Os resultados obtidos do parâmetro BCI mostraram que, para os três segmentos analisados os valores calculados estão abaixo do limite de referência contudo, próximo deste limite, o que pode indicar processo de degradação do subleito em andamento.

4.5 Raio de Curvatura (Rc)

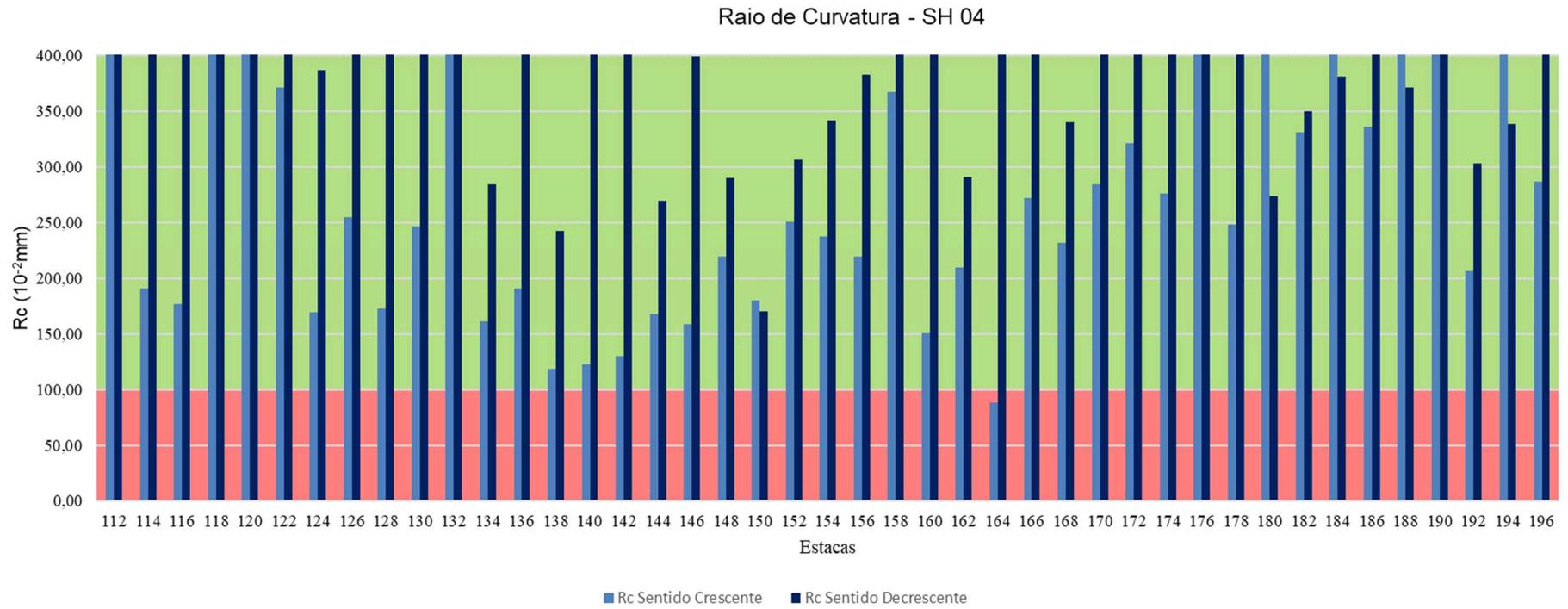
Finalizando as análises dos parâmetros de bacia de deflexão com o Rc, para os três segmentos definidos. Os Gráficos 13, 14 e 15, apresentados em seguida, mostram resultados obtidos em cada segmento analisado.

Gráfico 13 – Raio de Curvatura - Rc – Segmento Homogêneo 03



Fonte: A autora (2023)

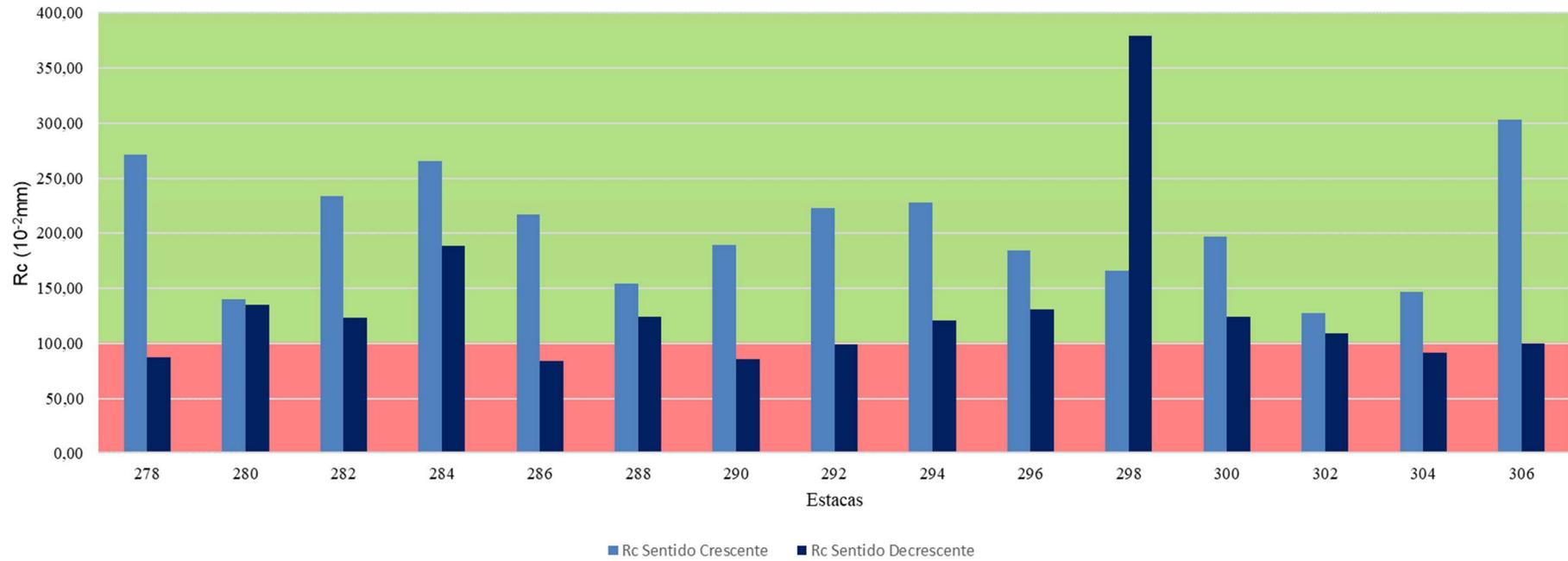
Gráfico 14 - Raio de Curvatura - Rc. – Segmento Homogêneo 04



Fonte: A autora (2023)

Gráfico 15 - Raio de Curvatura - Rc – Segmento Homogêneo 07

Raio de Curvatura - SH 07

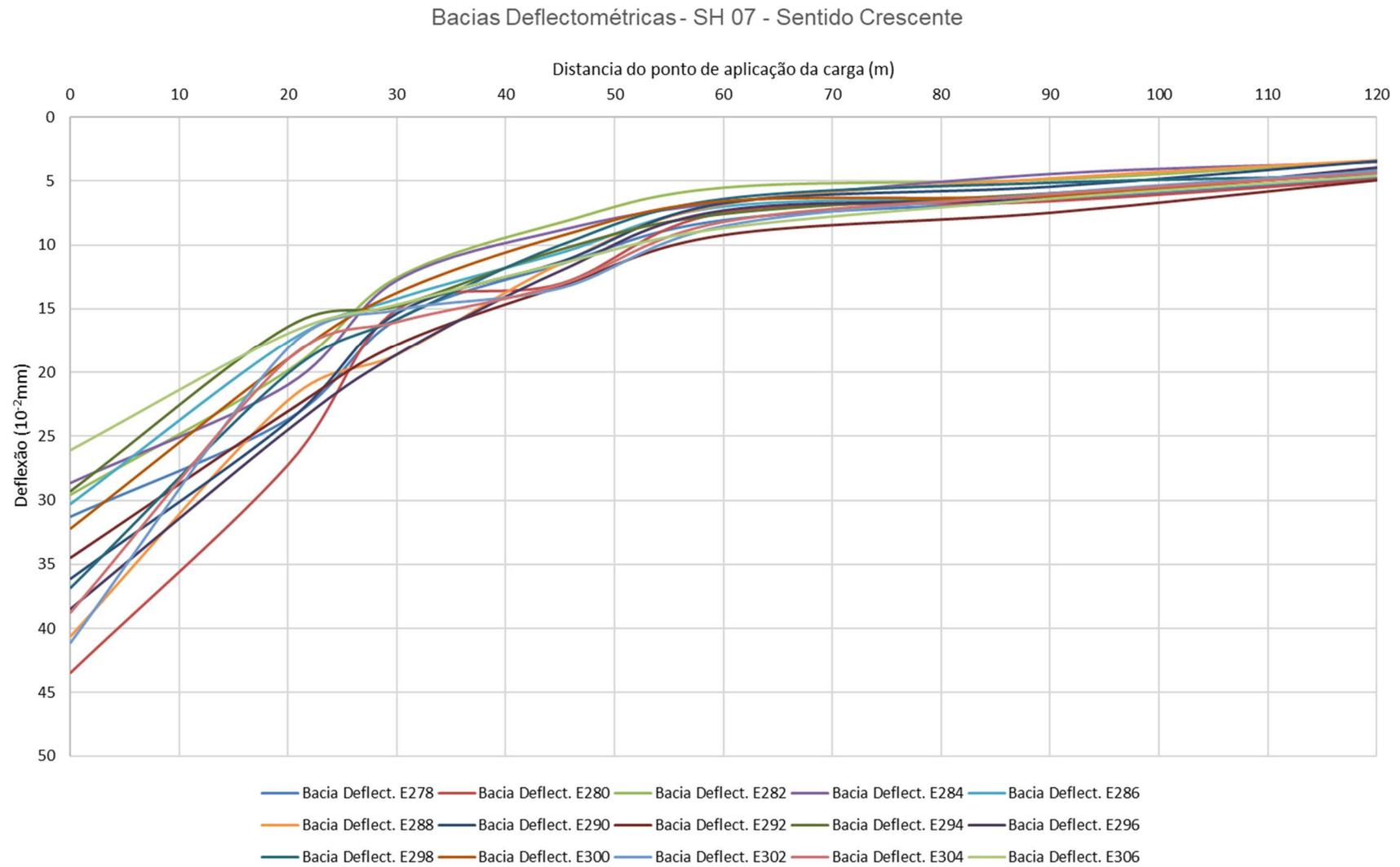


Fonte: A autora (2023)

4.6 Bacias de deflexão obtidas

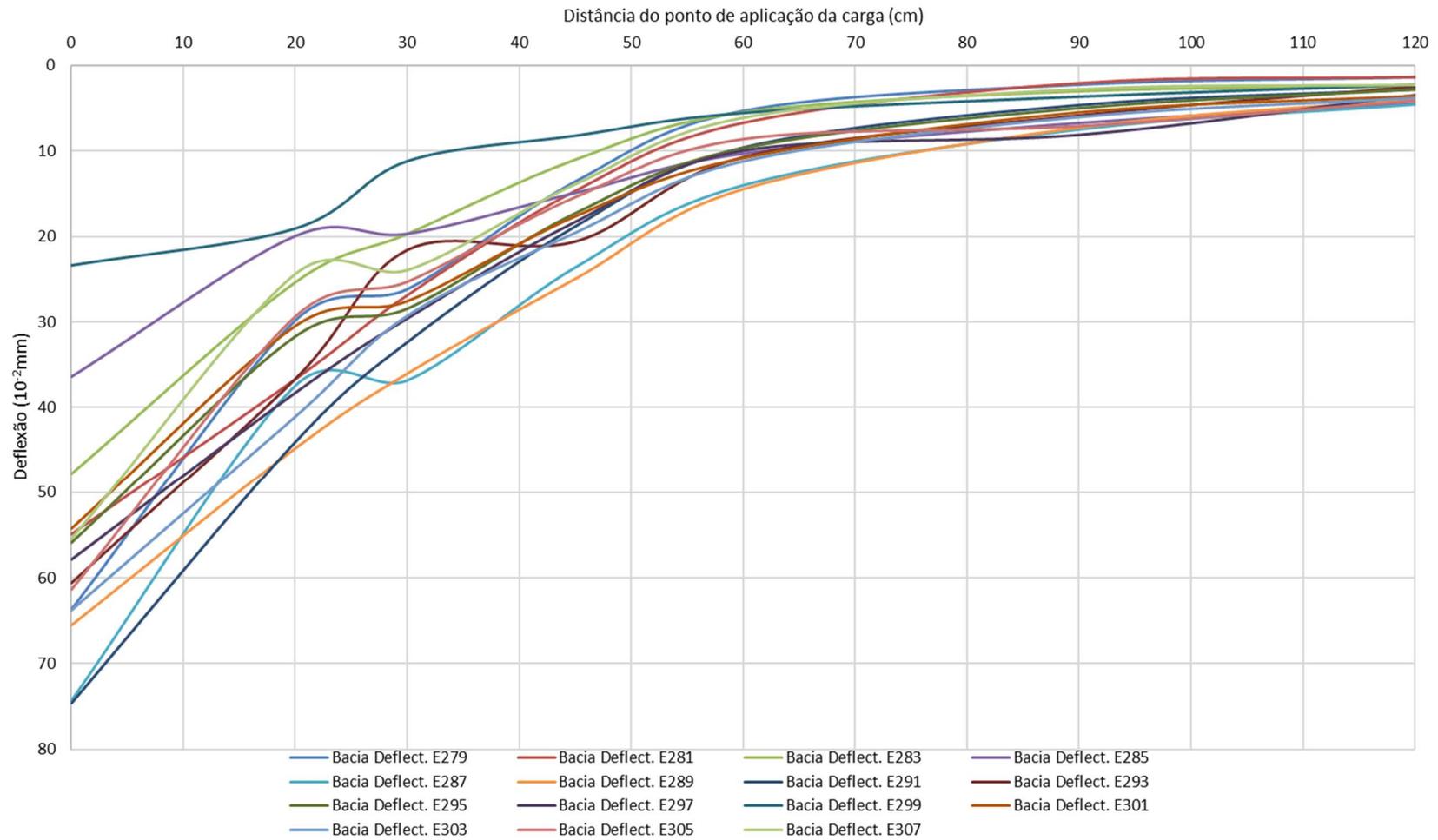
Diante das observações realizadas, levando em consideração os valores de deflexão máxima e dos parâmetros analisados, partimos para análise visual das bacias deflectométricas do segmento 07, apresentada nos Gráficos 16 e 17, para a verificação do comportamento da bacia mediante a aplicação da carga de ensaio.

Gráfico 16 – Bacias deflectométricas – Segmento Homogêneo 07 – Sentido Crescente



Fonte: A autora (2023)
Gráfico 17 – Bacias de deflexões – Segmento Homogêneo 07 – Sentido Decrescente

Bacias Deflectométricas - SH 07 - Sentido Decrescente



Fonte: A autora (2023)

Foi possível verificar nos gráficos certas anomalias nas bacias de deflexões, principalmente entre as distâncias de 20cm a 50cm do ponto de aplicação da carga. Essas anomalias podem ser causadas por uma variedade de fatores, como heterogeneidades do solo, presença de camadas de solo de baixa resistência, presença de água subterrânea, o efeito da subsidência, entre outros.

4.7 Retroanálise da bacia de deflexão

A escolha das estacas 287, 294 e 297 para realização da retroanálise no software BackMedina foi determinada pela necessidade de compreender o comportamento dos módulos de resiliência da referida estrutura diante do comportamento das bacias deflectométricas analisadas e dos resultados obtidos nas análises.

Em primeiro lugar, todas as três estacas apresentaram valores de deflexões máximas que excederam o limite admissível, indicando possíveis problemas de suporte ao carregamento, comprometendo toda a estrutura.

Ademais, pelo menos um dos parâmetros de bacia de deflexão associados a essas estacas ficou acima do limite recomendado, resultando em uma distribuição inadequada de carga e deformações excessivas.

Logo, conforme as condições de contorno já apresentadas, foram realizadas as retroanálises das bacias de deflexão das referidas estacas e a resumos dos resultados são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Resultados da retroanálise com BackMedina – Condições 1, 2 e 3

Condição 1						
Estrutura Retranalisada				Resultados (MPa)		
Camada	Espessura (cm)	Poisson	Aderência	MR (E287)	MR (E294)	MR (E297)
CBUQ	20	0,3	Aderido	445	1062	567
Granular	25	0,4	Aderido	137	331	119
Granular	20	0,4	Aderido	35	669	57
Subleito	-	0,45	Aderido	189	213	222
Erro:				8,5%	5,3%	13,9%
Condição 2						
Estrutura Retranalisada				Resultados (MPa)		
Camada	Espessura (cm)	Poisson	Aderência	MR (E287)	MR (E294)	MR (E297)
CBUQ	10	0,3	Aderido	190	569	2020
CBUQ	10	0,3	Aderido	3742	4814	68
Granular	25	0,4	Aderido	49	212	507
Granular	20	0,4	Aderido	111	1815	24
Subleito	-	0,45	Aderido	176	212	296
Erro:				6,5%	4,3%	12,3%
Condição 3						
Estrutura Retranalisada				Resultados (MPa)		
Camada	Espessura (cm)	Poisson	Aderência	MR (E287)	MR (E294)	MR (E297)
CBUQ	5	0,3	Aderido	491	3739	3858
CBUQ	5	0,3	Aderido	472	1640	977
CBUQ	10	0,3	Aderido	875	547	264
Granular	25	0,4	Aderido	68	329	70
Granular	20	0,4	Aderido	71	738	138
Subleito	-	0,45	Aderido	174	209	211
Erro:				8,5%	100%	13,8%

Fonte: A autora (2023)

Tabela 11 – Resultados da retroanálise com BackMedina – Condições 4, 5 e 6

Condição 4						
Estrutura				Resultados (MPa)		
Camada	Espessura (cm)	Poisson	Aderência	MR (E287)	MR (E294)	MR (E297)
CBUQ	20	0,3	Aderido	465	912	616
Granular	25	0,4	N Aderido	126	477	87
Granular	20	0,4	N Aderido	112	7176	1758
Subleito	-	0,45	N Aderido	190	243	221
Erro:				8,4%	5,5%	13,4%
Condição 5						
Estrutura				Resultados (MPa)		
Camada	Espessura (cm)	Poisson	Aderência	MR (E287)	MR (E294)	MR (E297)
CBUQ	10	0,3	Aderido	204	1089	2075
CBUQ	10	0,3	Aderido	2189	643	53
Granular	25	0,4	N Aderido	105	599	1021
Granular	20	0,4	N Aderido	154	4616	28
Subleito	-	0,45	N Aderido	182	243	441
Erro:				6,9%	5,9%	11,5%
Condição 6						
Estrutura				Resultados (MPa)		
Camada	Espessura (cm)	Poisson	Aderência	MR (E287)	MR (E294)	MR (E297)
CBUQ	5	0,3	Aderido	491	1165	1931
CBUQ	5	0,3	Aderido	472	494	1302
CBUQ	10	0,3	Aderido	875	1150	112
Granular	25	0,4	N Aderido	68	1387	193
Granular	20	0,4	N Aderido	71	3173	181
Subleito	-	0,45	N Aderido	174	243	231
Erro:				7,8%	6,9%	13,0%

Fonte: A autora (2023)

Durante a análise dos módulos de resiliência da estrutura do pavimento, foram consideradas várias condições e cenários, e os resultados variaram significativamente. No entanto, os resultados obtidos na condição de análise 1 se destacaram como os mais coerentes. Essa condição provavelmente representou com maior fidelidade às condições reais de rigidez da estrutura do pavimento.

Uma descoberta importante foi relacionada à camada de sub-base do pavimento. Nas análises considerando todas as camadas aderidas, os resultados obtidos para a camada de sub-base foram consistentemente inferiores aos valores esperados nas estacas E287 e E297. Isso levantou preocupações sobre a integridade estrutural da camada, sugerindo a necessidade de intervenções específicas para melhorar sua resistência e investigações mais profundas para a identificação dos possíveis agentes de degradação que estão atuando na estrutura.

Além disso, nas condições de revestimento e base aderidos, um destaque foi observado na estaca 287 na condição 4. Igualmente à condição 1, os resultados obtidos para a estaca 287 se mostraram coerentes com a ordem de grandeza esperada.

Vale salientar que à medida que as condições de análise foram sendo estabelecidas, com a inferência de recapeamentos executados em outras fases da vida da estrutura, houve o acréscimo de camadas de análise no BackMedina. Estes acréscimos tornaram as interações mais longas, com isto nas análises realizadas nas condições 3 e 6 os cálculos não convergiram, mesmo após horas. Diante disso, tais análises foram interrompidas a medida em que não se observava alterações significativas nos valores dos módulos de resiliência ao longo do passar do tempo.

É importante reconhecer que a subsidência pode ser uma das razões por trás dos baixos módulos obtidos, no entanto, é crucial enfatizar que, atualmente, não dispomos de elementos suficientes para afirmar com exatidão uma relação direta entre a subsidência e esses resultados. A complexidade subsidência requer uma investigação mais aprofundada e análises adicionais para determinar com precisão qualquer correlação subjacente.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho se propôs a analisar o comportamento estrutural em pavimentos submetidos ao afundamento do subleito, mediante análise das características das bacias de deflexões e das respostas do pavimento oriundas da avaliação estrutural. O estudo buscou estabelecer uma correlação entre esses MR e as condições estruturais do pavimento, com foco particular na investigação da relação entre a subsidência e a degradação do pavimento.

A investigação das camadas da estrutura do pavimento por meio de sondagens geotécnicas revelou que a estrutura do pavimento está construída sobre subleito predominantemente arenoso, havendo a presença de camadas de reforço em alguns trechos. Além disso, foram identificadas que as camadas de base e sub-base são compostas por material granular e o revestimento asfáltico com espessuras variando de 5 a 25 centímetros.

A análise dos parâmetros de bacias deflectométricas revelou resultados que sugerem um processo de degradação na estrutura do pavimento. Esse processo de deterioração está refletido nos valores obtidos para SCI (*Surface Curvature Index*), BDI (*Base Damage Index*), BCI (*Base Curvature Index*) e Rc (Raio de Curvatura).

Com relação ao SCI, notavelmente, todos os segmentos homogêneos analisados apresentaram trechos com valores acima do limite de referência citado, indicando degradação do revestimento nestes trechos. Vale ressaltar que os segmentos 3 e 7 se destacaram nesse aspecto, apresentando as maiores extensões com valores significativamente elevados.

Já para os valores de BDI, foi possível identificar que todos os seguimentos homogêneos analisados apresentaram em suas totalidades valores significativamente abaixo do limite de referência citado no estudo, inferindo boas condições da camada de base.

No que diz respeito ao parâmetro BCI, verificou-se que apesar dos valores estarem abaixo do limite de referência nos três segmentos analisados, foi possível visualizar nos gráficos apresentados que estes valores se encontram próximos do limite de referência, refletindo uma tendência de aumento. Vale destacar o comportamento da estaca E178 do segmento homogêneo 4, que apresentou valor de BCI acima do limite. Com isto foi concluir que o subleito está sofrendo degradação, visto a tendência de crescimento verificada nos gráficos e a presença de pontual de valores acima do limite.

Com relação ao Rc, os segmentos 3 e 7 apresentaram as maiores extensões de trechos com $Rc < 100m$, indicando problemas na capacidade da estrutura em distribuir os esforços solicitantes às camadas subjacentes. Contudo, a maior parte das estacas analisadas nos três

segmentos apresentaram valores acima de 100m, indicando boas condições do subleito nestes trechos.

As retroanálises revelaram que as condições de contorno definidas influenciaram sensivelmente nos resultados obtidos. Foi possível verificar que nas condições 1 e 4 os valores de MR obtidos foram baixos, contudo, numa ordem de grandeza esperada para uma estrutura degradada.

À medida que os cenários de recapeamento foram aplicados no BackMedina, os valores de MR alteraram sensivelmente, retornando valores fora do esperado para uma estrutura degradada, como foi possível verificar nas condições 2 e 5, onde foi considerado apenas uma camada de recapeamento. Por fim, nas condições 3 e 6, onde foi considerado duas camadas de recapeamento, a retroanálise não convergiu, sendo interrompida após horas de cálculo à medida que se observou que os valores de MR não sofreram alterações significativas após 2h de retroanálise.

Foi possível concluir que a verificação da calibração do equipamento de medição das deflexões é essencial, pois isso ajudaria a entender melhor o comportamento das bacias de deflexões. Com isso, não foi possível afirmar que as anomalias verificadas nas bacias deflectométricas no segmento homogêneo 07 provém de falha de calibração do equipamento ou de condições físicas de degradação.

Embora os resultados obtidos indiquem que a subsidência do solo desempenha um papel relevante na degradação da estrutura, é importante destacar que eles por si só não são suficientes para afirmar que a subsidência é o fator principal responsável pela deterioração do pavimento. Para uma avaliação mais abrangente e precisa, estudos mais detalhados são necessários.

Foi possível concluir que a análise estrutural de um pavimento asfáltico submetido a subsidência é um processo complexo que requer uma abordagem abrangente e que os resultados obtidos são indicativos, mas não conclusivos de que a deterioração da estrutura está diretamente relacionada com a subsidência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAVIK, A; TALVIK, O. **Use of falling weight deflectometer (FWD) measurement data for pavement structural evaluation and repair design.** Faculty of Environmental Engineering: The 7th International Conference, Lithuania, 2008.

AMARANTE, A. **Infraestrutura e crescimento econômico regional: o efeito da pavimentação de rodovias interestaduais sobre a atividade econômica municipal na Região Sul do Brasil.** Revista Catarinense De Economia, 1(1), 28-51. 2017. <https://doi.org/10.54805/RCE.2527-1180.v1.n1.4>. Acesso em 10 de setembro de 2023.

ANDRADE, L.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L. B. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS POR MEIO DE ADOÇÃO DE PARÂMETROS DE BACIA DE DEFLEXÃO.** XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (XXX ANPET) Rio de Janeiro/RJ - Brasil. 2016. <https://www.researchgate.net/publication/324653347>. Acesso em 10 de setembro de 2023.

ANDRADE, M. O.; MAIA, M. L. A.; NETO, O. C. da C. L. **Impactos de investimentos em infraestruturas rodoviárias sobre o desenvolvimento regional no Brasil - possibilidades e limitações.** TRANSPORTES, 23(3), 90–99. 2015. <https://doi.org/10.14295/transportes.v23i3.797>. Acesso em 10 de setembro de 2023.

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

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica Formação Básica para Engenheiros.** PETROBRAS, ABEDA, 2ª edição, Rio de Janeiro, 2022.

BERTOLLO, S. A. M. **Considerações Sobre a Gerência de Pavimentos Urbanos em Nível de Rede.** 1997. 211 páginas. Dissertação para obtenção de Título de Mestre em Transportes – Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.

FRANCO, F. A. C. de P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração do método mecanístico – empírico de dimensionamento de pavimento asfálticos.** Convênio UFRJ/DNIT, Projeto DNIT TED nº682/2014. Rio de Janeiro, 2020.

HORAK, E. **Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters**. Journal of the South African Inst. of Civil Eng. v50, n.2. p. 2-9. 2008.

IPR – INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, **Manual de Gerência de Pavimentos – Publicação IPR 745**, DNIT, 2011.

IPR – INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, **Manual de restauração de Pavimentos Asfálticos – Publicação IPR 720**, DNIT, 2006.

KIM, Y. R. **Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Data for Pavement Strength Estimation**. No. FHWA/NC/2002-006. Department of Civil Engineering North Carolina State University Raleigh. 2002.

FILHO, J. C. **Avaliação funcional e estrutural de um trecho experimental em pavimento rígido: Estudo de caso BR-101/NE Lote 05-PB – Obra de Duplicação**. 2011. 234 páginas. Dissertação para obtenção de Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental– Universidade Federal de Campina Grande – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande.

FREIRE, R. A. *et al.* **Rational design method for bituminous pavements reinforced by geogrid, Geotextiles and Geomembranes**, Volume 51, Issue 5, 2023, Pages 39-52, ISSN 0266-1144, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.04.008>.

_____. DEPARTAMENTO ESTRADAS DE RODAGEM (DER). **IP-DE-P00/003 – Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimento**, São Paulo, 2006.

_____. DNER-PRO 011/79. **Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – Procedimento B**. Rio de Janeiro, 1996. 4 p.

_____. DNIT-PRO 440/2023. **Pavimentação – Levantamento funcional e estrutural contínuo de pavimentos utilizando um equipamento móvel - Procedimento**. Distrito Federal, 2023. 14 p.

NOBREGA, E. S. **Comparação entre Métodos de Retroanálise em Pavimentos Asfálticos**. 2003. 384 páginas. Tese para obtenção de Título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

APÊNDICE A – MAPA DE SITUAÇÃO



VIRTUS IMPAVIDA
UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO

Legenda

— Estacas

— Local de estudo

UNIDADE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA

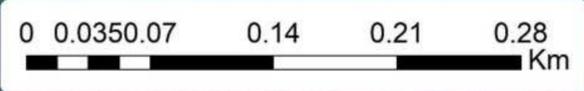
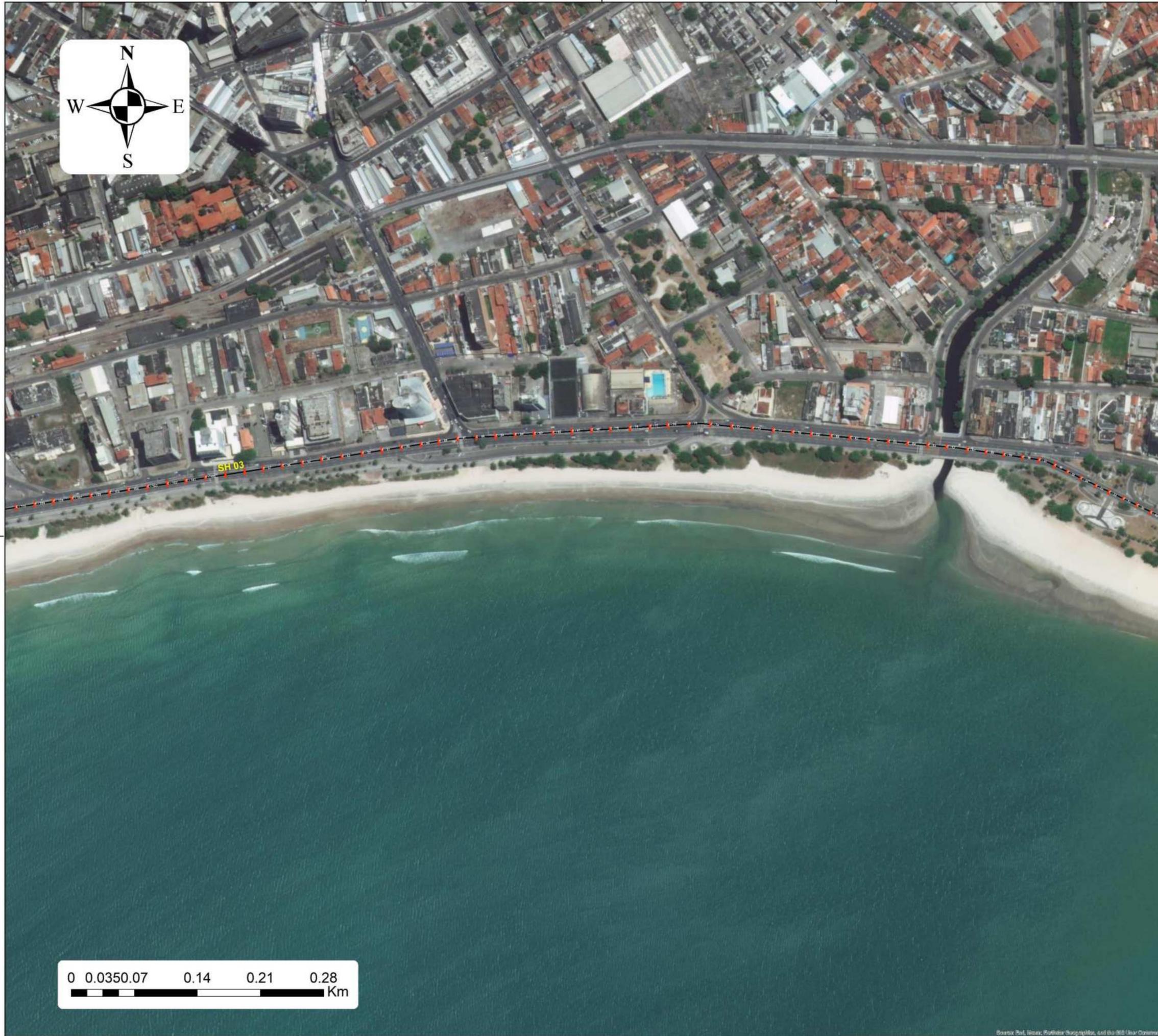
ASSUNTO: MAPA DE SITUAÇÃO

DATA:

PRANCHA: P01 / P06

Setembro/2023

ESCALA: 1:2.000



Legenda

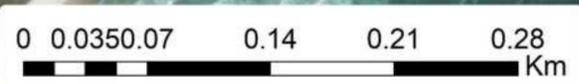
- Estacas
- Local de estudo

UNIDADE:		UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
ASSUNTO:	MAPA DE SITUAÇÃO	DATA: Setembro/2023
PRANCHA:	P02 / P06	
ESCALA:	1:2.000	



Legenda

- Estacas
- Local de estudo



UNIDADE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA	
ASSUNTO: MAPA DE SITUAÇÃO	DATA: Setembro/2023
PRANCHA: P04 / P06	
ESCALA: 1:2.000	

Source: Prof. Marco Estrela Geographica, and Rio Old Line Community



VIRTUS IMPAVIDA
UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO

Legenda

— Estacas

— Local de estudo

0 0.0350.07 0.14 0.21 0.28
Km

UNIDADE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO -
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA

ASSUNTO: MAPA DE SITUAÇÃO

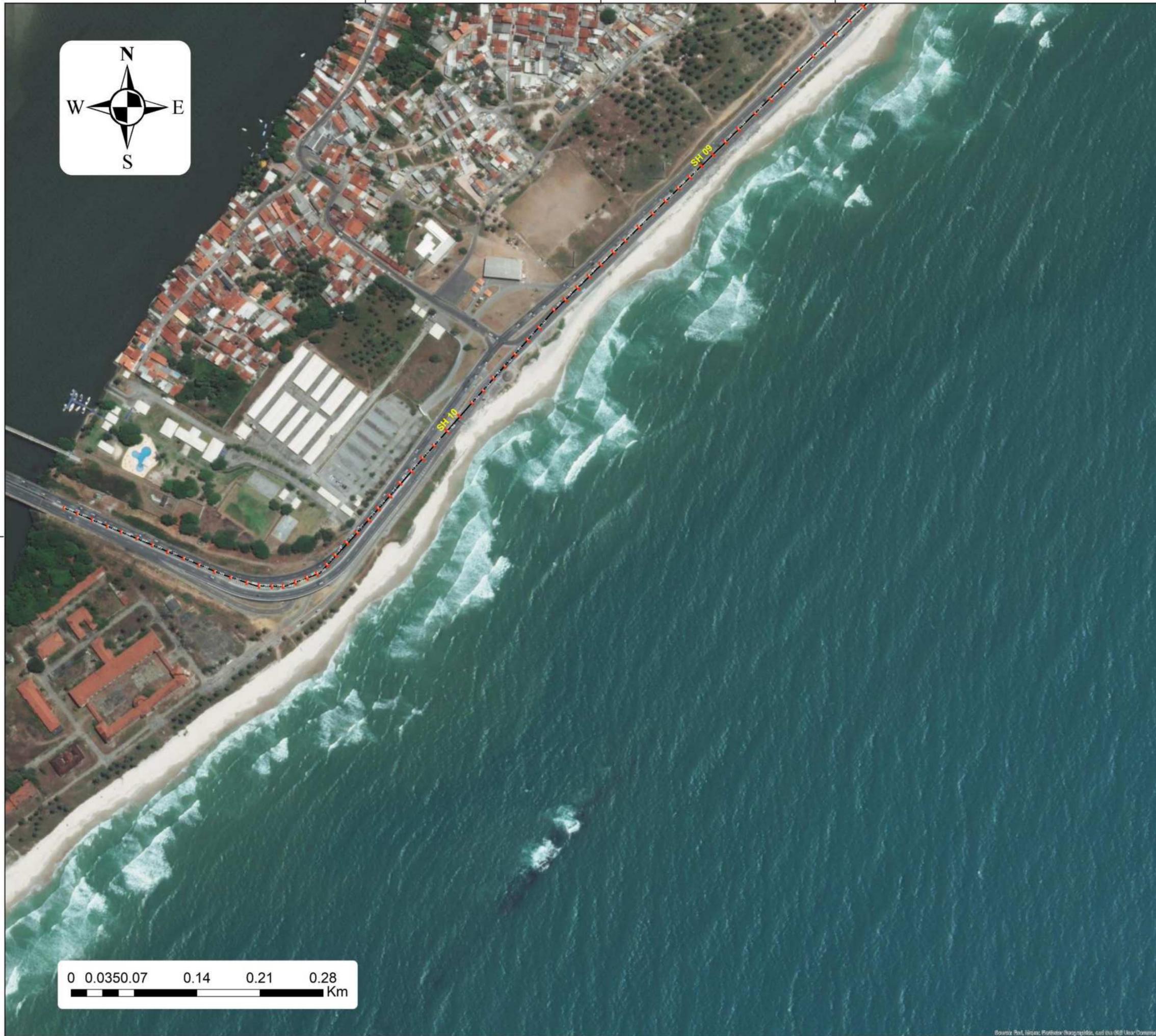
DATA:

PRANCHA: P01 / P06

Setembro/2023

ESCALA: 1:2.000

Source: Intel, Intel, Esri/DeLorme, and the OpenStreetMap community



Source: Intel, Intel, Esri/ArcGIS, and the OpenStreetMap Community



Legenda

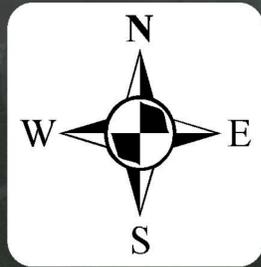
- Estacas
- Local de estudo



UNIDADE:	UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA	
ASSUNTO:	MAPA DE SITUAÇÃO	DATA:
PRANCHA:	P06 / P06	Setembro/2023
ESCALA:	1:2.000	

Source: Intel, Intel, Esri/ArcGIS, and the OpenStreetMap Community

**APÊNDICE B – LOCAÇÃO DAS SONDAGENS POR DIVISÃO DE SEGMENTOS
HOMOGÊNOS**

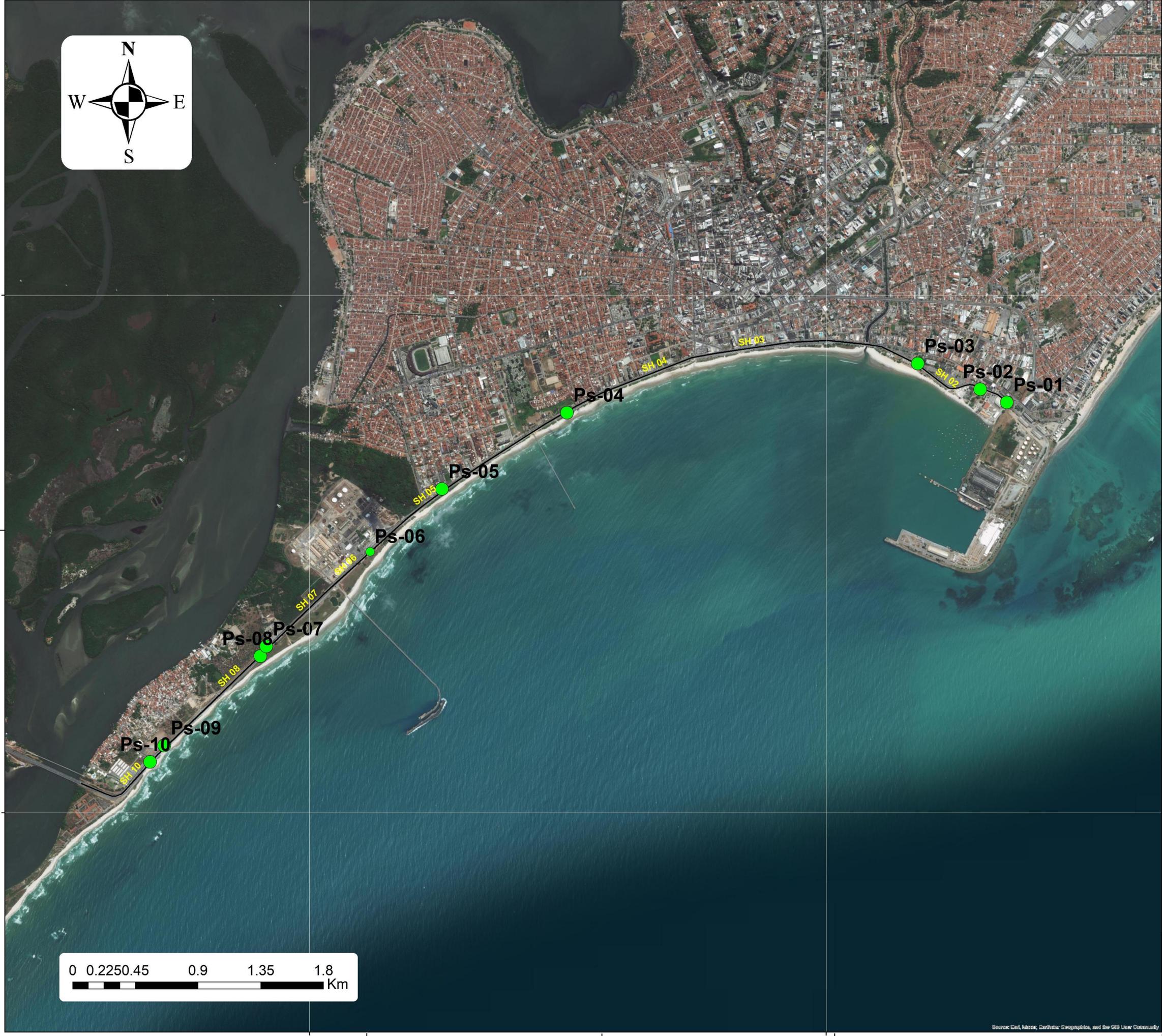


9°40'0"S

35 46 0 W

35 44 0 W

9°42'0"S



Legenda

— Local de estudo

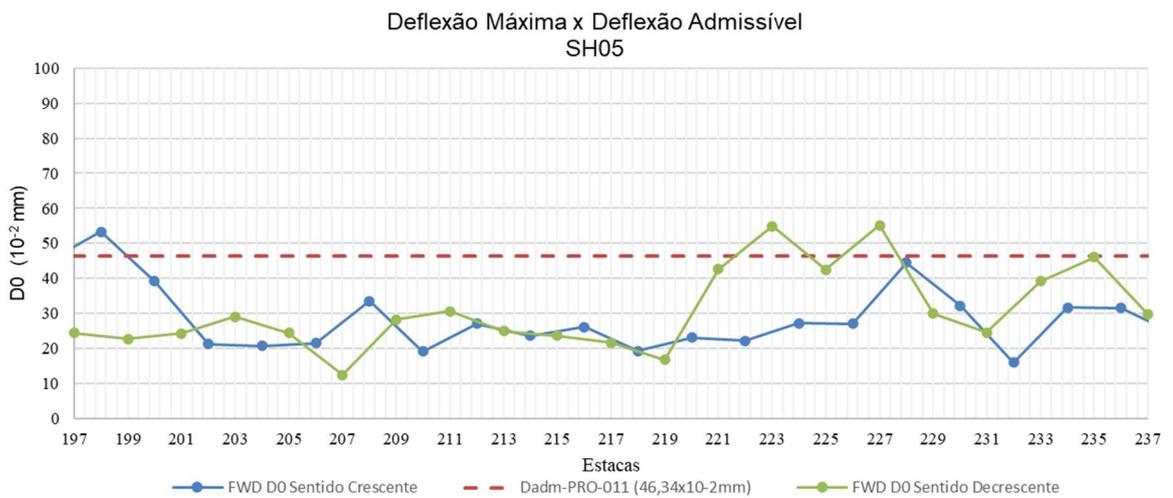
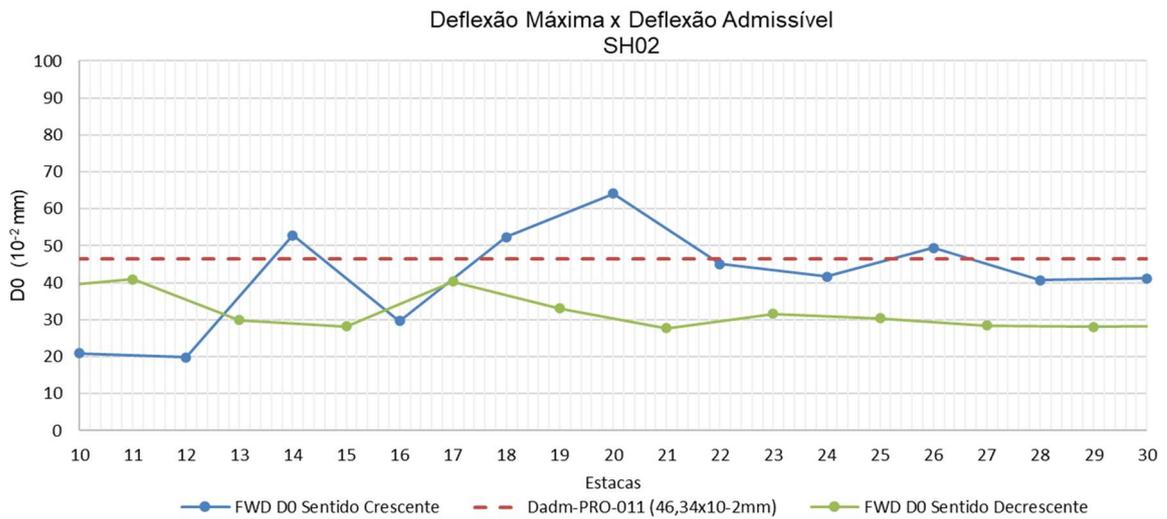
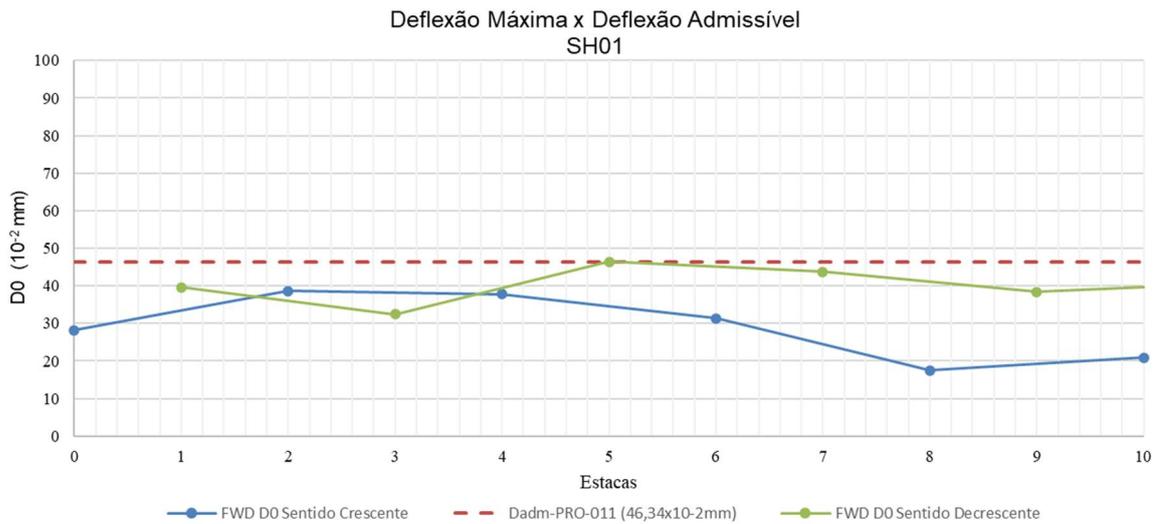
● Localização de Sondagem



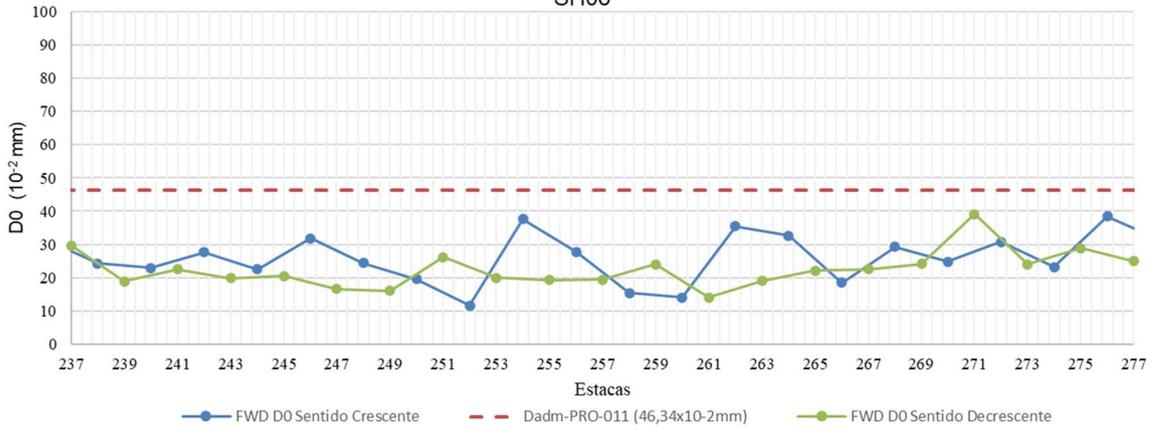
UNIDADE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA	
ASSUNTO: LOCAÇÃO DE SONDAAGEM	DATA: Setembro/2023
PRANCHA: ARRANJO GERAL	
ESCALA: 1:10.000	

Source: Esri, DeLorme, Garmin, Geoposition, and the GIS User Community

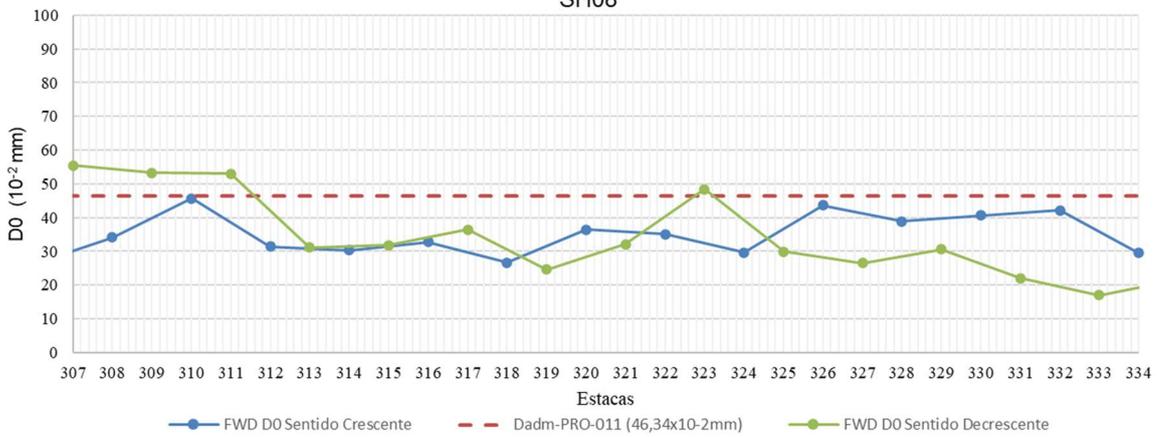
APÊNDICE C – GRÁFICOS DE DEFLEXÕES MÁXIMAS DEMAIS SEGMENTO



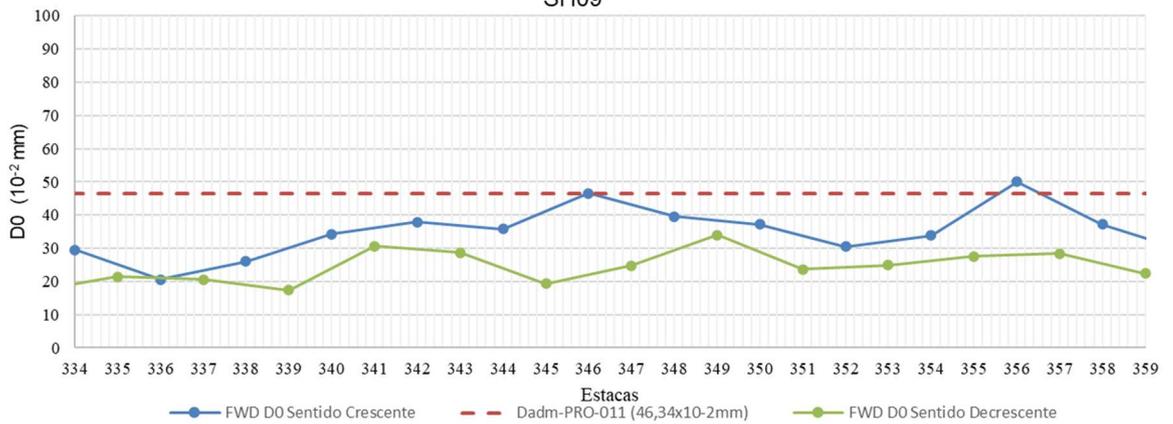
Deflexão Máxima x Deflexão Admissível
SH06



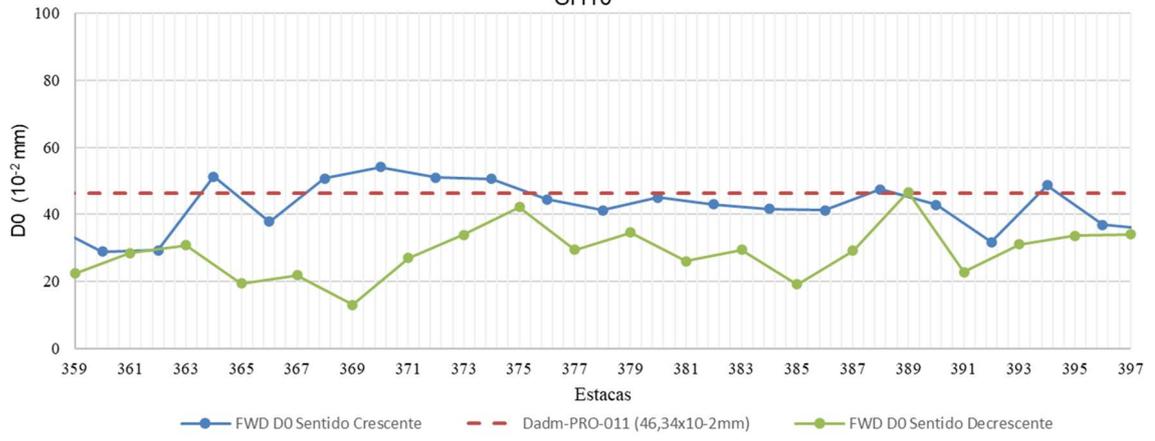
Deflexão Máxima x Deflexão Admissível
SH08



Deflexão Máxima x Deflexão Admissível
SH09

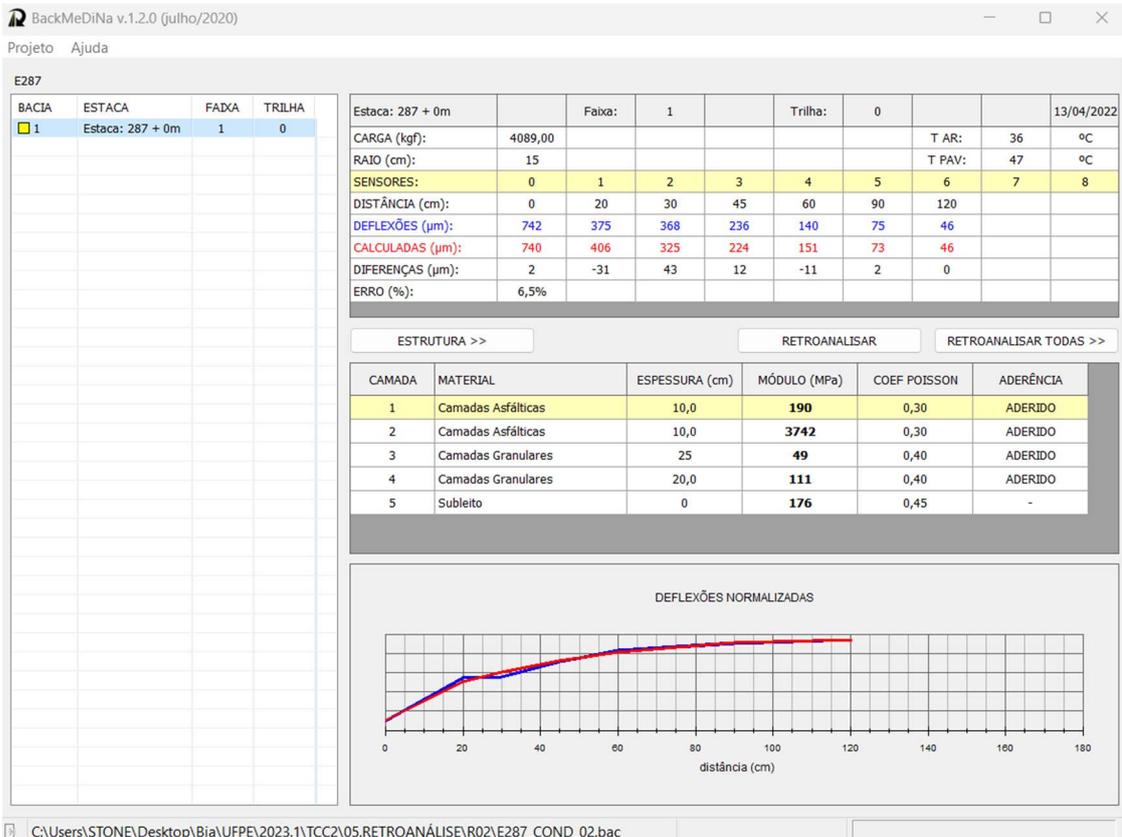
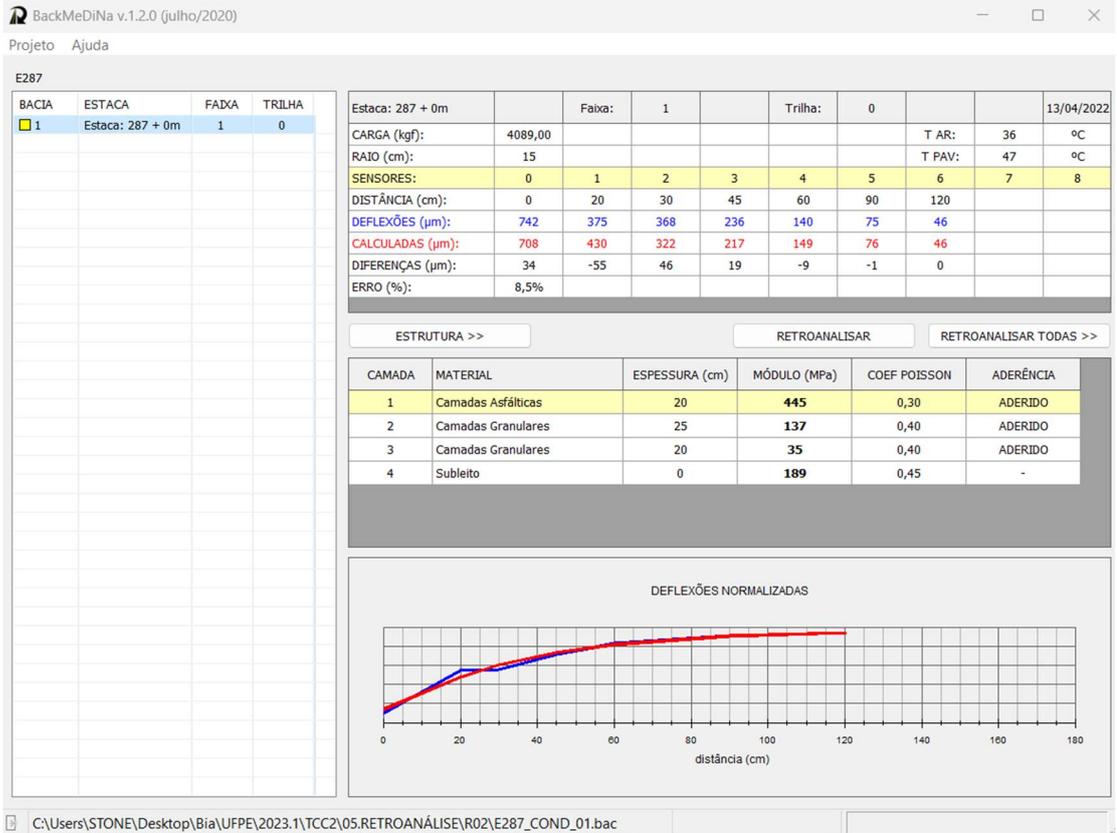


Deflexão Máxima x Deflexão Admissível
SH10



APÊNDICE D – RETROANÁLISES BACKMEDINA

- Estaca 287 – Condições 01 a 06



E287

BACIA	ESTACA	FAIXA	TRILHA
<input type="checkbox"/> 1	Estaca: 287 + 0m	1	0

Estaca: 287 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0			13/04/2022
CARGA (kgf):	4089,00						T AR:	36	°C
RAIO (cm):	15						T PAV:	47	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	742	375	368	236	140	75	46		
CALCULADAS (µm):	677	435	333	220	146	72	47		
DIFERENÇAS (µm):	65	-60	35	16	-6	3	-1		
ERRO (%):	8,5%								

ESTRUTURA >>> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	5	491	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	5	472	0,30	ADERIDO
3	Camadas Asfálticas	10,0	875	0,30	ADERIDO
4	Camadas Granulares	25	68	0,40	ADERIDO
5	Camadas Granulares	20,0	71	0,40	ADERIDO
6	Subleito	0	174	0,45	-



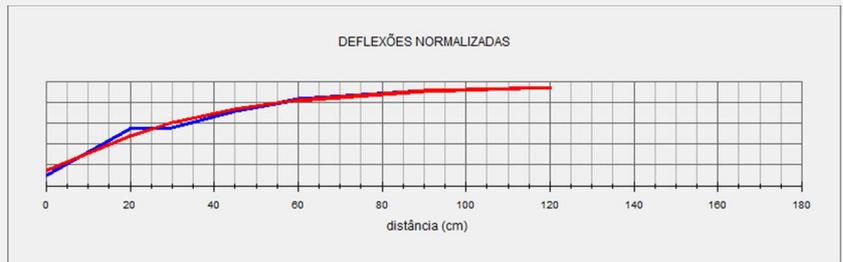
E287

BACIA	ESTACA	FAIXA	TRILHA
<input checked="" type="checkbox"/> 1	Estaca: 287 + 0m	1	0

Estaca: 287 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0			13/04/2022
CARGA (kgf):	4089,00						T AR:	36	°C
RAIO (cm):	15						T PAV:	47	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	742	375	368	236	140	75	46		
CALCULADAS (µm):	703	431	323	217	148	75	46		
DIFERENÇAS (µm):	39	-56	45	19	-8	0	0		
ERRO (%):	8,4%								

ESTRUTURA >>> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	20	465	0,30	ADERIDO
2	Camadas Granulares	25	126	0,40	NÃO ADERIDO
3	Camadas Granulares	20,0	112	0,40	NÃO ADERIDO
4	Subleito	0	190	0,45	-



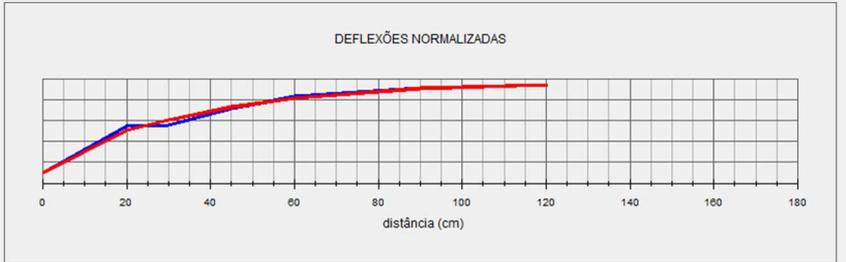
E287

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
1	Estaca: 287 + 0m	1	0

Estaca: 287 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0			13/04/2022
CARGA (kgf):	4089,00						T AR:	36	°C
RAIO (cm):	15						T PAV:	47	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	742	375	368	236	140	75	46		
CALCULADAS (µm):	741	410	323	222	151	75	46		
DIFERENÇAS (µm):	1	-35	45	14	-11	0	0		
ERRO (%):	6,9%								

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	10,0	204	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	10,0	2189	0,30	ADERIDO
3	Camadas Granulares	25	105	0,40	NÃO ADERIDO
4	Camadas Granulares	20,0	154	0,40	NÃO ADERIDO
5	Subleito	0	182	0,45	-



C:\Users\STONE\Desktop\Bia\UFPE\2023.1\TCC2\05.RETROANÁLISE\R02\E287_COND_05.bac

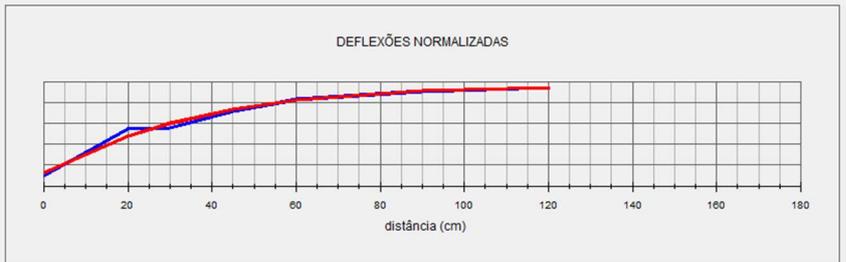
E287

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
1	Estaca: 287 + 0m	1	0

Estaca: 287 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0			13/04/2022
CARGA (kgf):	4089,00						T AR:	36	°C
RAIO (cm):	15						T PAV:	47	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	742	375	368	236	140	75	46		
CALCULADAS (µm):	720	428	330	217	144	72	48		
DIFERENÇAS (µm):	22	-53	38	19	-4	3	-2		
ERRO (%):	7,8%								

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	5	199	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	5	719	0,30	ADERIDO
3	Camadas Asfálticas	10,0	957	0,30	NÃO ADERIDO
4	Camadas Granulares	25	127	0,40	NÃO ADERIDO
5	Camadas Granulares	20,0	174	0,40	NÃO ADERIDO
6	Subleito	0	178	0,45	-



C:\Users\STONE\Desktop\Bia\UFPE\2023.1\TCC2\05.RETROANÁLISE\R02\E287_COND_06.bac

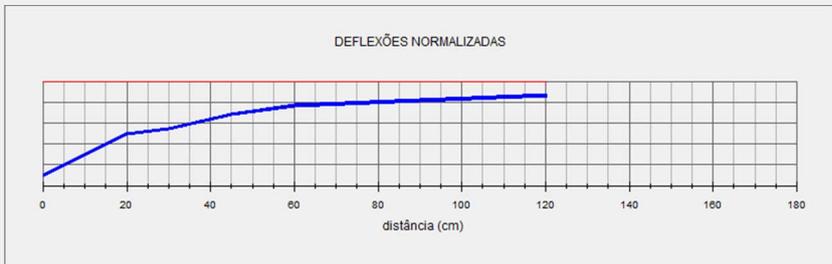
E294

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
<input type="checkbox"/> 1	Estaca: 294 + 0m	1	0

Estaca: 294 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0			13/04/2022
CARGA (kgf):	4101,00							T AR:	33 °C
RAIO (cm):	15							T PAV:	42 °C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	292	163	147	103	75	59	43		
CALCULADAS (µm):									
DIFERENÇAS (µm):									
ERRO (%):	100,0%								

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	5	2000	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	5	2000	0,30	ADERIDO
3	Camadas Asfálticas	10,0	2000	0,30	ADERIDO
4	Camadas Granulares	25	400	0,40	ADERIDO
5	Camadas Granulares	20,0	300	0,40	ADERIDO
6	Subleito	0	50	0,45	-



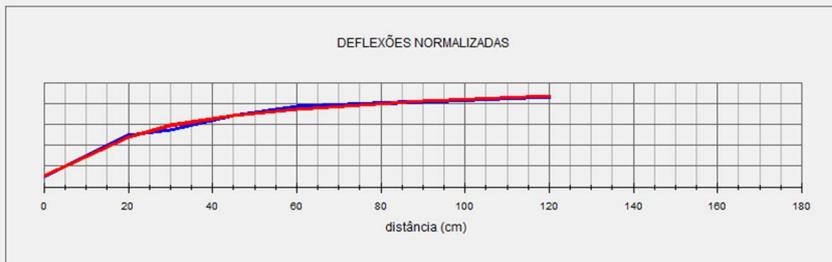
E294

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
<input checked="" type="checkbox"/> 1	Estaca: 294 + 0m	1	0

Estaca: 294 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0			13/04/2022
CARGA (kgf):	4101,00							T AR:	33 °C
RAIO (cm):	15							T PAV:	42 °C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	292	163	147	103	75	59	43		
CALCULADAS (µm):	290	171	133	102	82	58	42		
DIFERENÇAS (µm):	2	-8	14	1	-7	1	1		
ERRO (%):	5,5%								

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	20	912	0,30	ADERIDO
2	Camadas Granulares	25	477	0,40	NÃO ADERIDO
3	Camadas Granulares	20,0	7176	0,40	NÃO ADERIDO
4	Subleito	0	243	0,45	-



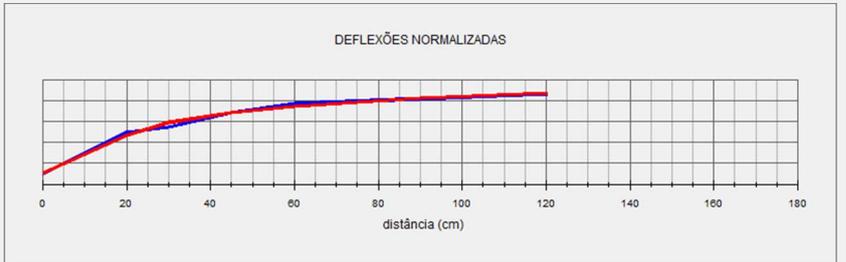
E294

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
1	Estaca: 294 + 0m	1	0

Estaca: 294 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0				13/04/2022
CARGA (kgf):	4101,00							T AR:	33	°C
RAIO (cm):	15							T PAV:	42	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120			
DEFLEXÕES (µm):	292	163	147	103	75	59	43			
CALCULADAS (µm):	289	172	133	102	83	58	42			
DIFERENÇAS (µm):	3	-9	14	1	-8	1	1			
ERRO (%):	5,9%									

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	10,0	1089	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	10,0	643	0,30	ADERIDO
3	Camadas Granulares	25	599	0,40	NÃO ADERIDO
4	Camadas Granulares	20,0	4616	0,40	NÃO ADERIDO
5	Subleito	0	243	0,45	-



C:\Users\STONE\Desktop\Bia\UFPE\2023.1\TCC2\05.RETROANÁLISE\R02\E294_COND_05.bac

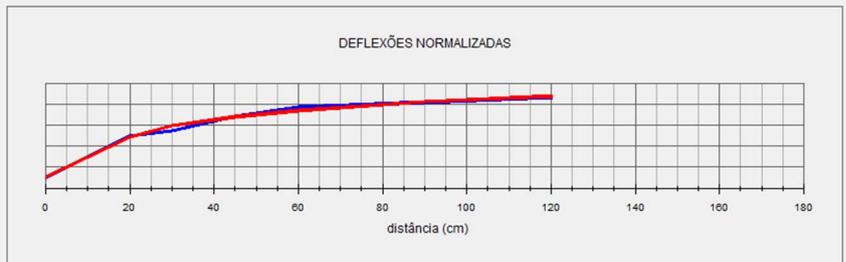
E294

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
1	Estaca: 294 + 0m	1	0

Estaca: 294 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0				13/04/2022
CARGA (kgf):	4101,00							T AR:	33	°C
RAIO (cm):	15							T PAV:	42	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120			
DEFLEXÕES (µm):	292	163	147	103	75	59	43			
CALCULADAS (µm):	290	167	132	104	84	57	40			
DIFERENÇAS (µm):	2	-4	15	-1	-9	2	3			
ERRO (%):	6,9%									

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>

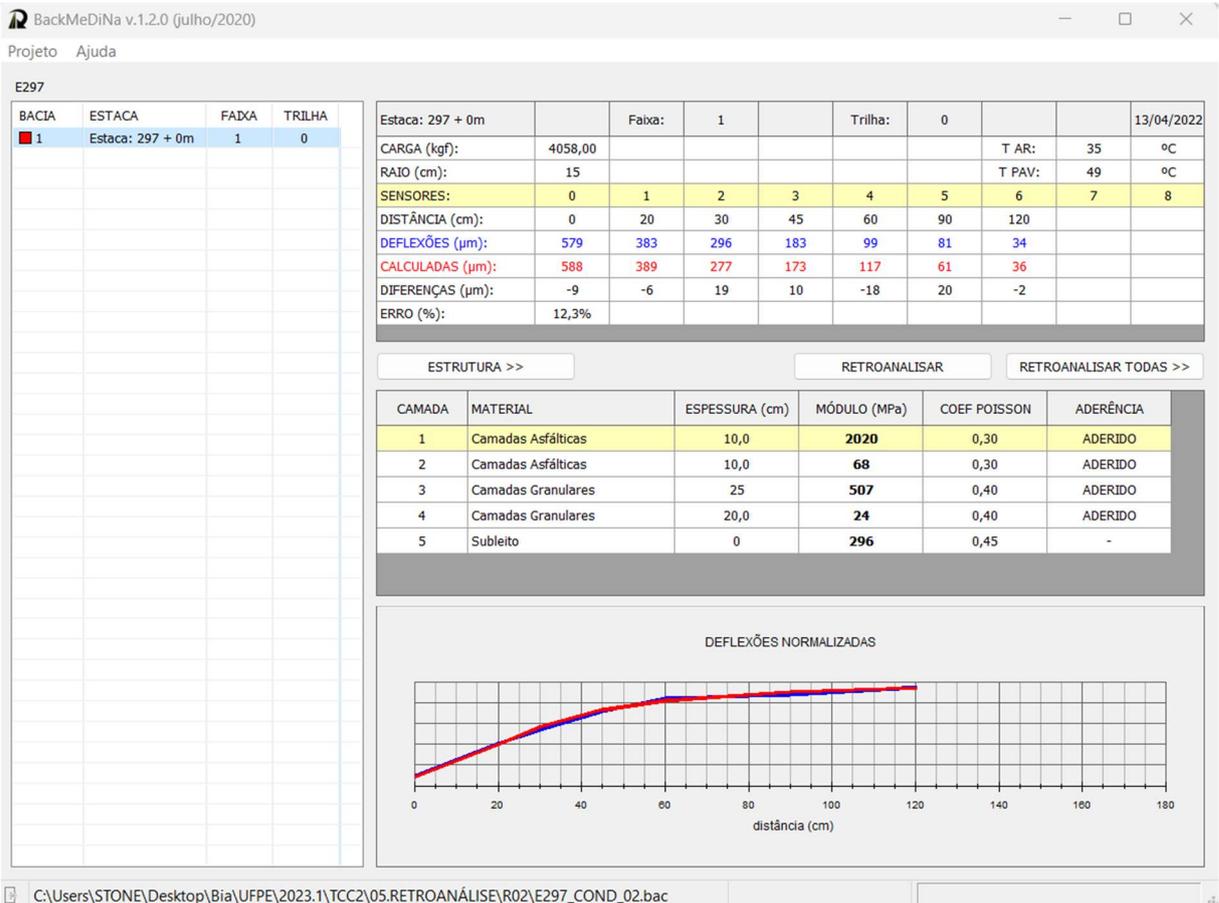
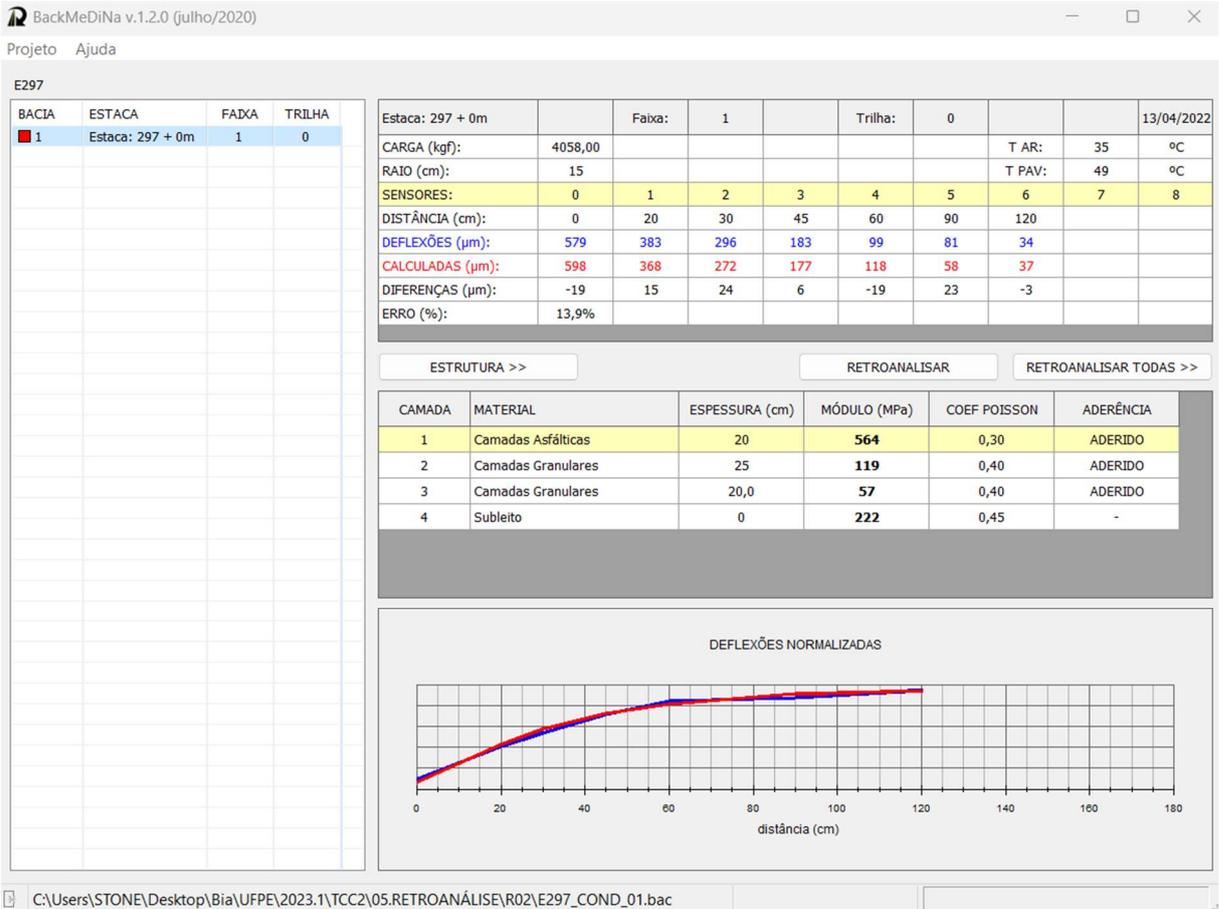
CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	5	1165	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	5	494	0,30	ADERIDO
3	Camadas Asfálticas	10,0	1150	0,30	NÃO ADERIDO
4	Camadas Granulares	25	1387	0,40	NÃO ADERIDO
5	Camadas Granulares	20,0	3173	0,40	NÃO ADERIDO
6	Subleito	0	243	0,45	-



C:\Users\STONE\Desktop\Bia\UFPE\2023.1\TCC2\05.RETROANÁLISE\R02\E294_COND_06.bac

7h 38m 21,2s

- Estaca 297 – Condições 01 a 06



E297

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
1	Estaca: 297 + 0m	1	0

Estaca: 297 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0			13/04/2022
CARGA (kgf):	4058,00						T AR:	35	°C
RAIO (cm):	15						T PAV:	49	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	579	383	296	183	99	81	34		
CALCULADAS (µm):	570	388	283	176	113	56	38		
DIFERENÇAS (µm):	9	-5	13	7	-14	25	-4		
ERRO (%):	13,8%								

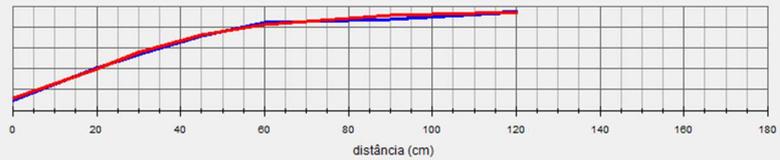
ESTRUTURA >>

RETROANALISAR

RETROANALISAR TODAS >>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	5	3858	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	5	977	0,30	ADERIDO
3	Camadas Asfálticas	10,0	264	0,30	ADERIDO
4	Camadas Granulares	25	70	0,40	ADERIDO
5	Camadas Granulares	20,0	138	0,40	ADERIDO
6	Subleito	0	211	0,45	-

DEFLEXÕES NORMALIZADAS



E297

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
1	Estaca: 297 + 0m	1	0

Estaca: 297 + 0m		Faixa:	1		Trilha:	0			13/04/2022
CARGA (kgf):	4058,00						T AR:	35	°C
RAIO (cm):	15						T PAV:	49	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	579	383	296	183	99	81	34		
CALCULADAS (µm):	595	372	275	177	116	58	37		
DIFERENÇAS (µm):	-16	11	21	6	-17	23	-3		
ERRO (%):	13,4%								

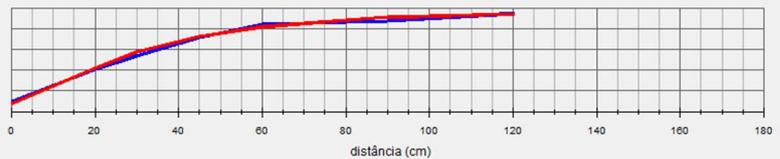
ESTRUTURA >>

RETROANALISAR

RETROANALISAR TODAS >>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	20	616	0,30	ADERIDO
2	Camadas Granulares	25	87	0,40	NÃO ADERIDO
3	Camadas Granulares	20,0	1758	0,40	NÃO ADERIDO
4	Subleito	0	221	0,45	-

DEFLEXÕES NORMALIZADAS



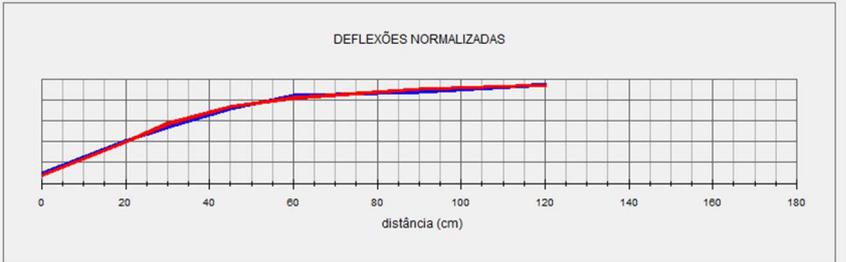
E297

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
1	Estaca: 297 + 0m	1	0

Estaca: 297 + 0m		Faixa: 1		Trilha: 0					13/04/2022
CARGA (kgf):	4058,00							T AR:	35 °C
RAIO (cm):	15							T PAV:	49 °C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	579	383	296	183	99	81	34		
CALCULADAS (µm):	592	390	276	171	117	63	35		
DIFERENÇAS (µm):	-13	-7	20	12	-18	18	-1		
ERRO (%):	11,5%								

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	10,0	2075	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	10,0	53	0,30	ADERIDO
3	Camadas Granulares	25	1021	0,40	NÃO ADERIDO
4	Camadas Granulares	20,0	28	0,40	NÃO ADERIDO
5	Subleito	0	441	0,45	-



E297

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA
1	Estaca: 297 + 0m	1	0

Estaca: 297 + 0m		Faixa: 1		Trilha: 0					13/04/2022
CARGA (kgf):	4058,00							T AR:	35 °C
RAIO (cm):	15							T PAV:	49 °C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	579	383	296	183	99	81	34		
CALCULADAS (µm):	605	388	272	167	111	60	39		
DIFERENÇAS (µm):	-26	-5	24	16	-12	21	-5		
ERRO (%):	13,0%								

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	5	1931	0,30	ADERIDO
2	Camadas Asfálticas	5	1302	0,30	ADERIDO
3	Camadas Asfálticas	10,0	112	0,30	ADERIDO
4	Camadas Granulares	25	193	0,40	NÃO ADERIDO
5	Camadas Granulares	20,0	181	0,40	NÃO ADERIDO
6	Subleito	0	231	0,45	-

