AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRRESTES ANTT

RECURSO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO RDT:

DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS E RELAÇÃO CAMPO-LABORATÓRIO

RELATÓRIO FINAL

Nova Lima/MG, Setembro de 2017.

RECURSO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO RDT
DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS E RELAÇÃO CAMPO-LABORATÓRIO

RESUMO: Apresenta-se o projeto de Recurso de Desenvolvimento Tecnológico (RDT), que tem por objetivo analisar o comportamento e desempenho dos pavimentos da Via040 (Brasília/DF a Juiz de Fora/MG). Por meio de análises de resultados de monitorações e ensaios de campo e laboratoriais busca-se implantar um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) calibrado para fornecer previsões de deterioração consistentes com o desempenho dos pavimentos. As rodovias com características similares, que interceptam ou não a Via040, implantadas ou planejadas, também serão favorecidas, pois as informações contidas no Banco de Dados e as análises de desempenho poderão ser utilizadas como referência para elaboração de estudos e projetos. Para tal aproveitamento foram selecionadas Unidades de Amostragem (UAs) que possam abranger vários Segmentos Homogêneos (SHs) da Via040. A melhor compreensão do comportamento dos pavimentos contribuirá para a definição das soluções mais eficazes na aplicação dos recursos disponíveis, em diversos níveis de intervenção, de sorte a responder às necessidades dos usuários, de forma sustentável para preservação e melhoria da qualidade ambiental. Assim, o projeto busca alcançar retornos positivos para a sociedade e para o meio ambiente, devido à maior compreensão do comportamento dos pavimentos, à melhoria do processo da gestão e do processo decisório e ao aperfeiçoamento de pessoal.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos, Monitorações, Ensaios, Desempenho, Gerência.

RESOURCES FOR TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT (RDT)
PERFORMANCE OF PAVEMENTS AND FIELD-LABORATORY RELATIONSHIP

ABSTRACT: This paper presents RDT project, which intends to analyze behavior and performance of Via040's pavements (from Brasília/Federal District to Juiz de Fora/Minas Gerais). Through field investigations, laboratory testing and analysis of monitoring results, a Pavement Management System (PMS) will be calibrated. This system aims to provide predicting deterioration consistent with pavements' performance. The highways constructed or planned with similar features to Via040 will also be favored, due to the information contained in the database and to the analysis of performance. Both the information and the analyses could be used as references for studies and designs. For such utilization, Sampling Units (SUs) which are able to comprise several Homogeneous Sections (HSs) of Via040 were selected. A better understanding of pavements' behavior will contribute to the definition of more effective solutions in applying the resources available, at various levels of intervention. By these means, the project aims to meet the needs of users, in a sustainable way for preservation and enhancement of environmental quality. Therefore, RDT project intend to reach positive returns to society and to the environment, insofar as greater understanding of the behavior of pavements, better decision-making processes and personal enhancement are achieved.

KEYWORDS: Pavement, Monitoring, Testing, Performance, Management.

ÍNDICE

I – INTRODUÇÃO 6

II – OBJETIVO 10

III – MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS 11

IV - UNIDADES DE AMOSTRAGEM (UAs) 12

V – ESCOPO DO TRABALHO 14

VI – METODOLOGIA 16

VI.1 - DEFINIÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE 10 UNIDADES DE AMOSTRAGEM (UAS), COMPLEMENTARES ÀS 10 UAS EXISTENTES 16

VI.1.1 - SELEÇÃO DE TRECHOS HOMOGÊNEOS 16

VI.1.2 - DEFINIÇÃO DAS UNIDADES DE AMOSTRAGEM UAS 19

VI.1.3 - ABRANGÊNCIA DAS UNIDADES DE AMOSTRAGEM 22

VI.1.4 - PLACAS DE SINALIZAÇÃO 37

VI.2 - CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO E CONDIÇÃO DO TRECHO EM ANÁLISE 48

VI.2.1 - CONTAGENS VOLUMÉTRICAS E CLASSIFICATÓRIAS 48

VI.2.2 – PESAGEM ESTATÍSTICA 81

VI.2.3 – LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO 83

VI.2.3.1 – MÉTODO DE LEVANTAMENTO 96

VI.2.3.2 – DADOS DO LVC DA RODOVIA 97

VI.2.3.3 – TUTORIAL VÍDEO REGISTRO 97

VI.3 - ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO 101

VI.4 - CARACTERIZAÇÃO DAS CAMADAS DO PAVIMENTO (ENSAIOS DE CAMPO) 104

VI.4.1 - ANÁLISES DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS 112

VI.4.1.1 - AVALIAÇÃO ESTRUTURAL 112

VI.4.1 – ENSAIOS DE CAMPO REALIZADOS 120

VI.5 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E ENSAIOS DE LABORATÓRIO 121

VI.5.1 – EQUIPAMENTOS 121

VI.5.2 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO 122

VI.5.1 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS 160

VI.6 - PREVISÕES DE DESEMPENHO VERSUS COMPORTAMENTO OBSERVADO 161

VI.6.1 - ANÁLISES DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS 163

VI.6.1.1 - ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA HDM-4 164

VI.6.1.2 - PREVISÃO DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS 164

VI.6.1.3 - ANÁLISES COMPARATIVAS DOS CENÁRIOS DE DESEMPENHO 165

VI.7 - MANUAIS 216

VII - CONCLUSÕES 217

REFERÊNCIAS 218

ANEXOS 224

I – INTRODUÇÃO

A Via040 (Figura 1) trecho com 936,8 km da rodovia BR-040, entre Brasília/DF e Juiz de Fora/MG, interliga duas importantes regiões do país (Sudeste ao Centro Oeste) e se destaca pela relevância estratégica para o desenvolvimento da economia brasileira. Inúmeras empresas nacionais e estrangeiras instaladas às margens da Via040 ou em cidades próximas vêm investindo pesados aportes na ampliação de suas unidades, com geração de empregos diretos e indiretos. A rodovia também faz ligação com outros importantes eixos produtores. Ao elevado volume de tráfego de caminhões, soma-se a movimentação de ônibus e veículos de passeio resultante de transportes de diferentes naturezas, desde negócios até turismo. É de suma importância para o escoamento da produção e transportes diversos, que as condições funcionais e estruturais dos pavimentos da rodovia garantam a agilidade e segurança do tráfego, com baixos custos operacionais dos veículos. Para tanto, é necessária uma gestão dos dados relativos à pavimentação para compreender os mecanismos que governam o comportamento dos pavimentos e desenvolver técnicas e soluções que retornem em resultados positivos para a sociedade e meio ambiente.

Os pavimentos rodoviários representam um valioso patrimônio cuja conservação e restaurações oportunas são essenciais para a sua preservação e para o tráfego de veículos necessários à economia e desenvolvimento do país. A Gerência de Pavimentos constitui-se em uma importante ferramenta de administração, objetivando determinar a forma mais eficaz da aplicação dos recursos disponíveis, em diversos níveis de intervenção, de sorte a responder às necessidades dos usuários dentro de um plano estratégico que garanta a melhor relação Custo x Benefício (IPR-745, 2011). A função do Sistema de Gerência de Pavimentos SGP é aumentar a eficiência das tomadas de decisão, expandir seu escopo, fornecer *feedback* quanto às consequências das decisões, facilitar a coordenação das atividades dentro da organização e assegurar a consistência das decisões tomadas em diferentes níveis de gerência dentro da mesma organização (Gonçalves, 1999). Um pavimento, que é restaurado no momento adequado, poderá exigir apenas uma camada delgada de recapeamento, sobreposta à estrutura atual, sendo de custo relativamente baixo (Visconti, 2000). Entretanto, se restaurado apenas quando este atingir condição mais avançada de solicitação, o pavimento excessivamente deteriorado exigirá serviços cujos custos atingirão valores bastante superiores.

Um aspecto importante da gerência de pavimento é a estruturação de dados da malha rodoviária em um Banco de Dados compatível com um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) que permita a elaboração de avaliações de desempenho do pavimento e econômicas. O Brasil é um dos países pioneiros no desenvolvimento de modelos de comportamento de pavimentos para aplicação em processos gerenciais de malhas viárias. Um dos sistemas de gerência de pavimentos mais utilizado mundialmente, o HDM-4, e que tem sido aceito por entidades internacionais de financiamentos, como o BIRD (Banco Mundial) e BID (Banco Interamericano

de Desenvolvimento), foi desenvolvido, em grande parte, a partir de pesquisas realizadas no Brasil (Norma DNER-PRO 159/85 e GEIPOT, 1982). Os modelos de desempenho pela norma DNER-PRO 159/85 são resultantes da análise do comportamento de algumas seções de pavimentos asfálticos flexíveis e semi-rígidos no Brasil, em fins da década de 1970 até meados da década de 1980. O método estabelece equações para previsão da evolução dos diversos tipos de defeitos ao longo da utilização de um pavimento e permite a proposição de medidas de manutenção (restauração) ao longo dos anos, buscando soluções de menor custo global. Em linhas gerais, esse método, em função dos dados observados em campo (tráfego, deflexão, irregularidade, área de trincas, desgaste etc.), apresenta equações que simulam o comportamento do pavimento ao longo do tempo, que são chamadas de modelos de desempenho.

Os resultados obtidos pela aplicação de tecnologias, técnicas e métodos de domínio próprio da Via040 permitirão a elaboração de avaliações mais consistentes com a condição do pavimento, aumentando a confiabilidade das informações monitoradas e o nível de compreensão da mecânica dos pavimentos. Nesse contexto, a aplicação de equipamentos e metodologias mais modernas podem proporcionar maior qualidade e precisão nas informações contidas num Banco de Dados que alimentarão um sistema de gerência de pavimentos, como por exemplo, o HDM-4, responsável pela elaboração dos cenários de deterioração dos pavimentos por meio de seus modelos de previsão de desempenho.

Os setores técnico e administrativo da concessionária Via040 e o meio técnico-científico em seus diversos níveis serão beneficiados com o desenvolvimento do projeto de RDT, que propõe apresentar um conjunto de dados sobre pavimentação da rodovia BR-040 e a tendência de comportamento dos pavimentos, obtidos por pesquisas e equipamentos, técnicas e métodos modernos voltados para um sistema de gerência de pavimentos (SGP). As rodovias adjacentes, que interceptam ou não a Via040, implantadas ou planejadas, também serão favorecidas, pois as informações contidas no Banco de Dados (série histórica e resultados ensaios, monitorações e levantamentos) e os cenários de desempenho separados por segmentos e Unidades de Amostragem (UAs), sendo representativos das condições dessas rodovias, podem ser utilizados como referência para elaboração de estudos e projetos, desde restauração até implantação de rodovias. A maior compreensão do comportamento dos pavimentos contribuirá na definição das soluções mais eficazes da aplicação dos recursos disponíveis, em diversos níveis de intervenção, de sorte a responder às necessidades dos usuários, de forma sustentável para preservação e melhoria da qualidade ambiental. Assim, haverá retornos positivos para a sociedade e meio ambiente, devido à maior compreensão dos mecanismos que controlam o comportamento dos pavimentos, à maior possibilidade de serem adotadas decisões corretas e ao aperfeiçoamento de pessoal.

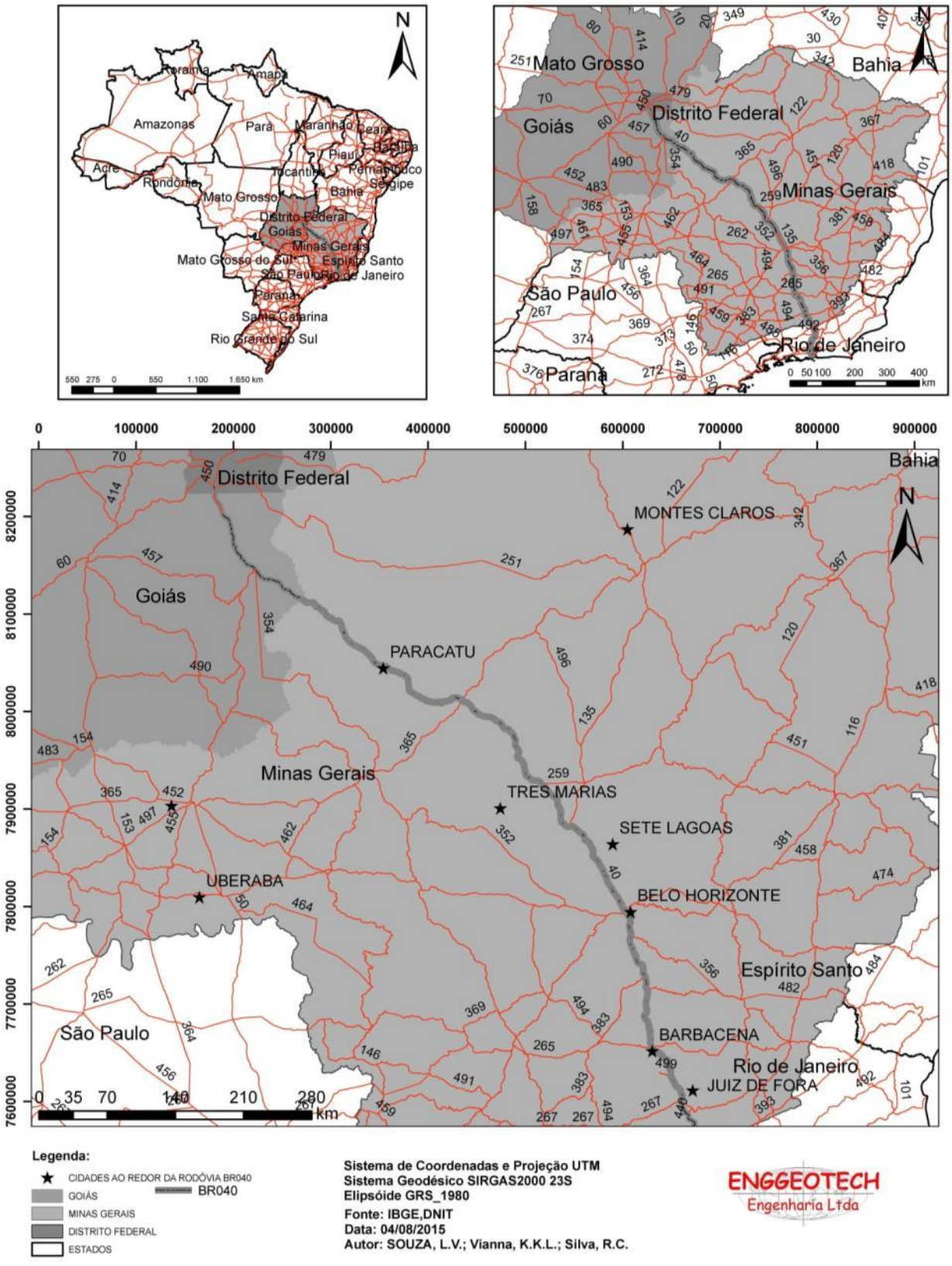


Figura 1 – Mapa de localização da Via040.

Para compreensão do comportamento dos pavimentos é necessário caracterizar a rodovia e os materiais de pavimentação, monitorar as condições dos pavimentos (estrutural e funcional) e avaliar o desempenho do pavimento, comparando com os resultados de algum modelo de previsão de desempenho. Para tanto é necessário desenvolver atividades inerentes a um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), tais como ensaios de campo e laboratoriais, monitorações periódicas e análises de previsão de desempenho. Essas atividades estão intimamente ligadas entre si, cujos resultados são utilizados na alimentação/atualização de um Banco de Dados (BD). No laboratório buscam-se modelos de comportamentos dos materiais frente à aplicação de cargas repetidas, que tentam simular o carregamento atuante no pavimento. Entretanto, em campo esses materiais trabalham em conjunto, formando a estrutura de um pavimento, cuja resposta à ação do tráfego é outra incógnita. A frequência de repetições de cargas nos ensaios não é a mesma que aquela que ocorre em campo, de forma que se faz necessário monitorar o processo de degradação do pavimento para buscar uma relação, ainda que aproximada, entre o laboratório e campo. Assim, os resultados das monitorações contribuem tanto para avaliar o desempenho dos pavimentos ao longo do tempo, como para estabelecer um Fator Laboratório-Campo (FLC). O grau de confiabilidade na previsão de desempenho dos pavimentos ao longo do tempo, obtida por meio de modelos existentes, pode ser melhor avaliado realizando-se análises comparativas entre a condição prevista e a medida. Na pesquisa foi adotado o uso de um sistema de gerência de pavimentos, o HDM-4, que possui modelos de previsão de desempenho com possibilidade de serem calibrados, através de ajustes nos fatores de calibração. O processo de calibração seria algo análogo à retro-análise, na qual se busca ajustar as bacias de deflexão traçadas pelo software de retro-análise com aquelas medidas em campo.

As informações e resultados obtidos por todas essas atividades são estruturadas num Banco de Dados (BD), sendo o mesmo o centro de toda a gerência de pavimento. O BD é uma ferramenta fundamental para orientar os estudos que buscam uma melhor compreensão do comportamento dos pavimentos, ajustes de modelos de previsão de desempenho e estimativas do fator laboratório-campo (FLC). Nesse sentido é importante a identificação espacial e temporal dos dados inclusos no BD. Portanto, os parâmetros devem ser registrados com sua posição em relação ao marco quilométrico e ao sistema de coordenadas global, incluindo a data de obtenção da informação. Tal recurso auxilia nas análises espaço-temporais, fundamentais para calibração dos modelos de previsão de desempenho dos pavimentos e ajustes no fator laboratório-campo (FLC). No ano de 2015 foi montado um BD com informações da série histórica de monitorações realizadas pelo DNER/DNIT (anos: 1997, 1998, 1999, 2001, 2007, 2008, 2011, 2013 e 2014) e Via040 (anos: 2013 2014 e 2015), que continuará sendo alimentado sistematicamente com os resultados de todas as etapas da pesquisa e das campanhas de levantamentos das condições dos pavimentos realizadas anualmente. O Sistema Gerenciador de Dados (SGD) desenvolvido no ano de 2015 é uma ferramenta muito útil para armazenar e organizar dados e para elaborar análises conforme interesse do usuário. Na Figura 2 é apresentado o fluxograma de uso e aplicação do SGD.

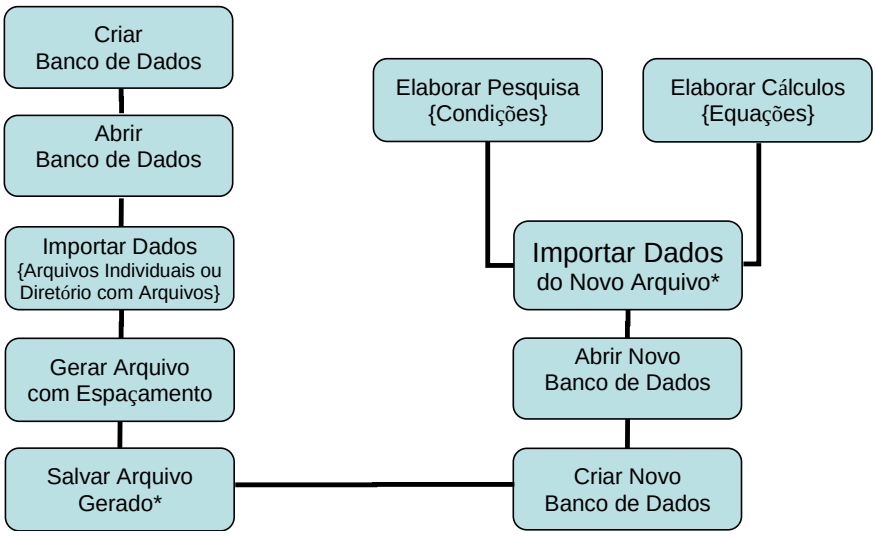


Figura 2 – Fluxograma de uso e aplicação do Sistema Gerenciador de Dados (SGD).

O SGD foi utilizado pela equipe técnica que foi capacitada no ano de 2015, para realizar montagens de Banco de Dados, com as informações dos ensaios e monitorações realizados durante o período previsto para o presente RDT. Através do SGD é possível agrupar os parâmetros obtidos pelos ensaios de campo e laboratório, monitorações e coleta de dados existentes da rodovia, numa estrutura de Banco de Dados compatível com o formato típico dos Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) usuais, tais com o modelo HDM-4. Como as informações são devidamente datadas será possível observar as alterações dos parâmetros que influenciam no comportamento ou desempenho dos pavimentos. Nas UAs foram realizados ensaios e monitorações para obtenção de um Banco de Dados, cujo conteúdo é destinado para elaboração de análises do comportamento e desempenho do pavimento e de estimativa FLC.

II – OBJETIVO

O presente projeto tem como objetivo principal a monitoração das unidades de amostragem que representam os segmentos homogêneos da rodovia, para que a evolução das patologias seja monitorada podendo, assim, ajustar a curva de previsão de desempenho do software HDM-4.

São objetivos específicos do projeto:

•Realização de contagens de tráfego, pesagem estatística e levantamento visual contínuo (método normatizado) e para melhor conhecimento do tráfego atuante nas unidades de amostragem que representam os segmentos homogêneos e monitorar a frequência de surgência de defeitos no pavimento;

•Definição de 10 unidades de amostragem através do método da AASHTO e identificação visual das mesmas em campo (placas de sinalização);

•Execução de campanha de campo para realização de ensaios em loco e coleta de amostras para determinação das características do pavimento e comportamento do mesmo ao longo do tempo;

•Após levantados todos os dados necessários, o software HDM-4 terá seu segundo ponto de calibração concluído. Fazendo com que o software fique mais confiável e seja capaz de informar as curvas de previsão de desempenho com mais precisão.

III – MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

Previsão de desempenho de pavimentos é a quantificação da redução do nível de serventia ou geração de defeitos ao longo de sua vida de serviço (IPR-720, 2006). Na pesquisa de RDT será utilizado o sistema HDM-4 (*Highway Development and Management*) desenvolvido pelo Banco Mundial, que já vem sendo usado há mais de duas décadas, combinando a avaliação técnica e econômica nas redes de rodovias. É uma ferramenta em ambiente *Windows* e este modelo está sendo ampliado consideravelmente, superando as avaliações tradicionais de projetos, proporcionando um potente sistema para análises de gestão de rodovias e das alternativas de investimento.

O programa HDM-4 é formado por quatro sub-modelos que têm funções específicas em cada fase de um processo de gerência de pavimentos: deterioração de rodovias (RD); efeito das intervenções nos trabalhos de manutenção (MIE); efeito sobre os custos dos usuários (RUC); e sócio econômico (SEC).

O sistema modular, com uma interface integrada entre os módulos, possibilita aos usuários a substituição de modelos técnicos inadequados por seus próprios modelos. O HDM-4 é muito eficiente quando é calibrado de acordo com o comportamento do pavimento frente à ação dos agentes externos. A Via040 pretende melhorar a precisão da aplicação do HDM-4, para que as tomadas de decisão sejam mais racionais e, assim, possa atingir as metas de sustentabilidade, através da aplicação de recursos humanos e financeiros e matérias primas em quantidade adequada, sem excessos, antes que o pavimento se aproxime de um grau de deterioração avançado, que exigiria maiores esforços e impactos ambientais.

O HDM-4 será alimentado com os dados existentes organizados no SGD, sendo elaboradas as curvas de desempenho do pavimento das Unidades de Amostragem (UAs). Este será o cenário inicial de desempenho do pavimento. À medida que mais campanhas de monitoração forem realizadas podem-se ajustar as curvas de desempenho. Na Figura 3 exemplifica-se o ajuste da curva de calibração do trincamento de um pavimento, um dos parâmetros que define o tempo de vida útil do pavimento. Na Figura 4 apresentam-se três curvas de progressão de trincamento no pavimento para um mesmo trecho da rodovia. Adotando o critério de intervenção quando o pavimento atingir 40% de trincamento, sendo a curva intermediária a mais adequada, pode haver uma tomada de decisão precoce ou tardia, caso a mesma não seja considerada. Assim, destaca-se a importância da calibração dos modelos para cada cenário onde o mesmo é aplicado, sendo

fundamental em todo o processo de planejamento futuro, uma vez que previsões de desempenho adequadas levarão a diagnósticos acurados e desta forma, alocações de recursos mais confiáveis e estritamente necessários.

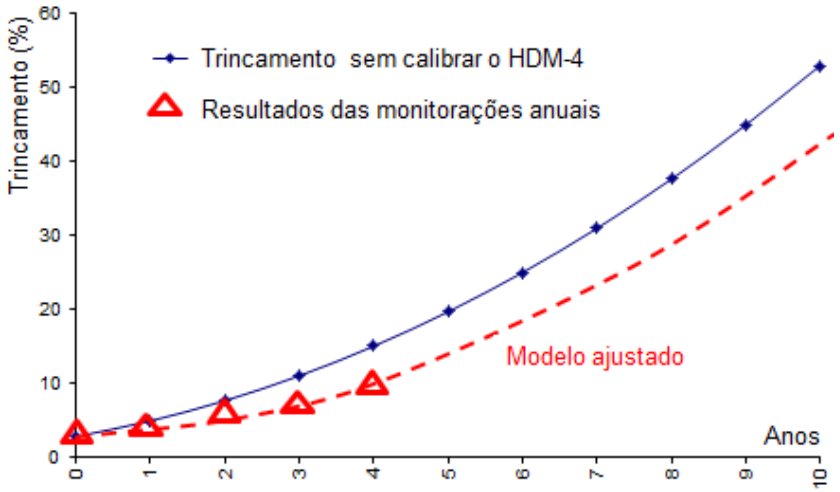


Figura 3 – Calibração de modelos de previsão de desempenho.

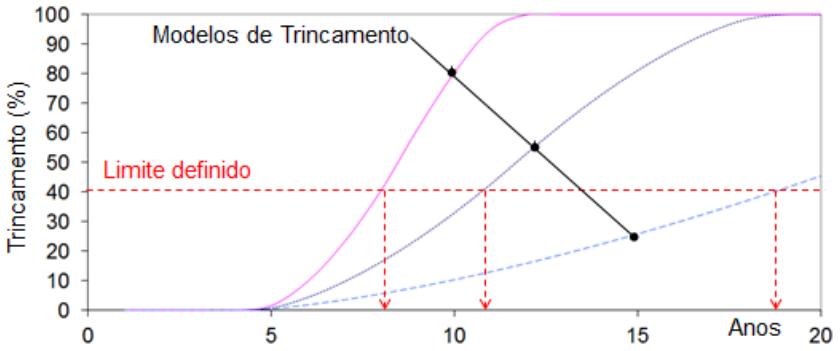


Figura 4 – Tomada de decisão precoce ou tardia em função do uso de modelos inadequados.

IV - UNIDADES DE AMOSTRAGEM (UAs)

As Unidades de Amostragem (UAs) são trechos considerados representativos das características e condições de um conjunto de segmentos homogêneos, que servem para melhorar o nível de compreensão do comportamento do pavimento e, por consequência, calibrar os modelos de previsão de desempenho do HDM-4. Através de uma UA é possível acompanhar a evolução de suas condições funcionais e estruturais ao longo do tempo, havendo uma melhor compreensão dos comportamentos e desempenhos dos pavimentos da Via040. Nas UAs são realizados ensaios e monitorações para obtenção de dados necessários para elaboração de análises do comportamento e desempenho do pavimento e estabelecimento do Fator Laboratório-Campo (FLC). O FLC serve para ajustar a vida de fadiga estimada por ensaios de laboratório às

condições de campo. Segundo Medina e Motta (2015), há que se considerar a repetição de cargas mais espaçadas no campo, permitindo, eventualmente, recuperação por solda parcial das fissuras nas condições mais elevadas de temperatura de campo no Brasil. Há, também, a variabilidade de incidência lateral nas trilhas de roda e o envelhecimento no campo do ligante asfáltico, que enrijece a mistura. Parte do FLC se destina a corrigir a severidade dos ensaios de fadiga, especialmente os de compressão diametral à tensão controlada.

Considerando o tráfego como um dos parâmetros iniciais da hierarquia adotada para a segmentação, tem-se que seriam necessárias no mínimo 20 UAs. O número de UAs poderia ser maior que o apresentado no Plano de Trabalho do RDT apresentado no ano de 2015, entretanto, limitou-se a uma quantidade de 10 UAs para que fosse possível realizar os ensaios de campo e laboratório necessários para as análises, sem comprometer a qualidade das informações e do programa de capacitação técnica. Ainda que não representem todos os segmentos da Via040, as Unidades de Amostragem (UAs), selecionadas para a primeira fase do projeto de RDT (2015), representam uma quantidade e extensão significativa de Segmentos Homogêneos (SHs). Visto que 10 UAs não são suficientes para representação dos segmentos da Via040, a partir de 2016 foram implantadas novas UAs, com base nas informações do Banco de Dados montados com auxílio do SGD. As análises com uso de SIG também foram úteis para definição das novas UAs.

As UAs foram definidas seguindo a mesma linha de raciocínio de Kohler *et al.* (2006) e Albuquerque (2007), a qual faz hierarquização das características e condições da rodovia. A definição das UAs foi realizada através da aplicação do critério de hierarquia na seguinte ordem: Unidade de Federação → Região Climática → Geomorfologia → Tráfego → Deflexão → Trincamento → Estrutura do Pavimento → Afundamento de Trilha de Roda → Irregularidade Longitudinal (IRI). A determinação das UAs foi realizada com auxílio do Sistema Gerenciado de Dados (SGD), executando a função de filtro na Matriz dos Segmentos Homogêneos.

Com base no Banco de Dados existente e através do uso do SGD foram definidas 10 (dez) novas Unidades de Amostragem (UAs). Foram feitas análises para definir quais trechos da rodovia poderiam ser adotados como novas UAs, tendo como critério a abrangência que cada uma possa acrescentar às UAs existentes, garantindo-se, portanto, que as características das novas sejam diferentes das existentes. Um critério importante para a seleção das novas UAs é que as mesmas estivessem dentro do segmento homogêneo em termos de tráfego e geomorfologia. Assim, tem-se 2 UAs por segmento de tráfego. Tal critério é para observar o comportamento de dois trechos com parâmetros funcional e estrutural distintos situados em um mesmo compartimento geomorfológico, com tráfegos iguais. Isso é muito útil para reduzir o número de incógnitas.

É muito importante a materialização das UAs em campo, visto que elas são objeto de monitoração contínua. As UAs têm que ser sinalizadas para evitar que sejam realizadas intervenções sem o conhecimento da equipe do Projeto de RDT. Qualquer acontecimento que possa influenciar nos resultados é importante filtrar. Para tanto, foram implantadas duas placas (sinalização vertical) para cada UA, uma no sentido crescente e outra no sentido decrescente.

Além disso, também foram instalados marcos topográficos no centro de cada UA, sendo as coordenadas obtidas por GPS de navegação.

V – ESCOPO DO TRABALHO

A seguir apresentam-se as atividades que foram desenvolvidas durante a presente pesquisa de Recurso de Desenvolvimento Tecnológico (RDT), conforme indicado no Plano de Trabalho:

Definição e Identificação de 10 Unidades de Amostragem (UAs), complementares às 10 UAs Existentes

- Elaboração de análises mais avançadas para o refinamento da definição dos sub-trechos (segmentos) homogêneos. Na definição dos segmentos homogêneos foram consideradas as informações do tráfego, compartimentos geomorfológicos, estrutura do pavimento (medida com GPR) e parâmetros dos pavimentos que refletem as condições funcional e estrutural.

- Definição de 10 novas UAs com base em critérios aplicados nos resultados da segmentação homogênea. Os trabalhos foram auxiliados pelo software SGD.

Caracterização do Tráfego e Condição do Trecho em Análise

- Contagens volumétricas e classificatórias e pesagem estatística. Foram definidos 10 postos de pesquisas, localizados nas UAs, ou próxima às mesmas. Nos 10 postos de coleta foram aplicadas pesquisas de contagem volumétrica classificada de veículos, durante sete dias consecutivos em jornadas de 24 horas.

Levantamento Visual Contínuo

- Levantamento Visual Contínuo LVC para qualificação e quantificação dos defeitos dos pavimentos, em conformidade também com o padrão de alimentação do modelo HDM-4, incluindo registro de imagens.

Caracterização das Camadas do Pavimento (Ensaios de Campo)

- Resultados e análises dos resultados dos ensaios de campo realizados nos pavimentos das Unidades de Amostragem (UAs).

Equipamentos

- Processo de compras dos equipamentos previstos para elaboração dos Ensaios de Laboratório de Pavimentação.

Ensaios de Laboratório

- Resultados e análises dos resultados dos ensaios de laboratório realizados nos materiais constituintes dos pavimentos das Unidades de Amostragem (UAs).

Alimentação do Sistema HDM-4

- Alimentação do SGD e do modelo HDM-4 com base nos resultados dos estudos das campanhas de ensaios de campo.

Previsão de Desempenho dos Pavimentos e Análises Comparativas com a Monitoração

- Elaboração de projeção do desempenho dos pavimentos das UAs com base no modelo HDM-4 e análises comparativas com os dados provenientes das monitorações de campo.

Manuais

- Elaboração de manuais com a descrição e manuseio dos equipamentos, detalhes dos ensaios e padronização de todas as etapas envolvidas nas atividades, sejam de campo ou laboratório

VI – METODOLOGIA

As metodologias empregadas nos trabalhos desenvolvidos durante a pesquisa de Recurso de Desenvolvimento Tecnológico (RDT) são apresentadas a seguir. Os resultados são apresentados a seguir, por tópicos.

– Definição e identificação de 10 Unidades de Amostragem (UAs), complementares às 10 UAs existentes
– Caracterização do tráfego e condição do trecho em análise
– Análise e tratamento dos dados de caracterização do tráfego
– Caracterização das camadas do pavimento (ensaios de campo)
– Preparação das amostras e ensaios de laboratório
– Previsões de Desempenho versus Comportamento Observado
– Manuais

VI.1 - DEFINIÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE 10 UNIDADES DE AMOSTRAGEM (UAS), COMPLEMENTARES ÀS 10 UAS EXISTENTES

VI.1.1 - SELEÇÃO DE TRECHOS HOMOGÊNEOS

Os estudos de definição dos segmentos homogêneos basearam-se nos dados de deflexão utilizando o procedimento do Método das Diferenças Acumuladas da AASHTO (1993). Foram definidos os segmentos homogêneos com base na estrutura do pavimento (espessura do concreto asfáltico CA) e nos parâmetros que refletem as condições estrutural e funcional dos pavimentos (Deflexão, Trincamento, Afundamento de Trilha de Roda ATR e Irregularidade Longitudinal IRI). Na Tabela 1 apresenta-se o resumo das quantidades de segmentos obtidas aplicando o método da AASHTO (1993) para Deflexão, Trincamento, ATR, IRI e espessura do CA.

Tabela 1 - Segmentos por parâmetro obtidos por meio do Método das Diferenças Acumuladas.

UF	Parâmetro				
	Do	TR	ATR	IRI	CA
DF	4	2	5	3	6
GO	36	30	63	20	39
MG	199	91	110	73	132

O "Método das Diferenças Acumuladas" (*Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences*), recomendado pela AASHTO (1993), é apresentado a seguir:

1. Calcula-se o valor médio da deflexão para todo o trecho (D).
2. Calcula-se a diferença entre cada valor individual e o valor médio.
3. Calculam-se os valores acumulados das diferenças.
4. Plota-se em um gráfico, nas abscissas as distâncias e nas ordenadas os valores acumulados das diferenças.

Cada variação de coeficiente angular da curva obtida indica uma mudança do comportamento médio de um determinado segmento para outro, delimitando as extremidades dos segmentos homogêneos. Analiticamente considera-se:

Deflexão média:

$$\overline{Di} = \frac{D(i-1) + Di}{2}$$

Área entre estações e curva:

$$Ai = \overline{Di}\, x\, \Delta li$$

Onde:

$\overline{Di} =$ deflexão na estaca i;

$\Delta li =$ = distância entre estações.

Área acumulada:

$$Ac = \sum_{i=1}^{n} Ai$$

Distância acumulada:

$$Lc = \sum_{i=1}^{n} \Delta li$$

Diferença acumulada:

$$Zi = \sum Ai - \tan\alpha \sum \Delta li$$

Onde:

$$\tan\alpha = \frac{Ac}{Lc}$$

A Figura 5 exemplifica o procedimento aplicado para a Pista 3 do DF.

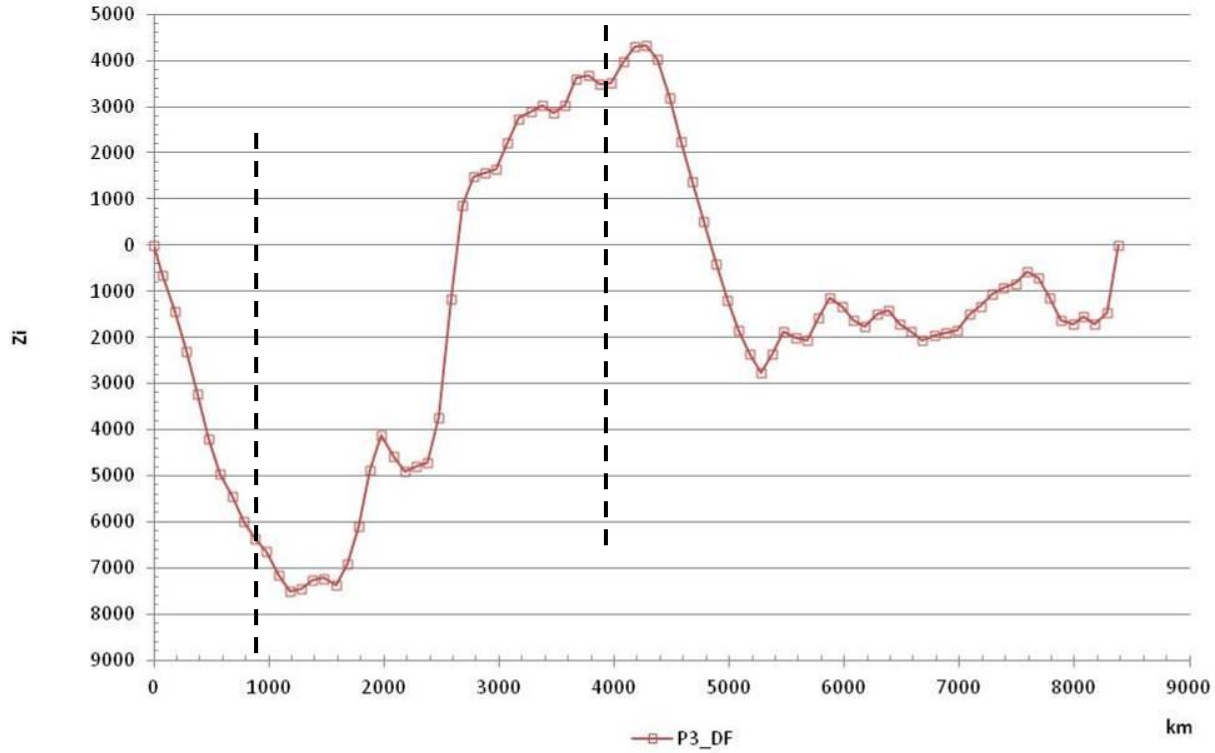


Figura 5 – Exemplo de delimitação dos segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas (AASHTO, 1993) e análise dos dados.

Após aplicar o Método das Diferenças Acumuladas (AASHTO, 1993), foi feita a fusão (ou interpolação) em matriz única dos segmentos obtidos por parâmetro (Deflexão, Trincamento, ATR, IRI e espessura do CA) para definição dos Segmentos Homogêneos. O número total de segmentos homogêneos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação dos segmentos homogêneos por Unidade de Federação obtidos pela fusão das matrizes da segmentação dos parâmetros Do, TR, ATR, IRI e CA.

Número Total de Segmentos	**DF**	**11**	**und**
	GO	**138**	**und**
	MG	**485**	**und**

A relação (ou lista) dos segmentos homogêneos foi importada para o Sistema Gerenciador de Dados (SGD) para montar uma matriz de dados contendo todas as informações existentes sobre o pavimento de cada segmento. Os cálculos foram realizados utilizando a Matriz de Dados previamente estruturada, organizada e armazenada no SGD. O SGD calculou as médias dos demais parâmetros para cada segmento. Ressalta-se que na Matriz de Dados dos Segmentos

Homogêneos consta uma quantidade significativa de informações necessárias para a alimentação do Sistema HDM-4 (*Highway Deveolpment and Management*), utilizado na elaboração de análises de desempenho dos pavimentos da Via040.

VI.1.2 - DEFINIÇÃO DAS UNIDADES DE AMOSTRAGEM UAS

As Unidades de Amostragem (UAs) são trechos considerados representativos das características e condições de um conjunto de segmentos homogêneos, que servem para melhorar o nível de compreensão do comportamento do pavimento e, por consequência, calibrar os modelos de previsão de desempenho do HDM-4. Através de uma UA será possível acompanhar a evolução de suas condições funcionais e estruturais ao longo do tempo, havendo melhor compreensão dos comportamentos e desempenhos dos pavimentos da Via040. Nas UAs foram realizados ensaios e monitorações para obtenção de dados necessários para elaboração de análises do comportamento e desempenho do pavimento.

Considerando o tráfego como um dos parâmetros iniciais da hierarquia adotada para a segmentação, tem-se que seriam necessárias no mínimo 20 UAs. O número de UAs poderia ser maior que o apresentado no Plano de Trabalho do RDT apresentado no ano de 2015, entretanto, limitou-se a uma quantidade de 10 UAs para que fosse possível realizar os ensaios de campo e laboratório necessários para as análises, sem comprometer a qualidade das informações e do programa de capacitação técnica. Ainda que não representem todos os segmentos da Via040, as Unidades de Amostragem (UAs), selecionadas para a primeira fase do projeto de RDT (2015), representam uma quantidade e extensão significativa de Segmentos Homogêneos (SHs). Visto que 10 UAs não são suficientes para representação dos segmentos da Via040, a partir de 2016 serão implantadas novas UAs, com base nas informações do Banco de Dados montados com auxílio do SGD. As análises com uso de SIG também poderão ser úteis para definição das novas UAs.

As UAs foram definidas seguindo a mesma linha de raciocínio de Kohler *et al*., 2006 e Albuquerque (2007), a qual faz hierarquização das características e condições da rodovia. A definição das UAs foi realizada através da aplicação do critério de hierarquia na seguinte ordem: Unidade de Federação → Região Climática → Geomorfologia → Tráfego → Deflexão → Trincamento → Estrutura do Pavimento → Afundamento de Trilha de Roda → Irregularidade Longitudinal (IRI).

A determinação das UAs foi realizada com auxílio do SGD, executando a função de filtro na Matriz dos Segmentos Homogêneos. Para tanto foram estabelecidas classes para os parâmetros que refletem os mecanismos de deterioração dos pavimentos (Tabela 3 a Tabela 7) – Deflexão, Trincamento, Afundamento de Trilha de Roda, Irregularidade Longitudinal e espessura da camada de revestimento. As classes foram definidas em conformidade com o recomendado pelos manuais do HDM-4 e do DNIT (IPR-745, 2011) – Tabela 8 a Tabela 10. Buscou-se UAs que

pudessem representar o máximo de Segmentos Homogêneos da Via040. Outro critério, de ordem prática, refere-se à segurança da equipe técnica e do tráfego nas proximidades de cada UA. Privilegiou-se a locação de UAs em trechos da rodovia em tangente com boa visibilidade para os usuários nos dois sentidos. Também foi realizada a materialização de cada UA por meio de marcações com tinta no pavimento e placas de sinalização.

Tabela 3 - Classes de Deflexão.

Deflexão Máxima
Do ≤ 50 - Ótimo
50 < Do ≤ 70 - Bom
70 < Do ≤ 100 - Regular
Do > 100 - Ruim

Tabela 4 - Classes de Trincamento.

Trincamento
TR = 0% - Ótimo
0 < TR < 5% - Bom
5% ≤ TR < 25% - Regular
25% ≤ TR < 35% - Ruim
TR ≥ 35% - Péssimo

Tabela 5 - Classes de Irregularidade Longitudinal.

IRI
IRI < 3 - Bom
3 ≤ IRI < 4 - Regular
4 ≤ IRI < 5,5 - Ruim
IRI ≥ 5,5 - Péssimo

Tabela 6 - Classes de Afundamento de Trilha de Roda.

ATR
0 ≤ ATR < 2 - Ótimo
2 ≤ ATR < 5 - Bom
5 ≤ ATR < 15 - Regular
15 ≤ ATR < 25 - Ruim
ATR ≥ 25 - Péssimo

Tabela 7 - Classes de espessuras do pavimento com revestimento em concreto asfáltico.

Espessura CA
CA ≤10
10 < CA ≤ 15
15 < CA ≤ 20
CA > 20

Tabela 8 - Classes de Irregularidade Longitudinal definidas no HDM-4 e DNIT (IPR-745, 2011) para qualificar a qualidade ao rolamento da superfície do pavimento.

Classe da Rodovia	Referência	Bom	Regular	Ruim	Péssimo
Principal ou tronco	HDM-4	IRI < 3	3 ≤ IRI < 5	5 ≤ IRI < 7	IRI ≥ 7
	DNIT (IPR-745)	IRI < 3	3 ≤ IRI < 4	4 ≤ IRI < 5,5	IRI ≥ 5,5

Tabela 9 - Classes de trincamento definidas pelo modelo HDM-4.

Classes de Trincamento (%)				
Ótimo	**Bom**	**Regular**	**Ruim**	**Péssimo**
TR = 0	0 < TR < 5	5 ≤ TR < 25	25 ≤ TR < 35	TR ≥ 35

Tabela 10 - Classes de Suficiência Estrutural do Pavimento definidas pelo HDM-4 pelo Número Estrutural SNC comparadas com os respectivos valores de deflexão.

Número Estrutural SNC x Deflexão (Classes HDM-4)				
Parâmetro	**Bom**	**Regular**	**Ruim**	**Péssimo**
SNP	SNP ≥ 5	4 ≤ SNP < 5	3 ≤ SNP < 4	SNP < 3
Do	Do ≤ 50	50 < Do ≤ 70	70 < Do ≤ 110	Do > 110

No HDM-4 a suficiência estrutural é definida pelo Número Estrutural SNC. Para comparar com as classes definidas no estudo de definição das UAs, o SNC foi transformado em valor de deflexão (0,01 mm), conforme apresentado na Tabela 10.

A seguir é apresentada memória de cálculo do estudo para definição das Unidades de Amostragem (UAs) com base nas classes e cores definidas da Tabela 3 a Tabela 7. Com uso do recurso de filtro do SGD foram definidas as UAs.

VI.1.3 - ABRANGÊNCIA DAS UNIDADES DE AMOSTRAGEM

Para definição das Unidades de Amostragem foram realizadas análises para verificar a abrangência das mesmas. Buscou-se UAs que pudessem representar um somatório de extensão e número significativos de Segmentos Homogêneos com as mesmas características físicas, representadas pelos parâmetros Deflexão, Trincamento, Afundamento de Trilha de Roda, Irregularidade Longitudinal e espessura do CA. As análises foram realizadas por compartimento geomorfológico, sendo desprezado o tráfego. A Figura 6 apresenta a localização das UAs no mapa rodoviário. A lista dos segmentos nos quais estão contidas as UAs é apresentada na Tabela 11. Da Figura 7 a Figura 16 são apresentadas as fotos das Unidades de Amostragem UAs selecionadas e suas respectivas localização em relação aos marcos quilométricos.

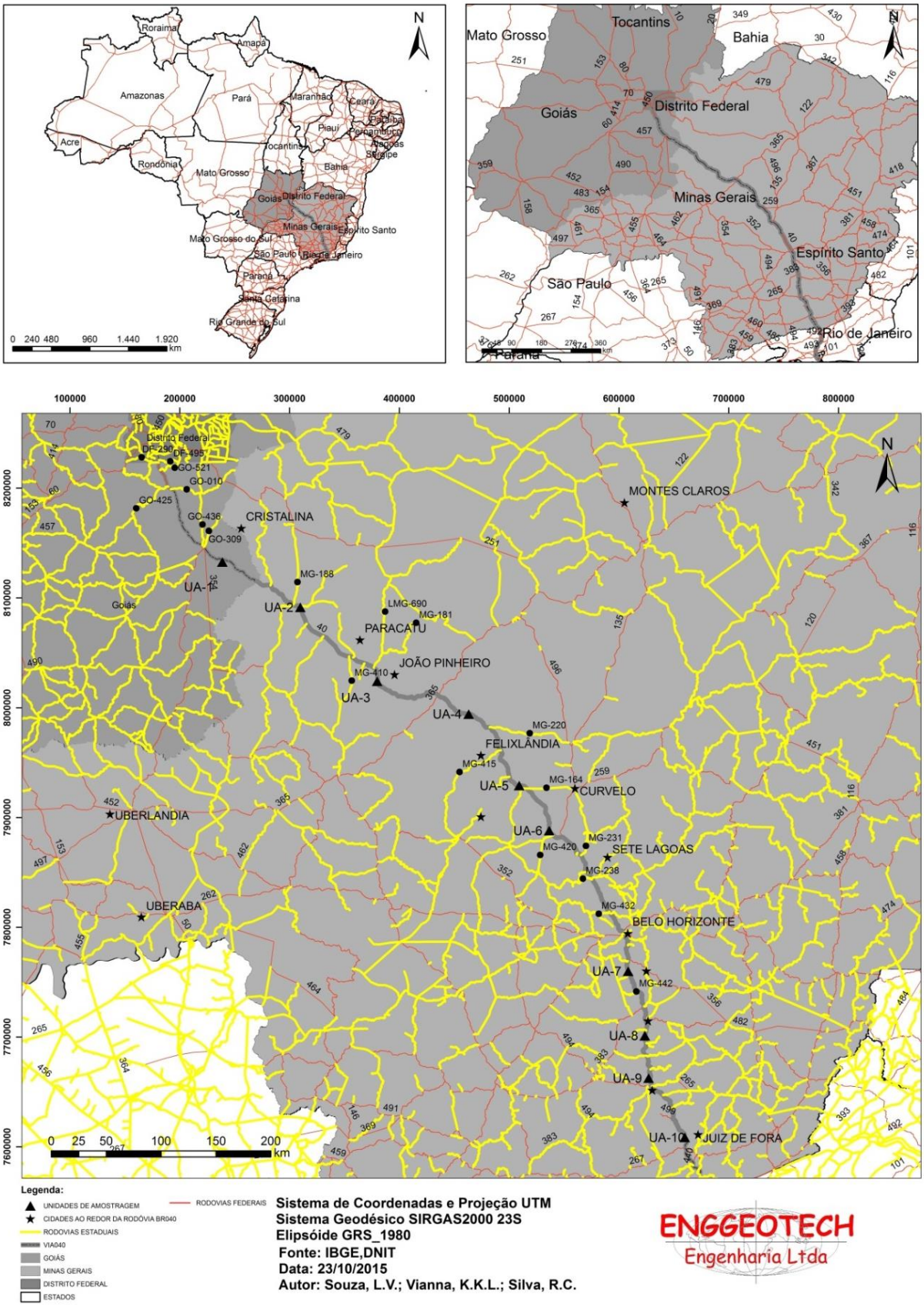


Figura 6 – Mapa Rodoviário com a indicação das Unidades de Amostragem (UAs) ao longo do eixo da Via040.

Tabela 11 - Lista dos Segmentos Homogêneos nos quais as Unidades de Amostragem (UAs) estão inseridas.

UA	km i	km f	UF	L (km)	D0 (0,01 mm)		TR (%)		Esp. CA (cm)		ATR (mm)		IRI (m/km)		Compartimento Geomorfológico
					Valor	Classe	Valor	Classe	Valor	Classe	Valor	Classe	Valor	Classe	
UA01-A	93,25	99,8	GO	6,55	30,3	D0≤50	6,80	5≤TR<25	12,8	10<CA≤15	0,84	0≤ATR<2	1,9	IRI<3	Planalto
UA01-B	106,25	107,3	GO	1,05	51,4	50<D0≤70	28,80	25≤TR<35	16,5	15<CA≤21	2,20	2≤ATR<5	3,3	3≤IRI<4	
UA02-A	51,6	54,3	MG	2,70	9,1	D0≤50	5,60	5≤TR<25	18,2	15<CA≤20	1,54	0≤ATR<2	2,0	IRI<3	Patamares Rio São Francisco/Tocantins
UA02-B	83,399	84,92	MG	1,52	42,4	D0≤50	30,80	5≤TR<25	14,4	10<CA≤15	2,56	2≤ATR<5	2,2	IRI<3	
UA03-A	148,98	155,25	MG	6,27	15,3	D0≤50	12,40	5≤TR<25	17,4	15<CA≤20	3,07	2≤ATR<5	2,0	IRI<3	
UA03-B	193,734	194,909	MG	1,18	29,5	D0≤50	33,30	5≤TR<25	19,7	15<CA≤20	1,68	0≤ATR<2	3,2	3≤IRI<4	
UA04-A	257,82	264,12	MG	6,30	22,4	D0≤50	6,90	5≤TR<25	18,8	15<CA≤21	2,78	2≤ATR<5	2,1	IRI<3	
UA04-B	243,2	246,1	MG	2,90	59,2	50<D0≤70	23,30	5≤TR<25	21,3	CA>20	2,30	2≤ATR<5	2,8	IRI<3	
UA05-A	350,82	355,84	MG	5,02	37,3	D0≤50	9,90	5≤TR<25	20,7	CA>20	2,09	2≤ATR<5	1,7	IRI<3	Depressões e Chapadas São Franscisco/BH
UA05-B	337	339,04	MG	2,04	62,7	50<D0≤70	20,20	5≤TR<24	18,6	15<CA≤21	2,31	2≤ATR<5	1,5	IRI<3	
UA06-A	407,2	408,7	MG	1,50	45,1	D0≤50	16,10	5≤TR<25	14,4	10<CA≤15	1,98	0≤ATR<2	2,3	IRI<3	
UA06-B	411,7	413,631	MG	1,93	36,4	D0≤50	22,30	5≤TR<25	16,9	15<CA≤21	3,15	2≤ATR<5	3,1	3≤IRI<4	
UA07-A	568,45	576,25	MG	7,80	32,6	D0≤50	31,70	25≤TR<35	13,1	10<CA≤15	0,61	0≤ATR<2	1,5	IRI<3	Quadrilátero Ferrífero
UA07-B	619,75	625	MG	5,25	76,6	70<D0≤100	42,00	TR≥35%	21,2	CA>20	0,74	0≤ATR<2	2,3	IRI<3	
UA08-A	644,55	646,55	MG	2,00	49,1	D0≤50	11,60	5≤TR<25	8,5	CA≤10	0,73	0≤ATR<2	1,7	IRI<3	
UA08-B	630,5	632,65	MG	2,15	101,6	D0>100	31,40	25≤TR<35	11,6	10<CA≤15	0,51	0≤ATR<2	2,7	IRI<3	
UA09-A	705,89	709,4	MG	3,51	30,0	D0≤50	6,80	5≤TR<25	18,7	15<CA≤20	1,75	0≤ATR<2	2,6	IRI<3	Campo das Vertentes
UA09-B	725,8	730,6	MG	4,80	81,4	70<D0≤100	14,70	5≤TR<25	9,8	10<CA≤15	1,03	0≤ATR<2	2,3	IRI<3	
UA10-A	766,5	769,7	MG	3,20	103,7	D0>100	17,60	5≤TR<25	11,7	10<CA≤15	0,88	0≤ATR<2	2,5	IRI<3	
UA10-B	738,984	746,75	MG	7,77	26,5	D0≤50	4,10	0<TR<5	11,5	10<CA≤15	1,62	0≤ATR<2	2,5	IRI<3	

Figura 7 – Unidade de Amostragem UA01 (km 97+625, UF: GO).

Figura 8 – Unidade de Amostragem UA02 (km 52+065, UF: MG).

Figura 9 – Unidade de Amostragem UA03 (km 153+250, UF: MG).

Figura 10 – Unidade de Amostragem UA04 (km 260+470, UF: MG)

Figura 11 – Unidade de Amostragem UA05 (km 352+550 UF: MG).

Figura 12 – Unidade de Amostragem UA06 (km 407+650, UF: MG).

Figura 13 – Unidade de Amostragem UA07 (km574+600, UF: MG).

Figura 14 – Unidade de Amostragem UA08 (km 644+770, UF: MG).

Figura 15 – Unidade de Amostragem UA09 (km 708+650, UF: MG).

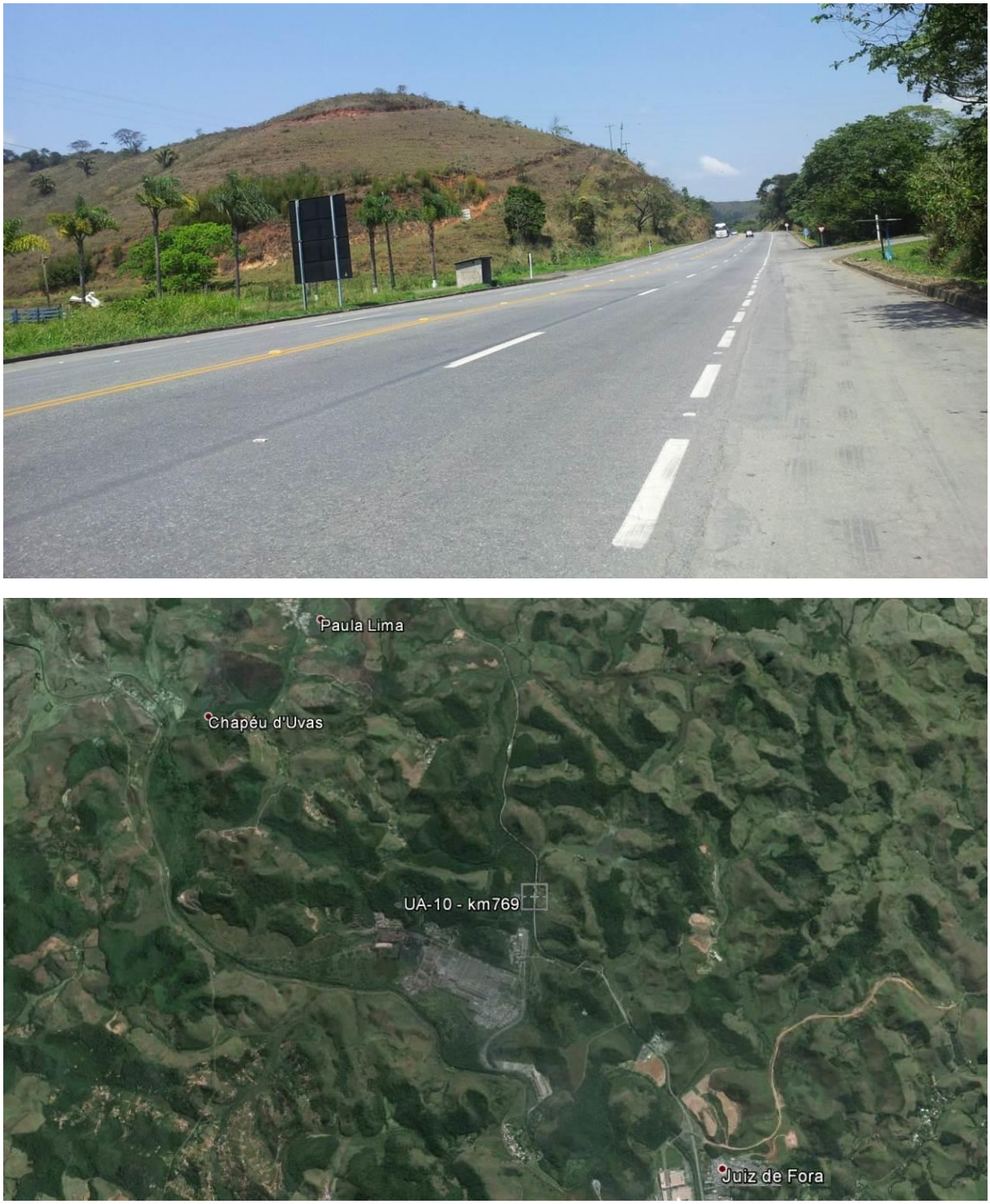


Figura 16 – Unidade de Amostragem UA10 (km 769+000, UF: MG).

Na Tabela 12 apresenta-se um resumo com a localização das Unidades de Amostragem (UAs) e os valores médios dos parâmetros Deflexão, Trincamento, Espessura da Camada de Revestimento (concreto asfáltico), Afundamento de Trilha de Roda e Irregularidade Longitudinal.

Tabela 12 - Lista das Unidades de Amostragem (UAs).

UA	km i	UF	D0 (0,01 mm)	TR (%)	Esp. CA (cm)	ATR (mm)	IRI (m/km)	Compartimento Geomorfológico
UA01-A	97,625	GO	30,3	6,80	12,8	0,84	1,9	Planalto
UA01-B	107,000	GO	51,4	28,80	16,5	2,20	3,3	
UA02-A	52,065	MG	9,1	5,60	18,2	1,54	2,0	Patamares Rio São Francisco/Tocantins
UA02-B	84,000	MG	42,4	30,80	14,4	2,56	2,2	
UA03-A	153,250	MG	15,3	12,40	17,4	3,07	2,0	
UA03-B	194,300	MG	29,5	33,30	19,7	1,68	3,2	
UA04-A	260,470	MG	22,4	6,90	18,8	2,78	2,1	
UA04-B	244,500	MG	59,2	23,30	21,3	2,30	2,8	
UA05-A	352,550	MG	37,3	9,90	20,7	2,09	1,7	Depressões e Chapadas São Franscisco/BH
UA05-B	338,000	MG	62,7	20,20	18,6	2,31	1,5	
UA06-A	407,650	MG	45,1	16,10	14,4	1,98	2,3	
UA06-B	412,600	MG	36,4	22,30	16,9	3,15	3,1	
UA07-A	574,600	MG	32,6	31,70	13,1	0,61	1,5	Quadrilátero Ferrífero
UA07-B	622,500	MG	76,6	42,00	21,2	0,74	2,3	
UA08-A	644,770	MG	49,1	11,60	8,5	0,73	1,7	
UA08-B	631,550	MG	101,6	31,40	11,6	0,51	2,7	
UA09-A	708,650	MG	30,0	6,80	18,7	1,75	2,6	Campo das Vertentes
UA09-B	728,500	MG	81,4	14,70	9,8	1,03	2,3	
UA10-A	769,000	MG	103,7	17,60	11,7	0,88	2,5	
UA10-B	743,450	MG	26,5	4,10	11,5	1,62	2,5	

O resumo dos resultados dos Estudos de Abrangência é apresentado na

Tabela 13. Para verificar a abrangência da UA, desconsiderou-se o ATR, IRI e espessura de CA. O valor correto da espessura do revestimento asfáltico depende de uma calibração do GPR, cuja quantidade de amostragem pode não ter sido suficiente para utilizar como referência. O Afundamento de Trilha de Roda (ATR), que representa a fase plástica do pavimento, pode ter o valor falseado em função de um escorregamento de massa que refletiria um valor que não representaria a deformação permanente das trilhas de roda dos pavimentos. A Irregularidade Longitudinal (IRI) é um parâmetro que reflete a condição funcional mais relacionada à qualidade ao rolamento, ou seja, ao conforto ao usuário e, por vezes, não tem relação com os mecanismos que conduzirão a falência do pavimento. A deflexão refere-se à resposta estrutural do pavimento frente a ação do tráfego e serve de referência para estimar os módulos de resiliência das camadas dos pavimentos. O trincamento cuja área foi levantada de forma contínua é um parâmetro que permite avaliar o grau de evolução do processo de deterioração do pavimento, refletindo, até certo nível, a fase elástica do pavimento. Pelas razões explicitadas, o estudo de abrangência, elaborado com base na Deflexão e Trincamento, pode ser considerado adequado para avaliar quais segmentos podem ser representados pelas UAs selecionadas.

Tabela 13 - Análise de abrangência das Unidades de Amostragem (UAs).

UA	km	UF	Abrangência					Compatibilidade UA x SH			
			Identificação Geomorfológica	Limites Geomorfológicos				Nº Segmentos		Ext. Segmentos	
				km i	km f	N. Seg	L (km)	Quant.	%	L (km)	%
UA01	97,625	GO	Planalto	0 (DF)	22 (MG)	169	187,7	46	27,22%	55,05	29,49%
UA02	52,065	MG	Patamares Rio São Francisco/Tocantins	22 (MG)	270	154	248,0	71	46,10%	126,46	50,85%
UA03	153,25	MG									
UA04	260,47	MG									
UA05	352,55	MG	Depressões e Chapadas São Franscisco/BH	270	550	175	280,0	90	51,43%	144,07	51,86%
UA06	407,65	MG									
UA07	574,6	MG	Quadrilátero Ferrífero	550	651	66	101,0	10	15,15%	26,95	26,08%
UA08	644,77	MG						28	42,42%	39,75	38,46%
UA09	708,65	MG	Campo das Vertentes	651	773	70	122,0	37	52,86%	54,62	45,18%
UA10	769	MG						3	4,29%	9,40	7,78%

Os resultados apresentados na

Tabela 13 revelam que as Unidades de Amostragem (UAs) representam uma quantidade e extensão significativa de Segmentos Homogêneos (SHs). Serão nessas UAs que os estudos e ensaios serão elaborados de forma mais intensa.

VI.1.4 - PLACAS DE SINALIZAÇÃO

Foram confeccionadas 20 placas de sinalização, sendo estas dispostas no sentido sul e norte em cada unidade de amostragem, conforme explicitadas abaixo:

UA 01 – A

Figura 17 - Placa de sinalização UA 01-A Norte.

Figura 18 - Placa de sinalização UA 01-A Sul.

UA 02 – A

Figura 19 - Placa de sinalização UA 02-A Norte.

Figura 20 - Placa de sinalização UA 02-A Sul.

UA 03 - A

Figura 21 - Placa de sinalização UA 03-A Norte.

Figura 22 - Placa de sinalização UA 03-A Sul.

UA 04 – A

Figura 23 - Placa de sinalização UA 04-A Norte.

Figura 24 - Placa de sinalização UA 04-A Sul.

UA 05 – A

Figura 25 - Placa de sinalização UA 05-A Norte.

Figura 26 - Placa de sinalização UA 05-A Sul.

UA 06 – A

Figura 27 - Placa de sinalização UA 06-A Norte.

Figura 28 - Placa de sinalização UA 06-A Sul.

UA 07 – A

Figura 29 - Placa de sinalização UA 07-A Norte.

Figura 30 - Placa de sinalização UA 07-A Sul.

UA 08 – A

Figura 31 - Placa de sinalização UA 08-A Norte.

Figura 32 - Placa de sinalização UA 08-A Sul.

UA 09 – A

Figura 33 - Placa de sinalização UA 09-A Norte.

Figura 34 - Placa de sinalização UA 09-A Sul.

UA 10 – A

Figura 35 - Placa de sinalização UA 10-A Norte.

Figura 36 - Placa de sinalização UA 10-A Sul.

VI.2 - CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO E CONDIÇÃO DO TRECHO EM ANÁLISE

O desempenho de um pavimento está relacionado às características do seu conjunto de camadas (revestimento asfáltico, base, sub-base, reforço do subleito e subleito) frente a ação tráfego e do clima e das condições geológico-geotécnicas. O principal agente deflagrador de sua deterioração é o carregamento dinâmico exercido pelo tráfego, que tem seu volume aumentado a cada ano. Esse carregamento mobiliza deformações elásticas e plásticas, que são monitoradas através de campanhas de levantamento de campo. Essas deformações, em determinada fase de vida do pavimento, começam a refletir na superfície do pavimento através de defeitos e irregularidades longitudinais e transversais, reduzindo a serventia do pavimento.

Muitos fatores afetam o desempenho a ser oferecido por um determinado pavimento, dentre estes se destacam o número e a magnitude das cargas do tráfego. As ações do clima e do tráfego em conjunto constituem os principais fatores que impõem uma vida útil limitada aos pavimentos (Medina, 1997). Um pavimento dificilmente sofre ruptura catastrófica, a sua degradação se dá de forma contínua, ao longo do tempo. A causa da ocorrência da deformação permanente é devida à ação das cargas do tráfego sobre a superfície dos pavimentos que gera uma deformação total na estrutura. Esta deformação total é composta pelas parcelas de deformação resiliente ou reversível e deformação permanente, ou plástica. A modelagem do tráfego é complexa, sendo necessário obter os dados do volume do tráfego e do carregamento a partir da contagem e da pesagem de veículos. Nesse contexto, os estudos de tráfego consistem em importante etapa a ser realizada durante o processo de avaliação das condições de um pavimento. A ocorrência, extensão e frequência de defeitos em pavimentos estão intimamente relacionadas às solicitações de tráfego, aos materiais utilizados e à idade do pavimento. Em diversos modelos de previsão de desempenho dos pavimentos o tráfego é considerado uma das principais variáveis.

VI.2.1 - CONTAGENS VOLUMÉTRICAS E CLASSIFICATÓRIAS

Visto a importância do tráfego atuante nos pavimentos da Via040 foram realizadas Contagens Volumétricas e Classificatórias. Foram definidos 10 postos de pesquisas, localizados nas Unidades de Amostragem, ou próxima às mesmas, visando à segurança das equipes e usuários da rodovia. Nos postos de coleta foram aplicadas pesquisas de contagem volumétrica classificada de veículos, durante sete dias consecutivos em jornadas de 12 horas. Os veículos passantes foram classificados em:

- Automóveis;
- Motocicletas;
- Ônibus;
- Caminhões de 2 eixos (2C);

- Caminhões de 3 eixos (3C e 2S1);
- Caminhões de 4 eixos (4C e 2S2);
- Caminhões de 5 eixos (2S3, 3S2, 2I3);
- Caminhões de 6 eixos (3S3 e 3I3);
- Caminhões de 7 eixos (3D4);
- Caminhões de 9 eixos (3T6 e 3M6).

Através destas contagens é possível estimar o comportamento do tráfego na rodovia ao longo dos dias e ao longo da semana. Estes resultados são a base para o cálculo do Volume Diário Médio Anual (VDMa). A relação dos postos de pesquisa e o VDM são apresentados Tabela 14.

Tabela 14 -Relação Unidade de Amostragem e VDM.

UA	km	UF	VDM
01-A	97+625	GO	1.800
02-A	52+065	MG	2.100
03-A	153+250	MG	1.600
04-A	260+470	MG	1.300
05-A	352+530	MG	1.600
06-A	407+650	MG	1.700
07-A	574+600	MG	9.000
08-A	644+770	MG	5.300
09-A	708+650	MG	6.400
10-A	769+000	MG	5.500

A Figura 37 apresenta a locação dos postos de contagem ao longo da rodovia com os respectivos VDM obtidos. Os resultados das contagens volumétricas e classificatórias apresentados da Tabela 15 a Tabela 34.

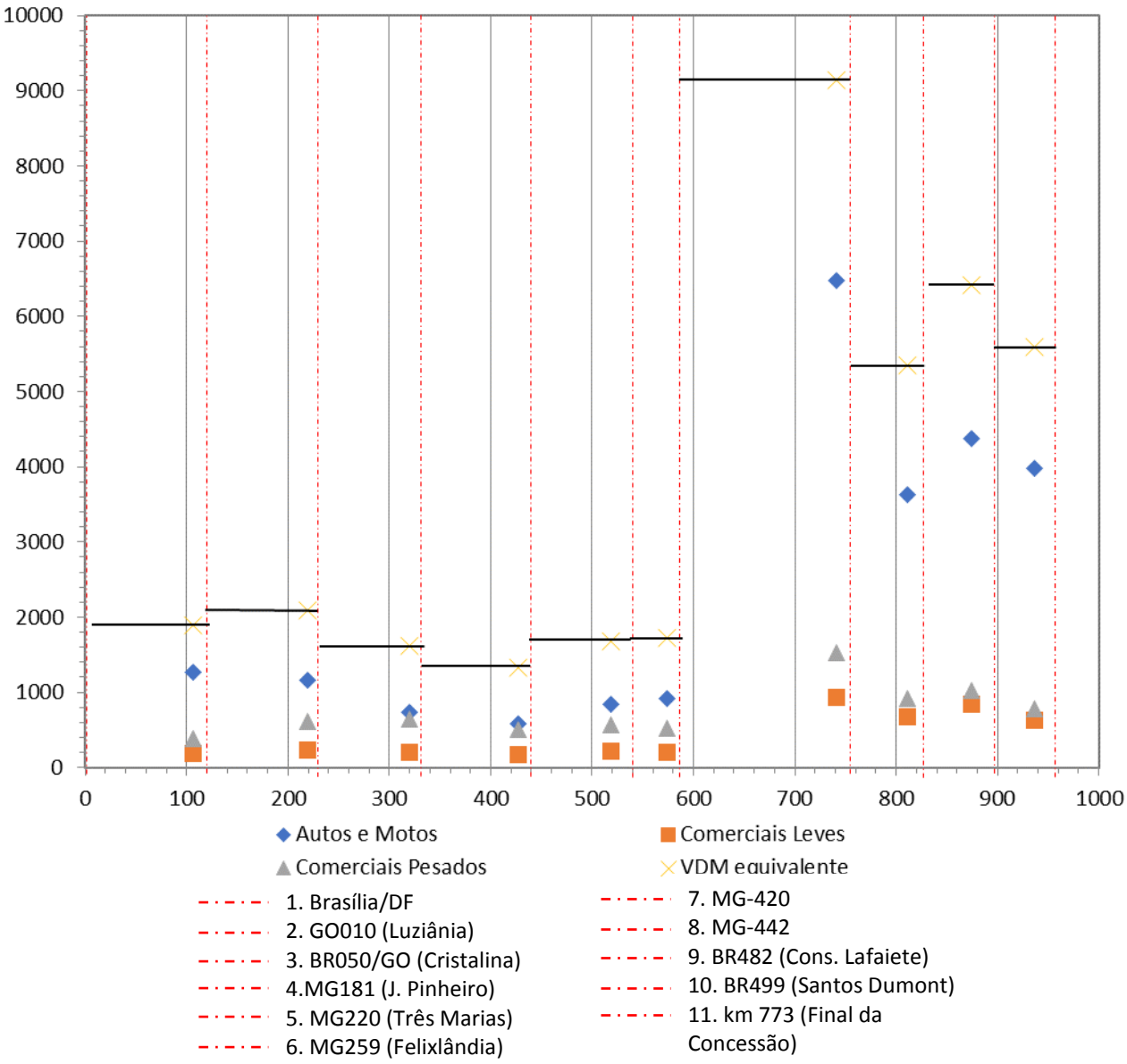


Figura 37 - Resultados das Contagens Volumétricas e Classificatórias realizadas ao longo da Via040, com indicação dos VDMs dos automóveis/motos, veículos comerciais leves e pesados, VDM equivalente, localização dos postos de contagem e limites dos segmentos homogêneos em relação ao tráfego.

UA 01-A

As contagens foram feitas no km 97+625/GO nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 38). Os resultados se encontram na Tabela 15 e na Tabela 16.

Figura 38- Local de realização da contagem volumétrica UA01-A.

Tabela 15-Contagem classificatória da UA 01-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
15/05/2017	1.321	71	44	83	107	10	12	26	41	5	11	105	36	74	10	30	1.986
16/05/2017	983	60	46	80	121	25	33	19	62	11	3	119	66	67	10	42	1.747
17/05/2017	926	61	49	77	115	-	17	20	42	6	2	109	59	81	6	65	1.635
18/05/2017	1.149	62	60	92	126	3	32	14	70	16	2	170	52	80	26	43	1.997
19/05/2017	1.575	65	60	76	108	1	38	35	52	6	-	134	64	44	18	25	2.301
20/05/2017	1.272	53	43	48	111	-	17	17	39	11	1	143	57	46	19	27	1.904
21/05/2017	1.165	70	53	53	77	2	21	13	43	2	4	103	25	22	19	7	1.679
MÉDIA	1.199	63	51	73	109	6	24	21	50	8	3	126	51	59	15	34	1.893

Tabela 16-Contagem classificatória da UA 01-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
15/05/2017	1.456	88	47	81	95	7	14	24	29	12	13	75	42	55	8	36	2.082
16/05/2017	1.045	51	45	74	101	39	19	29	37	11	6	120	50	63	14	34	1.738
17/05/2017	950	42	53	106	114	1	22	23	48	12	3	106	64	84	23	37	1.688
18/05/2017	943	51	58	91	112	-	36	14	39	3	2	145	58	72	22	39	1.685
19/05/2017	1.228	59	77	80	86	1	20	22	52	6	5	112	49	73	26	38	1.934
20/05/2017	1.020	48	52	62	76	-	10	20	36	4	-	117	32	39	13	12	1.541
21/05/2017	1.589	57	44	43	116	-	25	30	31	6	2	127	40	46	13	26	2.195
MÉDIA	1.176	57	54	77	100	7	21	23	39	8	4	115	48	62	17	32	1.838

UA 02 - A

As contagens foram feitas no km 52+065/MG nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 39). Os resultados se encontram na Tabela 17 e na Tabela 18.

Figura 39 - Local de realização da contagem volumétrica UA02-A.

Tabela 17 - Contagem classificatória da UA 02-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
15/05/2017	1.145	28	74	104	123	8	40	26	48	6	13	197	30	134	55	22	2.053
16/05/2017	999	13	68	121	154	1	62	27	98	8	14	243	76	151	69	15	2.119
17/05/2017	908	19	67	91	157	-	54	35	72	7	8	215	67	160	79	28	1.967
18/05/2017	1.271	21	84	130	130	-	58	27	87	21	4	256	52	168	75	14	2.398
19/05/2017	1.632	31	87	125	162	1	58	38	83	11	3	241	76	103	53	5	2.709
20/05/2017	1.173	20	65	76	120	-	35	18	44	10	1	165	77	63	40	12	1.919
21/05/2017	884	19	76	41	87	-	41	16	44	5	3	134	36	46	33	3	1.468
MÉDIA	1.145	22	74	98	133	1	50	27	68	10	7	207	59	118	58	14	2.090

Tabela 18 - Contagem classificatória da UA 02-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
15/05/2017	1.724	40	87	126	120	1	54	12	72	14	6	174	55	117	50	12	2.664
16/05/2017	1.147	24	75	104	160	2	67	19	70	11	4	232	62	145	63	13	2.198
17/05/2017	1.042	17	77	139	159	-	67	24	65	9	4	205	95	140	64	23	2.130
18/05/2017	964	27	78	137	144	-	65	26	75	12	1	255	78	169	68	15	2.114
19/05/2017	1.150	26	95	120	143	1	67	25	70	6	3	229	59	151	61	13	2.219
20/05/2017	872	15	72	66	104	2	28	21	48	10	5	169	47	89	34	8	1.590
21/05/2017	1.425	27	53	55	126	-	27	29	44	7	1	169	57	79	49	6	2.154
MÉDIA	1.189	25	77	107	137	1	54	22	63	10	3	205	65	127	56	13	2.153

UA 03 - A

As contagens foram feitas no km 153+250/MG nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 40). Os resultados se encontram na Tabela 19 e na Tabela 20.

Figura 40 - Local de realização da contagem volumétrica UA03-A.

Tabela 19 - Contagem classificatória da UA 03-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
15/05/2017	765	26	40	52	109	1	38	8	31	28	9	152	116	160	38	48	1.621
16/05/2017	635	21	36	97	144	-	48	27	88	6	-	242	51	163	78	32	1.668
17/05/2017	648	16	35	82	123	-	26	27	67	6	3	231	79	183	89	46	1.661
18/05/2017	812	20	42	107	113	10	40	37	74	22	3	254	53	183	65	14	1.849
19/05/2017	916	20	41	100	127	-	41	24	68	8	1	190	88	141	59	10	1.834
20/05/2017	701	14	52	65	106	-	41	13	53	13	5	178	65	95	37	20	1.458
21/05/2017	535	15	46	38	97	-	34	13	50	3	6	197	50	83	31	14	1.212
MÉDIA	716	19	42	77	117	2	38	21	62	12	4	206	72	144	57	26	1.615

Tabela 20 - Contagem classificatória da UA 03-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
15/05/2017	1.023	31	51	93	88	3	10	21	59	6	3	171	41	106	44	19	1.769
16/05/2017	777	21	36	88	126	2	23	45	58	14	1	211	71	162	72	20	1.727
17/05/2017	700	23	47	107	125	-	13	53	48	13	2	218	83	168	68	30	1.698
18/05/2017	603	11	42	98	129	5	18	39	63	13	3	228	76	152	70	11	1.561
19/05/2017	738	21	55	66	103	2	30	23	53	4	5	188	76	164	61	15	1.604
20/05/2017	539	19	43	45	85	-	18	18	47	11	-	170	47	103	35	7	1.187
21/05/2017	683	16	34	34	121	1	33	29	46	3	3	193	48	89	53	14	1.400
MÉDIA	723	20	44	76	111	2	21	33	53	9	2	197	63	135	58	17	1.564

UA 04 - A

As contagens foram feitas no km 260+470/MG nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 41). Os resultados se encontram na Tabela 21 e na Tabela 22.

Figura 41 - Local de realização da contagem volumétrica UA04-A.

Tabela 21 - Contagem classificatória da UA 04-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
24/05/2017	490	15	35	86	99	5	40	28	91	5	3	185	58	135	45	26	1.346
25/05/2017	636	16	284	97	117	10	52	26	53	8	8	151	53	108	36	45	1.700
26/05/2017	727	17	30	68	97	8	38	22	45	14	5	186	96	86	32	67	1.538
27/05/2017	533	24	42	72	78	5	29	18	53	7	2	156	65	66	19	43	1.212
28/05/2017	529	16	27	31	97	1	32	15	46	3	2	147	47	96	14	32	1.135
29/05/2017	491	18	38	60	91	2	30	7	40	15	1	138	49	69	9	34	1.092
30/05/2017	507	13	28	76	117	1	34	18	71	6	5	182	63	93	16	58	1.288
MÉDIA	559	17	69	70	99	5	36	19	57	8	4	164	62	93	24	44	1.330

Tabela 22 - Contagem classificatória da UA 04-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
24/05/2017	533	16	228	78	116	4	42	17	54	17	8	167	69	124	37	26	1.536
25/05/2017	507	11	46	96	95	-	40	18	54	15	4	152	58	133	23	71	1.323
26/05/2017	692	25	39	64	85	7	27	17	47	13	3	157	68	88	18	46	1.396
27/05/2017	462	23	31	65	99	3	25	31	53	7	4	157	58	90	15	31	1.154
28/05/2017	642	19	37	28	89	4	27	17	27	13	3	170	68	52	17	30	1.243
29/05/2017	686	21	28	67	87	-	23	15	53	5	3	143	82	89	18	37	1.357
30/05/2017	522	12	34	92	113	2	34	16	32	21	2	189	64	130	24	68	1.355
MÉDIA	578	18	63	70	98	3	31	19	46	13	4	162	67	101	22	44	1.338

UA 05-A

As contagens foram feitas no km 352+550/MG nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 42). Os resultados se encontram na Tabela 23 e na Tabela 24.

Figura 42 - Local de realização da contagem volumétrica UA05-A.

Tabela 23 - Contagem classificatória da UA 05-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
24/05/2017	671	22	27	113	139	4	32	21	75	7	5	226	58	129	67	25	1.621
25/05/2017	819	24	277	113	146	1	26	41	72	7	4	227	52	113	37	58	2.017
26/05/2017	969	27	31	105	103	4	37	23	52	8	8	196	69	95	21	74	1.822
27/05/2017	702	31	28	83	84	3	32	29	55	9	3	205	49	72	19	68	1.472
28/05/2017	1.171	52	26	42	130	-	40	19	57	2	5	170	32	85	21	74	1.926
29/05/2017	688	33	43	75	96	-	40	13	33	12	6	179	42	61	5	40	1.366
30/05/2017	667	26	23	118	137	4	44	22	75	11	2	192	52	112	5	76	1.566
MÉDIA	812	31	65	93	119	2	36	24	60	8	5	199	51	95	25	59	1.684

Tabela 24- Contagem classificatória da UA 05-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
24/05/2017	745	23	157	98	141	4	31	34	58	13	10	220	58	111	79	12	1.794
25/05/2017	723	25	42	112	114	3	20	37	55	12	3	197	59	142	26	78	1.648
26/05/2017	1.076	35	46	83	115	-	14	26	53	6	2	188	47	86	15	67	1.859
27/05/2017	770	41	23	68	116	2	25	30	51	9	-	174	52	74	12	30	1.477
28/05/2017	815	46	37	42	90	1	29	22	33	10	4	179	57	49	15	67	1.496
29/05/2017	902	36	27	84	101	1	36	14	47	9	1	162	64	78	18	54	1.634
30/05/2017	694	26	28	103	142	2	26	34	51	10	2	195	70	123	11	90	1.607
MÉDIA	818	33	51	84	117	2	26	28	50	10	3	188	58	95	25	57	1.645

UA 06 - A

As contagens foram feitas no km 407+650/MG nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 43). Os resultados se encontram na Tabela 25 e na Tabela 26.

Figura 43 - Local de realização da contagem volumétrica UA06-A.

Tabela 25 - Contagem classificatória da UA 06-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
24/05/2017	653	12	31	96	146	1	45	15	74	9	10	211	65	138	56	52	1.614
25/05/2017	756	15	283	114	150	1	40	15	65	4	4	215	61	110	39	42	1.914
26/05/2017	1.216	21	46	88	135	-	33	15	63	8	2	188	74	106	21	68	2.084
27/05/2017	792	17	46	76	87	-	39	18	50	10	2	193	51	68	17	61	1.527
28/05/2017	1.523	41	35	47	114	3	36	7	59	2	3	162	33	91	13	48	2.217
29/05/2017	722	21	46	63	86	-	40	6	42	7	3	157	31	58	3	36	1.321
30/05/2017	624	15	27	96	143	1	33	13	65	14	3	180	49	89	3	58	1.413
MÉDIA	898	20	73	83	123	1	38	13	60	8	4	187	52	94	22	52	1.727

Tabela 26 - Contagem classificatória da UA 06-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
24/05/2017	698	16	112	100	151	3	34	17	51	7	2	183	50	101	30	33	1.588
25/05/2017	747	11	43	93	127	3	37	12	42	15	3	191	56	124	42	59	1.605
26/05/2017	1.015	16	38	95	103	1	23	18	43	12	3	181	45	77	11	49	1.730
27/05/2017	1.032	33	25	61	111	-	23	27	53	7	1	191	58	62	11	32	1.727
28/05/2017	810	26	41	37	82	2	25	17	32	9	-	171	59	44	16	34	1.405
29/05/2017	864	23	34	87	104	1	29	8	39	6	1	168	61	89	11	64	1.589
30/05/2017	672	15	35	91	154	1	29	20	45	11	1	188	68	118	7	89	1.544
MÉDIA	834	20	47	81	119	2	29	17	44	10	2	182	57	88	18	51	1.598

UA 07 - A

As contagens foram feitas no km 574+600/MG nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 44). Os resultados se encontram na Tabela 27 e na Tabela 28.

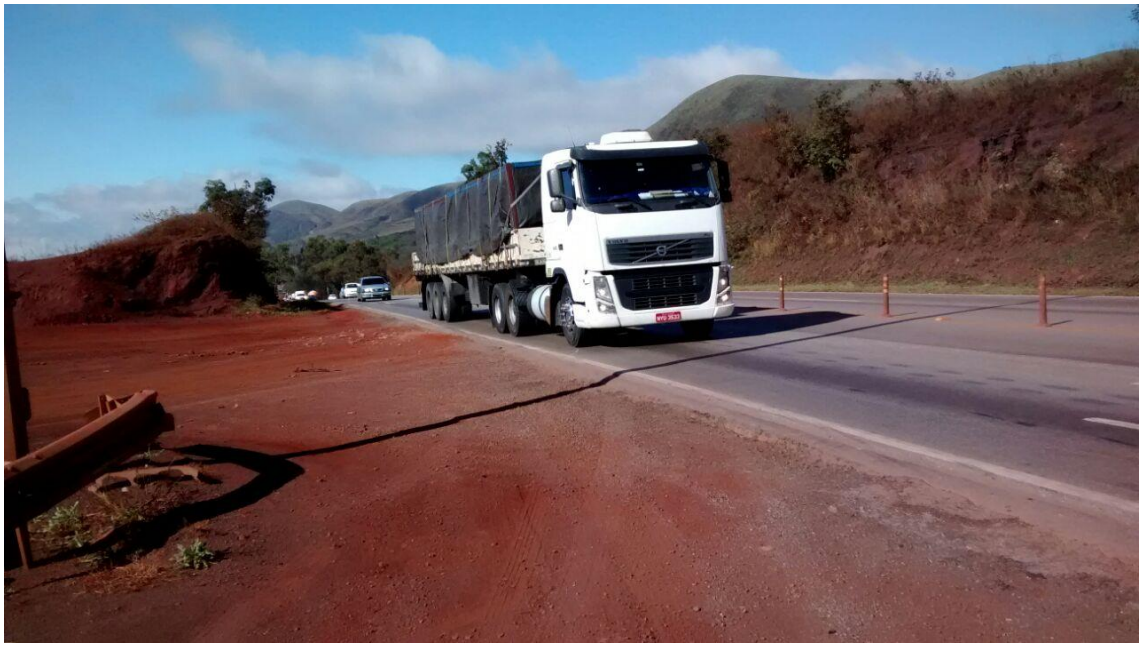


Figura 44 - Local de realização da contagem volumétrica UA07-A.

Tabela 27 - Contagem classificatória da UA 07-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
02/06/2017	8.221	209	231	636	533	64	71	66	544	60	13	757	140	63	24	34	11.666
03/06/2017	7.316	358	172	276	253	13	25	55	247	8	7	413	42	24	14	18	9.241
04/06/2017	5.436	290	162	152	170	12	33	26	107	10	8	188	54	24	22	28	6.722
05/06/2017	6.038	223	189	575	499	44	57	55	604	23	7	819	126	54	7	35	9.355
06/06/2017	5.475	162	181	497	489	22	58	76	570	16	39	903	134	52	20	35	8.729
07/06/2017	5.554	159	230	613	605	23	68	88	630	17	14	876	152	59	27	31	9.146
08/06/2017	5.712	192	233	571	496	30	94	42	627	20	17	851	158	53	26	31	9.153
MÉDIA	6.250	228	200	474	435	30	58	58	476	22	15	687	115	47	20	30	9.145

Tabela 28 - Contagem classificatória da UA 07-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
02/06/2017	6.682	173	257	635	529	67	111	62	478	82	92	734	206	65	30	25	10.228
03/06/2017	5.207	262	189	268	209	64	25	52	275	10	15	548	117	55	12	24	7.332
04/06/2017	8.549	345	180	166	107	109	16	27	34	5	25	193	77	21	1	48	9.903
05/06/2017	5.735	189	242	472	258	215	50	64	497	38	87	752	171	32	9	48	8.859
06/06/2017	4.923	147	214	577	337	249	63	78	465	64	168	864	184	49	18	39	8.439
07/06/2017	4.988	155	221	610	309	267	95	59	530	46	85	876	220	64	17	42	8.584
08/06/2017	5.457	159	204	695	306	217	86	77	506	48	73	859	251	57	21	44	9.060
MÉDIA	5.934	204	215	489	294	170	64	60	398	42	78	689	175	49	15	39	8.915

UA 08 - A

As contagens foram feitas no km 644+790/MG nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 45). Os resultados se encontram na Tabela 29 e na Tabela 30.

Figura 45 - Local de realização da contagem volumétrica UA08-A.

Tabela 29 - Contagem classificatória da UA 08-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
02/06/2017	4.525	266	151	430	396	2	79	37	255	13	29	370	159	62	14	34	6.822
03/06/2017	3.836	266	102	191	221	1	49	24	119	4	13	176	120	21	12	26	5.181
04/06/2017	3.270	192	107	82	139	1	49	14	102	8	13	150	51	23	6	20	4.227
05/06/2017	3.196	207	119	378	371	1	94	21	278	23	17	337	130	52	8	27	5.259
06/06/2017	2.925	200	115	384	415	1	94	22	302	18	17	375	179	55	4	22	5.128
07/06/2017	2.996	209	112	400	466	1	101	28	303	11	21	418	169	54	4	35	5.328
08/06/2017	3.140	205	123	407	465	-	90	23	329	13	10	425	179	57	5	19	5.490
MÉDIA	3.413	221	118	325	353	1	79	24	241	13	17	322	141	46	8	26	5.348

Tabela 30 - Contagem classificatória da UA 08-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
02/06/2017	3.978	213	124	473	401	9	72	41	296	25	27	394	156	65	6	26	6.306
03/06/2017	3.060	190	105	210	209	4	52	23	127	10	14	236	111	40	10	25	4.426
04/06/2017	4.254	290	114	119	200	11	20	9	90	1	6	137	84	14	8	13	5.370
05/06/2017	3.492	257	135	326	337	4	66	32	244	10	20	297	153	37	4	27	5.441
06/06/2017	2.877	207	119	389	416	-	68	39	294	13	17	370	171	53	6	28	5.067
07/06/2017	2.881	216	118	408	406	-	80	38	315	9	22	400	182	54	8	33	5.170
08/06/2017	3.166	226	119	443	468	-	82	42	294	13	23	397	206	48	10	30	5.567
MÉDIA	3.387	228	119	338	348	4	63	32	237	12	18	319	152	44	7	26	5.335

UA 09 - A

As contagens foram feitas no km 52+065 nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 46). Os resultados se encontram na Tabela 31 e na Tabela 32.

Figura 46 - Local de realização da contagem volumétrica UA09-A.

Tabela 31 - Contagem classificatória da UA 09-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
02/06/2017	5.247	341	215	513	538	7	55	67	221	30	5	418	214	122	18	21	8.032
03/06/2017	4.004	296	163	232	278	1	11	83	144	11	16	269	124	99	26	37	5.794
04/06/2017	4.236	314	139	125	197	1	21	15	80	5	4	159	79	71	4	34	5.484
05/06/2017	3.963	360	184	410	455	1	99	26	187	3	10	315	184	129	25	43	6.394
06/06/2017	3.491	330	173	439	491	1	100	31	232	7	19	414	220	114	29	46	6.137
07/06/2017	3.431	322	170	481	554	1	106	31	261	3	21	379	204	141	14	37	6.156
08/06/2017	3.973	330	172	542	581	-	88	50	249	21	27	417	242	124	18	32	6.866
MÉDIA	4.049	328	174	392	442	2	69	43	196	11	15	339	181	114	19	36	6.409

Tabela 32 - Contagem classificatória da UA 09-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
02/06/2017	4.390	321	209	481	447	14	59	70	224	16	12	370	146	99	22	26	6.906
03/06/2017	3.720	271	143	220	251	3	27	53	88	13	19	194	102	74	8	22	5.208
04/06/2017	4.174	300	136	110	218	3	66	22	119	1	15	221	65	74	6	31	5.561
05/06/2017	4.023	317	177	456	479	1	90	33	244	4	13	322	151	107	5	29	6.451
06/06/2017	3.416	308	170	476	529	1	108	31	252	2	39	390	151	92	8	31	6.004
07/06/2017	3.350	300	165	521	579	3	126	43	260	8	21	412	182	112	2	43	6.127
08/06/2017	3.555	320	166	562	558	3	120	35	257	8	10	429	170	90	5	38	6.326
MÉDIA	3.804	305	167	404	437	4	85	41	206	7	18	334	138	93	8	31	6.083

UA 10 - A

As contagens foram feitas no km 52+065 nos dois sentidos durante 12 horas por sete dias (Figura 47). Os resultados se encontram na Tabela 33 e na Tabela 34.

Figura 47 - Local de realização da contagem volumétrica UA10-A.

Tabela 33 - Contagem classificatória da UA 10-A sentido Sul (Brasília - Rio de Janeiro).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
02/06/2017	4.778	215	221	442	352	3	31	81	166	25	15	359	115	46	27	5	6.881
03/06/2017	3.874	191	167	206	233	-	16	57	130	8	5	258	103	32	13	22	5.315
04/06/2017	3.491	176	147	83	98	-	9	23	63	5	10	122	76	13	7	13	4.336
05/06/2017	3.671	214	210	345	337	1	27	94	163	23	14	239	153	50	7	24	5.572
06/06/2017	3.374	200	187	361	354	1	18	75	175	14	34	325	167	53	7	25	5.370
07/06/2017	3.378	210	200	374	406	2	25	94	182	27	19	290	182	61	9	33	5.492
08/06/2017	3.909	218	190	422	418	1	85	30	199	23	34	342	240	55	10	26	6.202
MÉDIA	3.782	203	189	319	314	1	30	65	154	18	19	276	148	44	11	21	5.595

Tabela 34 - Contagem classificatória da UA 10-A sentido Norte (Rio de Janeiro - Brasília).

DATA	AUTO	MOTO	ÔNIBUS	2 EIXOS	3 EIXOS		4 EIXOS		5 EIXOS			6 EIXOS		7 EIXOS	9 EIXOS		TOTAL
				2C	3C	2S1	4C	2S2	2S3	3S2	2I3	3S3	3I3	3D4	3T6	3M6	
02/06/2017	4.149	202	224	358	318	4	11	86	179	16	23	292	153	68	27	29	6.139
03/06/2017	3.320	167	170	173	199	6	9	46	116	11	8	165	89	23	14	25	4.541
04/06/2017	4.333	185	143	87	166	-	11	64	103	8	-	186	65	19	1	18	5.389
05/06/2017	4.022	215	207	343	315	3	20	73	169	16	5	254	123	55	5	20	5.845
06/06/2017	3.482	188	194	394	425	3	22	87	177	18	8	331	137	35	10	24	5.535
07/06/2017	3.457	205	195	417	402	1	20	116	200	14	11	337	175	49	6	31	5.636
08/06/2017	3.622	208	185	401	370	6	79	45	214	13	11	340	180	42	7	29	5.752
MÉDIA	3.769	196	188	310	314	3	25	74	165	14	9	272	132	42	10	25	5.548

VI.2.2 – PESAGEM ESTATÍSTICA

Para caracterizar o carregamento atuante no pavimento da Via040, foram determinados dez postos de pesagens próximos aos postos da Polícia Rodoviária Federal (PRF). Os locais da pesquisa foram:

- km 47+000 – MG, sentido Norte;
- km 145+000 – MG, sentido Norte;
- km 86+000 – MG, sentido Norte;
- km 284+000 – MG, sentido Sul;
- km 422+000 – MG, sentido Norte;
- km 422+000 – MG, sentido Sul;
- km 554+000 – MG, sentido Sul;
- km 607+000 – MG, sentido Norte;
- km 607+000 – MG, sentido Sul;
- km 767+000 – MG, sentido Sul.
-

Para a pesagem dos veículos foi utilizado o equipamento com Terminal TS3-RODOWIM e Software de Pesagem Dinâmica. O software reconhece a classe do veículo em função da quantidade e distância entre os eixos, registra a carga, velocidade e aceleração, e compara os valores com os limites pré-definidos para os eixos e conjunto de eixos, para reconhecimento de classe de veículo, distância entre eixos e Peso Bruto Total (PBT).

Os resultados da pesagem são imediatamente mostrados em um monitor, indicando também as infrações cometidas e eventuais erros de operação. O sistema permite o armazenamento dos dados relativos às pesagens, que são: peso por eixo e conjunto de eixos, peso total, classe do veículo, placa do veículo, velocidade de passagem, distância entre eixos e outros dados configurados pelo operador.

A classificação dos veículos é realizada de acordo com os padrões estabelecidos pelo DNIT. A Tabela 35 mostra o total de veículos pesados em cada posto de pesagem. Detalhes da pesagem realizada para o presente projeto de RDT são apresentados nos arquivos Excel disponíveis na pasta PESAGEM_RDT_VIA040_DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS_2017.

Tabela 35 - Relação da localização dos postos de pesagem e a quantidade de veículos pesados.

km	UF	Sentido	Período	Total de Veículos Pesados
47+000	MG	NORTE	02/05 - 08/05/17	3.803
86+000	MG	NORTE	09/05 - 15/05/17	2.470
145+000	MG	NORTE	02/05 - 08/05/17	2.029
284+000	MG	SUL	09/05 - 15/05/17	1.759
422+000	MG	NORTE	17/05 - 23/05/17	4.625
422+000	MG	SUL	17/05 - 23/05/17	3.127
554+000	MG	SUL	24/05 - 30/05/17	6.329
607+000	MG	NORTE	04/06 - 10/06/17	10.220
607+000	MG	SUL	10/06 - 13/06/17	5.270
767+000	MG	SUL	04/06 - 10/06/17	2.390

VI.2.3 – LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO

Conforme estabelecido pelos métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento e previsão de desempenho do pavimento, destacam-se dois parâmetros levantados pelo Levantamento Visual Contínuo (LVC), que definem o critério de ruptura do pavimento. São: o trincamento, medido por tipo de trinca e em área e a ocorrência de afundamentos de trilhas de roda (ATR). O trincamento está relacionado com as deformações elásticas, medidas pela Viga Benkelman (VB) e pelo *Falling Weight Deflectometer* (FWD). O ATR é oriundo das deformações plásticas ou permanentes que se manifestam no pavimento pela ação do tráfego, cuja medida também é um critério de definição de vida útil estrutural e funcional de um pavimento, visto que, a partir de certo valor, pode interferir na condição de conforto e segurança do tráfego. O trincamento e ATR também são avaliados em ensaios de laboratório realizados em amostras de solo e mistura asfáltica submetidas a carregamentos que tentam simular a ação do tráfego (triaxial e compressão diametral de cargas repetidas). Os resultados desses ensaios quando analisados em conjunto com os resultados medidos nos LVC servem para orientar os estudos para estimativa do Fator Laboratório-Campo (FLC).

Buscando a modernização do processo de inventário dos defeitos dos pavimentos a metodologia de LVC deve ser realizada para que todos os defeitos que se manifestam na superfície do pavimento possam ser qualificados e quantificados ao longo de cada faixa de tráfego de forma contínua (varredura completa da superfície do pavimento). Isso também é importante para a alimentação do modelo HDM-4, que exige a quantificação e qualificação dos defeitos dos pavimentos, como por exemplo, o trincamento, medido por área (m^2), que deve ser expresso em percentual (%).

O vídeo registro do LVC tem a importante função, como o próprio nome informa, de registrar o estado de superfície dos pavimentos da Via040 no momento do levantamento, compondo assim o histórico visual das condições funcionais dos pavimentos. Além de trazer a rodovia para o escritório, facilitando a elaboração de análises e tomadas de decisão, o vídeo registro também serve para validação do LVC.

A área total de cada tipo de defeito ocorrente e a porcentagem em relação a cada trecho ou característica da rodovia são apresentados da Tabela 36 a Tabela 47 e da Figura 48 a Figura 69.

Tabela 36 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/DF PN]

BR-040/DF	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	1301.4	4.4%	5679.1	19.3%
Trincas Isoladas	201.6	0.7%	227.0	0.8%
Jacaré FC-2	73.5	0.3%	395.5	1.3%
Jacaré FC-3	-	-	1.7	0.0%
Remendo	71.8	0.2%	255.0	0.9%
Panela	0.4	0.0%	2.1	0.0%
Afundamento Ondulação	14.0	0.0%	1.1	0.0%
Exsudação	-	-	-	-

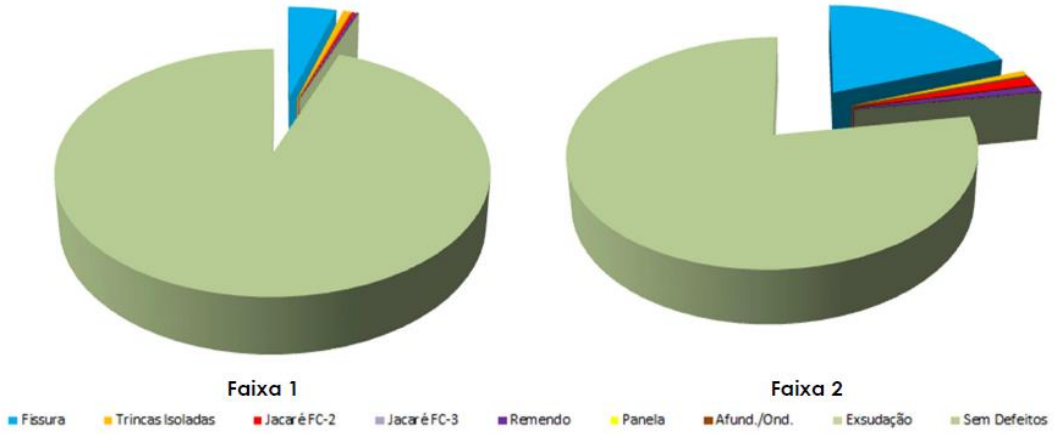


Figura 48 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/DF PN].

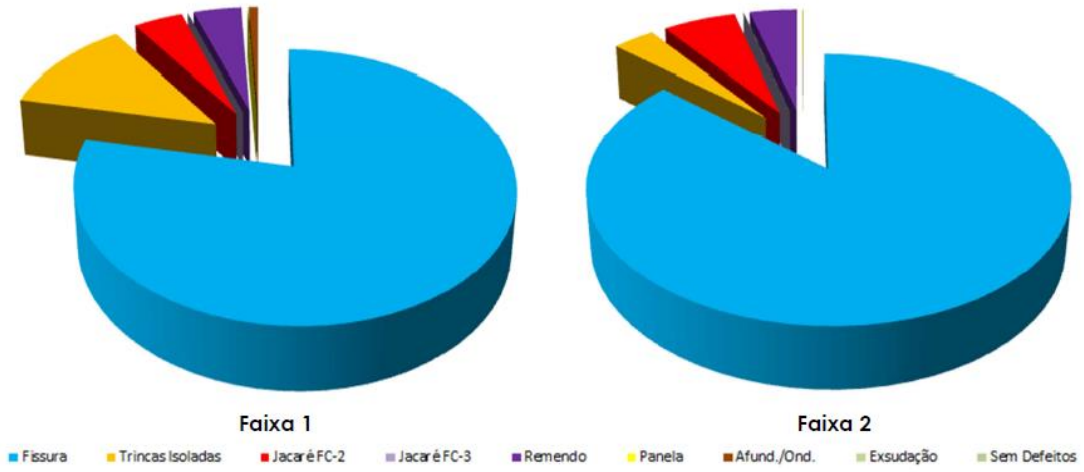


Figura 49 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/DF PN].

Tabela 37 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/DF PS]

BR-040/DF	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	910.6	3.1%	687.8	2.3%
Trincas Isoladas	120.9	0.4%	352.8	1.2%
Jacaré FC-2	-	-	52.5	0.2%
Jacaré FC-3	-	-	1.8	0.0%
Remendo	23.8	0.1%	141.8	0.5%
Panela	0.9	0.0%	1.3	0.0%
Afundamento	-	-	8.2	0.0%
Ondulação				
Exsudação	-	-	-	-

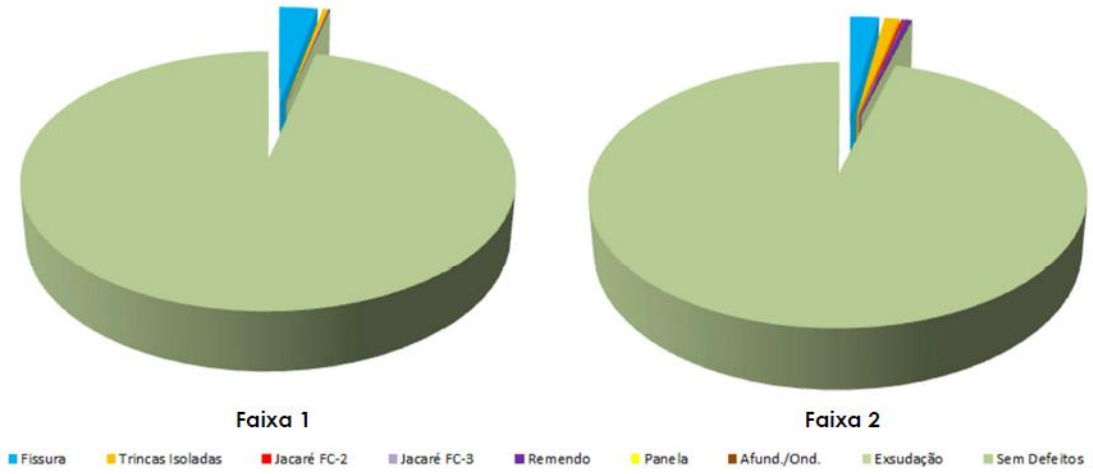


Figura 50 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/DF PS].

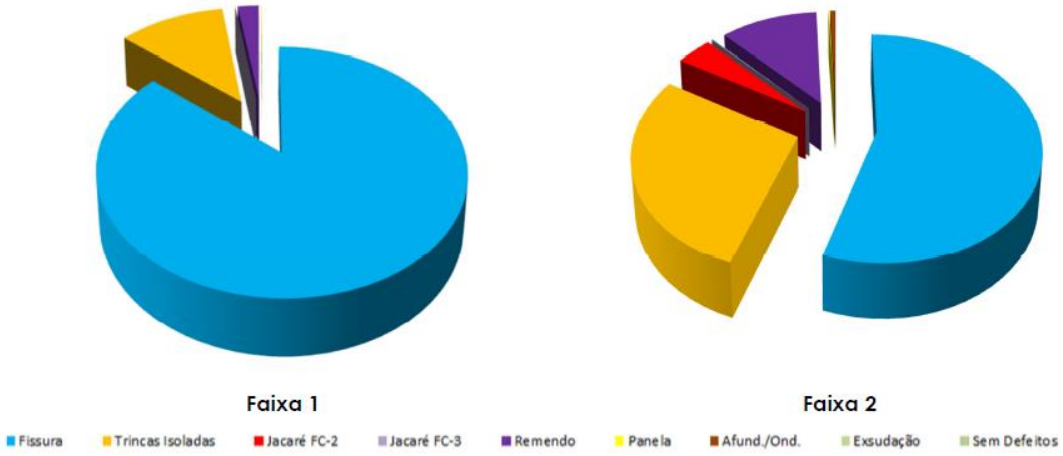


Figura 51 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/DF PS].

Tabela 38 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/GO PN]

BR-040/GO	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	11371.5	4.5%	42441.6	16.8%
Trincas Isoladas	1259.5	0.5%	1853.8	0.7%
Jacaré FC-2	191.9	0.1%	3838.9	1.5%
Jacaré FC-3	1.8	0.0%	8.8	0.0%
Remendo	426.4	0.2%	643.4	0.3%
Panela	24.9	0.0%	5.7	0.0%
Afundamento	1.8	0.0%	51.3	0.0%
Ondulação				
Exsudação	-	-	1.2	0.0%

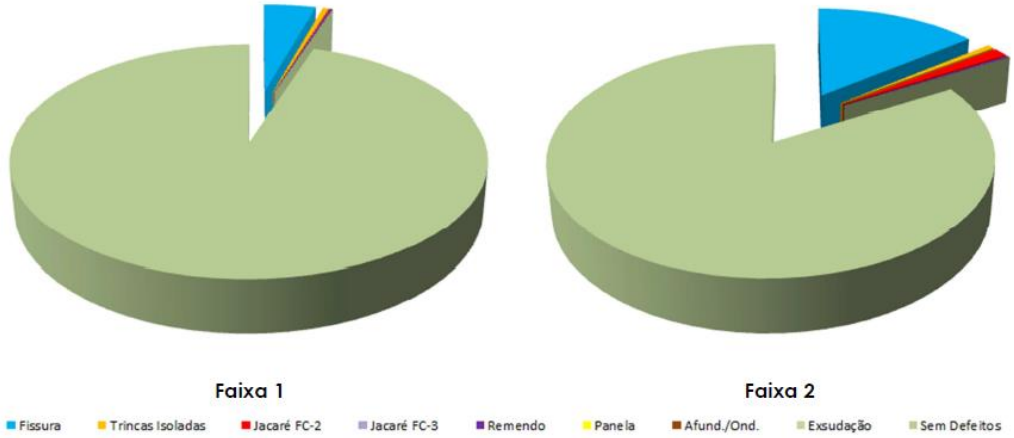


Figura 52 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/GO PN].

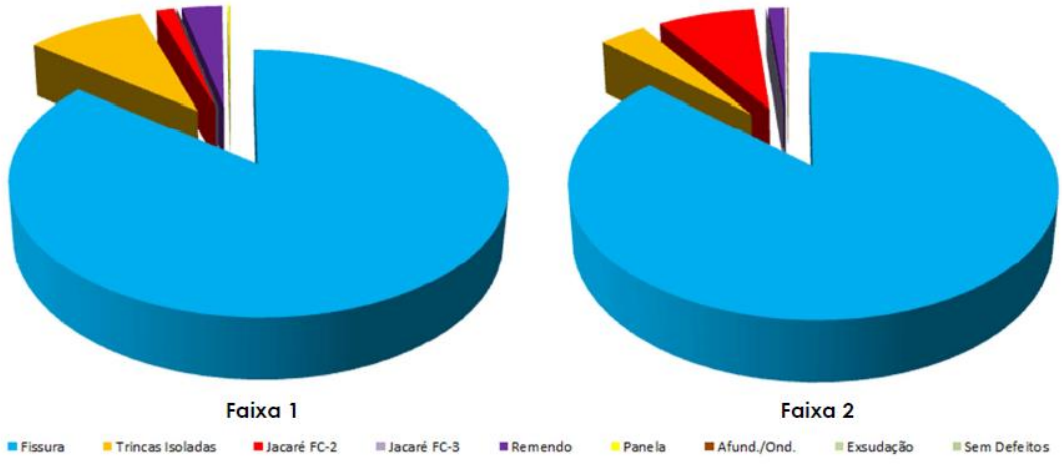


Figura 53 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/GO PN].

Tabela 39 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/GO PS]

BR-040/GO	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	8500.3	3.4%	34129.7	13.7%
Trincas Isoladas	1048.4	0.4%	527.6	0.2%
Jacaré FC-2	652.2	0.3%	5964.6	2.4%
Jacaré FC-3	-	-	103.8	0.0%
Remendo	1541.8	0.6%	401.9	0.2%
Panela	95.4	0.0%	4.8	0.0%
Afundamento Ondulação	19.8	0.0%	24.5	0.0%
Exsudação	-	-	-	-

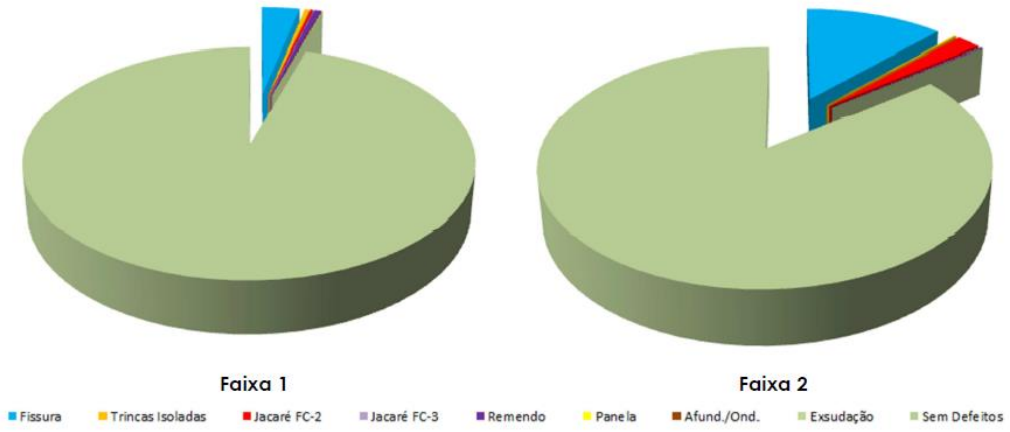


Figura 54 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/GO PS].

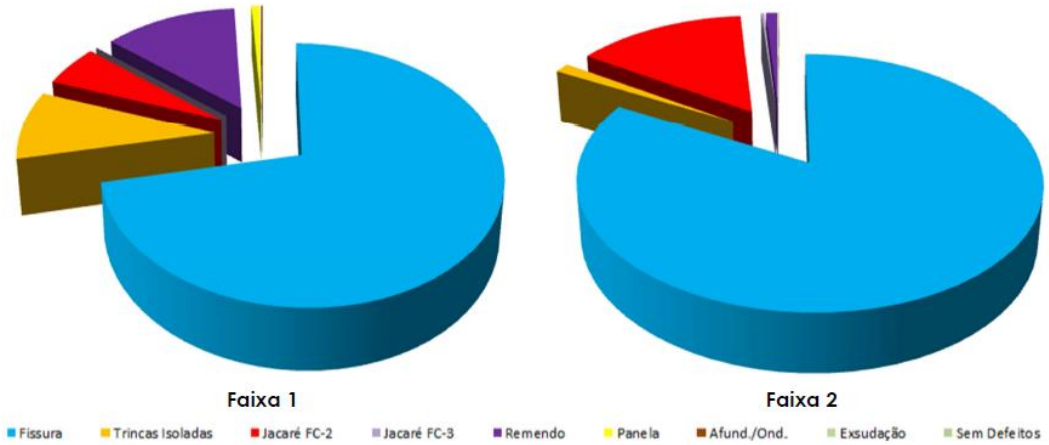


Figura 19- Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/GO PS].

Tabela 40 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/GO Pista simples]

BR-040/GO	Faixas Norte		Faixas Sul	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	37987.8	15.5%	30858.9	12.6%
Trincas Isoladas	2110.5	0.9%	1637.0	0.7%
Jacaré FC-2	6450.5	2.6%	8105.4	3.3%
Jacaré FC-3	411.3	0.2%	15.8	0.0%
Remendo	6530.4	2.7%	3625.4	1.5%
Panela	10.1	0.0%	10.9	0.0%
Afundamento Ondulação	2078.4	0.8%	576.3	0.2%
Exsudação	1011.5	0.4%	-	-

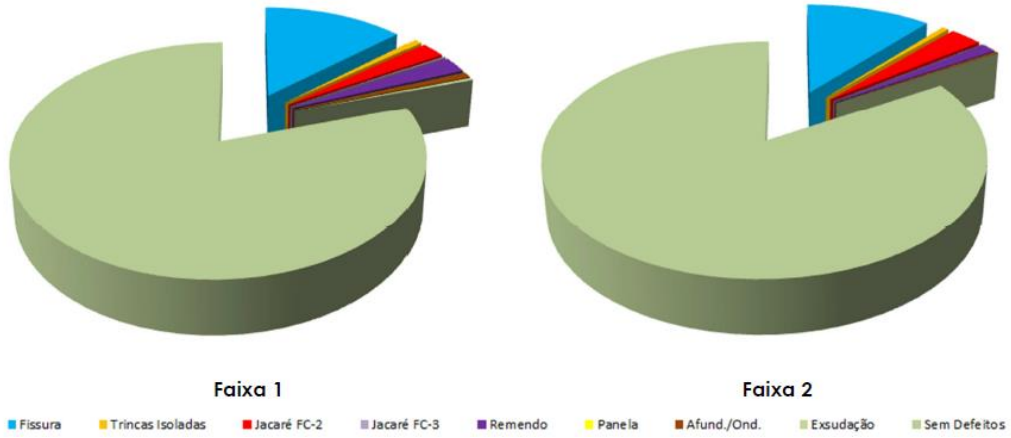


Figura 55 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/GO Pista simples].

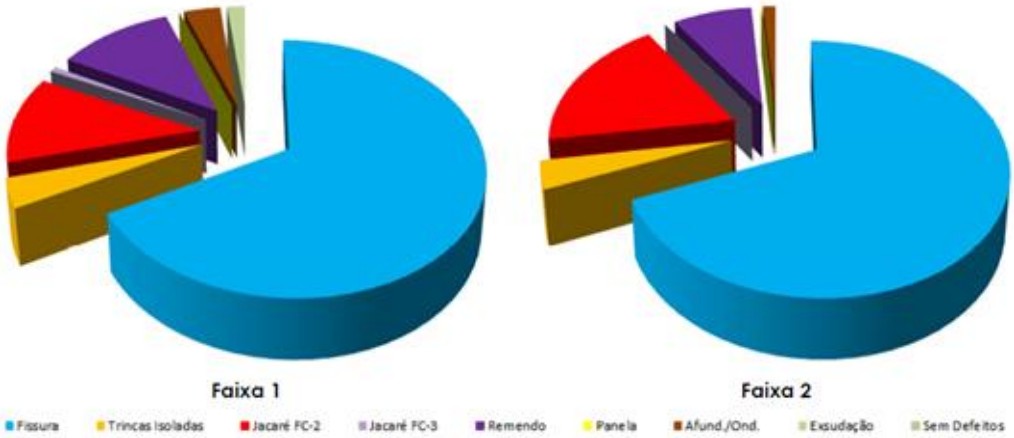


Figura 56 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/GO Pista simples].

Tabela 41 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/MG PN]

BR-040/MG	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	7682.5	1.5%	19989.7	4.0%
Trincas Isoladas	4182.2	0.8%	3649.3	0.7%
Jacaré FC-2	453.8	0.1%	4341.8	0.9%
Jacaré FC-3	134.8	0.0%	495.3	0.1%
Remendo	2567.8	0.5%	4718.6	0.9%
Panela	72.6	0.0%	126.9	0.0%
Afundamento Ondulação	1919.8	0.4%	2339.2	0.5%
Exsudação	-	-	-	-

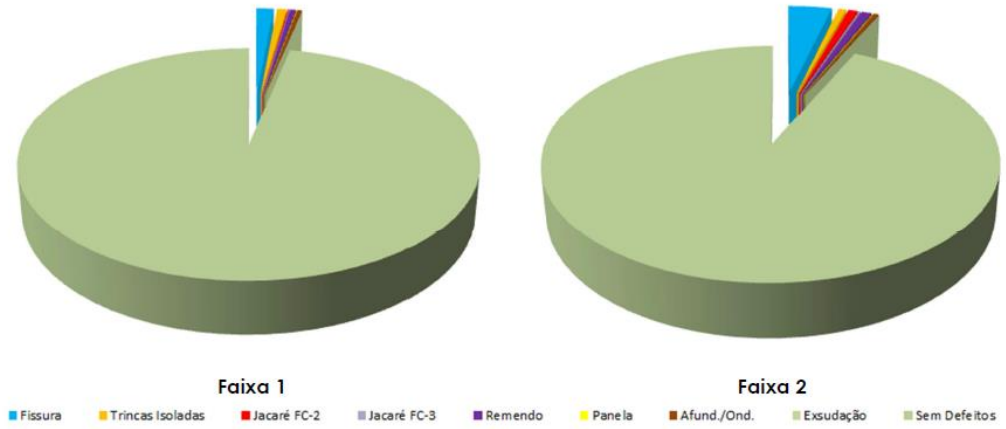


Figura 57 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/MG PN].

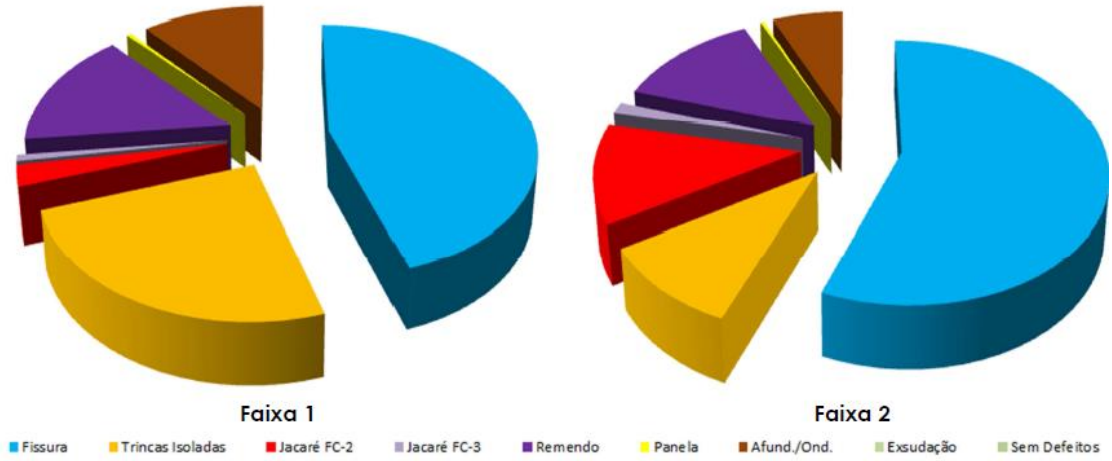


Figura 58 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/MG PN].

Tabela 42 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/MG PS]

BR-040/MG	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	4970.0	1.0%	55617.3	11.0%
Trincas Isoladas	1663.7	0.3%	2015.5	0.4%
Jacaré FC-2	453.3	0.1%	8902.8	1.8%
Jacaré FC-3	5.3	0.0%	554.2	0.1%
Remendo	1208.1	0.2%	12912.1	2.6%
Panela	11.8	0.0%	272.6	0.1%
Afundamento / Ondulação	119.6	0.0%	6515.3	1.3%
Exsudação	-	-	101.5	0.0%

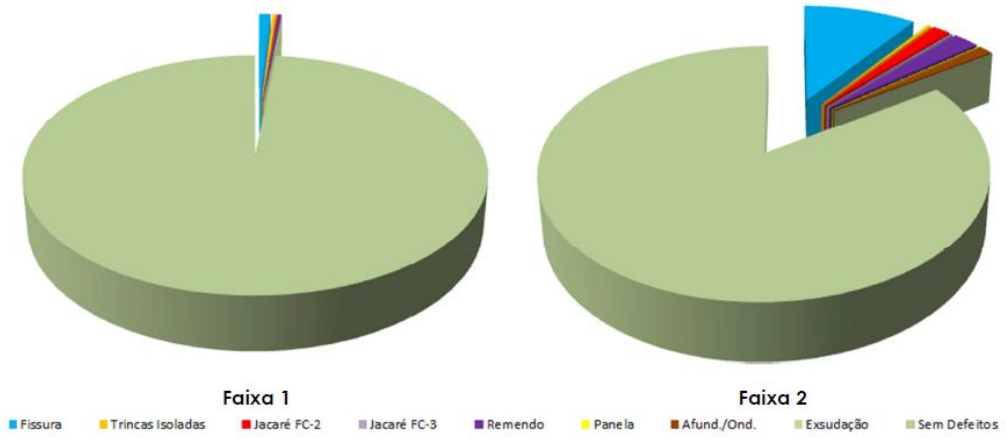


Figura 59 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/MG PS].

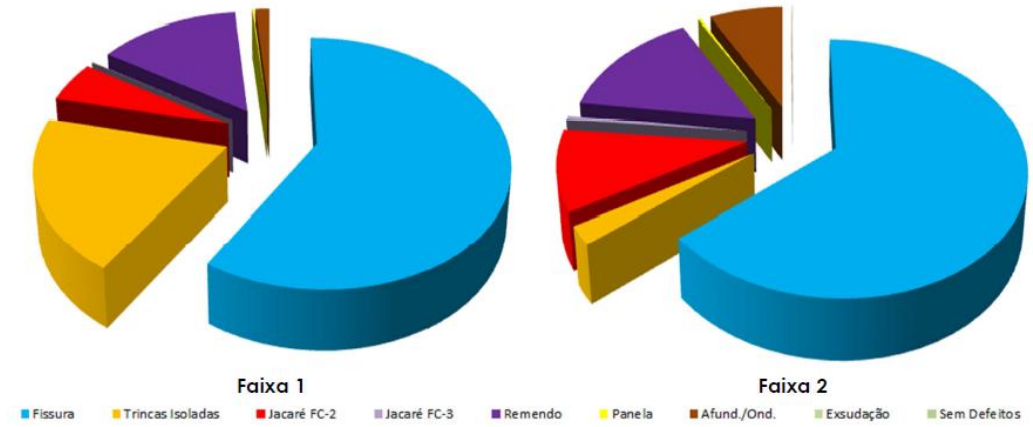


Figura 60 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/MG PS].

Tabela 43 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/MG Multivias Norte]

BR-040/MG	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	20047.4	3.4%	50037.2	8.4%
Trincas Isoladas	8779.6	1.5%	7776.3	1.3%
Jacaré FC-2	6653.5	1.1%	47387.1	8.0%
Jacaré FC-3	196.0	0.0%	4391.9	0.7%
Remendo	8515.5	1.4%	7573.4	1.3%
Panela	40.3	0.0%	129.9	0.0%
Afundamento Ondulação	330.8	0.1%	2594.1	0.4%
Exsudação	-	-	-	-

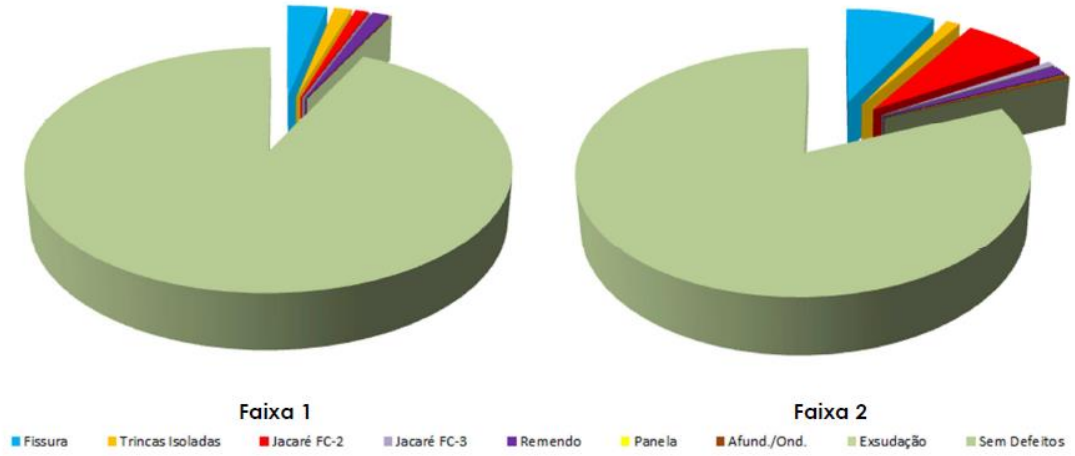


Figura 61 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/MG Multivias Norte].

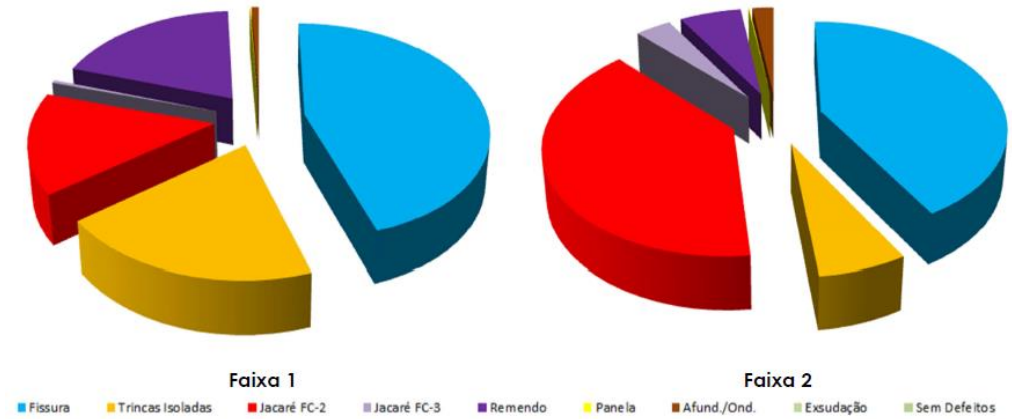


Figura 62 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/MG Multivias Norte].

Tabela 44 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/MG Multivias Sul]

BR-040/MG	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	10461.5	1.8%	48135.5	8.1%
Trincas Isoladas	10429.1	1.8%	6741.5	1.1%
Jacaré FC-2	38858.2	6.5%	88643.9	14.9%
Jacaré FC-3	2126.2	0.4%	2557.3	0.4%
Remendo	9774.9	1.6%	15626.3	2.6%
Panela	72.6	0.0%	185.1	0.0%
Afundamento	2066.7	0.3%	6711.2	1.1%
Ondulação				
Exsudação	-	-	-	-

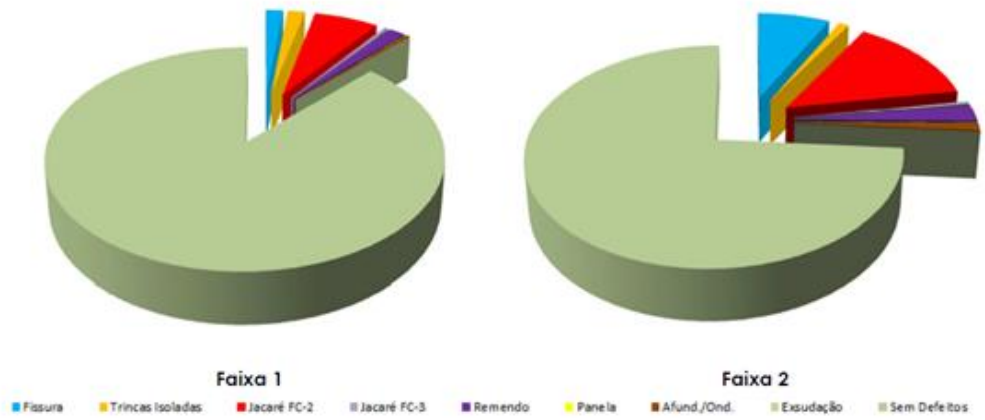


Figura 63 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/MG Multivias Sul].

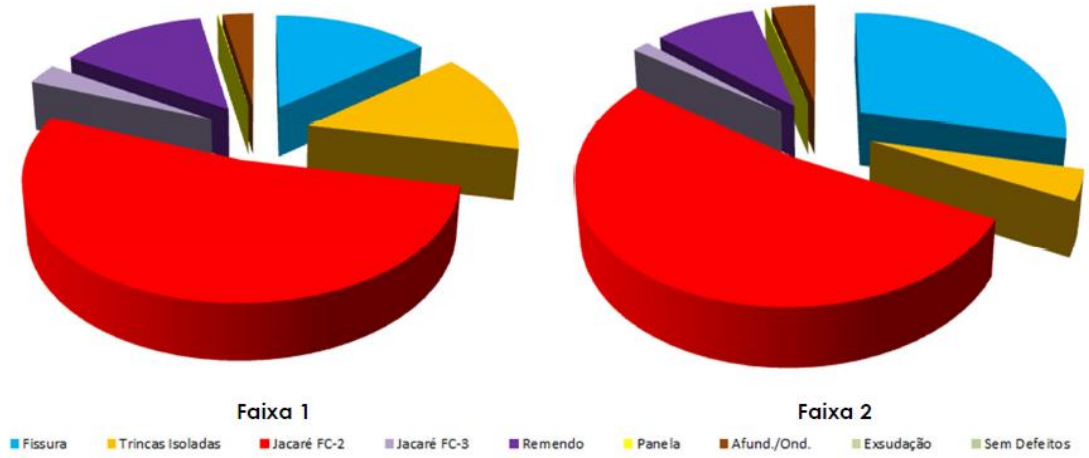


Figura 64 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/MG Multivias Sul].

Tabela 45 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR04/MG Pista Simples]

BR-040/MG	Faixas Norte		Faixas Sul	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	180764.5	27.2%	168723.3	25.4%
Trincas Isoladas	7461.3	1.1%	3791.6	0.6%
Jacaré FC-2	32655.6	4.9%	33300.7	5.0%
Jacaré FC-3	1204.0	0.2%	1116.5	0.2%
Remendo	12492.1	1.9%	13389.2	2.0%
Panela	129.5	0.0%	64.8	0.0%
Afundamento	5737.7	0.9%	3912.4	0.6%
Ondulação				
Exsudação	-	-	-	-

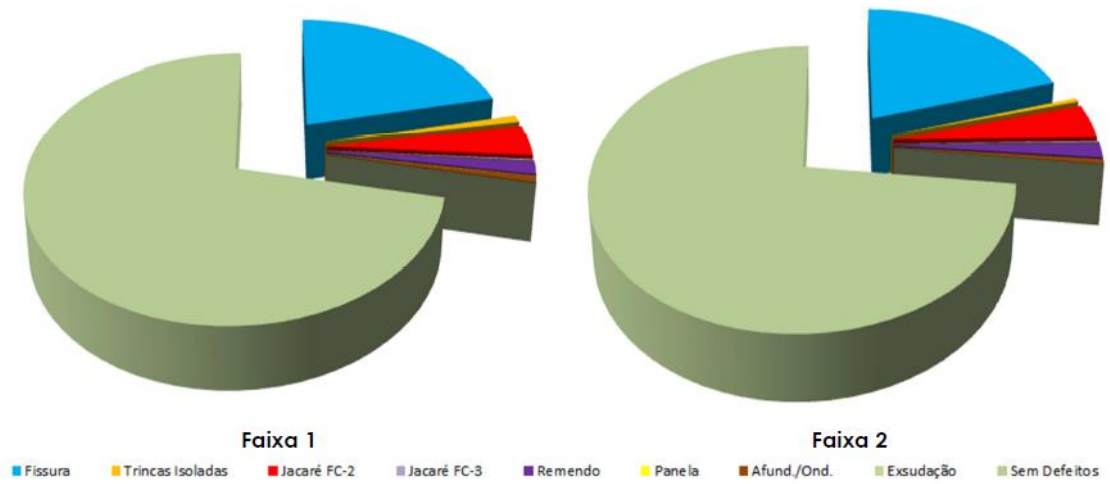


Figura 65 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040/MG Pista Simples].

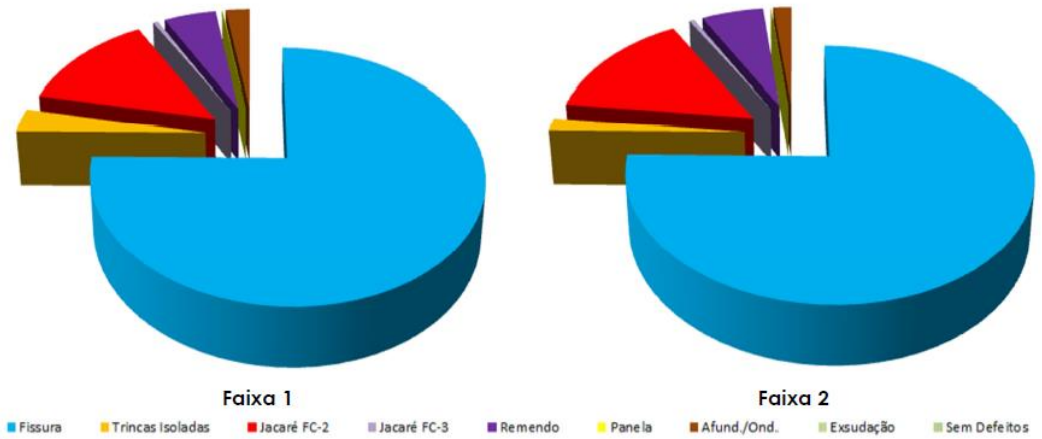


Figura 66 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040/MG Pista Simples].

Tabela 46 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040 Pistas Marginais Norte]

BR-040 MARG.	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	469.0	0.4%	372.8	0.3%
Trincas Isoladas	1394.4	1.1%	1559.3	1.3%
Jacaré FC-2	3535.0	2.9%	2428.4	2.0%
Jacaré FC-3	2322.3	1.9%	1458.3	1.2%
Remendo	883.8	0.7%	776.4	0.6%
Panela	19.7	0.0%	17.9	0.0%
Afundamento	911.8	0.7%	1218.0	1.0%
Ondulação				
Exsudação	-	-	-	-

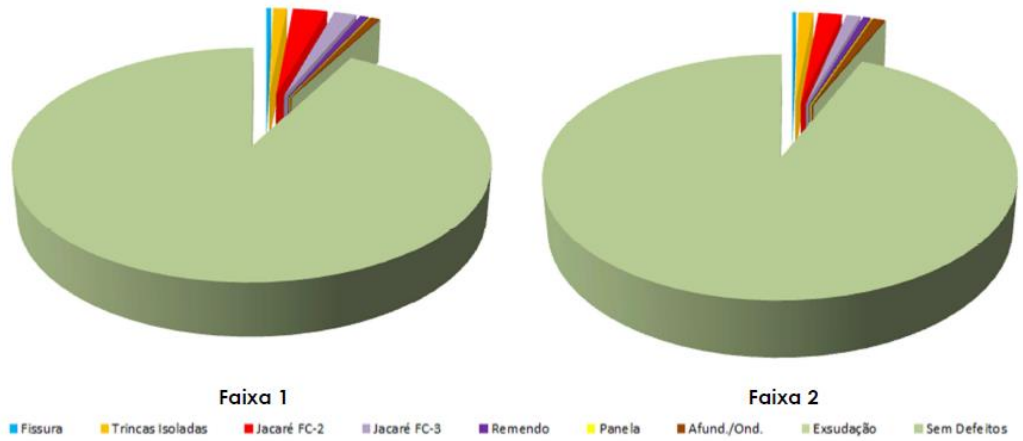


Figura 67 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040 Pistas Marginais Norte].

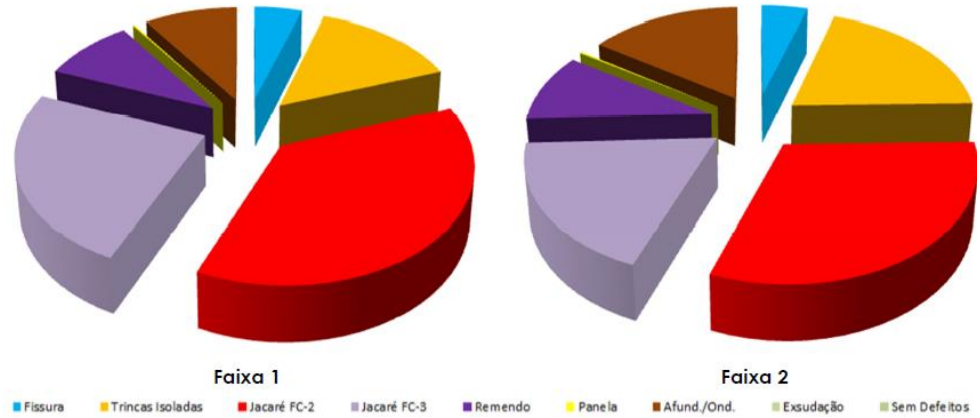


Figura 33 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040 Pistas Marginais Norte].

Tabela 47 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040 Pistas Marginais Sul]

BR-040/GO	Faixa 1		Faixa 2	
Defeito	Área Total		Área Total	
	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Fissura	789.3	0.6%	1004.5	0.8%
Trincas Isoladas	1755.1	1.4%	1478.4	1.2%
Jacaré FC-2	2922.5	2.4%	3844.2	3.1%
Jacaré FC-3	1102.5	0.9%	6235.3	5.1%
Remendo	1247.8	1.0%	2753.9	2.2%
Panela	22.8	0.0%	18.4	0.0%
Afundamento	511.0	0.4%	795.7	0.6%
Ondulação				
Exsudação	-	-	-	-

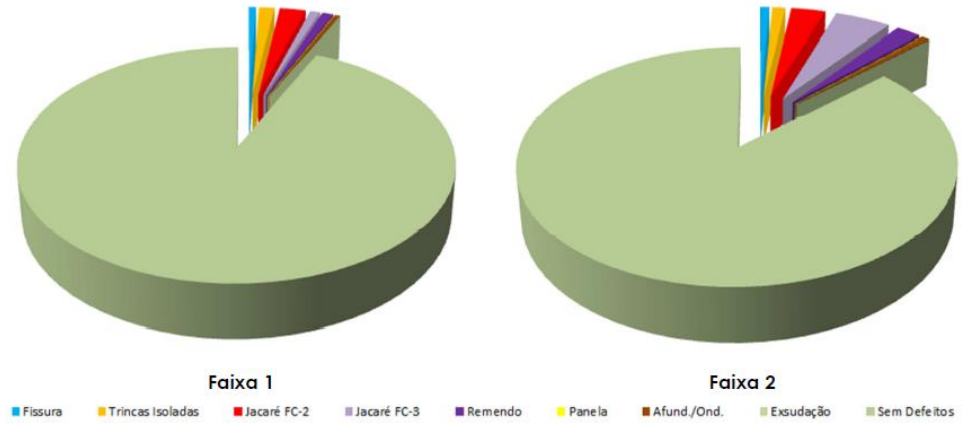


Figura 68 - Distribuição dos defeitos (faixa de rolamento) [BR040 Pistas Marginais Sul].

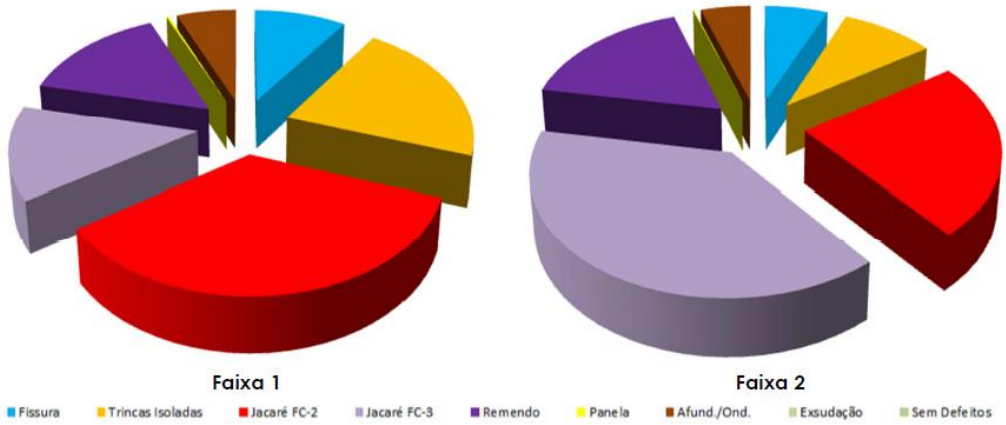


Figura 69 - Inventário de defeitos (área total de ocorrência) [BR040 Pistas Marginais Sul].

VI.2.3.1 – MÉTODO DE LEVANTAMENTO

Para aplicação da metodologia de Levantamento Visual Contínuo Informatizado (LVCI) pelo Método da Varredura é necessário o uso de um Sistema de Automação, Aquisição e Processamento de Dados (SAPD) instalado em um Laboratório Móvel (LM) para garantir que todos os defeitos que se manifestam na superfície do pavimento possam ser qualificados e quantificados, de forma a aprimorar as avaliações funcionais. Na Figura 70 e na Figura 71 apresentam-se o Laboratório Móvel e o software utilizados para realização do levantamento.

Figura 70 - Computador e veículo utilizado para LVC.

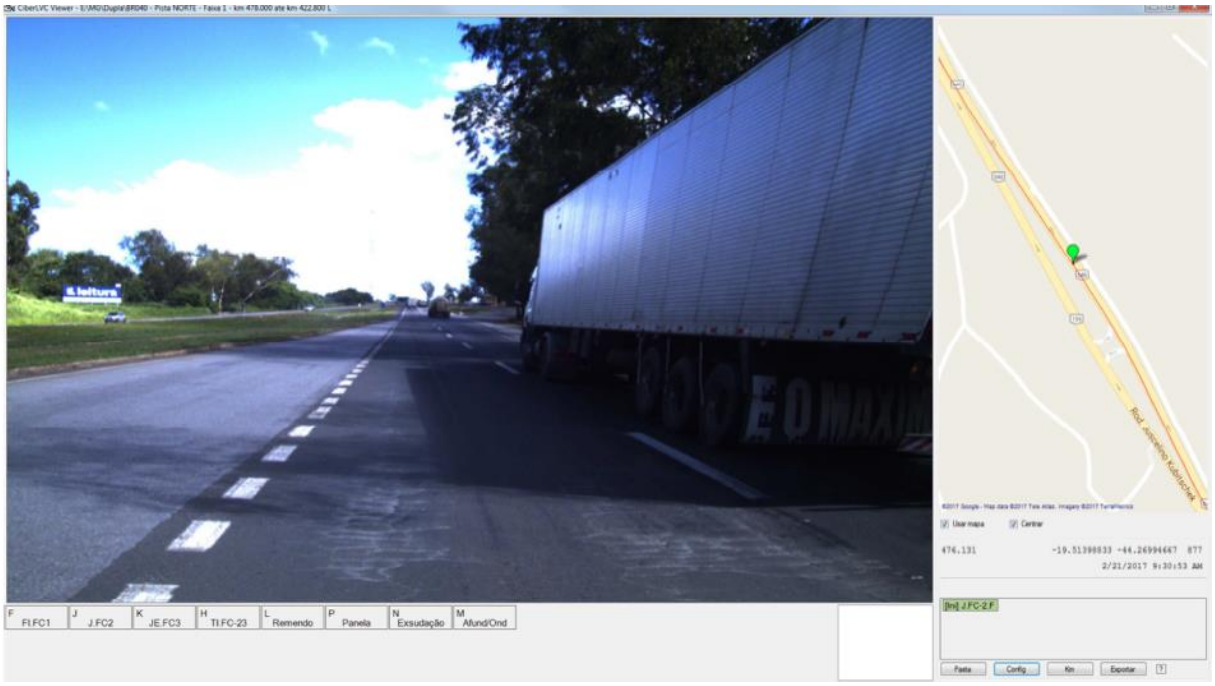


Figura 71 - Visualizador LVD – (J-FC-2 F).

VI.2.3.2 – DADOS DO LVC DA RODOVIA

Os dados do LVC da rodovia no ANEXO 2 (Lista de Defeitos da Superfície do Pavimento - LVD).

VI.2.3.3 – TUTORIAL VÍDEO REGISTRO

Para visualização do vídeo registro deve ser executado o arquivo VideoLVCPlayer.exe localizado em: *LVC Videorregistro – Visualizador (Pavesys Eng.)/VideoLVCPlayer*. Mostra-se por meio da Figura 39, exemplo de ícone do VideoLVCPlayer.

Figura 39– ícone do software VideoLVCPlayer.

Para cada segmento avaliado em campo, é gerada uma pasta raiz onde constam os seguintes arquivos:

- *cam 1*: imagens capturadas pela câmera 1 durante a aquisição do videorregistro em campo;
- *cam 2*: imagens capturadas pela câmera 2 durante a aquisição do videorregistro em campo;
- *lvc.cfg*: arquivo de configuração relacionado ao processamento das imagens e dados coletados;
- *lvc.txt*: arquivo referente aos dados de posicionamento geográfico por meio de componente GPS;
- *lvc.obs*: arquivo de aquisição de dados de campo e calibração odométrica.

No software VideoLVCPlayer, a tecla *pasta* é responsável pela localização dos arquivos do segmento à ser visualizado (pasta raiz onde constam os arquivos detalhados acima – conforme mostrado na Figura 40). Depois de localizada a pasta raiz (Figura 40), deve-se clicar em *ok* e aguardar que o software carregue as imagens e demais dados referentes ao levantamento.

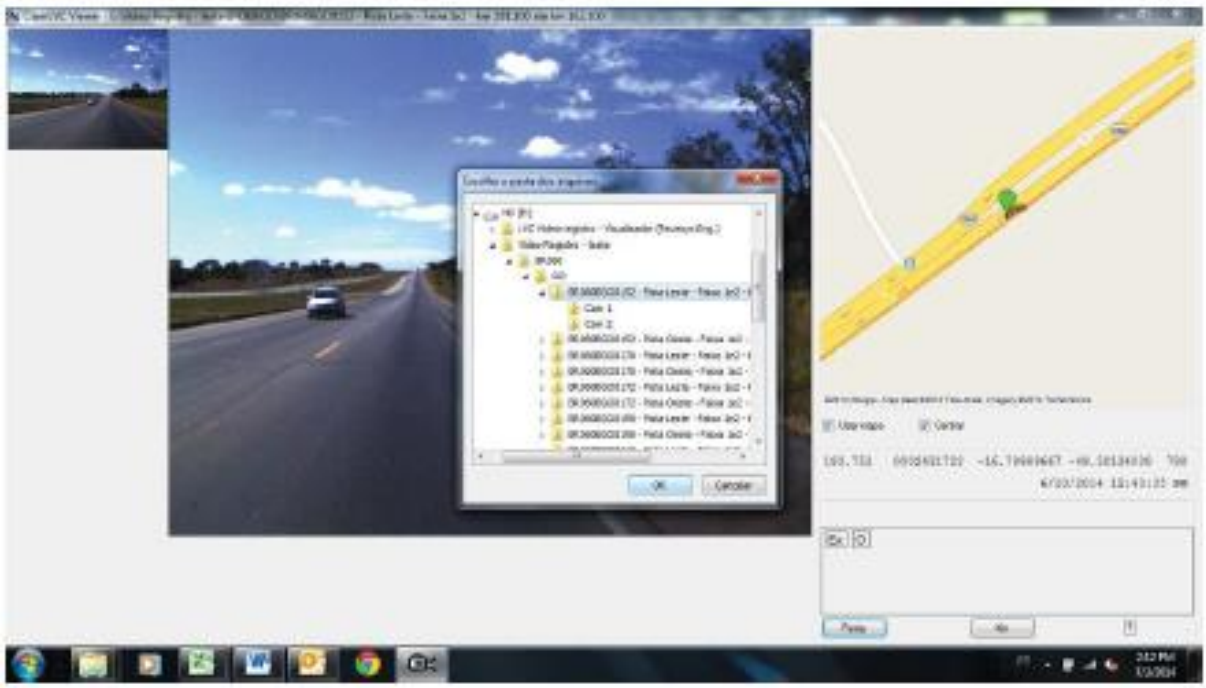


Figura 40 – Pasta raiz escolhida para visualização do vídeo registro.

Após a localização da pasta, apresenta-se na tela do programa:

- o vídeo registro da rodovia;
- localização e posicionamento do trecho avaliado por meio do Google Map2014®;
- Identificação da imagem mostrada pelos seguintes modos (Figura 41):
    - *posicionamento km da rodovia;*
    - *coordenadas GPS (longitude, latitude e altitude);*
    - *número sequencial da imagem;*
    - *data e horário em que foi realizado o vídeo registro.*

Apresentam-se, por meio das Tabelas 35 e 36, os principais comandos de teclas de atalho computacional e das teclas de operação do LVC-Vídeo Player, respectivamente.

Tabela 48 - Teclas de atalho do LVC Vídeo player

TECLADO	DESCRIÇÃO
Ctrl + Home	Visualizar ponto de início do videorregistro
Ctrl + End	Visualizar ponto final do videorregistro
Page Down	Deslocamento por quadrante do videorregistro (sentido do fluxo)

Tabela 49 - Teclas de atalho do LVC Vídeo player (continuação)

TECLADO	DESCRIÇÃO
Ctrl + Page Down	Deslocamento à cada prox.. 200 m da rodovia (sentido do fluxo)
Shift + Page Down	Deslocamento contínuo pela rodovia (sentido do fluxo)
Page Up	Deslocamento por quadrante do videorregistro (sentido contra fluxo)
Ctrl + Page Up	Deslocamento à cada prox.. 200 m da rodovia (sentido contra fluxo)
Shift + Page Up	Deslocamento continuo pela rodovia (sentido contra fluxo)
F1	Ativar somente a cam 1 (pista de rolamento)
F2	Ativar somente a cam 2 (acostamento e faixa de domínio)
F3	Ativar cam 1 e cam 2 (3 modos de visualização)
F6	Ativar localização sequencial da imagem na pasta de aquisição dos dados de campo

Tabela 50 - Teclas do software LVC vídeo player

TECLA	DESCRIÇÃO
Pasta	Localização da pasta raiz onde constam os arquivos em campo
Km	Localização do km em que se deseja visualizar

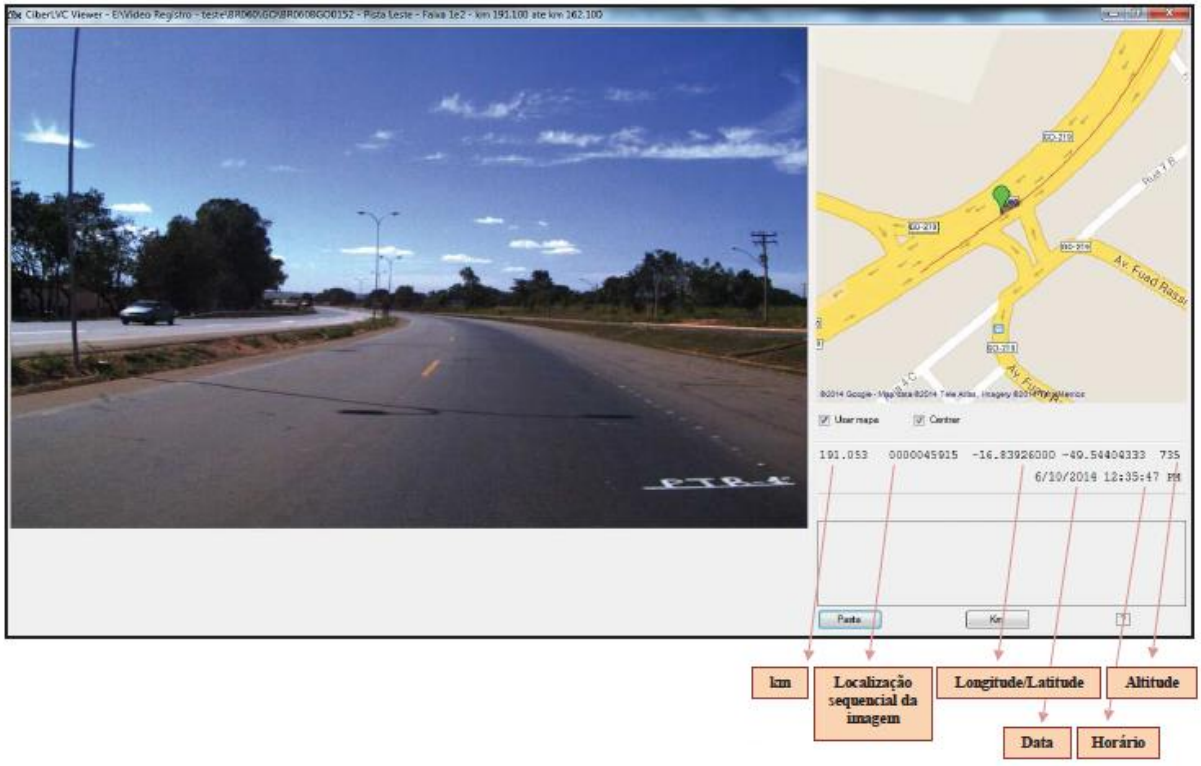


Figura 41 – Modelo da tela do visualizador.

VI.3 - ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO

Determinação do Número N

Nesta seção serão apresentadas informações a respeito da avaliação da solicitação do tráfego, componente essencial ao processo de deterioração do pavimento. Assim, além do VDM e do carregamento da frota, definiram-se os Fatores de Equivalência de Carga (FEC), os Fatores de Veículos (FV) e o Número Equivalente "N" para cada tipo de veículo em cada posto de pesagem e contagem. Os Fatores de Veículo para cada posto de pesagem foram determinados e estão apresentados na Tabela 51.

Tabela 51 – Relação dos Fatores de Veículos por tipo de veículo e posto de pesagem.

Classe Veíc.	KM 47+000 MG - NORTE	KM 86+000 MG - NORTE	KM 145+000 MG - NORTE	Km 284+000 MG - SUL	KM 422+000 MG - NORTE	KM 422+000 MG - SUL	KM 554+000 MG - SUL	KM 607+000 MG - NORTE	KM 607+000 MG - SUL	KM 767+000 MG - SUL
2C	0,68	0,67	0,72	0,69	0,97	0,61	1,11	0,74	0,67	0,80
3C	1,31	1,55	1,42	1,46	1,27	1,76	1,47	0,64	1,01	1,15
4C	0,58	0,58	0,58	0,58	0,86	0,86	1,61	1,40	1,40	0,78
2S1	1,02	1,21	1,77	1,97	2,34	2,48	1,75	1,13	1,07	1,38
2S2	1,53	1,43	1,40	1,69	1,99	1,27	1,26	0,64	1,09	1,22
2S3	3,81	4,05	2,54	3,49	4,07	3,31	4,01	3,64	3,61	3,10
3S3	3,53	3,58	3,13	3,36	2,86	3,59	2,64	2,31	2,06	2,71
3D4	4,74	4,71	3,72	4,25	4,95	5,12	4,82	2,72	3,47	2,90
3T6	7,59	7,09	5,55	8,10	7,65	8,75	5,10	4,58	4,69	3,08
3M6	5,57	5,31	5,26	5,37	4,61	5,36	4,57	4,29	4,06	3,08

Através dos dados de pesagens, determinaram-se os Fatores de Veículos, os números de solicitações "N" foram calculados através das contagens em cada Unidade de Amostragem e os Fatores de Veículos. Dessa forma, para cada Unidade de Amostragem obteve-se um número de solicitações "N" que corresponde ao segmento de tráfego da Unidade de Amostragem.

Com os valores de número de solicitações "N" para o ano de 2017, comparou-se com a previsão feita pelo software HDM-4. Cada Unidade de Amostragem apresenta uma previsão de solicitações para 2017, com base nos estudos de tráfego realizados em 2015, com previsão de crescimento de 3,5% conforme indicado o Programa de Exploração da Rodovia (PER). Os resultados se encontram na Tabela 52.

Tabela 52 – Comparação entre o número de solicitações “N” estimado pelo HDM-4 e calculado no ano de 2017. Valores em 10^6.

Unidade de Amostragem	Número "N" projetado HDM-4	Número "N" 2017
UA01 - A	0,58	0,56
UA01 - B	1,26	0,56
UA02 - A	0,49	0,88
UA02 - B	0,65	0,88
UA03 - A	0,31	0,77
UA03 - B	1,04	0,77
UA04 - A	0,39	0,71
UA04 - B	1,04	0,71
UA05 - A	0,25	0,88
UA05 - B	0,69	0,88
UA06 - A	0,11	0,83
UA06 - B	0,83	0,83
UA07 - A	0,19	1,04
UA07 - B	0,65	1,04
UA08 - A	0,15	0,48
UA08 - B	0,65	0,48
UA09 - A	0,19	0,52
UA09 - B	0,58	0,52
UA10 - A	0,18	0,41
UA10 - B	0,58	0,41

Os valores do número “N” projetado pelo HDM-4 para as Unidades de Amostragem B (unidades incluídas no segundo ano de projeto) tendem a ser mais próximas aos valores de número “N” determinado para o ano de 2017, com os dados atualizados. Diversos fatores podem ter contribuído para que o valor estimado não fosse próximo ao valor real, um deles seria o Volume Diário Médio.

A Tabela 53 compara os VDM’s dos postos de contagem de 2017 com os estimados em cada Unidade de Amostragem. De forma geral, o VDM diminuiu e não apresentou o crescimento estimado de 3,5%, exceto nas Unidades de Amostragem 09 e 10. A maior discrepância observada foi na UA 01, onde a queda no volume de veículos passantes foi cerca de 63%.

Apesar da queda no número de veículos passantes, percebeu-se que os fatores de veículos (FVs) aumentaram, uma vez que o número de solicitações “N” real teve uma tendência a ser maior que o previsto (Tabela 51). Pode-se concluir que a média do peso transportado por cada veículo comercial subiu, enquanto o número de veículos passantes diminuiu. A verificação da ocorrência deste fenômeno é de extrema importância, pois as maiores solicitações provocadas no pavimento

devido a passagem de veículos mais carregados, implica em maiores danos ao pavimento, o que provoca uma diminuição da vida útil do pavimento. Este acontecimento não poderia ser previsto pelos modelos do HDM-4, uma vez que o HDM-4 considera o aumento progressivo da frota, sem alteração de seus carregamentos.

Tabela 53 – Comparação entre os VDM's projetado (contagem de 2015, crescimento de 3,5%) e real (contagem de 2017).

Unidade de Amostragem	VDM projetado 2017	VDM real 2017
UA01 - A	5088	1893
UA01 - B	5087	
UA02 - A	2047	2090
UA02 - B	2047	
UA03 - A	1751	1615
UA03 - B	1751	
UA04 - A	1524	1330
UA04 - B	1525	
UA05 - A	2535	1684
UA05 - B	2535	
UA06 - A	1726	1727
UA06 - B	1726	
UA07 - A	9731	9145
UA07 - B	9731	
UA08 - A	5904	5348
UA08 - B	5904	
UA09 - A	4881	6409
UA09 - B	4881	
UA10 - A	5305	5595
UA10 - B	5305	

VI.4 - CARACTERIZAÇÃO DAS CAMADAS DO PAVIMENTO (ENSAIOS DE CAMPO)

A solicitação dinâmica dos pavimentos e do subleito, sujeitos a cargas de diferentes intensidades e frequências variáveis ao longo do dia e do ano, é de simulação difícil (Medina e Motta, 2005). Nos pavimentos cada carga aplicada exerce pressões diferentes, resultando em estados de tensão distintos nas camadas dos pavimentos. Um dos fatores mais simples que causam diferenças notáveis entre os ensaios de fadiga e a forma de aplicação de cargas em campo é a variabilidade do carregamento (Balbo, 2007). Como a aplicação de cargas durante o ensaio laboratorial é incompatível com a realidade de campo é necessário que também sejam realizados ensaios de campo para monitorar as condições e resposta dos pavimentos frente à solicitação do tráfego e clima. Assim, para haver uma melhor compreensão da relação campo laboratório, houve continuidade das campanhas de campo para realização de ensaios in situ com os equipamentos que já foram adquiridos (viga Benkelman, treliça, pêndulo britânico, mancha de areia, penetrômetro dinâmico DCP, extratora rotativa e outros).

Os resultados dos ensaios de campo vem sendo continuamente alimentados no Banco de Dados já implantado, promovendo uma melhoria gradativa na base de informações, cujo conteúdo é essencial para a elaboração de análises, destacando-se aquelas referentes às análises de desempenho dos pavimentos e para determinação dos Fatores Laboratório-Campo (FLC). A participação e a interação de recursos humanos no desenvolvimento de todas essas atividades proporcionaram a capacitação técnica da equipe.

Procedimentos

Inicialmente é realizada a abertura de uma janela de inspeção (Figura 72). Para tanto, utiliza-se a serra clipper para o corte do asfalto e um martelete para a retirada do asfalto. Assim que se alcança a base do pavimento, o primeiro ensaio a ser feito é o de frasco de areia (Figura 73). Para realização deste ensaio é necessário a limpeza da superfície do solo onde será feita a medição, deixando-a plana e horizontal. Coloca-se a bandeja na superfície e faz-se uma cavidade cilíndrica no solo com profundidade de cerca 15 cm, limitada ao orifício central da bandeja. O solo extraído durante a realização da cavidade é recolhido e pesado, sendo que uma pequena porcentagem é utilizada para determinação da umidade in situ através do método do fogareiro.

Figura 72 – Abertura da janela de inspeção.

Figura 73 – Ensaio de frasco de areia.

Após a abertura da cavidade, instala-se o conjunto de frasco de areia (Figura 74), de modo que o funil encaixe na cavidade. Abre-se o registro do frasco para que a areia escoe livremente até cessar o movimento da mesma, em seguida fecha-se o registro, retira o frasco mais funil, pesa-se este conjunto com areia que nele restar. A massa específica aparente do solo úmido será dada pela razão do peso do solo retirado da cavidade pelo peso da areia que enche a cavidade. A massa específica aparente do solo seco será a massa aparente do solo úmido vezes o fator de correção. O grau de compactação será a razão da massa específica do solo seco *in situ* pela massa específica aparente do solo obtida em laboratório.

Figura 74 – Conjunto frasco de areia.

Em seguida, é feito o ensaio para determinar a resistência do solo através do penetrômetro dinâmico (DCP). Este ensaio consiste em cravar no solo um cone por ação da queda livre de uma massa (Figura 75). A resistência à penetração é definida como o número de pancadas necessárias para cravar o penetrômetro a uma dada distância. O registro das leituras é feito de forma contínua sem recolhimento de amostra.

Figura 75 – Penetrômetro dinâmico (DCP).

Através do cilindro de cravação (Figura 76), retira-se uma amostra de solo com volume conhecido, esta amostra é pesada e através da relação peso e volume, descobre-se a densidade *in situ* de cada camada do solo.

Figura 76 – Penetrômetro dinâmico (DCP).

O último ensaio realizado na janela de inspeção é o ensaio de rebaixamento para determinar a permeabilidade *in situ*. A execução deste ensaio consiste em estabelecer uma coluna d'água inicial, em seguida, cessar a introdução de água e acompanhar o tempo gasto e o rebaixamento do nível d'água.

Os ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico para determinar as texturas do pavimento (macro e micro, respectivamente) são realizados de forma a garantir o mínimo de cinco leituras entre as trilhas de roda interna e externa. A terceira leitura coincide com o km definido para a Unidade de Amostragem, conforme esquema da Figura 77.

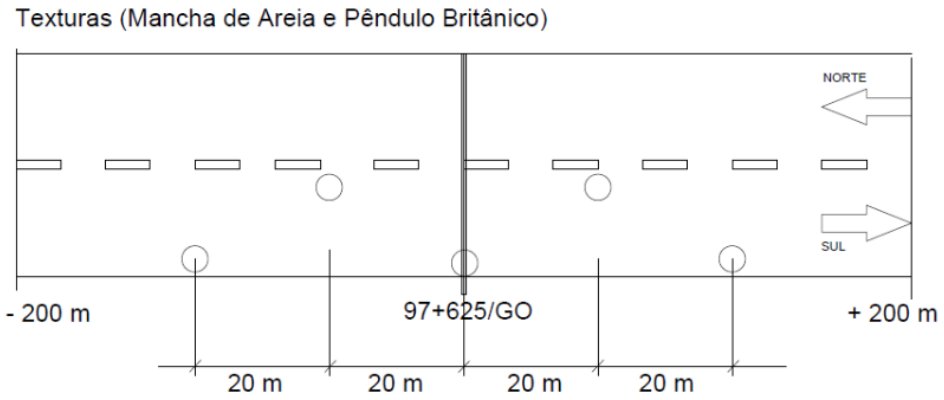


Figura 77 – Esquema de realização dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico (macro e micro texturas do pavimento).

O pêndulo britânico é utilizado para determinação da microtextura do pavimento, o funcionamento deste aparelho é baseado na perda de energia do pêndulo quando este desliza sobre o pavimento (Figura 78). O ensaio consiste em realizar pelo menos cinco lançamentos da sapata contra o pavimento molhado, sendo o primeiro lançamento descartado. Os valores da resistência à derrapagem são anotados, sua média calculada e comparadas com a classificação especificada no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT. No Manual, as superfícies com valores acima de 55 são consideradas medianamente rugosas a rugosas.

O ensaio de mancha de areia determina a macrotextura do pavimento, através do preenchimento dos vazios da textura superficial com um volume de 25.000 mm³ de areia de grãos arredondados, passante na peneira de abertura de 0,3 mm e retida na de 0,15 mm. Para a realização do ensaio se limpa a superfície com uma escova, o volume de areia é espalhado na superfície seca através de um disco, com movimentos uniformes e circulares, a fim de preencher os vazios da superfície até o espalhamento total da areia (Figura 79). Mede-se pelo menos quatro diâmetros do círculo formado e a média das é utilizada para determinar a altura média da mancha de areia. De acordo com o Manual do DNIT a textura do pavimento é classificada de acordo com a altura da mancha de areia, sendo que os valores superiores a 40 indicam um pavimento com macro textura grossa a muito grossa.

Figura 78 – Ensaio com pêndulo britânico.

Figura 79 – Ensaio de mancha de areia.

A medição do Afundamento da Trilha de Roda é realizada com o auxílio da treliça metálica. A medição consiste em colocar a treliça na trilha de roda interna e externa e realizar a leitura obtida pela régua a qual representa o afundamento da trilha de roda (Figura 80). As leituras são feitas em cinco pontos nas trilhas de rodas interna e externa conforme esquema apresentado na Figura 81.

Figura 80 – Medição do afundamento em trilha de roda (ATR) com treliça metálica.

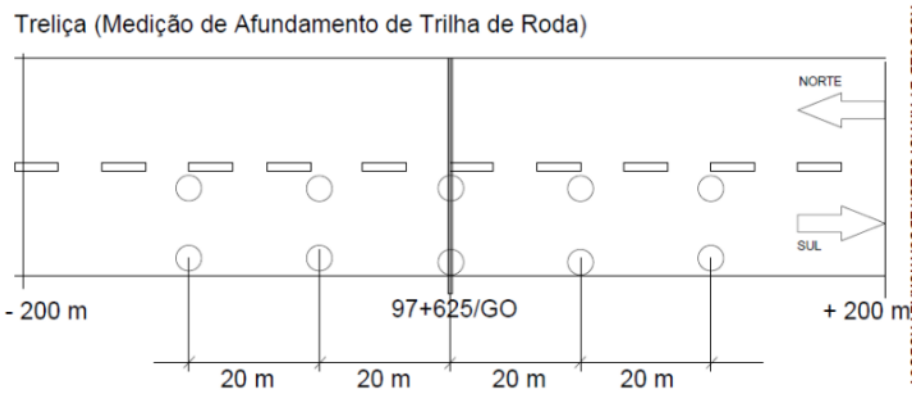


Figura 81 – Localização dos pontos de leituras dos ATR (trilhas internas e externas).

A viga Benkelman é um equipamento que possibilita realizar medições deflectométricas de um pavimento. Ela é constituída de um conjunto de sustentação em que se articula uma alavanca interfixa e um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla carregado com 8,2 toneladas para aplicar a carga sob a qual será medida a deformação elástica. A linha de influência deflectométrica (bacia de deflexão) é determinada com os mesmos espaçamentos de leituras realizados no FWD: 0 cm (deflexão máxima); 20 cm; 30 cm; 45 cm; 60 cm; 90 cm; e 120 cm.

Para a avaliação estrutural do pavimento é necessário medir os seguintes parâmetros durante o ensaio:

1. Deflexão máxima: obtida através do deslocamento sob o centro das rodas duplas de um eixo simples.
2. Raio de curvatura: é o arco de parábola que passa por dois pontos da deformada, sob a carga de 20 cm do centro de massa.
3. Bacia de deformação: medidas dos deslocamentos elásticos em vários pontos a partir do centro de carregamento.

O ensaio de viga Benkelman (Figura 82) nas Unidades de Amostragem é executado da seguinte forma: coloca-se a ponta de prova da viga Benkelman entre os pneus da roda dupla traseira do caminhão, exatamente sob o seu eixo. Realiza-se a leitura inicial do extensômetro que se situa a uma distância segura para o operador sobre o braço móvel da viga, em seguida deve se fazer o caminhão deslocar lentamente até as distâncias definidas para delineação da linha de influência deflectométrica. Por fim, faz-se a leitura final à 20 m de distância em relação da ponta de prova, distância que comumente o extensômetro não acusa mais variação. O croqui esquemático da localização dos pontos de ensaio com viga Benkelman é apresentado na Figura 83.

Figura 82 – Ensaios com uso da viga Benkelman.

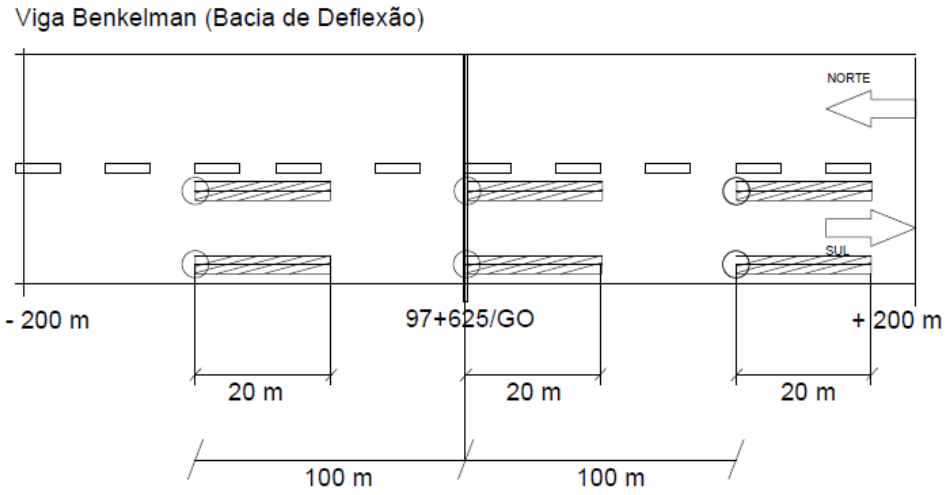


Figura 83 – Pontos de ensaios com uso da viga Benkelman.

A deflexão é dada pela diferença da primeira leitura e a última leitura multiplicada por uma constante da viga. Para a construção da curva da bacia de deflexão são feitas leituras de 20, 30, 45, 60, 90, 120 centímetros e 10 e 20 metros, a ser comparada com as leituras realizadas previamente com o FWD.

VI.4.1 - ANÁLISES DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS

As análises do comportamento estrutural dos pavimentos da Via040 foram realizadas através dos dados de deflexão das Unidades de Amostragem (UAs). A maneira mais direta e simples de avaliação da capacidade mecânica da estrutura, em faces das cargas aplicadas, é a medida de deflexões por meio de instrumento adequado, seja viga Benkelman ou FWD. Os valores das deflexões máximas comumente são utilizados para estudos de segmentação dos pavimentos de uma rodovia. Entretanto, não retratam a forma como o pavimento responde à ação de um carregamento. Destaca-se ainda, que nem sempre um pavimento com deflexão alta apresenta trincamento excessivo na camada de revestimento. Ao contrário, por vezes pode-se verificar um percentual de trincamento significativo em um pavimento com baixos valores de deflexão. Tal se deve à compatibilização de rigidez dos materiais de construção do pavimento. Como as camadas do pavimento trabalham em conjunto, é importante que haja compatibilidade de rigidez dos materiais, evitando-se gradientes elevados de módulos de resiliência (MR) entre camadas.

VI.4.1.1 - AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

A condição estrutural do pavimento indica por quanto tempo este ainda manterá um nível adequado de condição funcional ou serventia. A condição de um pavimento representa o nível de degradação resultante do processo de deterioração (DNER, 1998).

De acordo com Borges (2001), a avaliação estrutural verifica a capacidade de carga do pavimento, compreendendo o estudo das características de resistência e de deformabilidade de suas camadas. Dados referentes a adequabilidade estrutural do pavimento são essenciais para determinar o diagnóstico da qualidade global do pavimento.

Segundo Gontijo *et al*. (1994), este tipo de avaliação “permite detectar as causas mais prováveis das manifestações de ruína do pavimento, e consequentemente, definir a magnitude das operações necessárias à sua restauração".

Segundo Rodrigues (1995), é conhecido como avaliação estrutural de pavimentos o conjunto de procedimentos que determinam as respostas da estrutura quando sujeita às cargas do tráfego, traduzida na forma de tensões, deformações e deflexões em determinados pontos do pavimento, de forma que seja possível verificar sua capacidade de resistir aos mecanismos responsáveis pela degradação da estrutura do pavimento. A partir deste diagnóstico, torna-se possível definir quais serviços serão necessários ao restabelecimento das condições admissíveis aos usuários da rodovia.

A maneira mais direta e simples de avaliação da capacidade mecânica da estrutura, em faces das cargas aplicadas, é a medida de deflexões por meio de instrumento adequado, seja viga de Benkelman ou *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

A deflexão do pavimento, da forma como é medida, é o resultado de uma parcela de deformação elástica e uma parcela visco-elástica. A parcela visco-elástica pode ser considerada muito pequena devido ao curto espaço de tempo de aplicação da carga e de espera com o equipamento no local do levantamento, não havendo tempo para a recuperação total da estrutura. Desta forma, pode-se dizer que a deflexão do pavimento faz parte do grupo das deformações elásticas. A deflexão no pavimento é a deformação vertical ocorrida no pavimento pela passagem das rodas dos veículos. Essa deformação provoca o "arqueamento" das camadas do pavimento e sua repetição é responsável pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas e cimentadas (Borges, 2001).

Viga Benkelman

Este é, provavelmente, o teste de campo para avaliação de deflexões de pavimentos sob condições de carregamento, mais familiar aos engenheiros e aos projetistas de pavimentação, sendo o equipamento versátil e simples de operar o que o fez bem difundido e usado há um longo tempo.

A medição da deformabilidade do pavimento em provas de pneus de caminhões foi iniciada por volta de 1953, por ocasião da pista experimental da WASHO, EUA, com a criação pelo engenheiro norte-americano A. C. Benkelman de um equipamento muito simples (Figura 84 e Figura 85).

Moraes (2015) nos diz que a Viga Benkelman consiste de um equipamento muito simples destinado a medir deflexões no pavimento. É constituída por uma viga delgada horizontal com articulação intermediária, apoiada sobre três pés, formando então dois braços cuja relação dos comprimentos é 2:1 ou 4:1. Necessita de um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla carregado com 8,2t para aplicar a carga sob a qual será medida a deformação elástica.

No Brasil, a utilização da viga Benkelman iniciou-se, nos anos 1960 com os engenheiros Nestor José Aratangy e Francisco Bolivar Lobo Carneiro.

As normas que regulamentam a utilização da viga Benkelman no Brasil são DNER-ME 24/94, DNER-PRO 175/94 e DNER-ME 061/94.

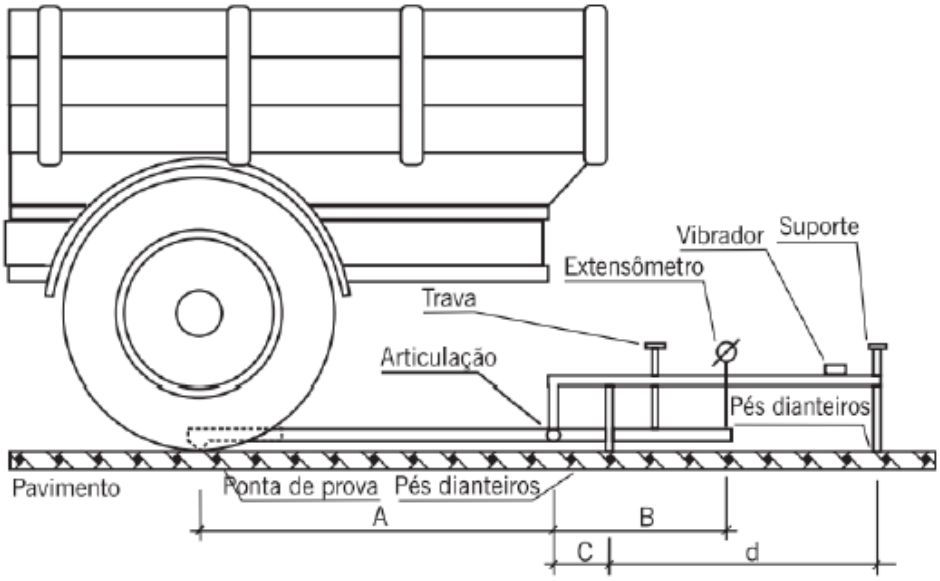


Figura 84 – Esquema viga Benkelman (DNER-ME 24/94).

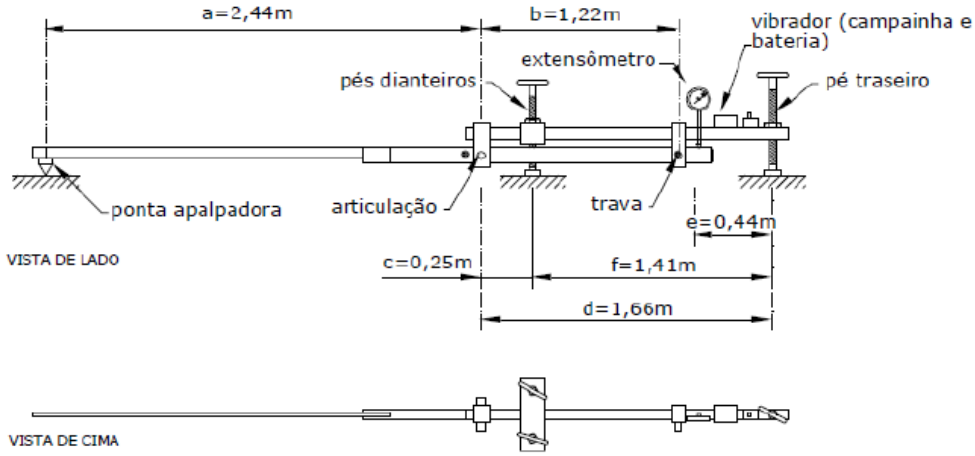


Figura 85 – Esquema da Viga Benkelman para medição de deflexões de pavimentos (Medina e Motta, 2005).

Execução do ensaio para cálculo da bacia de deflexão segundo a norma DNER-ME 061/94:

1. Aferição da viga conforme DNER-PRO 175/94;

2. Localização e marcação dos pontos do pavimento em que devem ser medidas as deflexões, localizados a uma distância prefixada da borda do revestimento, de acordo com a Tabela 54;

3. Um dos conjuntos de rodas duplas traseiras do caminhão deve ser centrado sobre o ponto selecionado na trilha externa, conforme indicado na Tabela 54. A carga de prova utilizada pelo caminhão é a carga sobre seu eixo traseiro de 8,2 tf;

4. A ponta de prova da Viga Benkelman deve ser colocada entre os pneus da roda dupla, coincidindo com o ponto selecionado. O perfeito posicionamento da ponta da viga, na vertical do eixo traseiro, deve ser assegurado por meio de um sistema de referência, relacionando a posição da viga à do caminhão. A trava da viga deve ser liberada;

5. Ligado o vibrador, faz-se a leitura inicial (L_0) quando o extensômetro indicar movimento igual ou menor que 0,01mm/min, ou decorridos 3 minutos da ligação do vibrador;

6. Desloca-se o caminhão lentamente para frente até que a sua referência atinja as proximidades da primeira divisão ressaltada da régua de referência. Com o caminhão parado e o vibrador ligado, efetua-se a primeira leitura intermediária, isto é, a leitura L_1 quando o extensômetro indicar movimento igual ou inferior a 0,01 mm/min, ou após decorridos 3 minutos, anotando também a distância correspondente ao deslocamento da referência do caminhão sobre a régua graduada com precisão de cm.

7. Procede-se da mesma maneira para obter as outras leituras intermediárias, isto é, as leituras L_2, L_3, L_4, L_5, etc.

8. O caminhão deve-se deslocar, lentamente, 10m para frente e conforme leitura inicial deve-se fazer a leitura final (L_f);

Calcula-se a deflexão do pavimento nos pontos correspondentes aos diversos deslocamentos pelas fórmulas:

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

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

Onde:

D_0: Deflexão em centésimo de milímetros no ponto de prova inicial (flexão máxima da linha de influência longitudinal da bacia de deformação);

D_n: Deflexão nos pontos correspondentes aos diversos deslocamentos do veículo;

L_0: Leitura inicial em centésimo de milímetros;

L_n: Leituras correspondentes aos diversos deslocamentos do veículo em centésimos de milímetros;

L_f: Leitura final em centésimo de milímetros;

$a\ e\ b$: Dimensões nos braços da viga Benkelman, em centímetros.

9. Desligado o vibrador, a parte móvel da viga deve ser travada sendo transportada para o novo ponto;

10. O raio de curvatura da bacia de deformação pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$R = \frac{6250}{2x(D_0 - D_1)}$$

Onde,

R = raio de curvatura, em metros;

D_0 = deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetros;

D_1 = deflexão na distância L_1, em centésimos de milímetros.

Existem outras fórmulas para cálculo do raio de curvatura e a interpretação da qualidade do pavimento sob o ponto de vista deste parâmetro, tal como a definição de um valor admissível, deve estar vinculada à expressão matemática usada nesta definição.

Tabela 54 - Distâncias de ensaio em relação à borda do revestimento (DNER-ME 061/94).

Largura da faixa de tráfego	Distância à borda do revestimento
Unidade (m)	Unidade (m)
2,70	0,45
3,00	0,60
3,30	0,75
3,50 ou mais	0,90

***Falling Weight Deflectometer* (FWD)**

Os defletômetros de impacto tipo *falling weight deflectometer* (FWD), normatizado pela DNER-PRO 273 e ASTM D 4695, tem tido grande aceitação nas avaliações estruturais de pavimentos asfálticos e de concreto, em pistas de aeroportos e rodovias, pois podem ser simuladas cargas de trens-de-pouso de aeronaves a eixos de caminhões e vem sendo cada vez mais utilizado devido à sua versatilidade, rapidez, alta precisão e grande produtividade.

De acordo com Cardoso (1995), o *falling weight deflectometer* (FWD) é um deflectômetro de impacto projetado para simular o efeito da passagem de uma carga de roda em movimento no pavimento. A medida de deflexão é obtida pela queda de um conjunto de massas, a partir de alturas pré-fixadas, sobre um sistema de amortecedores de borracha. Este sistema foi especialmente projetado para tornar o pulso de carga recebido pelo pavimento, o mais próximo possível de uma senóide. Igualando- se a energia potencial da massa, antes de sua queda, com o trabalho desenvolvido pelos amortecedores de borracha, depois da queda, pode-se conhecer a força de pico exercida sobre o pavimento.

O impacto causado pela carga no pavimento simula a passagem de uma carga de roda a uma velocidade entre 60 e 80km com uma duração de 25 a 33 milissegundos, em esquema na Figura 86.

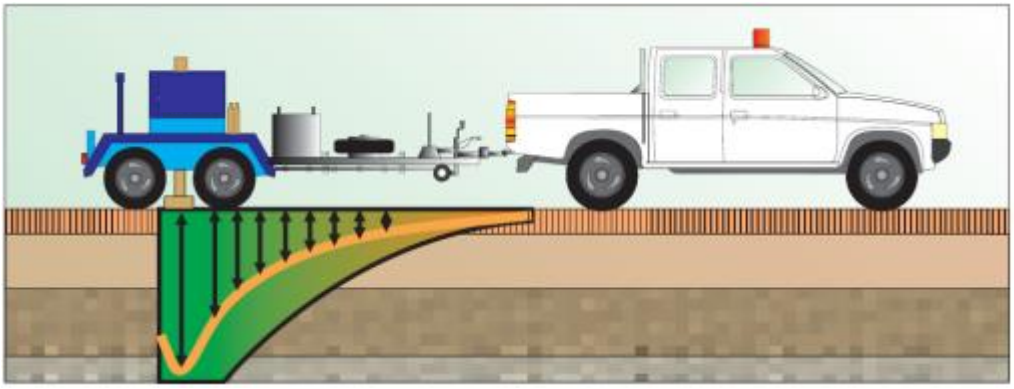


Figura 86 – Deflectômetro de Impacto, (Díaz, 2014).

Segundo Macêdo e Rodrigues (2003), os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento (bacia de deflexões) são medidos por sensores instalados ao longo de uma barra metálica (Figura 87) e um na própria placa circular. Estes sensores podem ser sismômetros, que são transdutores de deslocamento, geofones, que são transdutores de velocidade, ou acelerômetros.

Figura 87 – Sensores de medida de deflexão de um FWD.

O veículo de teste do FWD conta com um computador que, além da distância percorrida mensurada por um odômetro de precisão, simultaneamente armazena as deflexões medidas, temperatura da superfície do revestimento, temperatura do ar, altura de queda, massa e rigidez do pavimento. (Cardoso, 1995).

A força de pico aplicada ao pavimento, por meio da placa de carga pode ser calculada pela fórmula seguinte:

$$F = \sqrt{2Mghk}$$

Onde:

F = Força de pico;

M = Massa do peso que cai;

g = Aceleração da gravidade;

h = Altura de queda;

k = Constante do sistema de amortecedores.

De acordo com Moraes (2015), deve-se distinguir o nível de carga nominal do nível de carga real. O nível de carga nominal é determinado através da expressão (1), e o nível de carga real é medido pela célula de carga sendo função da massa, da altura de queda, rigidez e temperatura do pavimento.

A introdução no Brasil de um deflectômetro FWD Dynatest foi em 1988, e foi determinante para o avanço das análises mecanísticas dos pavimentos em uso, por permitirem medidas automáticas, rápidas e precisas das bacias deflectométricas. Desde então dois modelos principais têm sido utilizados no país: Dynatest e Kuab.

Em 2010, a Norma DNIT 132/2010 - PRO foi preparada pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias e estabelece a sistemática a ser empregada na calibração e controle de deflectômetro do tipo *falling weight deflectometer* (FWD). Foi elaborada tomando como base a norma AASHTO-R32-03 (2008/1): Standard recommended practice for calibrating the load cell and deflection sensor for a *falling weight deflectometer*.

Fatores que Influenciam os Valores de Deflexão

Os fatores que influenciam nas respostas deflectométricas do pavimento são os seguintes:

Efeitos Sazonais de Umidade

Durante a estação chuvosa o teor de umidade do subleito pode aumentar, diminuindo assim sua capacidade de suporte. Como esses períodos variam ao longo do ano, o valor da deflexão medida no pavimento não será constante, sendo dependente da época em que foram realizados os levantamentos.

De acordo com Nóbrega (2003), uma dúvida que os engenheiros e projetistas tinham desde a década de 60 na área de pavimentação era a seguinte: Qual a época do ano mais favorável às medições de deflexões no pavimento, sendo seus valores função das condições meteorológicas? Já naquela época, o meio técnico, de maneira geral, estava de acordo que a época mais adequada para realização de tais medições era após a estação chuvosa, em que o subleito apresentava o pior desempenho em relação a sua capacidade de suporte. Entretanto, se esta linha de raciocínio

fosse empregada como regra, o uso da viga Benkelman ficaria restrito a um pequeno período de tempo durante o ano, não sendo utilizado nas demais épocas.

Pesquisas posteriores realizadas no Brasil, tais como a pesquisa ICR e PAEP, mostraram que esta sazonalidade é baixa, além da ausência do ciclo gelo degelo (Medina, 1997).

Nestas pesquisas chegou-se a variações sazonais da ordem de 20 a 40% entre a estação seca e a estação chuvosa. No caso dos EUA esta variação pode chegar a 400%, ou seja, cinco vezes entre a medida do inverno e da primavera (Nóbrega, 2003).

De acordo com o DNER-PRO 10 (1979), a época do ano mais indicada a realização de levantamentos deflectométricos é imediatamente após a estação chuvosa, onde o subleito se encontra na condição mais desfavorável.

Temperatura

A temperatura é um dos fatores mais importantes nas medidas de deflexão, uma vez que afeta diretamente o comportamento do concreto asfáltico devido à variação da viscosidade do ligante betuminoso.

De acordo com Motta e Medina (1986), as misturas asfálticas têm um comportamento visco-elastoplástico, com sua rigidez sendo fortemente influenciada pela temperatura; quando esta diminui, o ligante betuminoso torna-se mais viscoso e o revestimento, mais rígido, aumentando, em consequência, a capacidade de distribuição de carga na estrutura do pavimento, diminuindo a magnitude das deflexões. Nos pavimentos flexíveis, a temperatura afeta, principalmente, a deflexão sob o ponto de aplicação da carga (D_0) devido ao comportamento reológico da camada asfáltica. Em pavimentos flexíveis, o efeito da temperatura nas deflexões é tanto maior quanto mais espessa for a camada elástica. Por isso, é fundamental a medida das temperaturas do ar e do pavimento no exato momento da realização dos ensaios.

Carregamento

Segundo Rocha Filho (1996), nas avaliações estruturais de pavimento a magnitude das deflexões é extremamente afetada pelo modo de carregamento utilizado. A influência do modo de carregamento sobre as deflexões pode ser melhor evidenciada quando é analisado o perfil de deflexões obtidas pelo emprego de equipamentos que utilizam modos diferentes de aplicação de carregamento.

Posicionamento dos sensores

De acordo com Nóbrega (2003), as deflexões são medidas em 0,01mm. Pequenos erros nas leituras deste parâmetro podem gerar grandes efeitos nos resultados de uma avaliação estrutural, no entanto, torna-se de extrema importância saber a que distância do centro da área carregada estão posicionados os sensores ao longo da bacia de deflexões.

Rocha Filho e Rodrigues (1998) *apud* Moraes (2015) observaram que o posicionamento dos sensores tem grande influência na obtenção dos módulos de elasticidade calculados por retroanálise. Os sensores registram os deslocamentos verticais referentes à contribuição das camadas que estão sob o estado de tensões provocado pelo carregamento aplicado, ao longo da

vertical que passa pelo sensor. Assim, a escolha mais adequada para as distâncias entre sensores deve ser função da rigidez e das espessuras das camadas do pavimento que será avaliado.

Segundo Pinto e Domingues (2001) *apud* Moraes (2015), geralmente são empregados os seguintes posicionamentos dos sensores:

- Pavimentos flexíveis: 0, 20, 30, 45, 65, 90 e 120cm;

- Pavimentos rígidos: 0, 20, 30, 80, 100, 160 e 200cm.

Os valores das deflexões máximas comumente são utilizados para estudos de segmentação dos pavimentos de uma rodovia. Entretanto, não retratam a forma como o pavimento responde à ação de um carregamento. Destaca-se ainda, que nem sempre um pavimento com deflexão alta apresenta trincamento excessivo na camada de revestimento. Ao contrário, por vezes pode-se verificar um percentual de trincamento significativo em um pavimento com baixos valores de deflexão. Tal se deve à compatibilização de rigidez dos materiais de construção do pavimento. Como as camadas do pavimento trabalham em conjunto, é importante que haja compatibilidade de rigidez dos materiais, evitando-se gradientes elevados de módulos de resiliência (MR) entre camadas.

VI.4.1 – ENSAIOS DE CAMPO REALIZADOS

Os resultados dos ensaios de laboratório realizados são apresentados no ANEXO 1 (Resultados dos Ensaios). A Tabela 55 apresenta um resumo da quantidade de ensaios realizados.

Tabela 55 - Quantidade de ensaios de campo realizados

ENSAIOS DE CAMPO	QUANTIDADE PREVISTA	QUANTIDADE EXECUTADA
Mancha de areia	6 a 10 pontospor UA	6 pontos por UA
Pêndulo Britânico	6 a 10 pontospor UA	6 pontos por UA
Viga Benkelman	12 bacias por UA	9 bacias por UA
Treliça	12 bacias por UA	10 pontos por UA
LVC	Segmento de 1000 m nas UA's	Segmento de 1000 m nas UA's
Janela de inspeção	1 janela por UA	1 janela por UA
Densidade in situ - Frasco de areia	1 por camada da janela de inspeção da UA	1 por camada da janela de inspeção da UA
DCP	1 por camada da janela de inspeção da UA	17*
Umidade in situ - Fogareiro	1 por camada da janela de inspeção da UA	1 por camada da janela de inspeção da UA
Avaliação Tátil-Visual	1 por camada da janela de inspeção da UA	1 por camada da janela de inspeção da UA

*Não foi possível realizar 4 ensaios de DCP, visto que o equipamento foi danificado impossibilitando a execução em todas as camadas das Unidades de amostragem.

VI.5 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E ENSAIOS DE LABORATÓRIO

VI.5.1 – EQUIPAMENTOS

Foram adquiridos os equipamentos Nobreak (Figura 88) e gerador (Figura 89). Para o funcionamento e realização dos ensaios no laboratório de Solos da Via040, parte da verba do RDT foi gasto com aquisição e reposição de materiais e serviços. Dentre os itens de reposição e aquisição tem-se a compra de peneiras, produtos químicos, normas internacionais de ensaios e reservas de materiais no almoxarifado da Via 040. O serviço contratado foi a calibração dos equipamentos, a fim de garantir o bom desempenho dos ensaios e a qualidade dos resultados.

Figura 88 - Nobreak.

Figura 89 - Gerador.

VI.5.2 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para elaboração de ensaios de pavimentação dentro das técnicas modernas e, por consequência, a capacitação de acadêmicos e profissionais foi necessária a montagem de um laboratório com espaço físico adequado, equipamentos específicos e recursos humanos (acadêmicos e profissionais) próprios do projeto de RDT da Via040. O laboratório de pavimentação encontra-se montado e funcionando com equipamentos básicos para realização de ensaios tradicionais. Entretanto, para estudar o pavimento como uma estrutura composta por materiais com diferentes propriedades geomecânicas, que em conjunto sofrem deformações elásticas e plásticas oriundas do carregamento rodoviário, deve-se fazer uso de métodos modernos de mecânica de pavimentos que exigem ensaios de carga repetida. Assim para obter os parâmetros de deformabilidade frente à ação do carregamento dinâmico aplicado pelo tráfego, o laboratório também conta com equipamentos para ensaios de carga repetida. Os módulos de resiliência dos materiais que constituem as camadas inferiores ao revestimento e do concreto asfáltico são obtidos, respectivamente, pelos equipamentos triaxial dinâmico e de compressão diametral com carga repetida. A mesma estrutura (compressor e secador de ar comprimido, sensores de deslocamento, célula de carga, transdutores de pressão, sistema de aquisição de dados, reguladores de pressão para aplicação de tensões desvio e confinante, temporizador de controle da frequência e tempo de duração do carregamento) é utilizada para realização dos ensaios triaxial e compressão diametral. Entretanto, por meio do esquema de montagem do equipamento de compressão diametral também é possível determinar as curvas de fadiga das misturas asfálticas.

Granulometria

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para determinar a porcentagem, em peso, que cada faixa específica de tamanho de partículas representa na massa total da amostra. Para isso, a amostra é preparada e passada por um conjunto normatizado de peneiras, pesando-se todo material retido em cada peneira (Figura 90).

Figura 90 – Peneiras para ensaio de granulometria simples.

Limite de Liquidez

O Limite de liquidez é definido como a divisa a qual o solo se comporta como material plástico, ou seja, a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo. O limite de plasticidade é tido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço, ou seja, a transição entre os estados plástico e semi-sólido do solo. Através desses ensaios podem-se estimar as propriedades do solo em relação à compressibilidade.

O ensaio de limite de liquidez consiste em colocar uma amostra em um recipiente de porcelana e ir adicionando água até a amostra ficar homogênea. Em seguida, passa-se certa quantidade para a concha do aparelho de Casagrande (Figura 91), aplainando com o auxílio de uma espátula. Com um cinzel realiza-se uma ranhura no meio da massa no sentido de maior comprimento do aparelho. Gira-se a manivela e conta-se o número de golpes necessários para fechar a ranhura, ao fechar a ranhura, uma parte do material é utilizado para determinar o teor de umidade. Com os pares de valores (número de golpes, teor de umidade) constrói-se um gráfico relacionando teores de umidade, em escala aritmética (nas ordenadas) com o número de golpes em escala logarítmica (nas abscissas). O teor de umidade correspondente a 25 golpes, obtido por interpolação linear é o Limite de Liquidez.

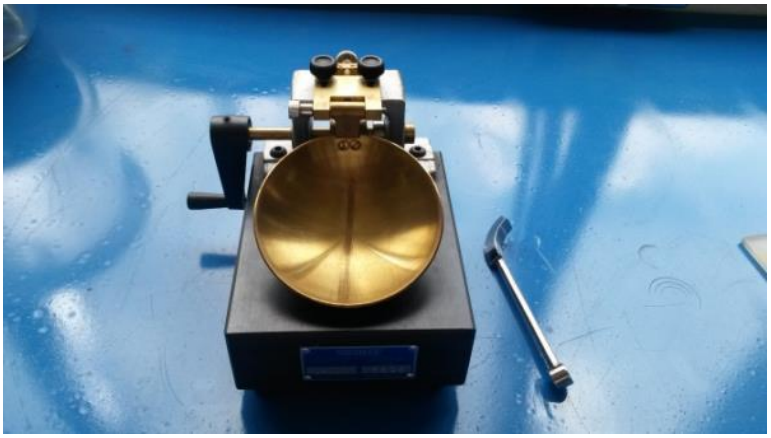


Figura 91 – Aparelho Casagrande.

Limite de Plasticidade

O ensaio de Limite de Plasticidade (Figura 92) também consiste homogeneizar a massa através de adição de água em um recipiente com a amostra. Em seguida, molda-se certa quantidade de massa em forma cilíndrica, rolando-a sobre uma placa de vidro até que ocorram fissuras em pequenos fragmentos quando essa atingir dimensões de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, conforme gabarito. Estes fragmentos são coletados para determinação do teor de umidade. A média dos valores de umidade encontrados é o Limite de Plasticidade.

Figura 92 – Conjunto limite de Plasticidade.

Expansão

O ensaio de expansão (Figura 93) é uma etapa para se determinar o índice de suporte de Califórnia, para este ensaio é necessário a moldagem de um corpo de prova com a amostra passada em uma peneira de 19 mm. Em cada corpo de prova colocam-se os pesos anelares e a haste de expansão juntamente com um extensômetro para medir as expansões ocorridas. Os corpos de prova são imersos em água durante 96 horas e as leituras do extensômetro devem ser feitas de 24 em 24 horas.

Figura 93 – Ensaio de expansão.

CBR

O Índice de Suporte Califórnia também é determinado utilizando-se um corpo de prova com a amostra passada na peneira de 19 mm. Para este ensaio, utiliza-se o mesmo molde do ensaio de expansão, levando o conjunto à prensa para assentamento do pistão de penetração no solo, por meio de aplicação de uma carga de aproximadamente 4,5 kg. Zera-se os ponteiros do extensômetro do anel dinamométrico e o que mede a penetração do pistão no solo. Aciona-se a manivela da prensa com uma velocidade constante e faz-se as leituras do extensômetro de acordo com a penetração do pistão no solo e o tempo decorrido de ensaio (Figura 94). Ao final obtém-se o Índice de Suporte de Califórnia através de um gráfico juntamente com o ensaio de compactação.

Figura 94 – Ensaio para determinação do Índice de Suporte de Califórnia

Módulo de Resiliência

São apresentados os detalhes dos ensaios realizados para obtenção dos módulos de resiliência (MR) de misturas asfálticas, materiais de base, sub-base e sub-leito e das curvas de fadiga das misturas asfálticas. Para determinação do MR e curvas de fadiga das misturas asfálticas faz-se uma adaptação no equipamento Triaxial Dinâmico. Os MRs dos materiais de base, sub-base e sub-leito são realizados diretamente no Triaxial Dinâmico. Além dos detalhes dos ensaios citados, também são apresentadas análises comparativas com os resultados típicos encontrados na literatura.

O parâmetro rigidez tornou-se essencial para o dimensionamento de pavimentos, após o desenvolvimento dos métodos mecanísticos, que compatibilizam a solicitação do tráfego com dados de resistência dos materiais (Franco, 2007). Pode-se citar os métodos de Kerkhoven e Dormon (1953), Saal e Pell (1960) e Dormon e Metcalf (1965), além dos métodos nacionais como o Método da Resiliência (Motta, 1991). O dimensionamento mecanístico tem por objetivo final a determinação da espessura de reforço estrutural que atenda simultaneamente, e de

maneira econômica, aos critérios limites de fadiga e de deformação permanente de todas as camadas do pavimento e do subleito, aumentando a confiabilidade da vida útil prevista para o pavimento (Fritzen, 2005).

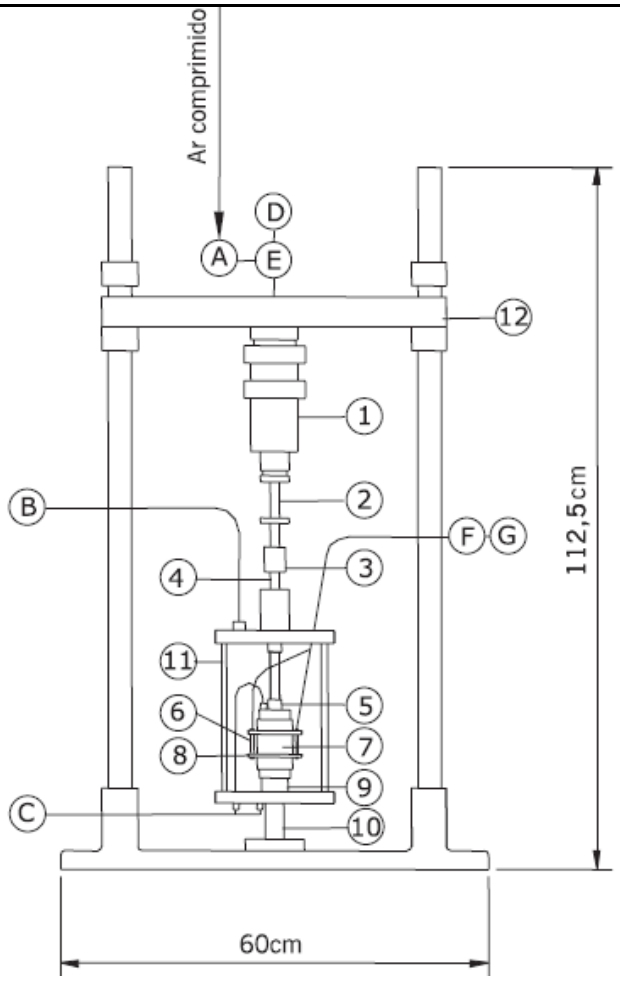
Outro fator importante a ser levado em consideração é a compatibilização de rigidez entre as camadas do pavimento. Um pavimento bem dimensionado não é, necessariamente, aquele que apresenta uma rigidez elevada, mas sim aquele em que suas camadas trabalhem, quando submetidas às solicitações do tráfego, de maneira harmoniosa. A prática tem mostrado que valores de deflexão baixos no pavimento não indicam, obrigatoriamente, um trincamento reduzido, pois, por vezes, as camadas do pavimento não apresentam uma compatibilidade adequada quanto à deformabilidade. Nos estudos realizados nesta pesquisa, casos semelhantes foram observados.

O MR foi introduzido por Francis Hveem em 1955, como forma de melhor representar o módulo de elasticidade para materiais sob carregamentos cíclicos. De acordo com a teoria da elasticidade, tanto o MR quanto o módulo de elasticidade possuem o mesmo conceito, sendo ambos representados pela razão entre a tensão e a deformação. A motivação para a diferenciação entre estes, foi as discrepâncias entre a ordem de grandeza de deslocamentos dos materiais utilizados em pavimentação em relação aos materiais elásticos comumente utilizados na engenharia (Brito, 2006).

Ponte *et al.* (2014) explica que a análise dos resultados de MR não permite uma modelagem apropriada dos fenômenos comumente associados aos pavimentos, por não considerar o comportamento viscoelástico do mesmo. Porém, este ainda é o parâmetro de rigidez mais difundido no país, devido tanto à cultura de utilização desse parâmetro quanto ao alto valor de aquisição de equipamentos para obtenção do Módulo Dinâmico. Para a realidade brasileira, o ensaio de MR é, numa análise comparativa, avançado quando se considera a caracterização mecânica dos materiais exigida pelo método de dimensionamento em vigor no país, que ainda baseia-se em resultados do ensaio de CBR (*California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia), bem como no uso do número N.

Módulo de Resiliência (Solos)

Para a determinação do módulo de resiliência de materiais de pavimentação, têm-se utilizado equipamentos de carga repetida em laboratório. A Figura 95 mostra um exemplo de equipamento triaxial de cargas repetidas e um desenho esquemático da montagem do corpo-de-prova dentro da célula triaxial. Na Figura 96 mostra-se o equipamento adquirido pelo projeto de RDT e seus componentes principais.



A – regulador de pressão para aplicação da tensão-desvio
B – regulador de pressão para aplicação da tensão confinante
C – sistema de vácuo
D – temporizador de controle da freqüência e tempo de duração do carregamento (tensão-desvio)
E – válvula de três vias
F – amplificador de sinal
G – oscilógrafo ou microcomputador com monitor e impressora
1. cilindro de pressão
2. pistão
3. conexão
4. haste
5. cabeçote (top-cap)
6. LVDT transdutor de deslocamento
7. amostra de solo
8. alça de fixação dos LVDTs
9. base
10. suporte central
11. célula triaxial
12. estrutura da prensa

Figura 95 – Esquema do primeiro equipamento triaxial de carga repetida do Brasil (Bernucci *et al.*, 2007).

Figura 96 – Equipamento adquirido pelo Projeto de RDT (Via040).

Segundo Bernucci *et al*. (2007), o material a ser ensaiado é compactado nas condições de estado representativas do projeto e obra, com altura de pelo menos duas vezes o diâmetro. Vem-se utilizando normalmente corpos-de-prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para solo, solo-cimento, misturas solo-agregado, etc. e para algumas britas graduadas simples ou tratadas com cimento ou ainda solo-brita-cimento. Dependendo do diâmetro máximo dos agregados, devem ser usados corpos-de-prova de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura.

De acordo com Medina e Motta (2015), a moldagem de corpos-de-prova de materiais granulares, com certo grau de coesão, pode ser feita compactando-se por impacto em moldes tripartidos verticalmente (Figura 97). Leva-se a amostra para o pedestal, quando, então, se retiram as três partes do molde e coloca-se a membrana. Se o corpo-de-prova de areia ou pedregulho não tiver possibilidade de se manter intacto, o mesmo deve ser preparado sobre a base ou pedestal por vibração ou outro procedimento. O vácuo que se pode aplicar através da placa porosa inferior também serve para verificar a integridade da membrana envolvente.

A moldagem dos corpos-de-prova de materiais coesivos faz-se, quase sempre em moldes tripartidos, por impacto, em várias camadas, obedecendo-se às energias especificadas conforme a camada do pavimento e subleito. É possível também se preparar corpos-de-prova por prensagem estática, de preferência em várias camadas para tentar obter maior uniformidade de massa especifica ao longo da altura do corpo-de-prova.

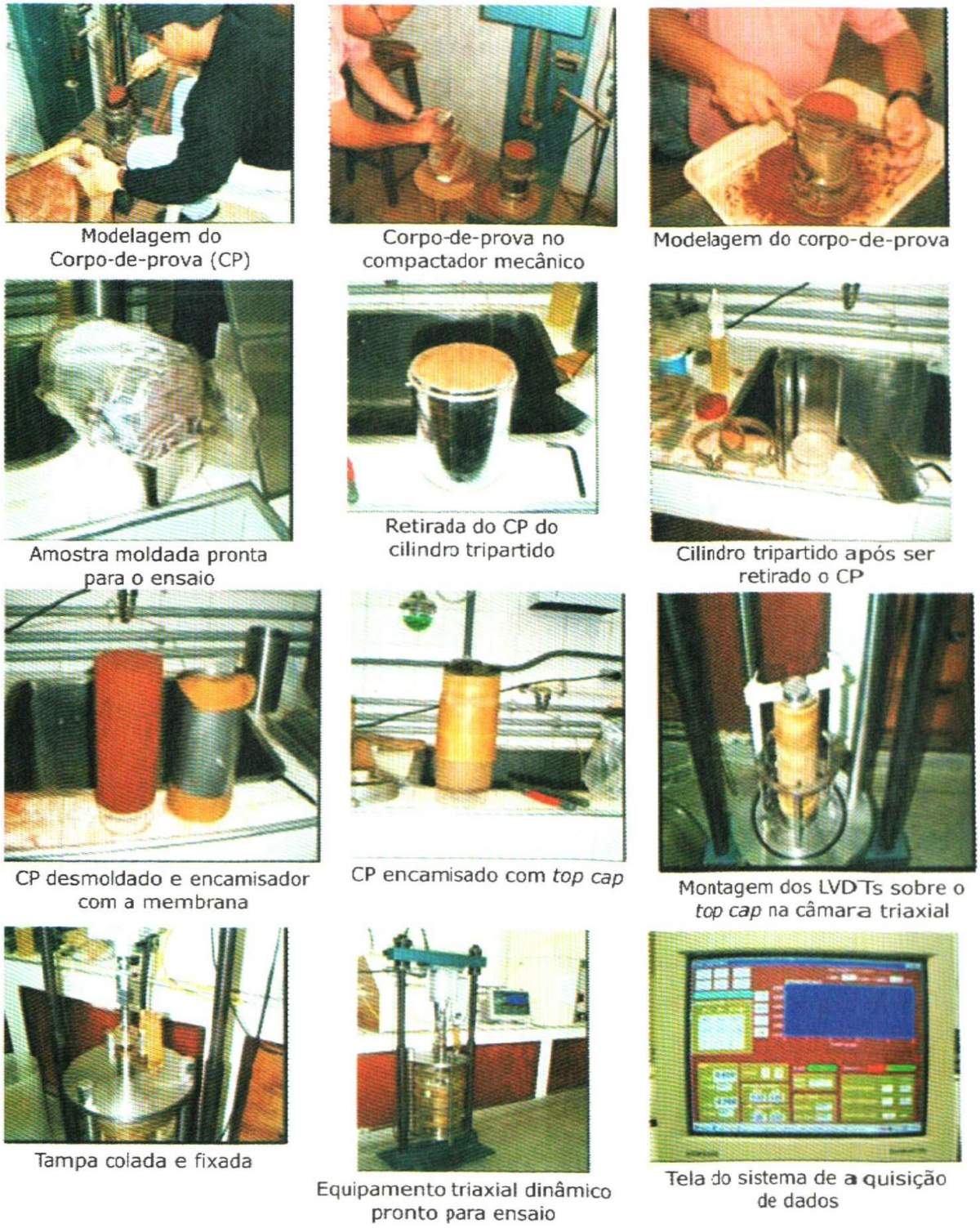


Figura 97 – Passos do ensaio triaxial de cargas repetidas (Medina e Motta, 2015).

Da Figura 98 a Figura 106 apresentam-se alguns dos passos do ensaio triaxial de cargas repetidas realizados nas amostras de solo das camadas de pavimento da BR-040 no Laboratório de Pavimentação da Via040. As amostras foram moldadas em laboratório com as mesmas características (peso específico, umidade, etc.) do material *in-situ*.

Figura 98 – Preparação da amostra de solo.

Figura 99 – Modelagem do corpo-de-prova.

Figura 100 – Corpo-de-prova no compactador.

Figura 101 – Pesagem do corpo-de-prova em balança de precisão.

Figura 102 – Encamisamento do corpo-de-prova com membrana.

Figura 103 – Corpo-de-prova encamisado, com top cap e suporte dos LVDTs.

Figura 104 – Instalação dos LVDTs no corpo-de-prova.

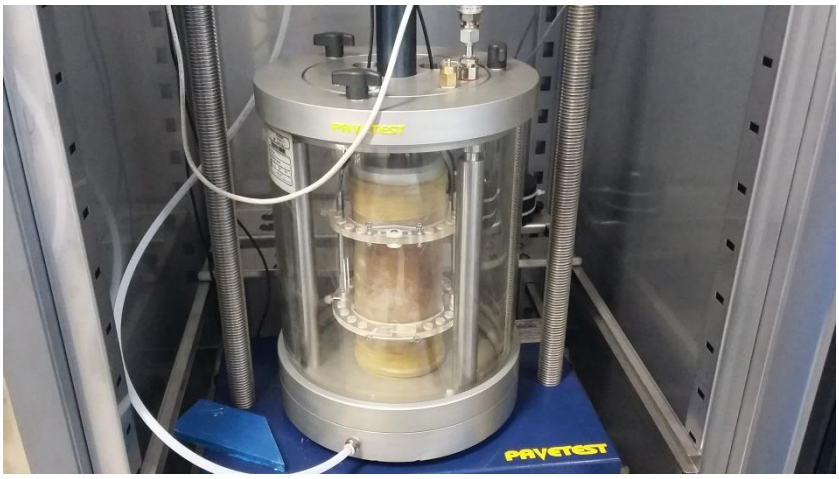


Figura 105 – Equipamento triaxial de carga repetida pronto para ensaio.

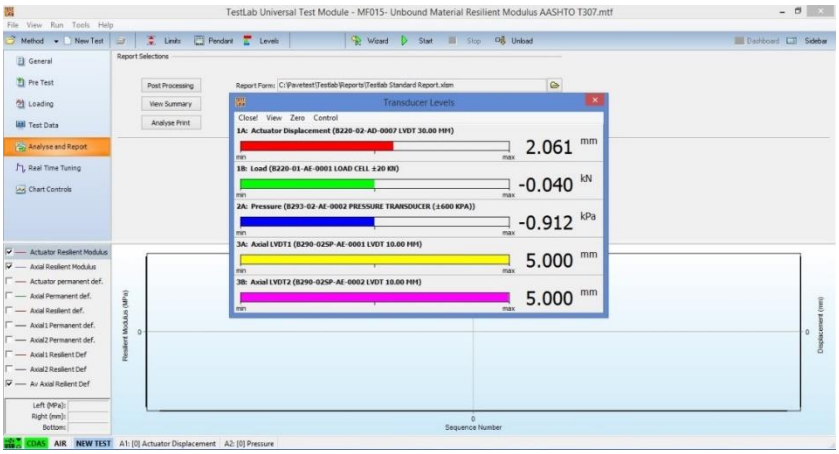


Figura 106 – Tela do sistema de aquisição de dados.

A norma DNIT 134/2010 – ME (Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio) recomenda que antes de iniciar o ensaio propriamente dito de determinação do MR, seja aplicada uma sequência de carregamentos dinâmicos com a finalidade de eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio e de reduzir o efeito na história de tensões no valor do módulo de resiliência. A norma sugere, então, que sejam aplicadas 500 repetições para cada combinação de tensão desvio σ_d e pressão confinante σ_3, de acordo com a sequência apresentada na Tabela 56.

Tabela 56 - Sequência de tensões para fase de condicionamento (DNIT 134/2010 – ME)

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1 / σ_3
68,9	68,9	2
68,9	206,8	4
102,9	309,0	4

Ressalta-se, entretanto, que a prática mostra que tal fase de condicionamento se apresenta, certas vezes, excessiva, estressando demasiadamente o corpo-de-prova, levando-o à ruptura após poucas sequências de tensões, necessárias para a determinação do módulo de resiliência.

No ensaio triaxial de cargas repetidas, a aplicação de carga é semi-senoidal por se aproximar da forma de carregamento correspondente à passagem de roda. O tempo de duração de aplicação total de carga é de 0,1 segundo e o repouso de 0,9 segundo. São utilizadas diferentes tensões de confinamento σ_3, dada por pressão de ar dentro da célula, e tensões desvio σ_d, aplicadas por célula de carga.

A norma DNIT 134/2010 – ME recomenda a aplicação de 18 pares de tensões desvio e confinante, conforme mostra a Tabela 57. Vale destacar, no entanto, que nem sempre é possível realizar toda essa sequência, pois o corpo-de-prova pode romper antes disso. O módulo de resiliência para cada par de tensões é obtido a partir do valor médio dos últimos 5 ciclos de carregamento, de um total mínimo de 10 repetições.

Tabela 57 - Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência (DNIT 134/2010 – ME)

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1/σ_3
20,7	20,7	2
	41,4	3
	62,1	4
34,5	34,5	2
	68,9	3
	102,9	4
50,4	50,4	2
	102,9	3
	155,2	4
68,9	68,9	2
	137,9	3
	206,8	4
102,9	102,9	2
	206,8	3
	309,0	4
137,9	137,9	2
	274,7	3
	412,0	4

A Figura 107(a) mostra de forma esquemática as tensões aplicadas ao corpo-de-prova no carregamento; no repouso, restam apenas as tensões de confinamento, sendo retirada a tensão desvio σ_d, que é a diferença entre as tensões principais maior e menor, respectivamente representadas por σ_1 e σ_3. Uma combinação variada de tensões é normalmente aplicada. A Figura 107(b) representa os deslocamentos do corpo-de-prova durante ciclos de repetição de carga. Uma parcela se refere ao deslocamento recuperável e a outra à acumulada ou permanente. É desejável que os deslocamentos permanentes sejam de pequena magnitude. Os deslocamentos são medidos

por transdutores mecânicos eletromagnéticos (*linear variable differential transducers*, LVDT), ao longo de uma determinada altura ou espessura (L) do corpo-de-prova (Bernucci *et al.*, 2007).

O Módulo de resiliência (MR), em MPa, é o módulo elástico obtido em ensaio triaxial de carga repetida cuja definição é dada pela expressão:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial, MPa;

σ_1 = tensão principal maior, MPa;

σ_3 = tensão principal menor ou tensão de confinamento, MPa;

ε_r = deformação específica axial resiliente (recuperável), mm/mm;

Sendo:

$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{L}$, ou seja, deslocamento recuperável (δ_r) pela altura ou espessura (L) do corpo-de-prova submetido às tensões.

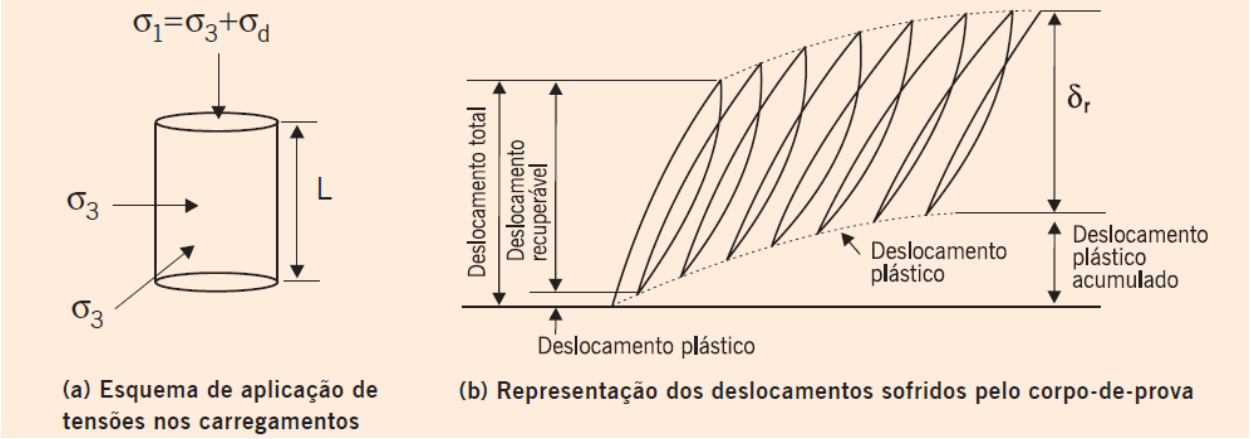


Figura 107 – Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida (Bernucci *et al.*, 2007).

O procedimento detalhado da preparação do corpo-de-prova, colocação na prensa e realização do ensaio triaxial pode ser sistematizado nos seguintes passos (Medina e Motta, 2015).

1. Após a compactação, mede-se a massa do corpo-de-prova, ainda dentro do molde, descontando-se a massa do molde tripartido.

2. Coloca-se o corpo-de-prova (CP) sobre a pedra porosa, ainda envolvida pelo molde cilíndrico tripartido.

3. Retiram-se as braçadeiras; desmoldam-se as três partes do cilindro.

4. Coloca-se o cabeçote sobre o CP.

5. Com auxilio do encamisador, envolve-se o CP com a membrana de borracha.

6. Colocam-se elásticos envolvendo a membrana na altura do cabeçote.

7. Coloca-se o CP sobre a base da célula triaxial.

8. Colocam-se elásticos envolvendo a membrana na altura da base da célula triaxial.

9. Fixam-se os LVDTs ao cabeçote.

10. Coloca-se o cilindro da célula triaxial.

11. Colocam-se as hastes de fixação da tampa da célula triaxial.

12. Assenta-se a tampa da célula triaxial, prendendo-a as respectivas hastes.

13. Coloca-se a conexão da haste ao pistão de carga.

14. Encaixam-se os mangotes de ar comprimido para a aplicação das tensões desvio e confinante.

15. Libera-se o ar comprimido.

16. Liga-se o sistema de aquisição e reprodução de dados.

17. Faz-se o ajuste fino dos LVDTs, com o auxilio das hastes rosqueadas, dentro do intervalo de voltagem para a leitura dos deslocamentos.

18. Inicia-se a fase de condicionamento, com aplicação de 500 pulsos de carga em três estágios de aplicação de tensão desvio e confinante.

19. Após o condicionamento, ajustam-se novamente os transdutores e inicia-se o ensaio triaxial. Na prática são 18 ciclos de carga, sendo 10 aplicações de carga por ciclo.

20. Após a aplicação do ultimo ciclo de carga, verificam-se os valores e os gráficos diretamente no monitor e, caso todos os ponto tenham sido computados ou nenhuma anomalia verificada, o ensaio pode ser considerado terminado.

21. Retiram-se o corpo-de-prova (CP) da câmara; coloca-se CP numa cuba metálica; verifica-se a massa do CP imediatamente após o ensaio; coloca-se o CP em estufa para secagem.

22. Após a verificação da constância de massa do CP em estufa e, conhecido o volume do mesmo e a massa da cuba metálica, calcula-se o teor de umidade de ensaio do CP.

Define-se módulo resiliente ou módulo de resiliência, MR, no ensaio triaxial de cargas repetidas pela equação:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1}$$

onde, σ_d é a tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) e ε_1 ou ε_r é a deformação resiliente axial (vertical):

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0}$$

onde: Δh é o deslocamento vertical máximo e h_0 é a altura inicial de referencia do corpo-de-prova cilíndrico, correspondente ao posicionamento e fixação dos LVDTs.

As tentativas de classificação de solos quanto à resiliência e de correlação de suas propriedades elásticas com suas propriedades geotécnicas tradicionalmente utilizadas em pavimentação vêm sendo feitas praticamente desde os primeiros estudos de deformabilidade elástica destes materiais.

Os primeiros modelos de módulo de resiliência de solo em função do estado de tensões que foram observados no Brasil estão indicados na Figura 108. Os dois primeiros modelos arenoso e argiloso são historicamente os que se encontram em trabalhos pioneiros como na tese de Hicks (1970) e no documento do Transportation Research Board (1975).

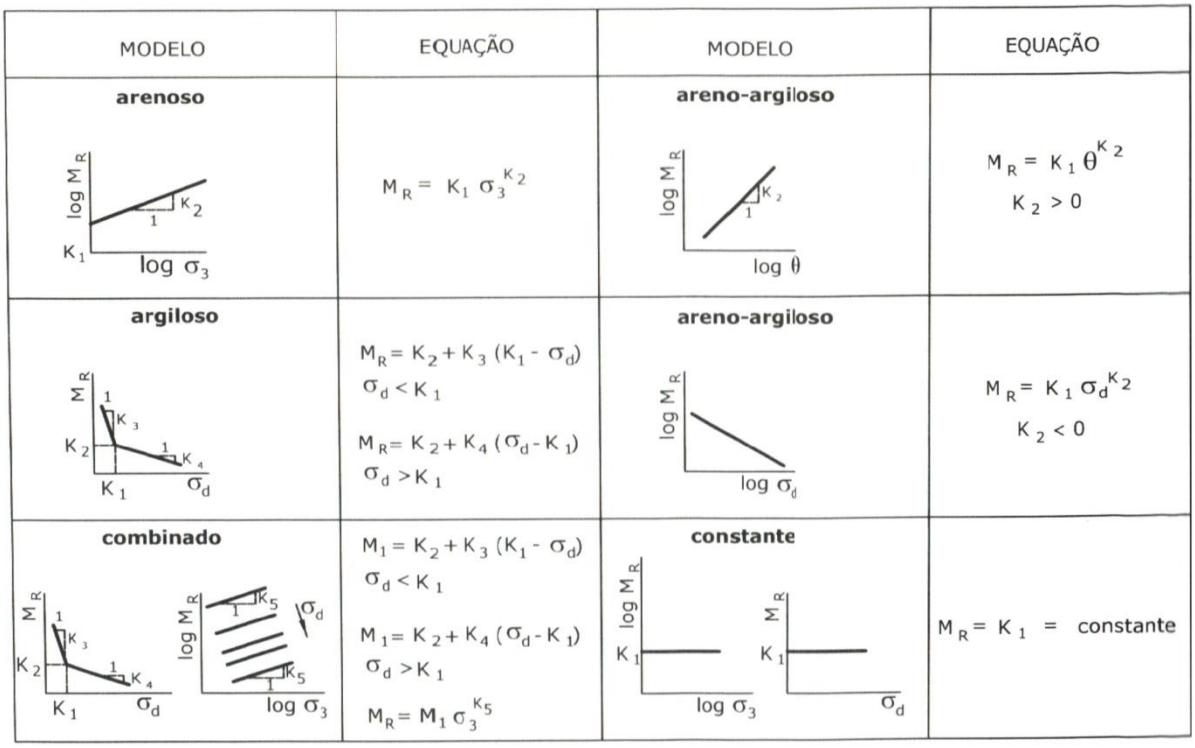


Figura 108 – Primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos em ensaios triaxiais de cargas repetidas, observados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ (Medina e Motta, 2015).

No Brasil, o primeiro esboço de classificação de solos quanto ao seu comportamento resiliente foi feito por Medina e Preussler (1980), com base nos resultados de ensaios triaxiais de cargas

repetidas realizados na COPPE/UFRJ no período de 1977 a 1980. A Tabela 58 apresenta os critérios de enquadramento definidos por Medina e Preussler (1980) e a Tabela 59 os valores típicos encontrados de MR para materiais granulares e de sub-leito.

Tabela 58 - Características Resilientes de Solos Brasileiros (Medina e Preussler, 1980).

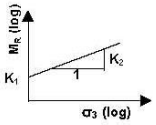
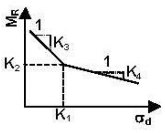
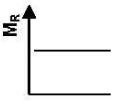
% que passa na peneira 200 (0,074mm); finos	Granulometria	Características Físicas (%)				Classe		Modelo $M_R=s(\sigma_3, \sigma_d)$	K	Avaliação como camada de pavimento e subleito
		LL	IP	CBR	EXP.	TRB	USCS			
Menos de 50%: Solos Arenosos	Graduada (Faixa A)	<45	≤14	>20	< 0,5	A–1–b e A-2	SM e SC		K1=4000 K2=0,90	Resiliência Média. Se K2 < 0,5 e compactado no proctor modificado: Bom para camadas do pavimento
										Se K2 < 0,5, espessura menor que 40 cm, acima de subleito de CBR > 10: Bom em camada do pavimento
	Uniforme (Faixa B)					A–3	SM		K_1 = 9500 K_2 = 0,75	Resiliência Pequena. Em camadas de base e subbase: Muito bom.
						A–2–6	SC		K_1= 2800 K_2=0,34	
						A–2–4	SM		K_1= 2600 K_2= 0,52	
	Intermediária a Uniforme	NL	NP	<10	≥2	A–4 A–2–4	SM		K_1=330 K_2= 0,52	Resiliência Grande. Não deve ser utilizado em Pavimentos: Muito ruim como subleito (micáceos)
Mais de 50%: Solos Argilosos (Lateríticos)	Silte / Finos < 50%	40 a 60	15 a 30	> 12	–	A-7 e A-6	CL e CH		K_1=0,07 a 0,11 K_2=223 (CBR) – 741 0<K_3<2840 K_4=-200 a –300 (CBR > 10) K_4=0 (CBR < 10) K_2=32+6,6 (CBR) – K_4 (0,2 – K_1)	Como subleito e reforço do subleito: bom; Como subbase: aceitável, às vezes
				≤ 12						Como subleito: médio a ruim; Como reforço do subleito: requer estudos e ensaios especiais
	Silte / Finos > 50%	35 a 60	15 a 20	= 12	–	A-7 e A-6	ML e CL		K_3=K_4=0 M_R=32+6,6 (CBR)	Como camada de pavimento: não utilizar; Como subleito: requer atenção e ensaios especiais

Tabela 59 - Valores típicos de MR para materiais granulares e de subleito (Ferreira, 2008).

Classificação do Material	Faixa de Valores do M_R (psi)	Valores Típicos de M_R (psi)	Valores Típicos de M_R (MPa)
A-1-a	38.500 – 42.000	40.000	287
A-1-b	35.500 – 40.000	38.000	272
A-2-4	28.000 – 37.500	32.000	229
A-2-5	24.000 – 33.000	28.000	201
A-2-6	21.500 – 31.000	26.000	186
A-2-7	21.500 – 28.000	24.000	172
A-3	24.500 – 35.500	29.000	208
A-4	21.500 – 29.000	24.000	172
A-5	17.000 – 25.500	20.000	143
A-6	13.500 – 24.000	17.000	122
A-7-5	8.000 – 17.500	12.000	86
A-7-6	5.000 – 13.500	8.000	57
CH	5.000 – 13.500	8.000	57
MH	8.000 – 17.500	11.500	82
CL	13.500 – 24.000	17.000	122
ML	17.000 – 25.500	20.000	143
SW	28.000 – 37.500	32.000	229
SP	24.000 – 33.000	28.000	201
SW-SC	21.500 – 31.000	25.500	183
SW-SM	24.000 – 33.000	28.000	201
SP-SC	21.500 – 31.000	25.500	183
SP-SM	24.000 – 33.000	28.000	201
SC	21.500 – 28.000	24.000	172
SM	28.000 – 37.500	32.000	229
GW	39.500 – 42.000	41.000	294
GP	35.500 – 40.000	38.000	272
GW-GC	28.000 – 40.000	34.500	247
GW-GM	35.500 – 40.500	38.500	276
GP-GC	28.000 – 39.000	34.000	244
GP-GM	31.000 – 40.000	36.000	258
GC	24.000 – 37.500	31.000	222
GM	33.000 – 42.000	38.500	276

Os ensaios triaxiais de carga repetida realizados em amostras das camadas de pavimento das unidades de amostragem seguiram as orientações da norma DNIT 134/2010 – ME. Para cada par de tensões, desvio e confinante, foram realizados 15 ciclos de carga e descarga, sendo utilizados os últimos 5 ciclos para obtenção do MR de cada sequência. A Figura 109 apresenta, a título de exemplo, os últimos 5 ciclos de carga e descarga da 2ª sequência de tensões do ensaio triaxial de carga repetida da sub-base da UA-9.

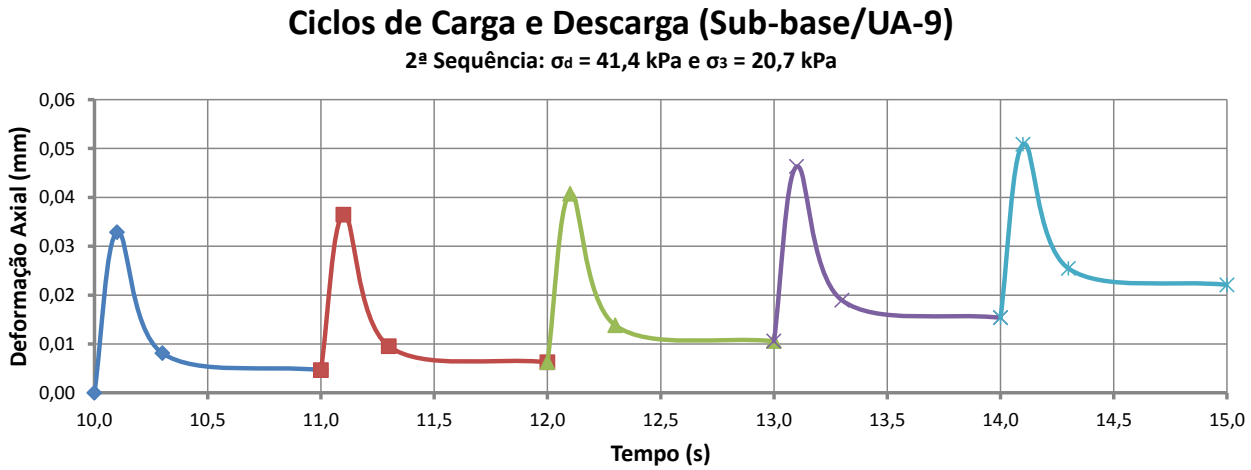


Figura 109 – Ciclos de carga e descarga utilizados na determinação do MR da 2ª sequência de tensões da sub-base da UA-9.

Conforme explicam Medina e Motta (2015), não sendo os solos e britas materiais elásticos lineares, não se aplicam as expressões da lei de Hooke generalizada. Os módulos de resiliência dos solos dependem do estado de tensões atuante – as decorrentes do peso próprio mais as tensões causadas pelas cargas dos veículos. O que se procura determinar nos ensaios triaxiais é a relação experimental:

$$MR = f(\sigma_3, \sigma_d)$$

para as condições de densidade, umidade e grau de saturação que o solo apresenta *in situ*.

A deformação resiliente pode ser vista no nível microscópico como deformação elástica das partículas do solo e dos aglomerados de partículas. A microestrutura floculada das argilas a baixos teores de umidade, seja no arranjo bordo-face das partículas (argila caulinítica comum nos solos tropicais) pode dispersar-se parcial e reversivelmente para as pequenas deformações que se mantêm muito aquém da ruptura plástica. Minerais de solo em forma de plaqueta – as micas – de solos saprolíticos também contribuem para a deformabilidade resiliente. A deformação plástica de sistema particulado com poros não saturados resulta de escorregamentos

nos contatos dos grãos e acomodações irreversíveis de partículas pequenas nos poros de partículas maiores.

Medina e Motta (2015) explicam, ainda, que o módulo de resiliência depende da natureza e constituição do solo, das condições de estado e das solicitações das tensões. O primeiro item refere-se à constituição mineralógica, textura das partículas, plasticidade da fração fina, arranjo estrutural das partículas e elos de cimentação natural. As condições de estado são a massa específica aparente e a umidade. As solicitações de tensão, aplicadas repetidamente, procuram representar a ação do tráfego numa estrutura de pavimento.

Mantendo-se os demais parâmetros sob especificação, para cada solo o módulo de resiliência poderá ser expresso como uma função do estado de tensões aplicado durante o ensaio, por meio de modelos matemáticos com constantes experimentais.

A partir dos resultados dos ensaios realizados nas amostras das UAs foram avaliados os seguintes modelos matemáticos:

- Modelo 1:

$$MR = k_1 \sigma_d^{k_2}$$

- Modelo 2:

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2}$$

- Modelo 3:

$$MR = k_1 \theta^{k_2}$$

onde k_1 e k_2 são constantes experimentais, σ_d é a tensão desvio, σ_3 é a tensão confinante e θ, no caso de compressão triaxial, é dado pela soma $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$.

Módulo de Resiliência (Misturas Asfálticas)

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é realizado aplicando-se uma carga repetida no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura. Os corpos-de-prova cilíndricos, moldados no compactador Marshall, possuindo 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, ou extraídos de pista ou de amostras de maiores dimensões com 100 mm de diâmetro e altura entre 35 mm e 65 mm.

O carregamento diametral, representado esquematicamente na Figura 110, gera um estado biaxial de tensões, esquematicamente representado na Figura 111, que é governado pela Equação:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{MR}(\sigma_x - \mu\sigma_y)$$

Onde:

ε_x = deformação de tração no diâmetro horizontal;

σ_x = tensão horizontal;

σ_y = tensão vertical;

μ = coeficiente de Poisson;

MR = módulo de resiliência.

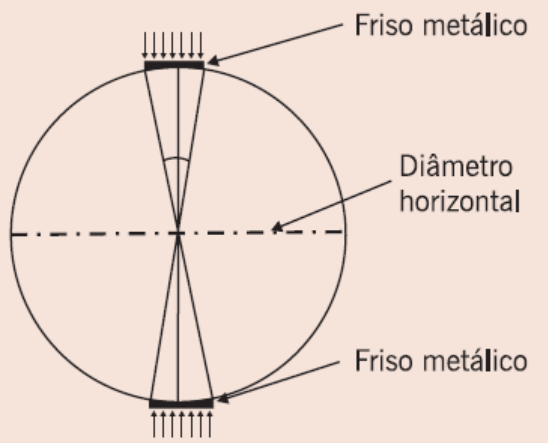


Figura 110 – Esquema de carregamento do ensaio de compressão diametral para determinação do MR (Bernucci *et al.*, 2007).

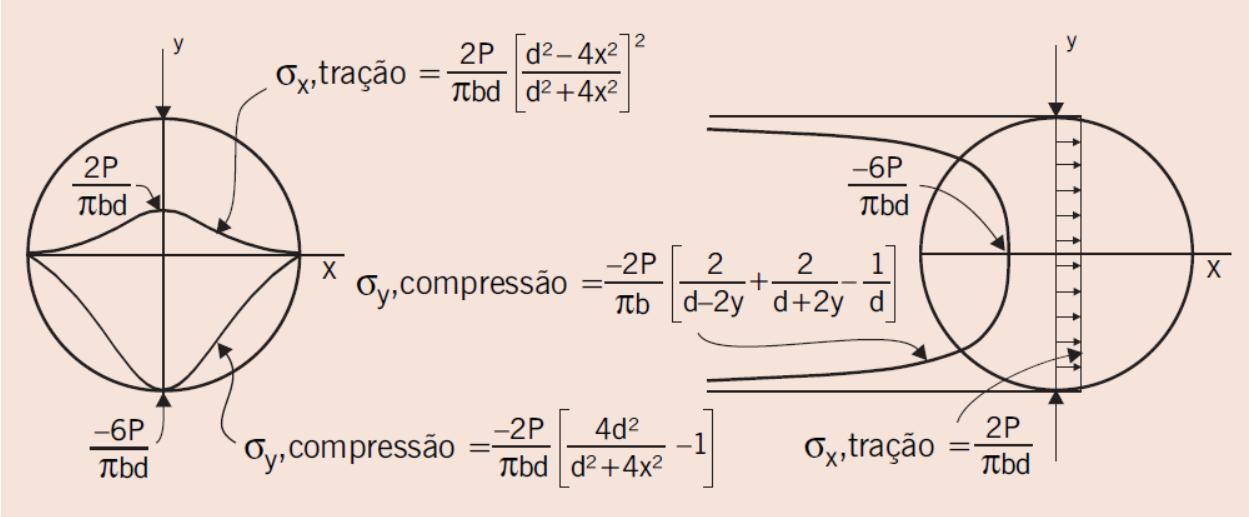


Figura 111 – Estado biaxial de tensões (Bernucci *et al.*, 2007).

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), nas misturas asfálticas o coeficiente de Poisson pode ser considerado independente do tipo de carregamento, variando apenas com a temperatura. O seu

valor varia entre 0,35 para baixas temperaturas e 0,50 para altas temperaturas. No Brasil comumente se assume o valor de 0,30.

Uma das normas brasileiras atuais referentes ao ensaio de módulo de resiliência de misturas asfálticas é a DNIT 135/2010 – ME. Esta norma cancela e substitui a norma DNER-ME 133/94. Ponte *et al.* (2014) ressalta que a norma mais atual apresenta baixa especificidade em relação a diversos parâmetros de ensaio, por exemplo: número de ciclos utilizados na fase de pré-condicionamento, número de ciclos utilizados na fase de condicionamento, escolha dos ciclos utilizados para o cálculo do MR, período de estabilização da temperatura de ensaio, entre outros. A baixa especificidade desses diversos parâmetros deixa muitas decisões a cargo do operador, podendo impactar os resultados obtidos. Outra norma brasileira disponível é a ABNT NBR 16018/2011. Esta norma se encontra em alinhamento com as recomendações das principais normas internacionais.

Ponte *et al.* (2014) apresentam uma comparação entre as normas vigentes no Brasil e algumas internacionais. Na parte experimental, feita com os métodos brasileiros, não foram obtidas grandes diferenças entre os valores de MR para três misturas asfálticas, de tal forma que não houve impacto no cálculo das tensões de uma estrutura de pavimentos analisada numericamente. Um resumo da comparação entre as duas principais normas brasileiras será visto mais a frente.

A seguir, de forma sucinta, são apresentados os equipamentos descritos nestas normas e alguns aspectos importantes das condições do ensaio.

Aparelhagem

• Sistema pneumático de carregamento, composto de:

- regulador de pressão para aplicação da carga vertical repetida;

- válvula de transmissão da carga vertical;

- cilindro de pressão e pistão de carga; e

- dispositivo mecânico digital timer para controle do tempo de abertura da válvula e frequência de aplicação da carga vertical.

• Sistema de medição de deslocamento do corpo-de-prova constituído de:

- dois transdutores mecânicos-eletromagnéticos tipo LVDT;

- suporte para fixação dos LVDTs na amostra; e

- oscilógrafo e amplificador com características apropriadas para uso com os transdutores LVDTs.

• Estrutura de suporte com acessórios.

Montagem do conjunto corpo-de-prova, frisos e LVDTs

• posicionar o corpo-de-prova no interior do suporte para fixação dos transdutores;

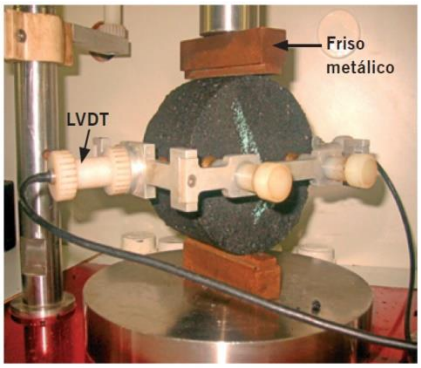
• colocar o corpo-de-prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos (frisos metálicos);

• fixar e ajustar os transdutores LVDTs;

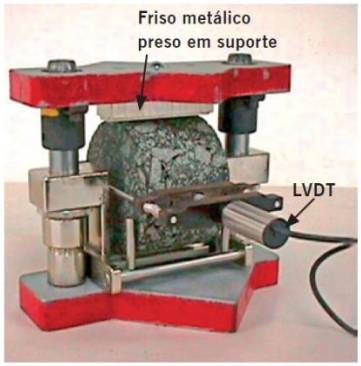
• observar o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova.

Figura 112 – Exemplos de equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida (Bernucci *et al.*, 2007).

A Figura 113 mostra dois arranjos experimentais possíveis para a instalação dos frisos metálicos para a aplicação da carga e colocação dos LVDTs para a medida de deslocamentos recuperáveis, podendo ser arranjo com dois ou apenas um único LVDT.



(a) Corpo-de-prova com dois LVDTs



(b) Corpo-de-prova com um único LVDT

Figura 113 – Exemplos de arranjos experimentais para a colocação dos medidores de deslocamento ao corpo-de-prova para o ensaio de MR (Bernucci *et al.*, 2007).

Condições de ensaio e registros (DNER-ME 133/94)

• Fase de condicionamento do corpo-de-prova:

Aplicar 200 vezes uma carga vertical repetida (P) diametralmente no corpo-de-prova, de modo a se obter uma tensão (σ_t) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. Recomenda-se a aplicação da menor carga (P), capaz de fornecer um registro compatível com a precisão dos conversores analógicos digitais responsáveis pelas leituras dos LVDTs (recomenda-se uma sensibilidade mínima de $2{,}5 \times 10^{-4}$ mm). A frequência de aplicação da carga (P) é de 60 ciclos por minuto, com o tempo de aplicação de carga de 0,10 segundo e, portanto, com 0,90 segundo de repouso ou descarregamento (Figura 114).

• Registro dos deslocamentos lidos pelos LVDTs após 300, 400 e 500 aplicações de carga (P).

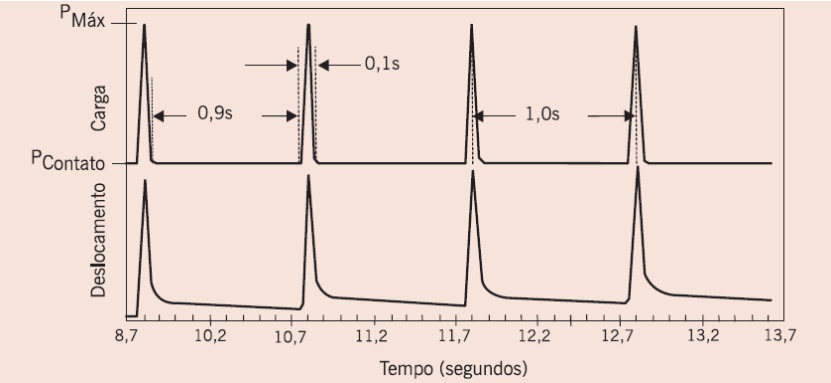


Figura 114 – Duração dos tempos de carregamento e repouso (Bernucci *et al.*, 2007).

Com os valores de carga aplicada e deslocamentos horizontais recuperáveis obtidos é calculado o módulo de resiliência por meio da equação:

$$MR = \frac{P}{\Delta\, X\, H}(0{,}9976\mu + 0{,}2692)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa;

P = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova, N;

Δ = deslocamento elástico ou resiliente registrado para 300, 400 e 500 aplicações da carga (P), mm;

H = altura do corpo-de-prova, mm;

μ = coeficiente de Poisson.

A norma DNER-ME 133/94 apresenta as seguintes notas:

1. Recomenda-se 0,30 como valor para o coeficiente de Poisson.

2. O modulo de resiliência (MR) do corpo-de-prova ensaiado será a média aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga (P).

3. O MR deverá ser determinado na temperatura de 30°C ± 1°C, quando a temperatura de ensaio não for especificada.

Neste procedimento de ensaio, os deslocamentos considerados são os recuperáveis (resilientes). Mesmo nos ensaios conduzidos com níveis de carregamento de 5% da tensão de ruptura ainda são perceptíveis deslocamentos plásticos (deslocamento permanente ilustrado na Figura 115) que não devem ser contabilizados no cálculo do MR (Bernucci *et al.*, 2007). Faz-se para isto um desconto nos deslocamentos lidos através de duas tangentes que passam pelas partes retilíneas do registro deste parâmetro. Na interseção das duas tangentes é que se mede a parcela elástica a ser usada no cálculo do módulo de resiliência.

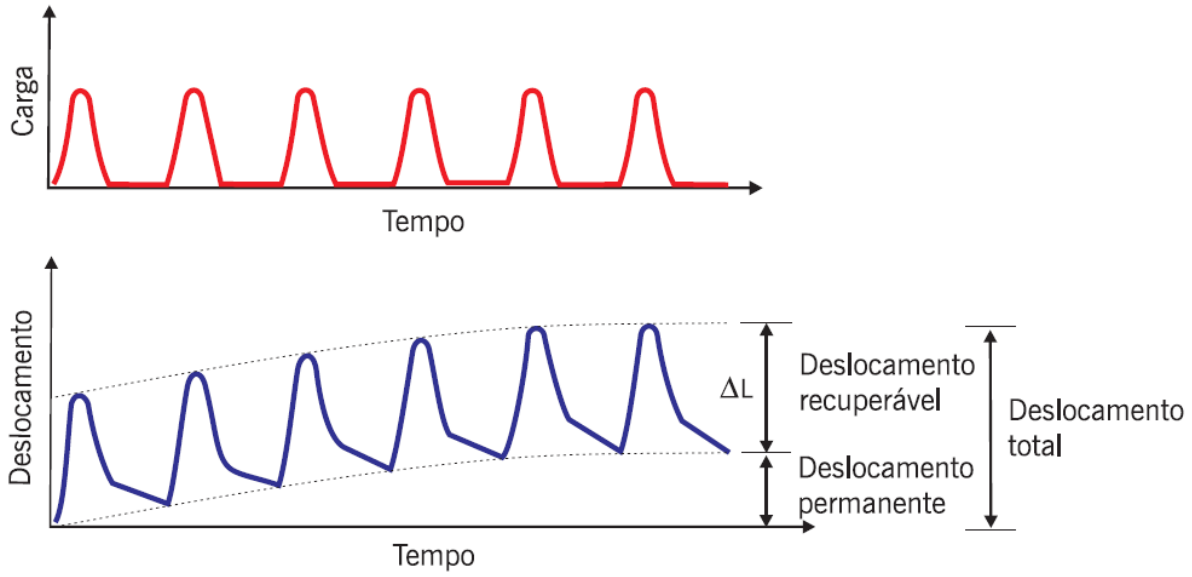


Figura 115 – Parcelas dos deslocamentos resilientes e permanentes registrados durante ensaios de módulo de resiliência (Bernucci *et al.*, 2007).

O módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente varia com: o tipo de mistura, o tipo de ligante asfáltico, a faixa granulométrica, as propriedades volumétricas, a energia de compactação, a temperatura de compactação, a temperatura de ensaio, entre outras variáveis. É possível dosar uma mistura asfáltica para se obter um determinado MR, conforme solicitado ou especificado em projeto.

Segundo Bernucci *et al.* (2007), valores típicos, como ordem de grandeza para simples orientação do leitor, podem ser considerados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa para concretos asfálticos a 25ºC, sendo os menores correspondentes a misturas com asfaltos modificados por

polímeros ou por borracha e os maiores a misturas com asfaltos de consistência dura. Deve-se ainda considerar a influência da distribuição granulométrica e do tamanho máximo de agregado.

Apenas como ilustração, valores médios de módulos de resiliência de diferentes misturas asfálticas já investigadas no país são apresentados na Tabela 60. Outro parâmetro que consta na tabela é a resistência à tração estática. Os valores são dados em MPa e a 25ºC. Na última coluna apresenta-se a razão entre esses parâmetros, que vem sendo usada como um indicador da vida de fadiga de misturas uma vez que agrega informações de rigidez e resistência, sendo mais desejável um valor pequeno da razão, dado que com frequência busca-se:

(i) baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro do revestimento, e;
(ii) alta resistência à tração, uma vez que em geral uma maior resistência na ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga.

Tabela 60 - Módulos de resiliência (MR) e resistência (RT) de misturas investigadas no país (25°C) (Bernucci *et al.*, 2007).

Características	Faixa (publicação)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Concreto asfáltico – CAP 30/45 Concreto asfáltico – CAP 50/60 Concreto asfáltico – CAP 85/100	Faixa C (Soares *et al.*, 2000)	3.628 3.033 1.488	1,09 0,89 0,44	3.346 3.425 3.376
Concreto asfáltico – CAP 30/45 Concreto asfáltico – CAP 50/60 Concreto asfáltico – CAP 85/100	Faixa B (Soares *et al.*, 2000)	5.105 4.425 1.654	0,82 0,73 0,21	6.201 6.062 7.755
Misturas densas (moldadas em usina) Concreto asfáltico 1 Concreto asfáltico 2 AAUQ1 AAUQ2	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)	 2.651 2.297 1.825 1.683	 0,85 0,67 0,52 0,72	 3.119 3.428 3.510 2.338
Misturas densas (moldadas em laboratório) Concreto asfáltico 1 Concreto asfáltico 2 AAUQ1 AAUQ2	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)	 3.609 3.026 1.786 1.682	 1,26 1,23 1,02 0,81	 2.864 2.460 1.751 2.077
SMA – 12,5mm SMA – 9,5mm	(Vasconcelos, 2004)	4.747 3.367	0,98 0,82	4.844 4.106
Concreto asfáltico de referência Com 0% fresado Com 10% fresado Com 30% fresado Com 50% fresado	Faixa C (Lima, 2003)	 3.200 4.776 7.524 8.901	 1,20 1,30 1,30 1,60	 2.667 3.674 5.787 5.663
Concreto asfáltico de referência Asfalto-borracha (úmido) Agregado-borracha (seco)	Faixa C (Pinheiro, 2004)	3.647 2.393 2.452	0,97 0,50 0,80	3.760 4.786 3.065

A Tabela 60 apresenta dados de misturas convencionais densas com diferentes CAPs, concretos asfálticos e AAUQs moldados tanto em usina como em laboratório, misturas com material fresado, misturas em asfalto-borracha – processos seco e úmido, misturas com escória de aciaria, misturas com agregados convencionais e granulometrias descontínuas.

Misturas de módulo elevado podem apresentar MR em média na faixa de 12.000 a 20.000 MPa, e destinam-se exclusivamente à camada de base, caracterizando o comportamento da estrutura como um pavimento semi-rígido do ponto de vista de deformabilidade.

Condições de ensaio e registros (ABNT NBR 16018/2011)

A norma ABNT NBR 16018/2011 recomenda que a carga máxima do ensaio de MR ($P_{máx}$) tenha valor entre 10% e 20% da resistência à tração por compressão diametral. Esse ensaio deve ser realizado de acordo com a ABNT NBR 15087/2012, em pelo menos três corpos-de-prova (CPs) com as mesmas características da amostra que será ensaiada. A carga máxima do ensaio de MR será obtida a partir da média aritmética dos valores encontrados nos três ensaios.

Previamente ao ensaio de carga repetida, o corpo de prova deve ser colocado na câmara de temperatura por um período mínimo de 4 h a (25 ± 0,5) °C.

Após o período de condicionamento da temperatura, o CP deve ser colocado no dispositivo de carregamento. Para o seu posicionamento, devem-se utilizar as linhas diametrais marcadas durante o preparo do CP, de modo que ele fique alinhado e centralizado verticalmente entre os frisos de carga. É importante observar se as duas faces do CP estão alinhadas e centralizadas. Na impossibilidade de visualização da face superior da amostra quando posicionada no dispositivo de carregamento, sugere-se a utilização de um espelho para tal verificação.

As superfícies de contato entre os frisos de carga e o corpo-de-prova devem estar bem assentadas, sem imperfeições que reduzam significativamente o seu contato. No caso de depressões ou projeções na superfície do corpo-de-prova que levem a comprimento maior do que 20 mm sem contato ao longo do friso de carga, devem-se buscar novas posições de contato por rotação, onde as superfícies do corpo-de-prova estejam em melhor condição. Neste caso, se a rotação for diferente de 90°, então devem-se marcar novos eixos diametrais de acordo com o item 5.3 da ABNT NBR 16018/2011 e, quando forem utilizados sensores acoplados à face do corpo-de-prova, deve-se proceder a uma nova colagem dos dispositivos de fixação.

Em seguida, devem-se acoplar ao corpo-de-prova os sensores de deslocamento de acordo com as recomendações do fabricante, alinhando-os com os eixos diametrais vertical e horizontal. É preciso, ainda, verificar no sistema de aquisição de dados se as leituras dos sensores estão compatíveis com os deslocamentos esperados durante o ensaio.

O pré-condicionamento do corpo-de-prova pode, então, ser realizado. Aplica-se 50 ciclos de ensaio com duração de 1 s cada ciclo, com carga máxima de ensaio ($P_{máx}$) de valor entre 10% e 20% da resistência à tração por compressão diametral. Durante o pré-condicionamento, é

importante acompanhar graficamente, em tempo real, os pulsos de carga, verificando se $P_{máx}$, $P_{contato}$ e os tempos de carregamento programados estão sendo atendidos, além dos pulsos de deslocamento horizontal e vertical (quando for utilizado sensor vertical), verificando se os respectivos gráficos não estão apresentando excessos de ruído ou sinais incompatíveis.

Após o pré-condicionamento do corpo-de-prova, sem interrupção, deve-se aplicar mais 15 ciclos de ensaio, gravando, com taxa de aquisição mínima de 200 pontos por segundo, todos os sinais de carga e deslocamento. O módulo de resiliência e o módulo de carregamento são calculados para cada um dos 15 ciclos de ensaio.

Os valores calculados para os 15 ciclos são processados da seguinte forma:

a) São divididos em três grupos: grupo 1 – dos ciclos 1 ao 5; grupo 2 – dos ciclos 6 ao 10; e grupo 3 – dos ciclos 11 ao 15;
b) Para cada grupo são calculados os valores médios de cada resultado;
c) Caso um dos grupos possua um ou mais resultados individuais com variação maior do que 5% em relação à respectiva média, então tal grupo deve ser desconsiderado (todos os resultados).

Os resultados reportados (módulo de resiliência e módulo de carregamento) devem ser do mesmo grupo, preferencialmente daquele que apresentar as menores variações. Caso nenhum dos grupos apresente variação aceitável, conforme especificado no item (c), o ensaio deve ser repetido, incluindo os ciclos de pré-condicionamento.

DNER-ME 133/94 versus ABNT NBR 16018/2011

As principais recomendações de cada uma das metodologias apresentadas para a realização dos ensaios de obtenção do MR de misturas asfálticas estão resumidas na Tabela 61.

Tabela 61 - Principais recomendações das metodologias apresentadas (Ponte *et al.*, 2014)

Procedimento/ Parâmetro	ABNT NBR 16018 (2011)	DNER ME 133 (1994)
Tipo de carrega-mento	Hidráulico/ Pneumático	Pneumático
Frequência (Hz)	1	1
Ciclos de pré-condicionamento	50	- 200 ciclos ou até a obtenção de registro mensurável no os-cilógrafo - Carregamento máximo→ 30% da RT
Ciclos de condiciona-mento	15	500
Ciclos para o cálculo do MR	15 (divididos em 3 grupos de 5 ciclos cada)	3 (para os ciclos de nº: 300, 400 e 500)
Temperatura (°C)	25	30
Período de estabiliza-ção da temperatura	4 h (mínimo)	Não especifica
Coef. de Poisson	Determinado / Assumido (v = 0,30)	Assumido (v = 0,30)
Cálculo do MR Total	Sim	Não
Cálculo do MR Ins-tantâneo	Sim	Sim

A norma DNER ME 133/1994 não especifica a metodologia para obtenção dos deslocamentos instantâneo e total. A norma ABNT NBR 16018/2011, por sua vez, apresenta metodologia similar à apresentada na norma americana AASHTO TP31/1996, evidenciado o alinhamento dessa norma brasileira em relação às normas internacionais.

A obtenção dos deslocamentos instantâneos e totais para o cálculo do MR é realizada através da subdivisão do pulso de carregamento em: (i) pico de deslocamento, (ii) porção reta do caminho de descarregamento, (iii) porção de recuperação e (iv) uma porção curva que une o caminho de descarregamento à porção de recuperação. A divisão dessas porções é feita através de regressões lineares e hiperbólicas, tangentes à curva do pulso de deslocamento. Uma explicação mais aprofundada sobre a metodologia da subdivisão do pulso de carregamento e da definição dos deslocamentos instantâneos e totais pode ser encontrada em Bernucci *et al.* (2007). A Figura 116 traz a representação gráfica da subdivisão do pulso de deslocamento durante o ensaio de MR, enquanto a Figura 117 ilustra os deslocamentos instantâneo e total.

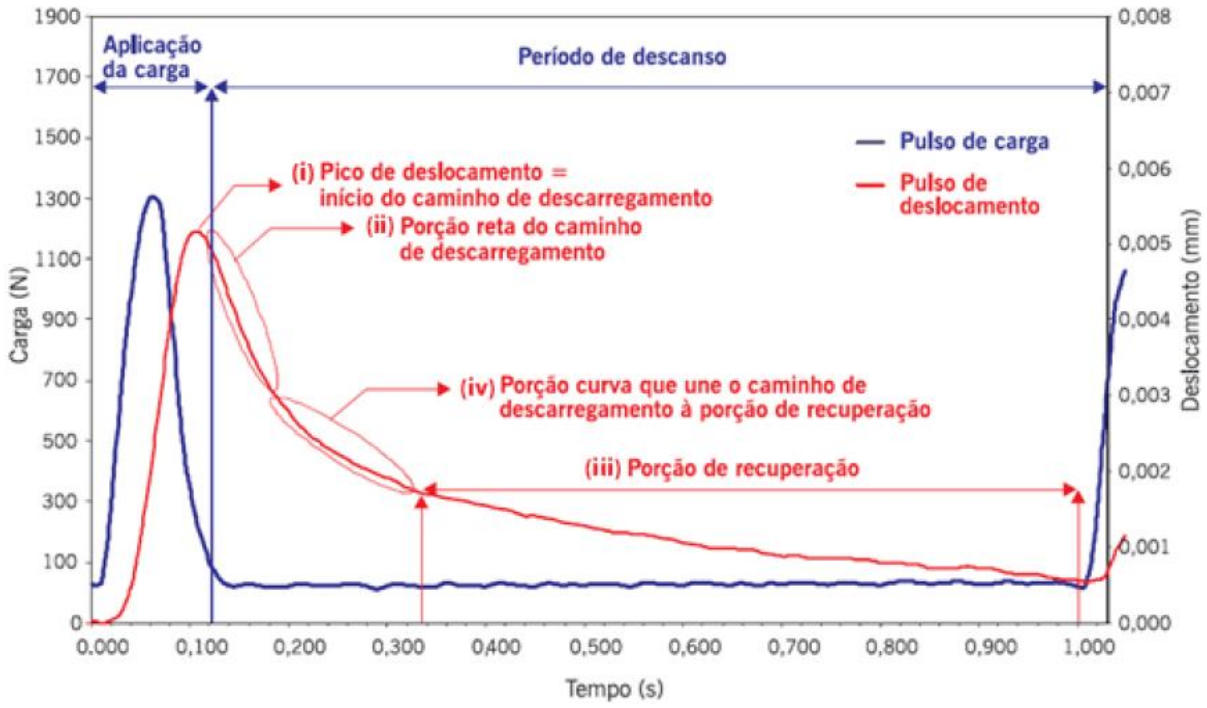


Figura 116 – Divisão do pulso de deslocamento (Ponte *et al.*, 2014 - Adaptado de Bernucci *et al.*, 2007)

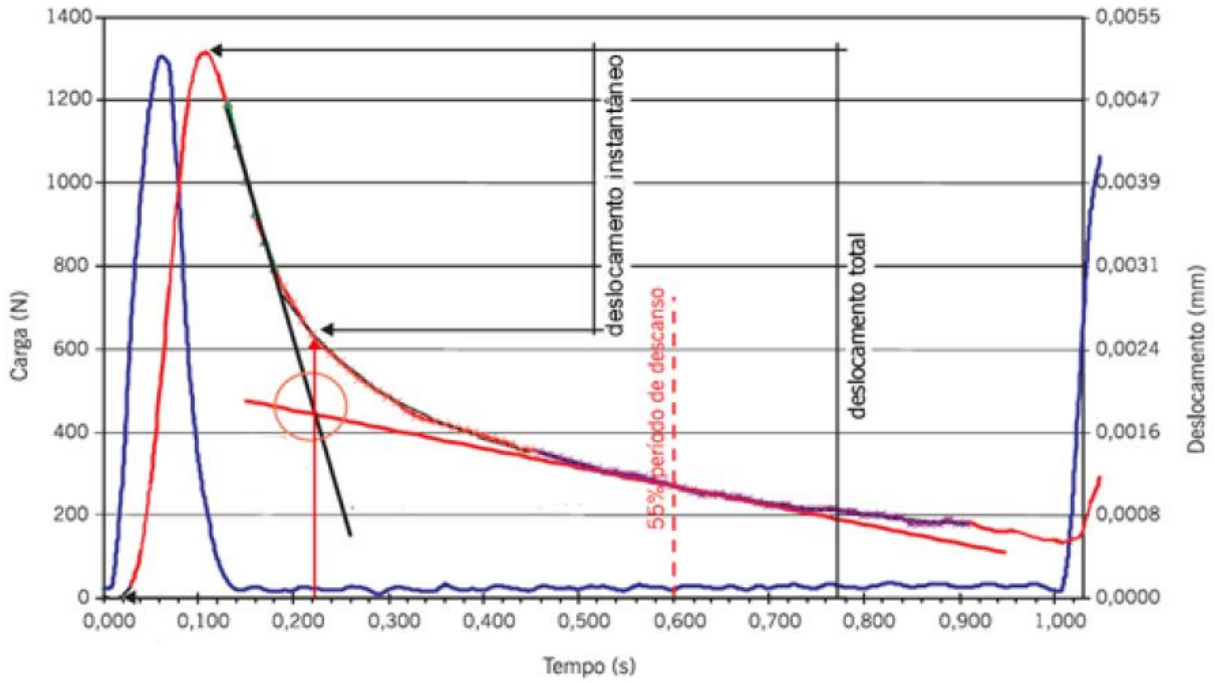


Figura 117 – Definições de deslocamento instantâneo e total para o cálculo do MR para misturas asfálticas (Ponte *et al.*, 2014 - Adaptado de Bernucci *et al.*, 2007)

Conforme relata Ponte *et al.* (2014), dentre as normas nacionais, a ABNT NBR 16018/2011 possui o texto mais específico, sendo a única que descreve os procedimentos para a obtenção dos deslocamentos utilizados para o cálculo do MR, como também traz recomendações para a obtenção do coeficiente de Poisson, tratamento dos dados quando se faz diferentes montagens de LVDTs, incluindo ainda o cálculo do MR total. A elaboração da ABNT NBR 16018/2011 teve como base as principais metodologias internacionais, como a ASTM D 7369/2009 e a EN 12697-26/2003.

A outra norma brasileira em vigor, DNIT ME 135/2010, não traz recomendações para diversos parâmetros de ensaio como: frequência de carregamento, número de ciclos de pré-condicionamento e número de ciclos de condicionamento e período para estabilização da temperatura de ensaio. De acordo com Ponte *et al.* (2014), a utilização dessa norma para a realização do ensaio de MR para misturas asfálticas deixa a cargo do operador decisões sobre parâmetros que podem vir a influenciar os resultados. A comparação, então, foi realizada entre a norma DNER ME 133/1994, precedente da DNIT ME 135/2010, e a ABNT NBR 16018/2011. Dentre as metodologias ensaiadas, a que apresentou melhor consistência foi a ABNT NBR 16018/2011. O trabalho de Ponte *et al.* (2014) mostrou que os resultados provenientes da aplicação desta metodologia apresentaram menor sensibilidade no quesito repetibilidade quanto à mistura ensaiada, como também menor dispersão dos resultados obtidos para cada mistura. Devido a estes fatores, como também, a maior especificidade do texto, os autores recomendam a

utilização desta norma para a realização de ensaios de MR para misturas asfálticas no Brasil. Os ensaios de MR em misturas asfálticas realizados na Via040 seguiram, dessa forma, as recomendações da norma ABNT NBR 16018/2011.

A Figura 118 e a Figura 119 mostram a instalação de corpo-de-prova no equipamento e preparação para ensaio de compressão diametral de cargas repetidas realizado em amostras de concreto asfáltico do pavimento da BR-040 no Laboratório de Pavimentação da Via040.

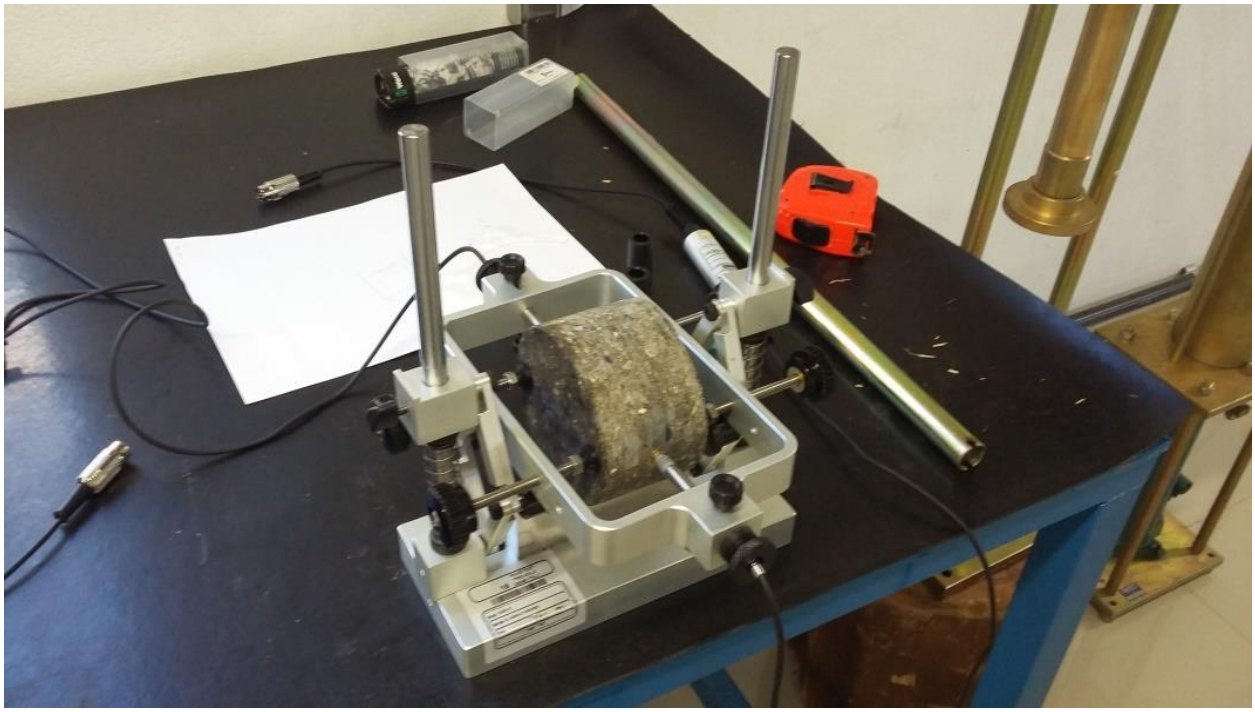


Figura 118 – Ajuste do corpo-de-prova e posicionamento dos LVDTs.

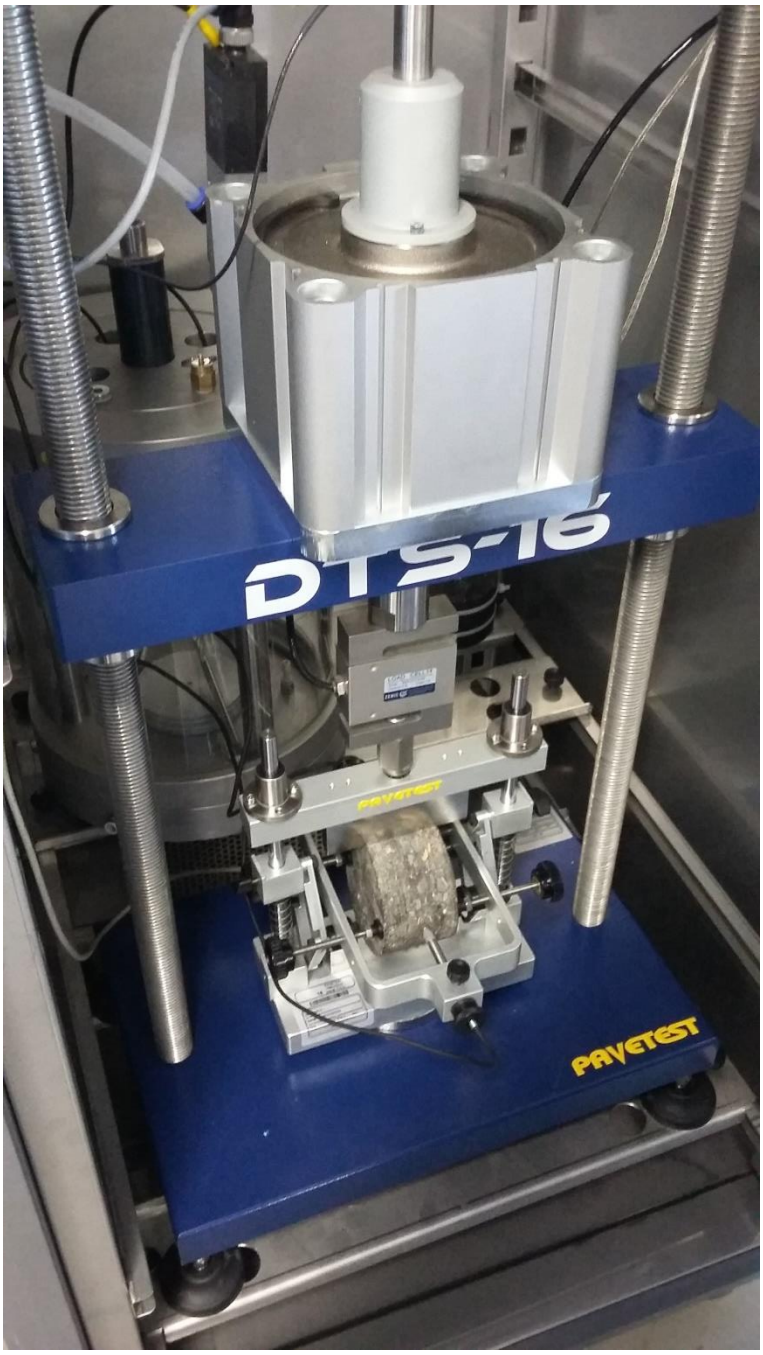


Figura 119 – Equipamento de carga repetida ajustado pronto para ensaio de compressão diametral.

Vida de Fadiga

O principal mecanismo de ruptura de pavimentos flexíveis no Brasil é a fadiga do revestimento asfáltico sob a ação das cargas repetidas de tráfego. A estimativa da vida de fadiga de misturas asfálticas pode ser feita com ensaios laboratoriais que procuram simular as condições de solicitação de uma rodovia ou procuram uma aproximação fundamentada (Fritzen, 2005).

A repetição das cargas das rodas dos veículos solicita à flexão a camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso, conforme explicam Medina e Motta (2015). Iniciam-se trincas, geralmente, na parte inferior do revestimento, que se propagam para cima até atingir a superfície. Segundo Adedimila e Kennedy (1975), em revestimentos muito espessos, de 20 cm ou mais, podem iniciar-se trincas na superfície pela curvatura convexa próxima às rodas. Há que se levar em conta, ainda, o efeito das cargas horizontais na distribuição de tensões, que pode eventualmente contribuir para o início das trincas na superfície do pavimento.

O fenômeno de fadiga é considerado um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincamento do pavimento ou até mesmo a sua ruptura, após um número suficiente de repetições de carregamento, ou seja, é a perda de resistência do material quando solicitado por uma carga repetida (Preussler *et al.*, 1981). A fadiga é considerada um dos principais problemas que pode levar a degradação da estrutura dos pavimentos. Em uma estrutura sujeita a carregamento cíclico, diversos estágios convencionalmente divididos podem ser diferenciados durante um processo de fadiga, conforme ilustra a Figura 120.

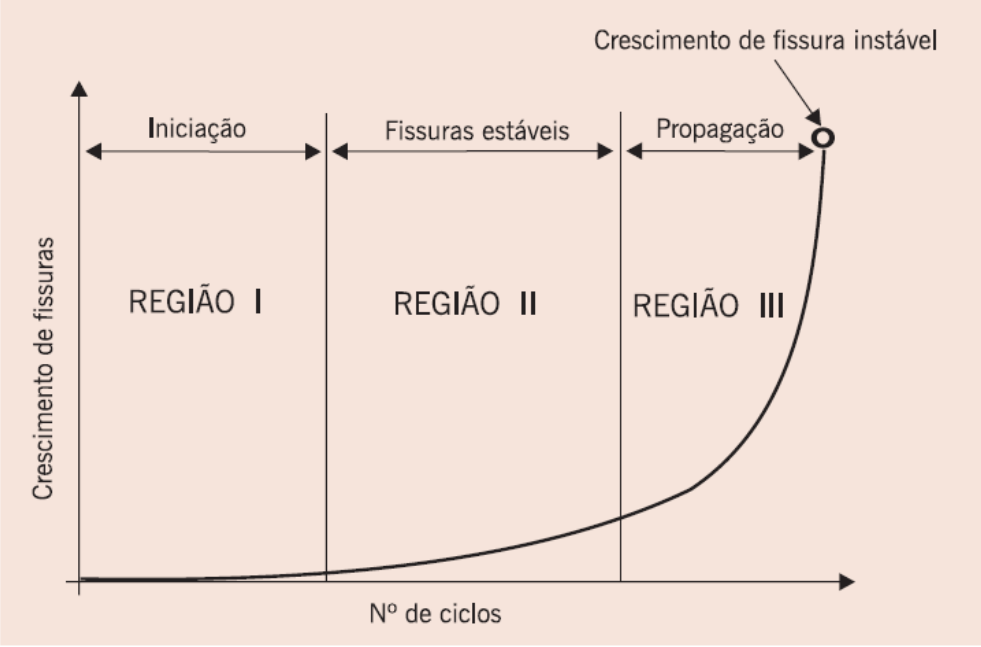


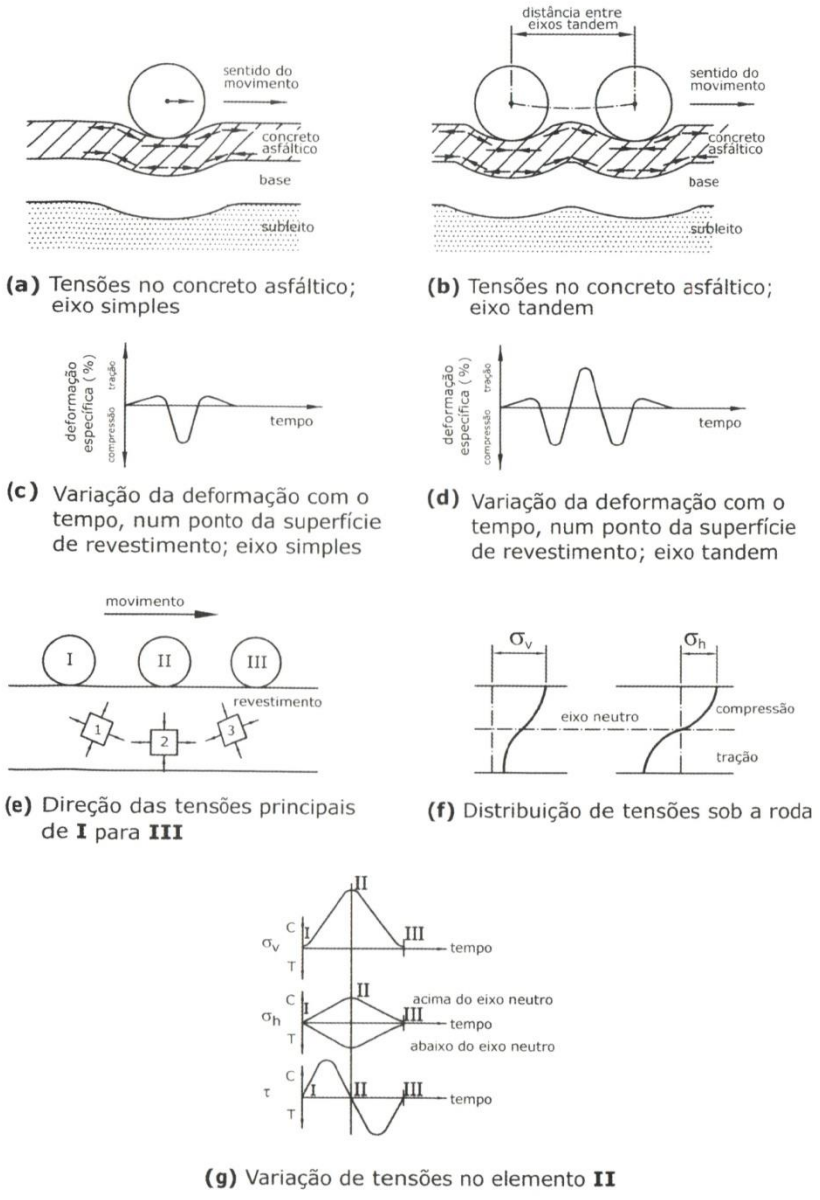
Figura 120 – Estágios existentes num processo de fadiga (Bernucci *et al.*, 2007).

• Região I: onde as primeiras mudanças microestruturais ocorrem; formam-se microfissuras; a densidade dos deslocamentos cresce e as zonas de danos irreversíveis se iniciam.

• Região II: caracterizada pelas macrofissuras originadas da coalescência das microfissuras.

• Região III: crescimento das macrofissuras conduzindo rapidamente ao colapso total.

Na Figura 121 mostram-se, de modo esquemático, as deformações desenvolvidas num revestimento de concreto asfáltico sob a passagem de rodas de um veículo. A magnitude dos deslocamentos vai depender dos parâmetros de deformabilidade vistos anteriormente, muito sensíveis à temperatura. Note-se em (e) que só se têm as tensões principais nos planos horizontal e vertical quando a roda está verticalmente acima como no elemento 2. Noutras posições da roda atuam tensões cisalhantes, t, como indicado em (g).



(a) Tensões no concreto asfáltico; eixo simples

(b) Tensões no concreto asfáltico; eixo tandem

(c) Variação da deformação com o tempo, num ponto da superfície de revestimento; eixo simples

(d) Variação da deformação com o tempo, num ponto da superfície de revestimento; eixo tandem

(e) Direção das tensões principais de **I** para **III**

(f) Distribuição de tensões sob a roda

(g) Variação de tensões no elemento **II**

Figura 121 – Deformações e tensões no revestimento asfáltico (Adedimila e Kennedy, 1975).

O efeito de fadiga está relacionado com a redução da rigidez do material, sendo influenciado pelas condições de carregamento e limites de contorno. Porém, este fenômeno não deve ser confundido com a deformação permanente que pode ocorrer quando são aplicadas apenas

tensões de compressão ou de tração repetidas originando significativas deformações acumuladas irreversíveis que podem ocultar o efeito relacionado com a fadiga, conforme mostrado na Figura 122.

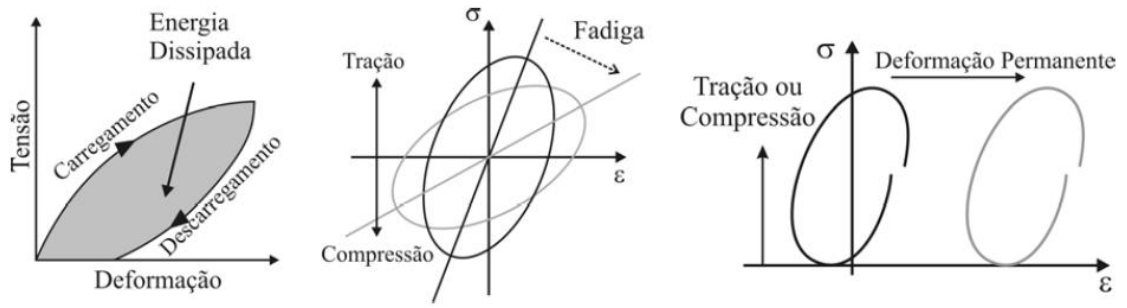


Figura 122 – Diferenciação entre o fenômeno de fadiga e deformação permanente (Brito *et al.*, 2008).

A simulação da aplicação dos esforços aponta a preferência dos ensaios de flexão. Entretanto, por sua maior facilidade de execução, principalmente para a moldagem e o sistema de carregamento, adotou-se o ensaio de compressão diametral como o mais conveniente no país, mas considerada a possibilidade de correlação com outros ensaios dinâmicos. As cargas solicitantes verticais de aplicação diametral devem induzir tensões no plano vertical diametral de 10 a 50 % da tensão da ruptura estática. Os corpos-de-prova são moldados por impacto na área plena segundo o método Marshall, resultando cilindros de 63 mm de altura e 100 mm de diâmetro, aproximadamente (Medina e Motta, 2015).

A determinação da tensão da ruptura estática é realizada de acordo com as recomendações da norma DNIT 136/2010 – ME. A resistência à tração é determinada a partir do ensaio de compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos de misturas asfálticas.

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura (N_f) ou vida de serviço (N_S). A primeira se refere ao número total de aplicações de uma certa carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda (N_S) ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido (Bernucci *et al.*, 2007).

Embora ainda não normatizado, o ensaio de fadiga tem sido largamente realizado no país, geralmente à compressão diametral sob temperatura e tensão controladas (TC). A tensão σ_t é repetidamente aplicada e induzida pela força vertical distribuída no friso da geratriz, não se alterando até a ruptura do corpo-de-prova.

Medina e Motta (2015) explicam que a modalidade de deformação controlada (DC) é de execução mais difícil se não se dispuser de um servomecanismo retroalimentador que permita ajustar a força aplicada em função dos desvios da deformação medida. O ensaio se encerra

quando houver uma queda da rigidez inicial do corpo-de-prova preestabelecida. Pinto (1991) adotou, como critério para o fim da vida de fadiga nos ensaios DC que realizou, o momento em que a carga necessária para manter a deformação constante tivesse sido reduzida de 40 % da inicialmente aplicada. O controle automático da deformação garante sua permanência num intervalo de ± 15 % da deformação inicial.

A solicitação à tensão controlada é a que ocorre em pavimentos de revestimento asfáltico muito mais rígido do que a camada de base e que, ao resistirem às carga, determinam a magnitude das deformações. A solicitação à deformação controlada corresponde melhor a pavimentos de revestimento delgado e fraco em relação à base; embora adicionando alguma resistência, o revestimento tem sua deformação controlada pela deformabilidade das camadas subjacentes (Medina e Motta, 2015).

Utiliza-se uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido (1Hz). Para manter a temperatura controlada utiliza-se uma câmara com sistemas de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato. Para cada mistura ensaiada determinam-se as relações entre o número de repetições à ruptura e o nível de tensões atuantes (conforme ilustrado na Figura 123 para três misturas com distintas faixas granulométricas):

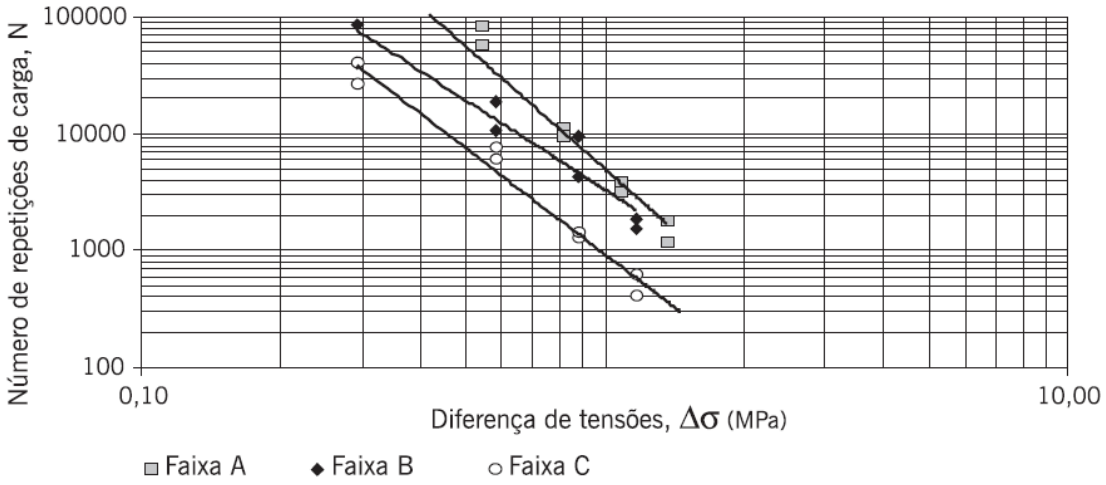


Figura 123 – Vida de fadiga considerando diferentes faixas granulométricas (Bernucci *et al.*, 2007).

No ensaio de resistência à compressão diametral em misturas asfálticas, a aplicação das forças se dá através de frisos metálicos de 12,7 mm de largura com curvatura adequada ao corpo-de-prova cilíndrico (Figura 124).

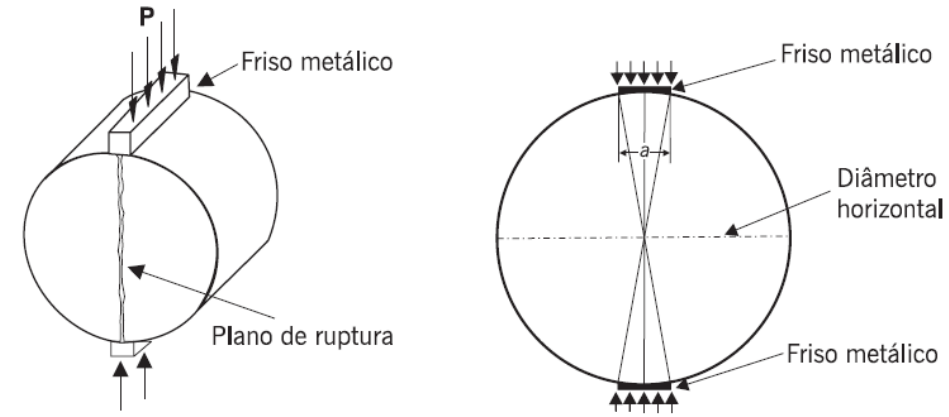


Figura 124 – Esquema do ensaio de compressão diametral (Bernucci *et al.*, 2007).

A norma ABNT NBR 15087/2012 define os passos e equipamento utilizado no ensaio, conforme descrição a seguir. A aparelhagem necessária para o ensaio consiste de:

- Prensa mecânica calibrada com sensibilidade inferior ou igual a 20N, com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de 0,8 ± 0,1mm/s – Figura 125(a);
- Sistema capaz de manter, de forma controlada, a temperatura de ensaio em 25°C ± 0,5°C em compartimento, câmara ou ambiente laboratorial que comporte a prensa mecânica e possa abrigar vários corpos-de-prova conjuntamente;
- Dispositivo de posicionamento e centralização de corpo-de-prova – Figura 125(b);
- Paquímetro e termômetro.

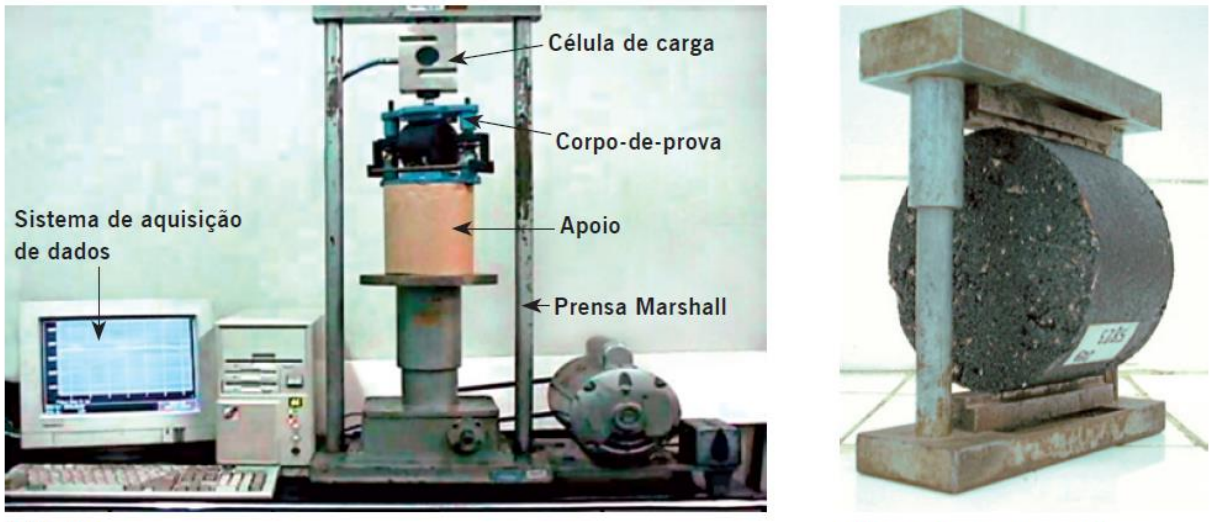


Figura 125 – Exemplo de equipamento para ensaio (Bernucci *et al.*, 2007).

O corpo-de-prova destinado ao ensaio pode ser obtido diretamente do campo por extração através de sonda rotativa ou fabricado em laboratório, de forma cilíndrica, com altura entre 35 mm a 70 mm e diâmetro de 100 ± 2 mm. O procedimento é o seguinte (Bernucci *et al.*, 2007).

- Medir a altura (H) do corpo-de-prova com o paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas (adotar como altura a média aritmética das quatro leituras);
- Medir o diâmetro (D) do corpo-de-prova com o paquímetro, em três posições paralelas (adotar como diâmetro o valor da média aritmética das três leituras);
- Manter o corpo-de-prova apoiado sobre uma geratriz em compartimento com temperatura controlada de 25°C, por no mínimo 4 horas. Alternativamente podem ser consideradas outras temperaturas, dependendo dos requisitos de projeto;
- Posicionar o corpo-de-prova no dispositivo centralizador e levar à prensa;
- Ajustar os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão;
- Aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de deslocamento de 0,8 ± 0,1mm/s, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical;
- Com o valor da carga de ruptura (P) obtido, a resistência à tração é calculada através da equação:

$$\sigma_{xx} = \frac{2P}{\pi D} = \frac{P}{\pi R}$$

Onde:

σ_{xx}= tensão de tração uniforme na direção-x (positiva);

P = força aplicada por unidade de espessura do cilindro;

R = raio do cilindro;

D = diâmetro do cilindro.

De acordo com as normas vigentes (ABNT NBR 15087/2012 e DNIT 136/2010), o cálculo da resistência à tração (RT) pela equação apresentada acima para misturas asfálticas assume que o corpo-de-prova rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do diâmetro solicitado que se iguala à tensão máxima admissível do material (σ_{adm} = RT), que está em regime elástico durante todo o ensaio.

O ensaio de vida de fadiga permite a obtenção de uma curva que representa a relação entre o número de repetições de ciclos de carga e descarga com o nível de tensões aplicado, de acordo com o critério de fadiga adotado (tensão ou deformação controlada). Esse número de repetições pode ser correlacionado com o número N de passagens do eixo-padrão no pavimento, através do fator laboratório-campo (FLC). Para tanto, faz-se necessário o monitoramento contínuo das UAs,

a fim de definir o número N que leva o pavimento, sob as condições regionais representadas por determinada UA, à fadiga.

Usualmente, os ensaios de vida de fadiga são realizados em corpos-de-prova de concreto asfáltico moldados em laboratório com o mesmo traço da mistura a ser aplicada em campo, ou ainda, a fim de definir o melhor traço de um projeto. Outro procedimento prevê a retirada de corpos-de-prova no concreto asfáltico recém-colocado em campo. O estudo idealizado neste projeto de pesquisa, no entanto, teve como diretriz a realização de ensaios de fadiga em amostras extraídas nas UAs. Dessa forma, será possível avaliar o comportamento do concreto asfáltico submetido às condições de campo.

VI.5.1 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS

Os resultados dos ensaios de laboratório realizados são apresentados no ANEXO 1 (Resultados dos Ensaios). A Tabela 62 apresenta um resumo da quantidade de ensaios realizados.

Tabela 62 - Quantidade de ensaios de laboratório realizados

ENSAIOS DE LABORATÓRIO	QUANTIDADE PREVISTA	QUANTIDADE EXECUTADA
Limite de Liquidez	1 por camada coletada	1 por camada coletada
Limite de Plasticidade	1 por camada coletada	1 por camada coletada
Granulometria Simples	1 por camada coletada	1 por camada coletada
CBR/Expansão	1 por camada coletada	1 por camada coletada
Equivalente de Areia (caso LL > 25% ou IP>6)	1 por camada coletada	19**
Módulo de Resiliência (Solos)	1 por camada coletada	1 por camada coletada
Módulo de Resiliência (CA - Camada Asfalto)*1	1 por ua	-
Compressão Diametral (Curvas de Fadiga)*2	3 ensaios nas UA´s mais representativas	-
Teor de Betume	1 por UA	1 por UA
Granulometria (CA - Camada Asfalto)	1 por UA	1 por UA

*1 Os ensaios de módulo de resiliência em misturas asfálticas ainda não foram executados.
*2 Para determinação das cargas solicitantes verticais de aplicação diametral foram realizados ensaios de resistência à tração. Os ensaios de fadiga, no entanto, ainda não foram executados.
** Não foram realizados ensaios de equivalente de areia em 3 amostras, devido à alta porcentagem de finos.

VI.6 - PREVISÕES DE DESEMPENHO VERSUS COMPORTAMENTO OBSERVADO

O Projeto de RDT utilizou o software "*Highway Design e Maintenance Standards Model*" (HDM-4). O sistema de projeto é modular, com uma interface integrada entre os módulos. O sistema modular possibilita aos usuários a substituição de modelos técnicos inadequados por seus próprios modelos. O programa HDM-4 é formado por quatro sub-modelos que têm funções específicas em cada fase de um processo de gerência de pavimentos: efeitos da deterioração de rodovias e das intervenções (RDWE); efeitos sobre os usuários (RUE); e efeitos ambientais, energéticos e na segurança (SEE). Dentre os modelos do HDM-4 concentraram-se esforços de trabalhos e pesquisas nos Modelos de Deterioração de Pavimentos (RDWE). A estrutura do HDM-4 é apresentada na Figura 126.

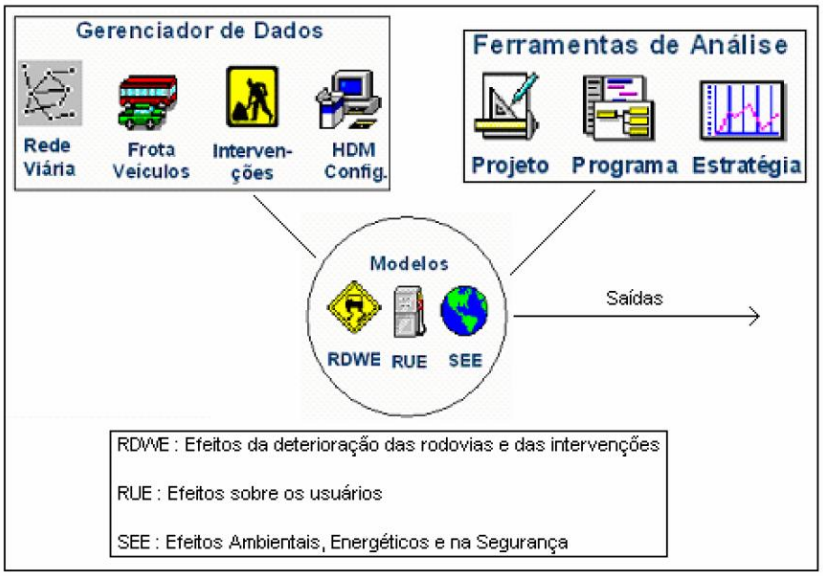


Figura 126 – Estrutura esquemática do HDM-4 (Kerali *et al*., 2000).

O HDM-4 é muito eficiente quando calibrado de acordo com o comportamento do pavimento frente às ações do tráfego e clima. As previsões de desempenhos dos pavimentos refletem com mais precisão as condições funcionais e estruturais dos pavimentos ao longo do tempo. As equações de desempenho no HDM-4 têm fatores de calibração que podem ser ajustados para reproduzirem as condições locais. É neste contexto, que a Via040 pretende melhorar a precisão da aplicação do HDM-4, para que as tomadas de decisão com uso do sistema sejam mais racionais. Tal visa atingir as metas de sustentabilidade - aplicação de recursos humanos e financeiros e matérias primas em quantidade adequadas, evitando esforços desnecessários e impactos ambientais. Previsões de desempenho adequadas levarão a diagnósticos futuros acurados e desta forma, alocações de recursos mais confiáveis e estritamente necessários.

Os cenários de desempenho dos pavimentos referem-se à evolução dos parâmetros das condições funcional e estrutural dos pavimentos ao longo do tempo de cada Unidade de Amostragem (UA), conforme as equações do modelo HDM-4. A quantidade mínima de cenários de desempenho dos pavimentos será igual ao número de Unidades de Amostragem (UAs) materializadas na rodovia. Limita-se uma quantidade de 20 UAs (10 UAs existentes e 10 UAs implantadas no presente projeto de pesquisa) para que seja possível realizar os ensaios de campo e laboratório, sem comprometer a qualidade das informações e do programa de capacitação técnica.

O HDM-4 foi alimentado com os dados existentes organizados no Banco de Dados construído a partir do SGD. Foram elaboradas as curvas de desempenho dos pavimentos das Unidades de Amostragem (UAs) através dos modelos de previsibilidade do HDM-4. No Projeto de RDT de 2015/2016 os cenários de previsão de desempenho das 10 Unidades de Amostragem foram refinados, obtendo-se as curvas de previsibilidade para os diferentes parâmetros que interferem nas condições funcional, estrutural e de segurança dos pavimentos. Esse foi considerado o cenário inicial de desempenho do pavimento. Para alimentação do HDM-4 com as 10 novas UAs adotaram-se os mesmos critérios e diretrizes definidos no Projeto de RDT de 2015/2016. Na atual fase da pesquisa os cenários de previsão de desempenho foram mantidos e os parâmetros medidos em 2016 foram lançados nos gráficos para fins de análises comparativas entre o comportamento previsto e o medido em campo, conforme apresentado na Figura 127.

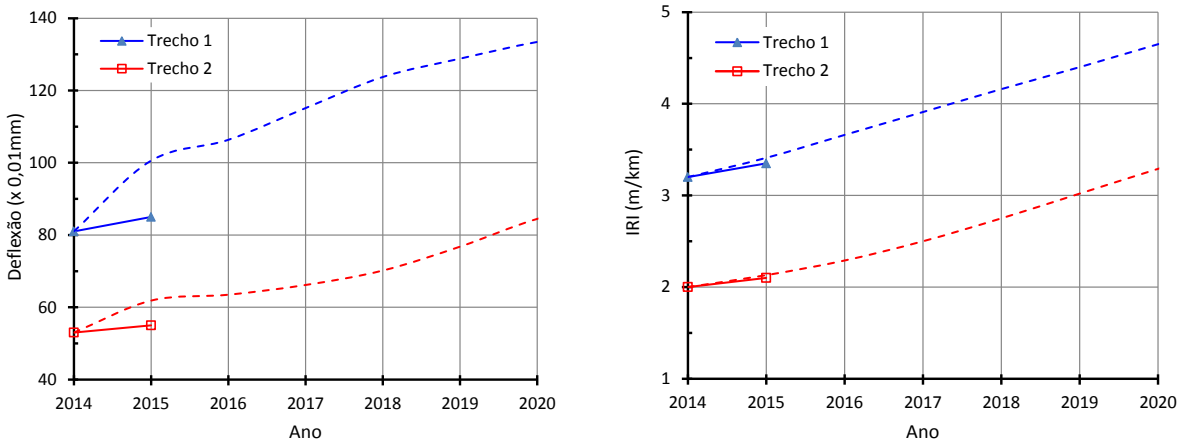


Figura 127 – Curvas de calibração das condições estrutural (Deflexão Máxima) e funcional (IRI) dos pavimentos de dois trechos de uma rodovia com diferentes espectros de carregamento (Silva e Souza, 2016). Linhas pontilhadas representam os cenários de previsibilidade do HDM-4 e as linhas contínuas as medições realizadas em campo.

Os resultados das monitorações posteriores serão utilizados para verificar se realmente as curvas de desempenho refletem o comportamento dos pavimentos avaliados. À medida que mais campanhas de monitoração forem realizadas podem-se ajustar as curvas de desempenho. Na

Figura 128 exemplifica-se o ajuste da curva de calibração do trincamento de um pavimento - um dos parâmetros que define o tempo de vida útil do pavimento.

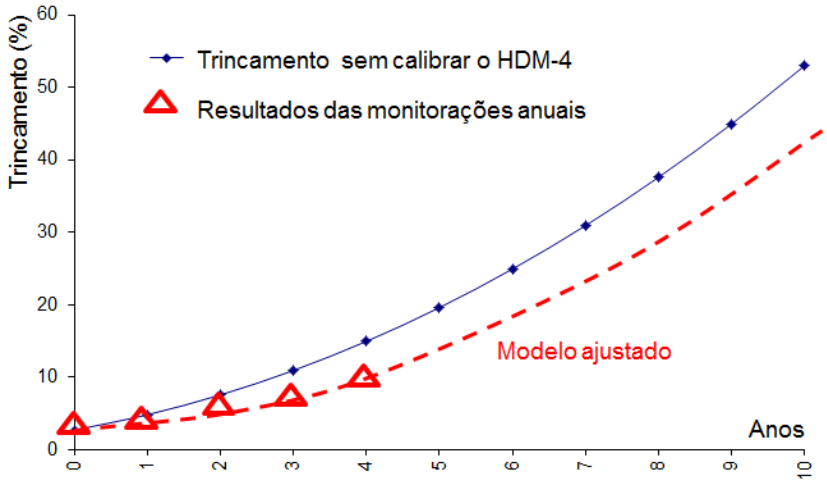


Figura 128 – Calibração de modelos de previsão de desempenho (Silva *et al*., 2015).

No presente projeto de RDT, as análises foram baseadas nas montagens e previsões de desempenho dos pavimentos realizadas no HDM-4 entre os anos de 2015 e 2016, acrescendo-se as 10 novas UAs, sem, por enquanto, ajustar ou calibrar os modelos de previsão de desempenho. Conforme discutido e apresentado na Figura 128, foram plotados os parâmetros medidos em campo nas curvas de previsão de desempenho geradas pelo HDM-4. Essas atividades foram realizadas pelo Estagiário Nível 2, Rodolfo César Costa Arantes, sendo orientadas pelo Coordenador, Eng. Rafael Cerqueira Silva. Os cursos ministrados e os estudos realizados foram suficientes para capacitar o Estagiário Nível 2 para dar continuidade nos estudos fundamentados no HDM-4. Foi de responsabilidade do estagiário apresentar um estudo sobre os modelos de previsão de desempenho do HDM-4, baseado no Manual do sistema.

VI.6.1 - ANÁLISES DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

Através do Sistema Gerenciador de Dados (SGD) foi gerado o arquivo contendo uma Matriz de Dados com estrutura e formato compatível com o padrão de importação do sistema HDM-4. Essa matriz contém os dados de entrada dos Segmentos Homogêneos (SHs) e das Unidades de Amostragem (UAs). Nas análises de previsão de cenários buscam-se as curvas de desempenho dos pavimentos baseadas nos modelos de deterioração do HDM-4 das UAs. Os cenários de desempenho dos pavimentos referem-se à evolução dos parâmetros das condições funcional e estrutural dos pavimentos ao longo do tempo de cada Unidade de Amostragem (UA), conforme as equações do modelo HDM-4. O HDM-4 foi alimentado com os dados existentes na Matriz de

Dados (pavimento, tráfego, clima, condição de drenagem...). Os resultados das fornecem o cenário de desempenho dos pavimentos.

VI.6.1.1 - ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA HDM-4

A elaboração de análises de cenários de previsão de desempenho dos pavimentos no HDM-4 depende da alimentação do sistema, através da montagem da: (i) Malha Rodoviária; (ii) Frota de Veículos; e (iii) Política de Manutenção. Também é necessária ajustes na configuração *default* do sistema HDM-4, principalmente, aquela que se refere ao clima.

Com base em estudos de sensibilidade do HDM-4 foram definidos os parâmetros de maior impacto sobre as previsões de desempenho dos pavimentos. Variaram-se parâmetros, um por vez, para avaliar os resultados de previsibilidade de desempenhos dos pavimentos. Um melhor refinamento dos dados de entrada também foi avaliado. Nas análises preliminares de previsão de desempenho dos pavimentos foram adotados os valores médios dos parâmetros das condições funcional e estrutural do segmento homogêneo no qual a UA encontra-se inserida. Avaliando especificamente a UA, cuja extensão é de 400 m, os valores médios são, por vezes, diferentes daqueles do segmento homogêneo. Em termo de resistência estrutural não houve mudança significativa, sendo mantida a média das deflexões do segmento homogêneo. O mesmo é válido para a irregularidade longitudinal. Visto o impacto da condição superficial dos pavimentos sobre a previsibilidade de desempenho, o refinamento dos valores é importante para obter resultados mais representativos, em conformidade com as condições dos 400m de cada UA. Buscando avaliar a evolução das condições funcionais dos pavimentos foram feitas campanhas de levantamento de campo para monitorar especificamente a extensão de cada Unidade de Amostragem (UA). Foi realizado o Levantamento Visual Contínuo em cada UA. O afundamento em trilha de roda (ATR) foi medido por meio de treliça metálica. Nessas UAs também foram feitos os ensaios para medição da macro e micro texturas dos pavimentos da UAs, através dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico, respectivamente. Em relação à estrutura do pavimento adotaram-se as espessuras encontradas nos poços de inspeção realizados nos pavimentos das UAs para retiradas de amostras. Esses valores, em conjunto com os ajustes nas configurações do sistema, constituem a revisão da base (ou banco de dados) de realimentação do modelo HDM-4.

VI.6.1.2 - PREVISÃO DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

Para elaboração dos cenários de previsão de desempenho dos pavimentos das Unidades de Amostragem (UAs) utilizou-se a Análise de Programa do sistema HDM-4. Para efetuar a Análise de Programa foi necessário alimentar o HDM-4 com todos os itens apresentados anteriormente. Após a montagem da Análise de Programa foi gerada a planilha com os principais parâmetros que refletem a deterioração dos pavimentos e foram plotados os gráficos referentes aos

parâmetros Deflexão, Trincamento, Irregularidade Longitudinal (IRI) e Afundamento em Trilha de Roda (ATR). São apresentados os gráficos referentes às previsões de desempenho das condições funcional, estrutural e de aderência dos pavimentos das UAs ao longo de 10 anos.

- Evolução da Deflexão Máxima (Do);

- Evolução do Trincamento (TR=TR2+TR3);

- Evolução do Trincamento (TR2 e TR) em conjunto com a Evolução da Trinca Classe 3 (TR3);

- Evolução do Afundamento em Trilha de Roda (ATR); e

- Evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI);

VI.6.1.3 - ANÁLISES COMPARATIVAS DOS CENÁRIOS DE DESEMPENHO

A seguir são apresentadas as análises comparativas dos cenários de previsão de desempenho das Unidades de Amostragem (UAs). Foram analisadas as curvas de desempenho dos parâmetros: (i) Deflexão; (ii) Trincamento; (iii) Afundamento de Trilha de Roda; e (iv) Irregularidade. Da Figura 129 a Figura 228 apresentam-se os gráficos das análises comparativas entre as curvas de previsão de desempenho e os dados da monitoração.

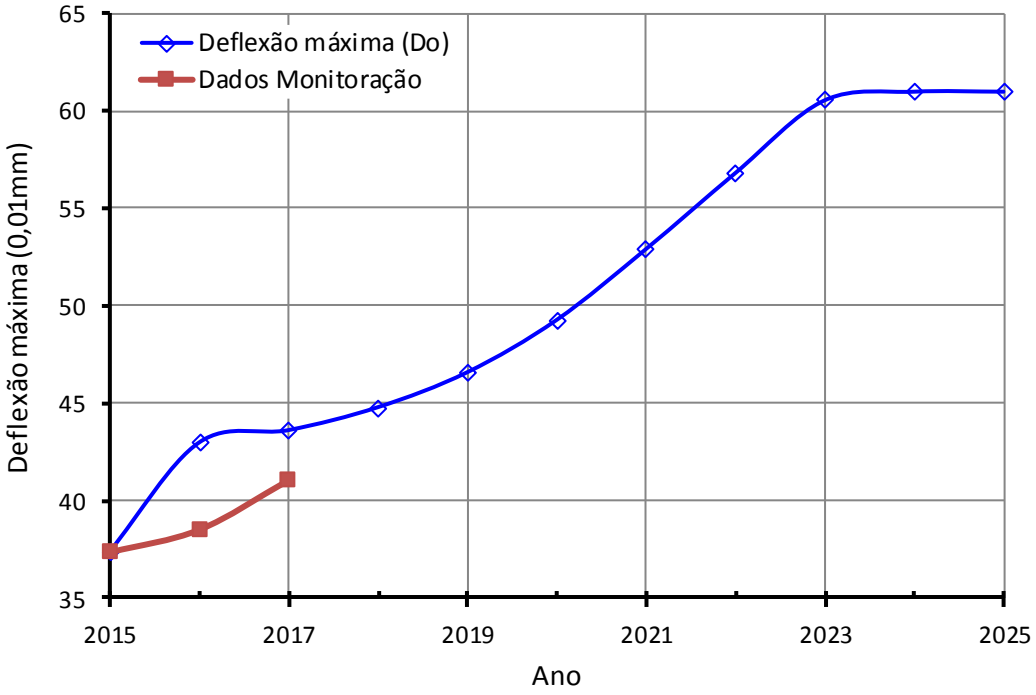


Figura 129 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

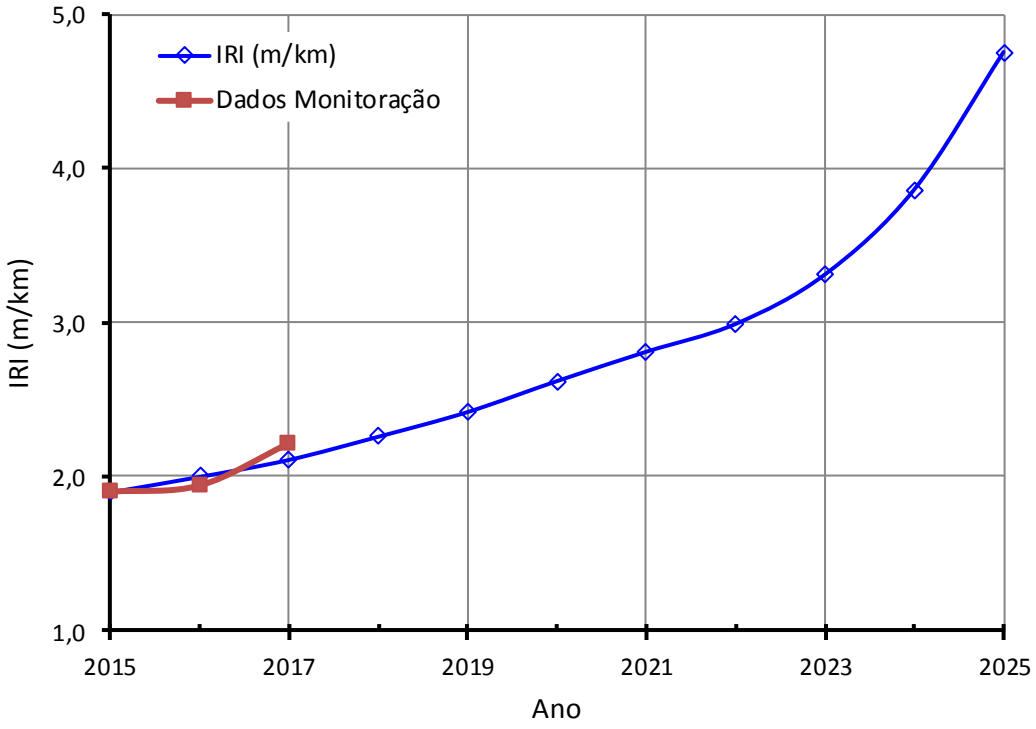


Figura 130 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

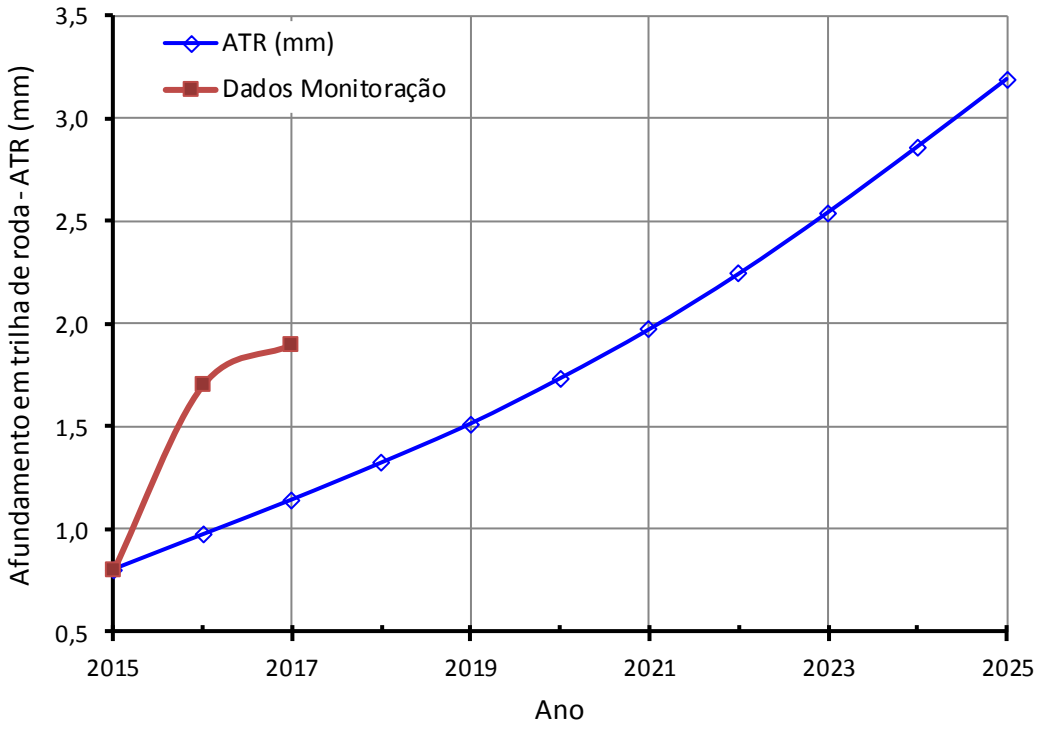


Figura 131 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

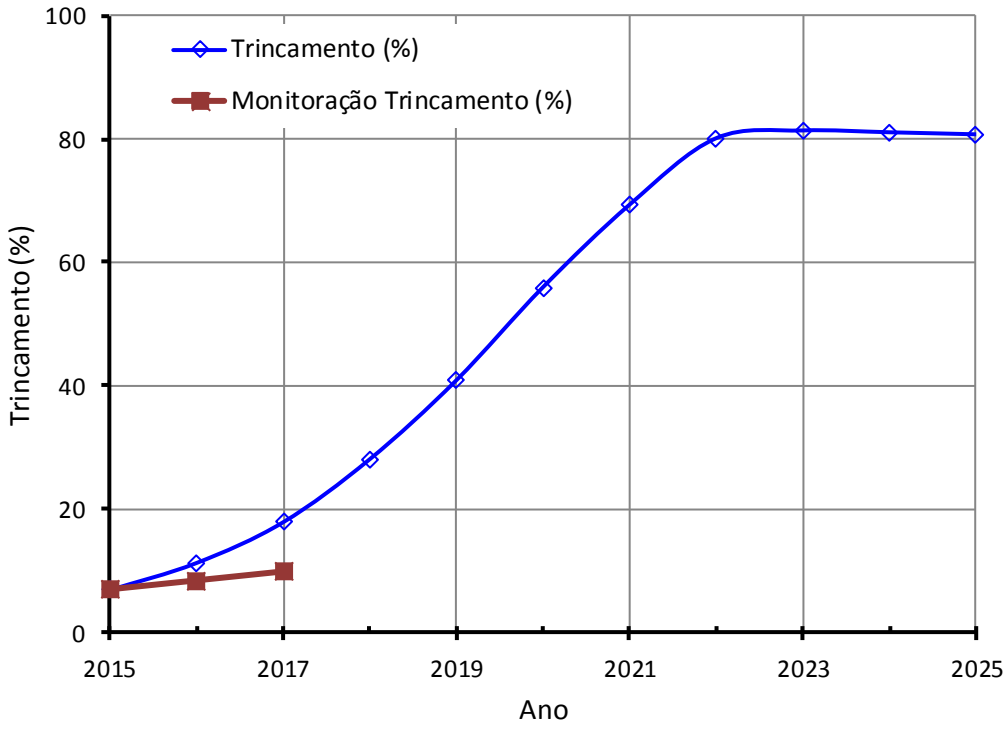


Figura 132 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

Figura 133 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA01-B (km 107+000, UF: GO)

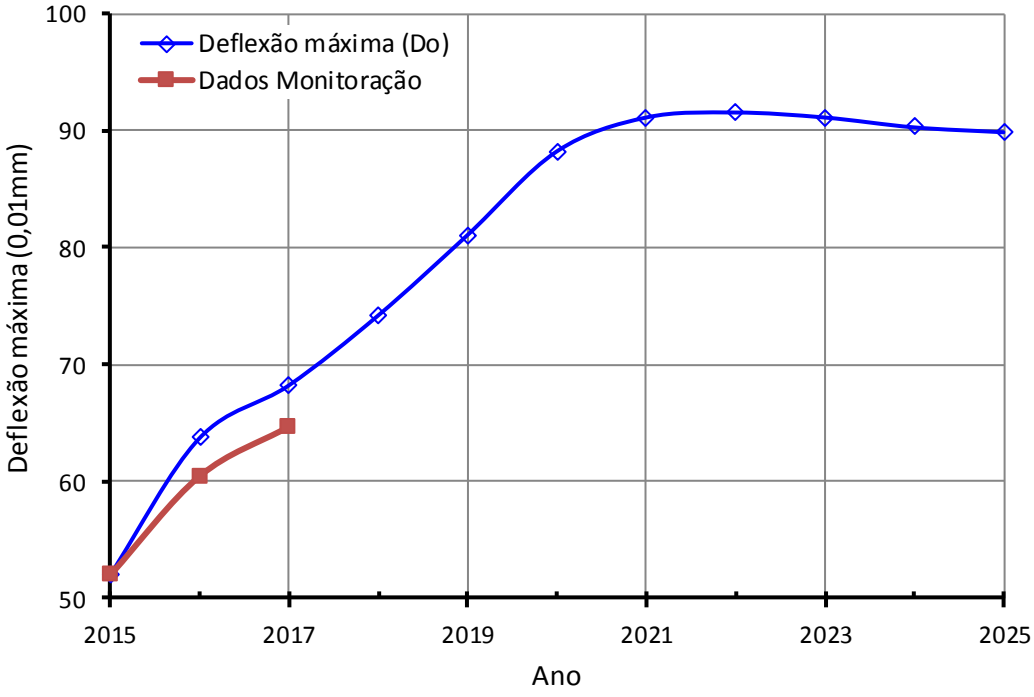


Figura 134 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

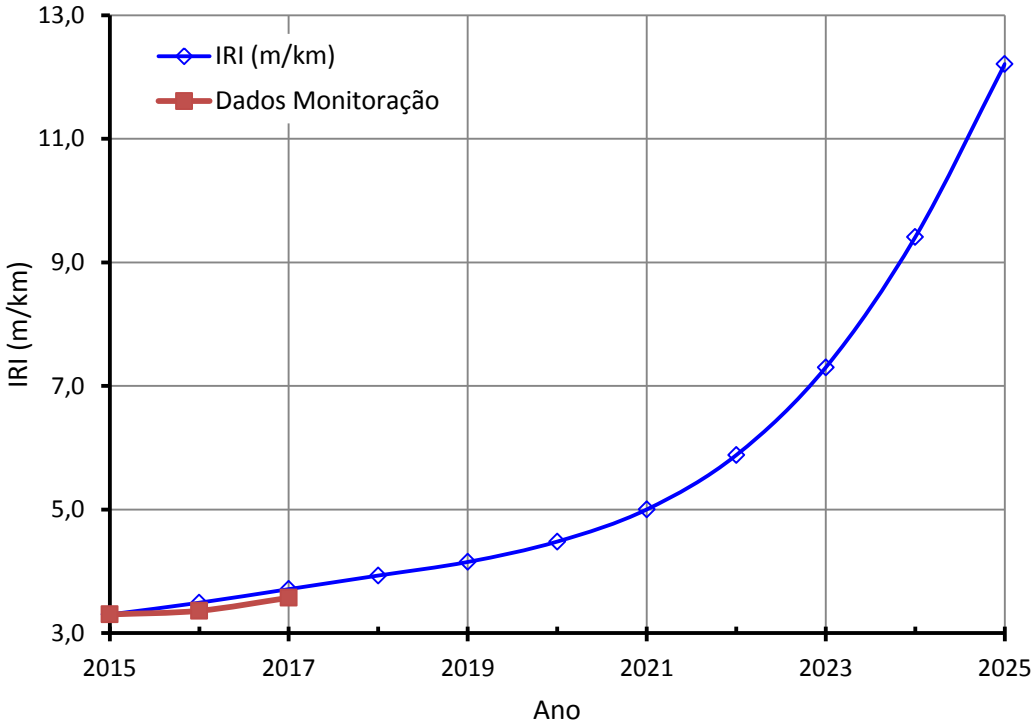


Figura 135 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

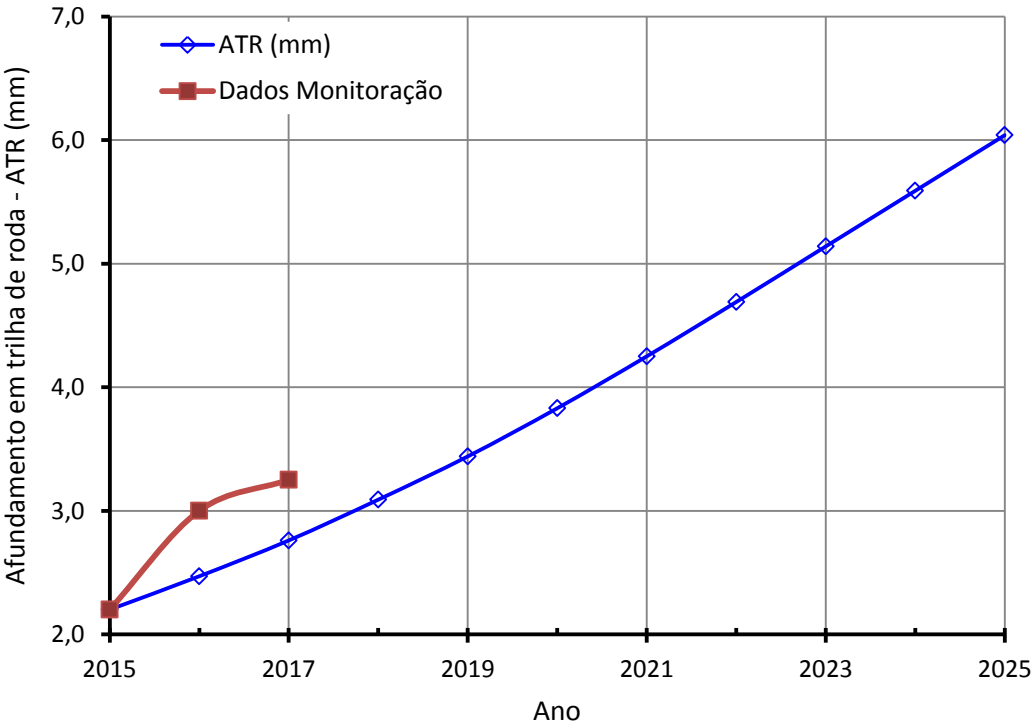


Figura 136 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

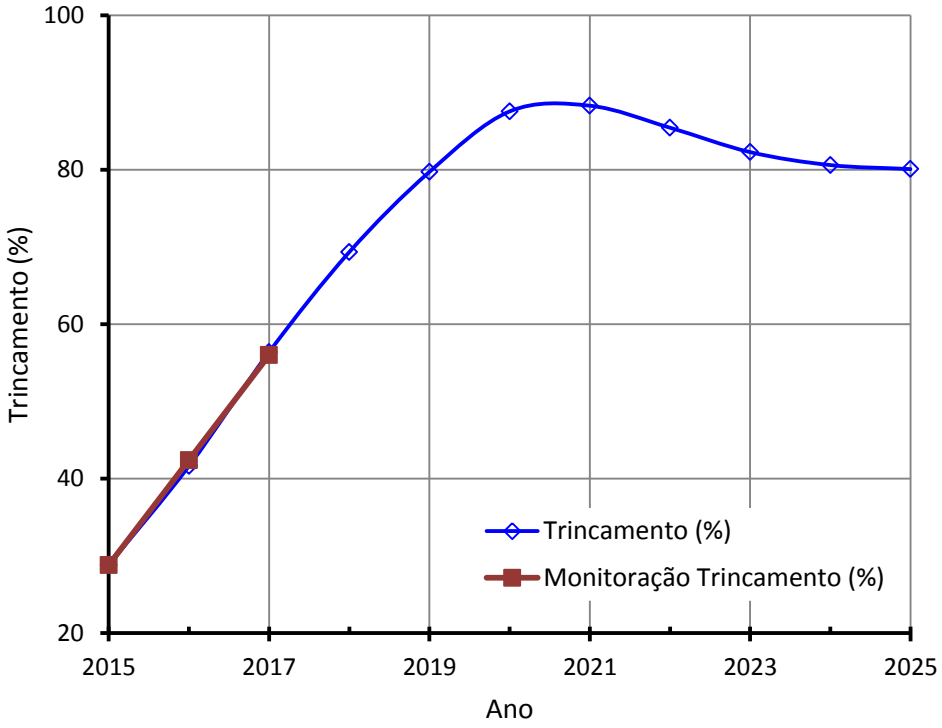


Figura 137 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

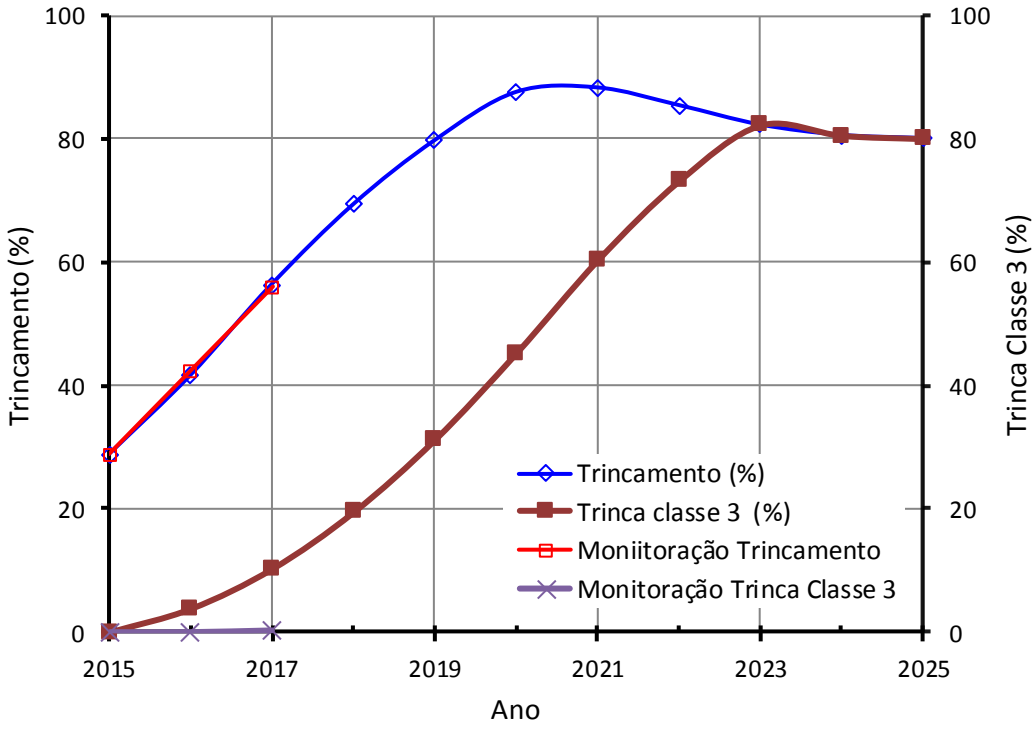


Figura 138 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

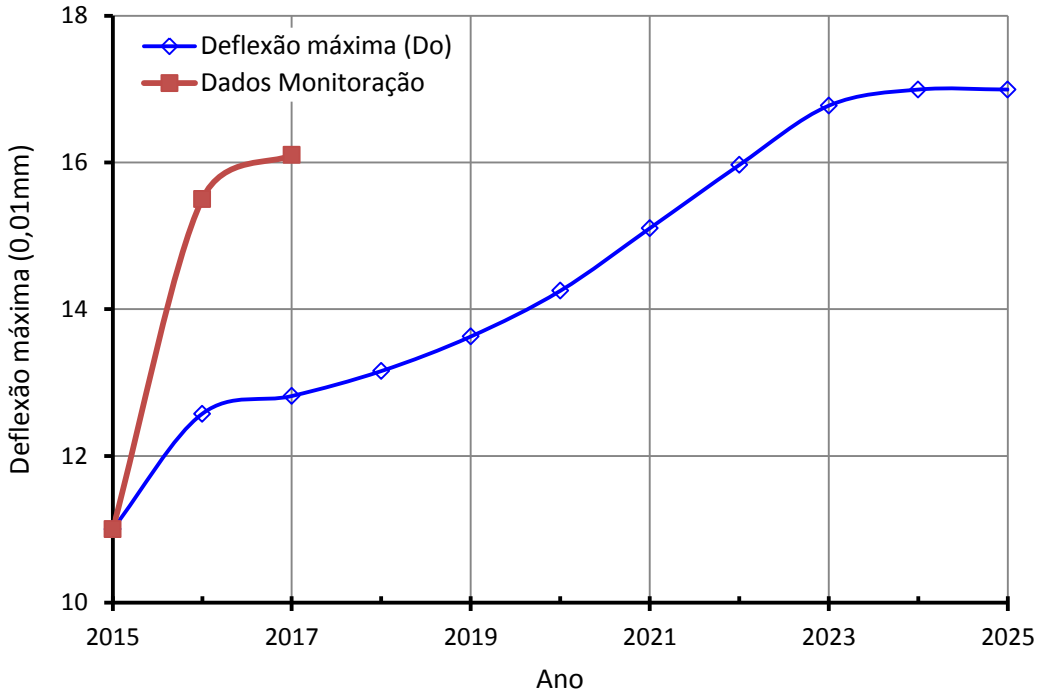


Figura 139 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

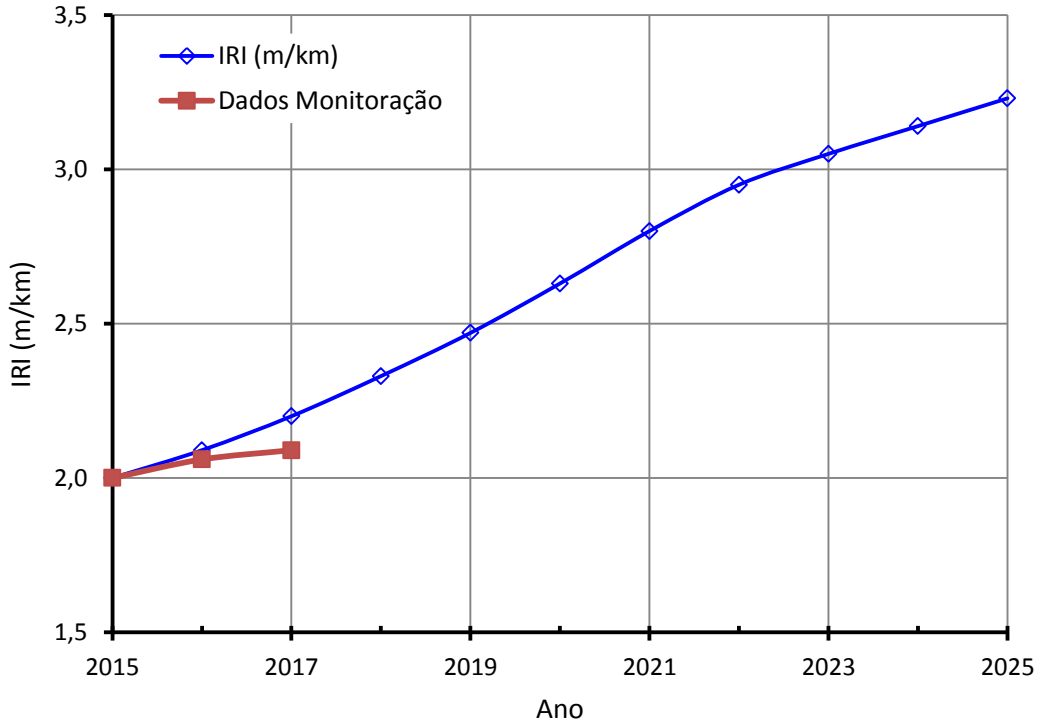


Figura 140 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

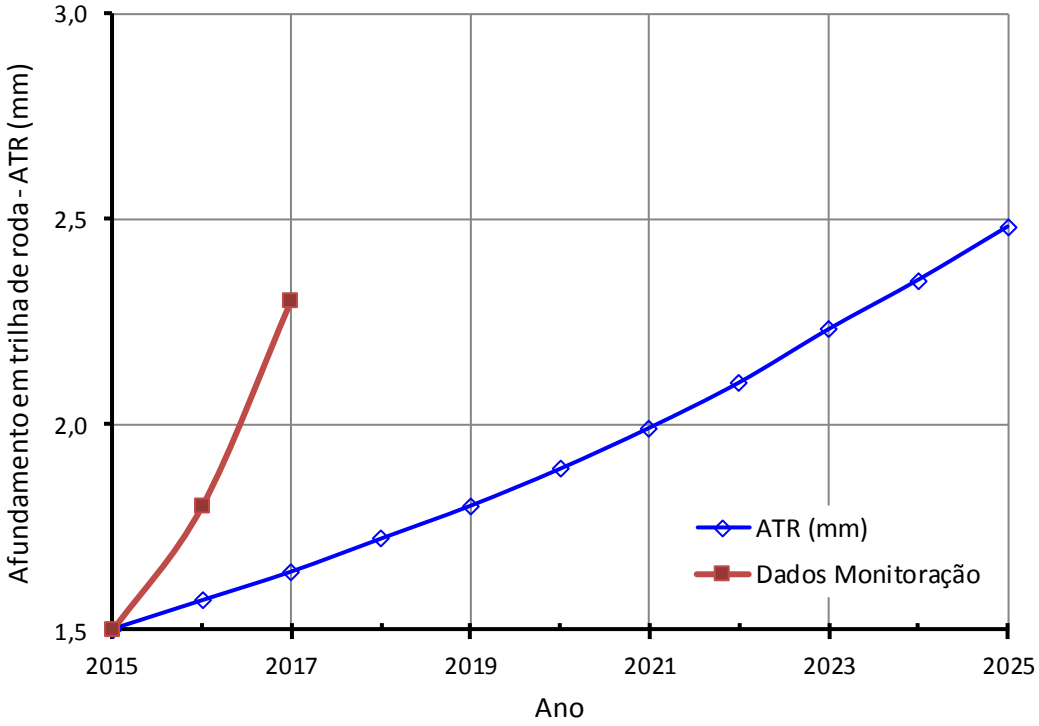


Figura 141 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

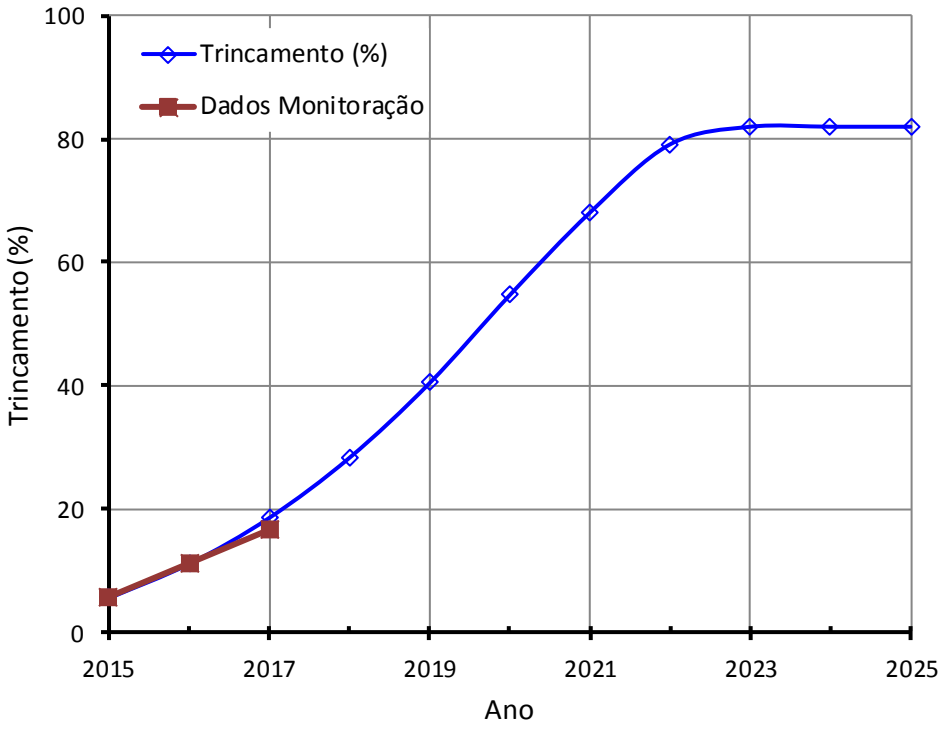


Figura 142 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

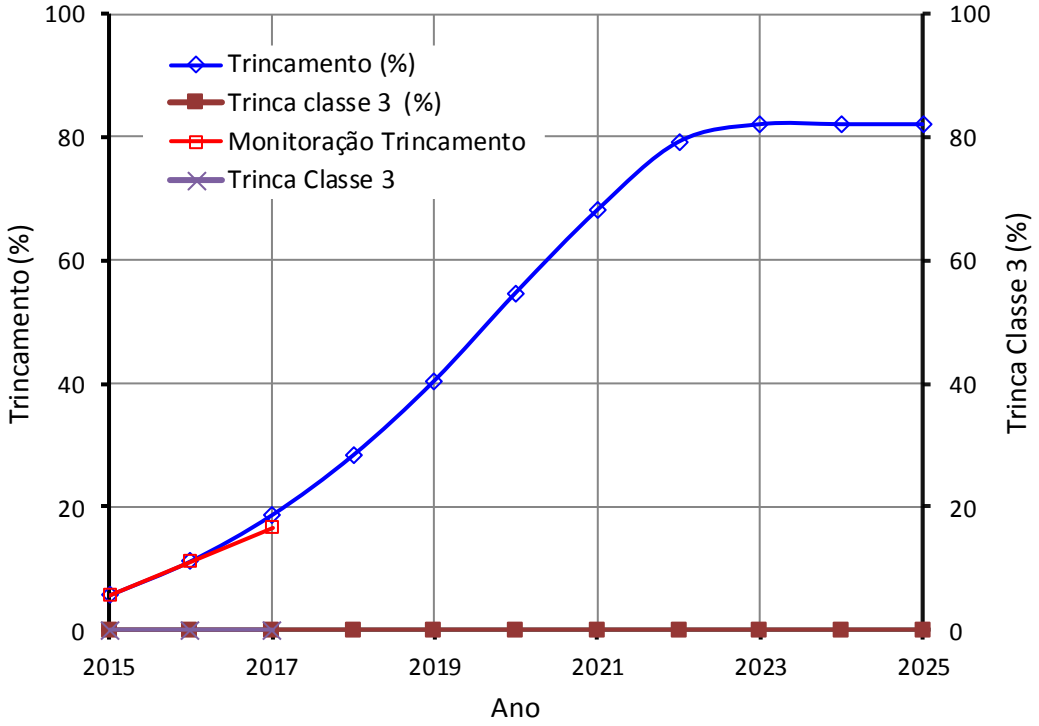


Figura 143 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA02-B (km 84+000, UF: MG)

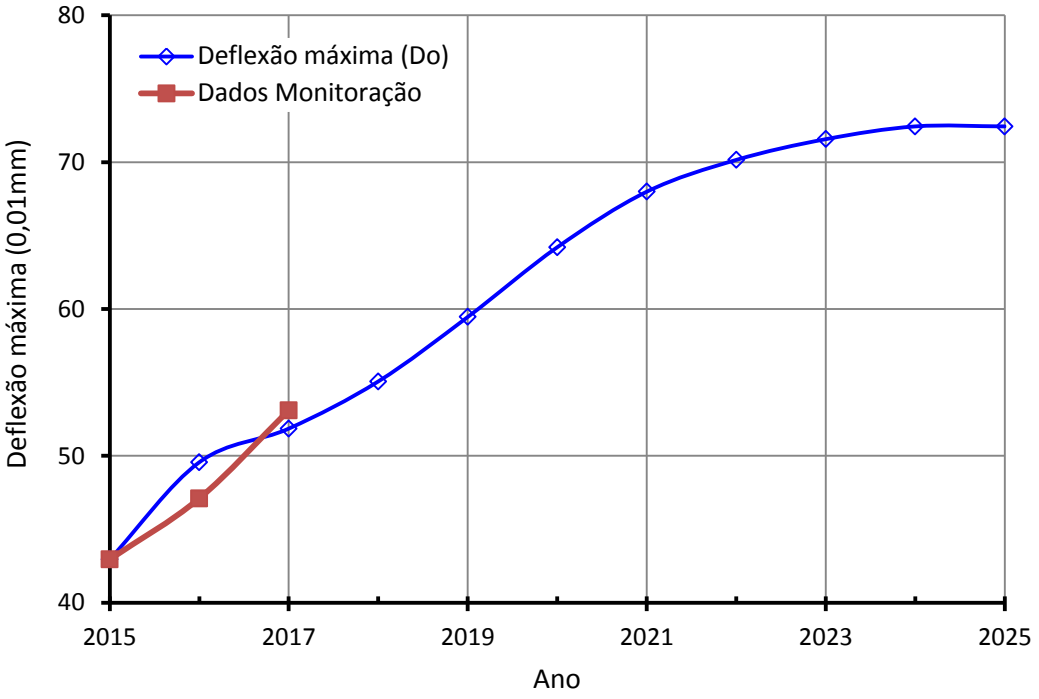


Figura 144 – Previsão e monitoração da deflexão máxima ($x10^{-2}$mm) x tempo (anos).

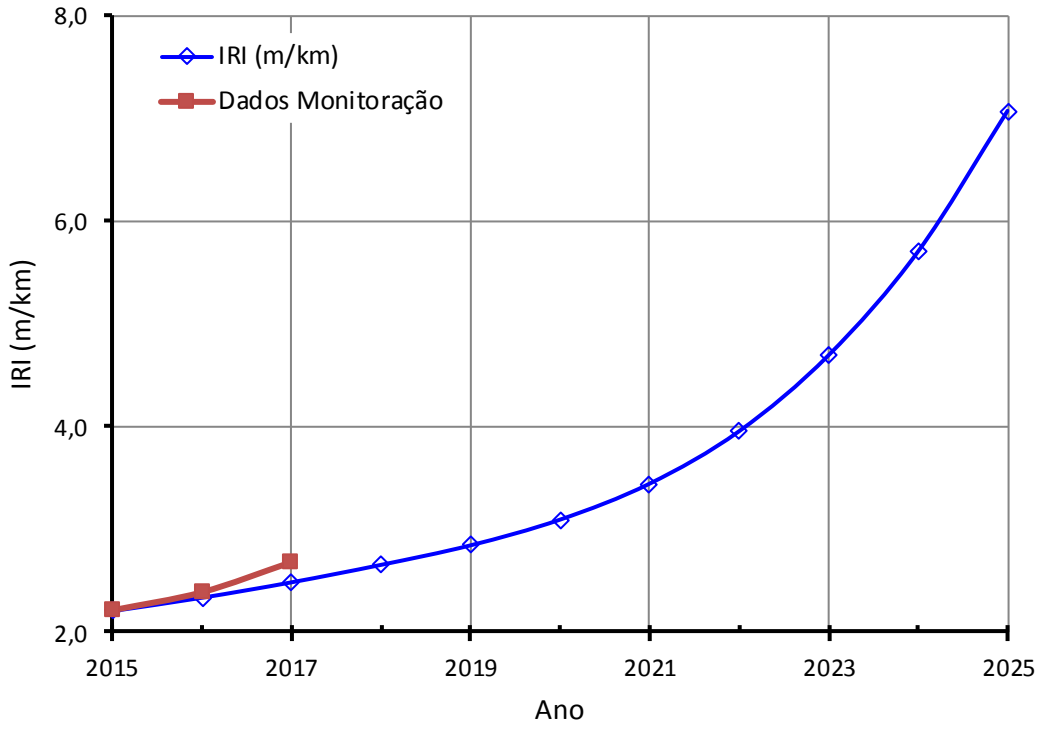


Figura 145 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

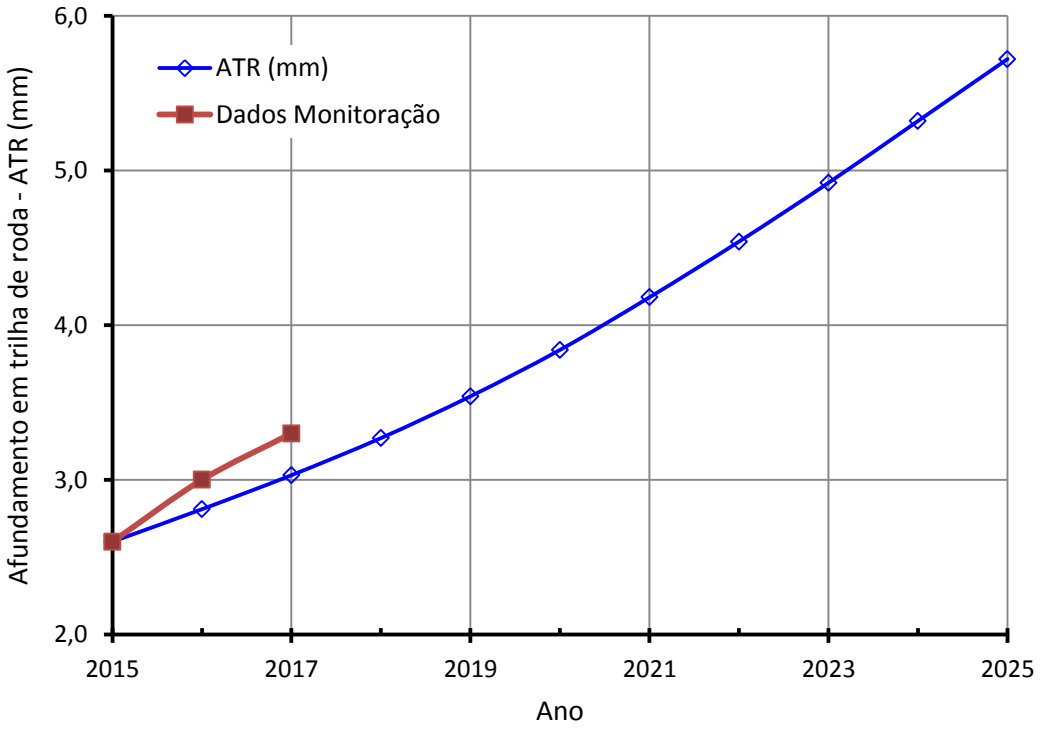


Figura 146 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

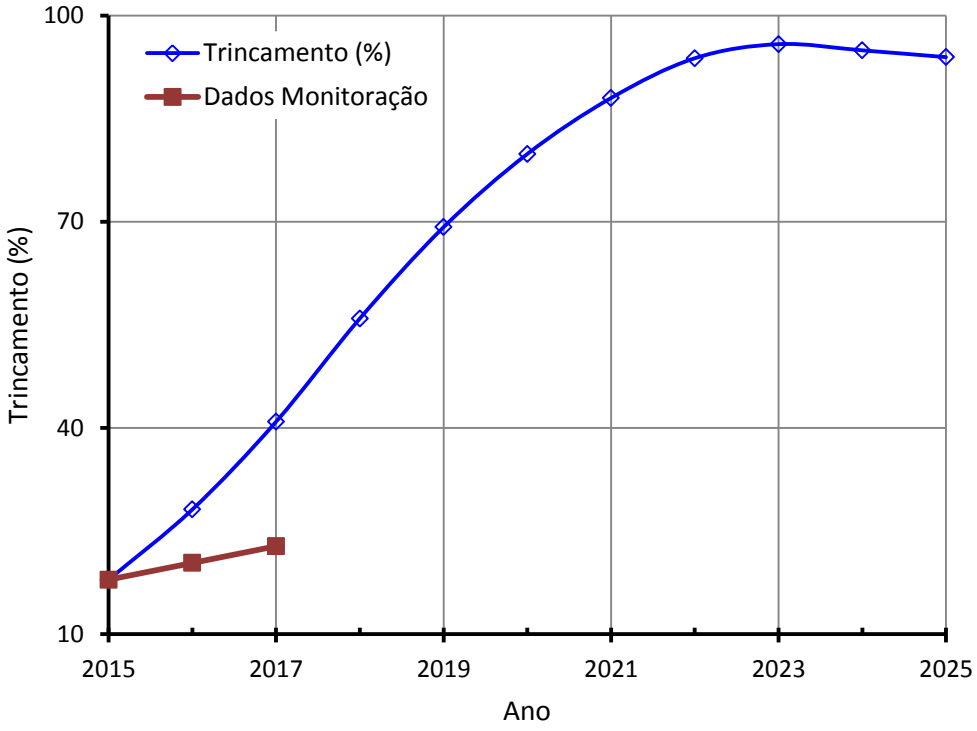


Figura 147 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

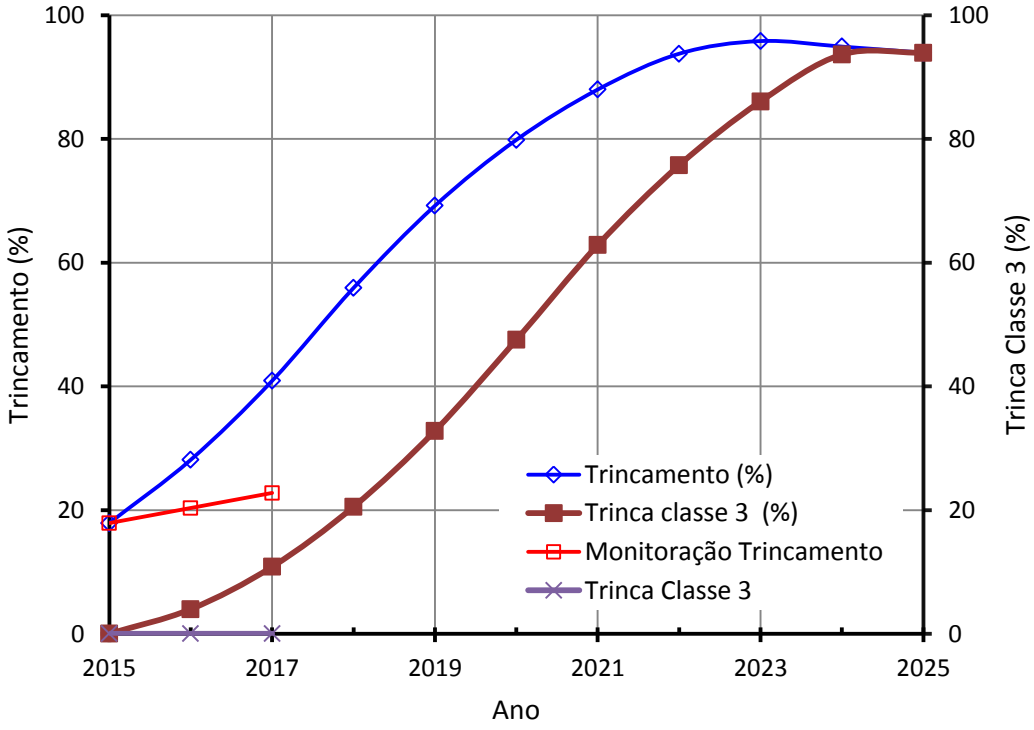


Figura 148 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

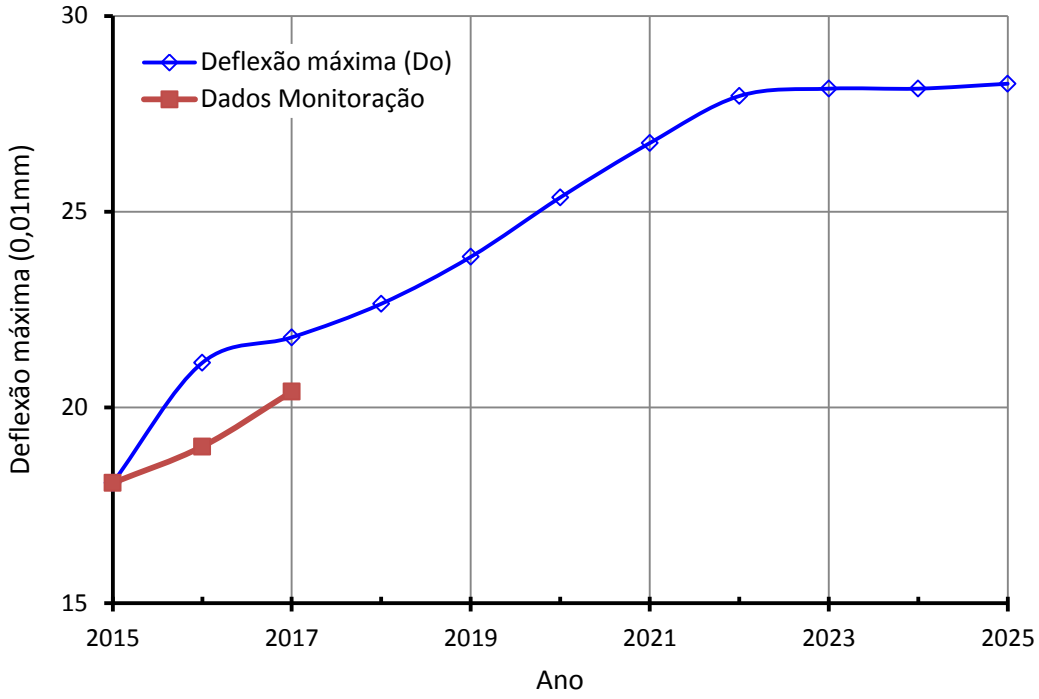


Figura 149 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

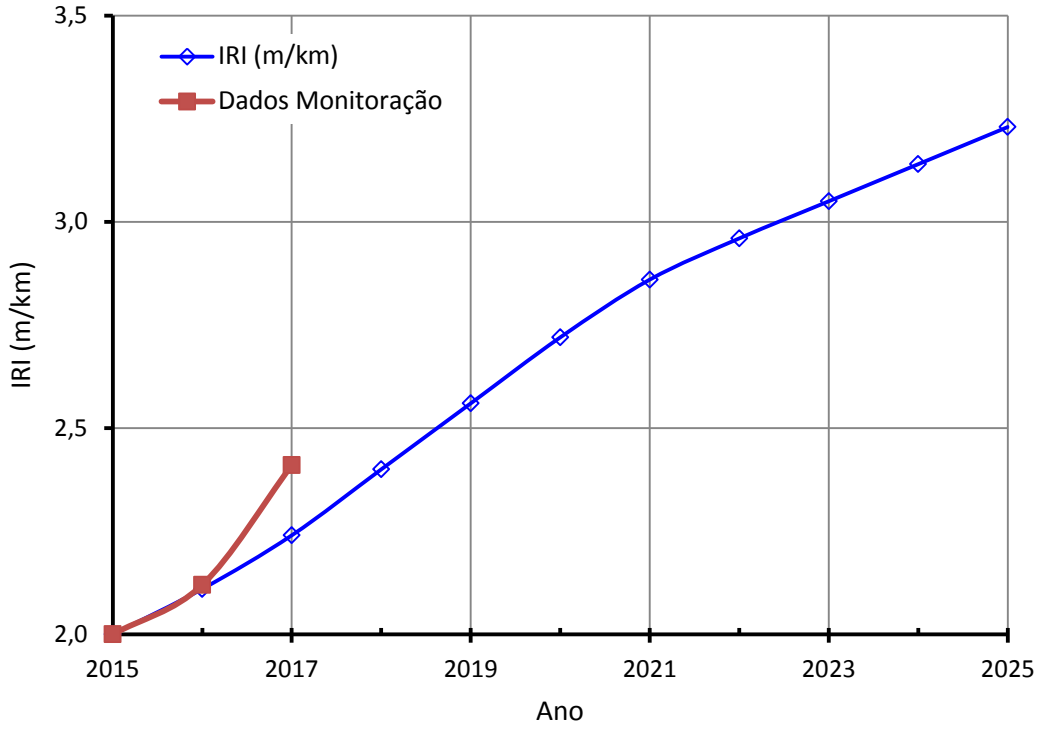


Figura 150 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

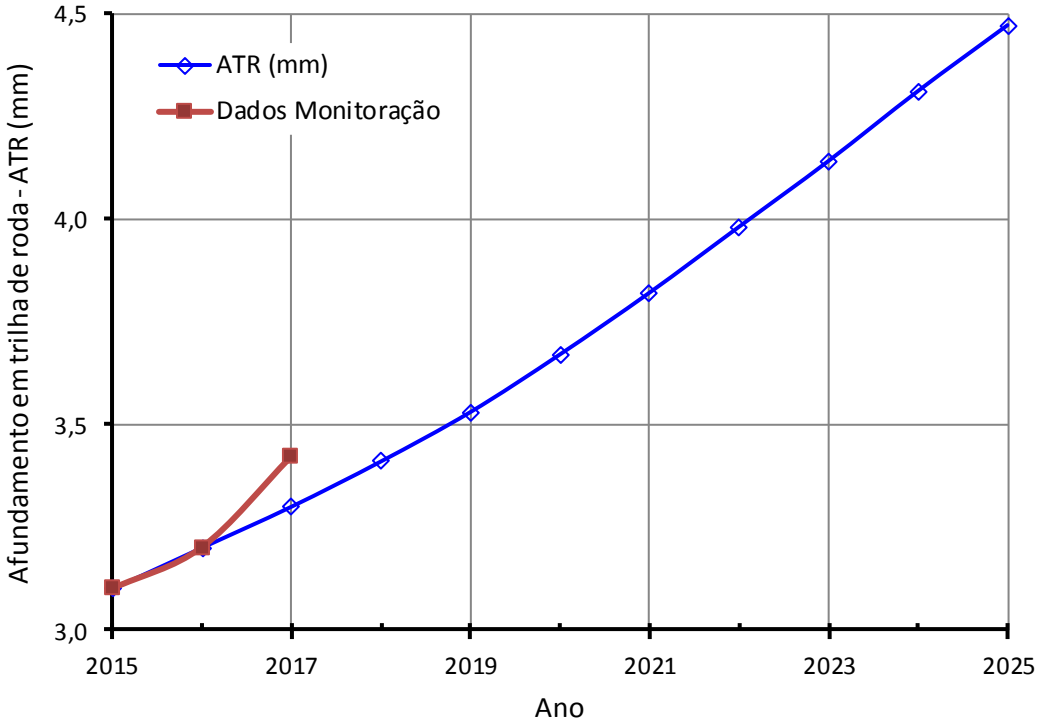


Figura 151 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

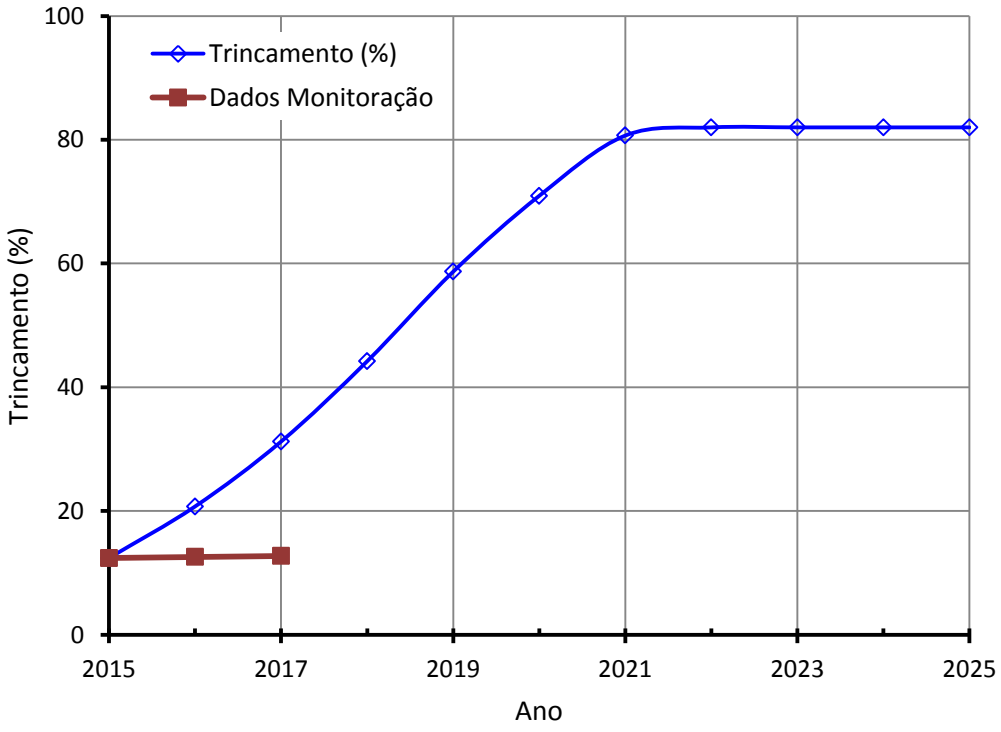


Figura 152 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

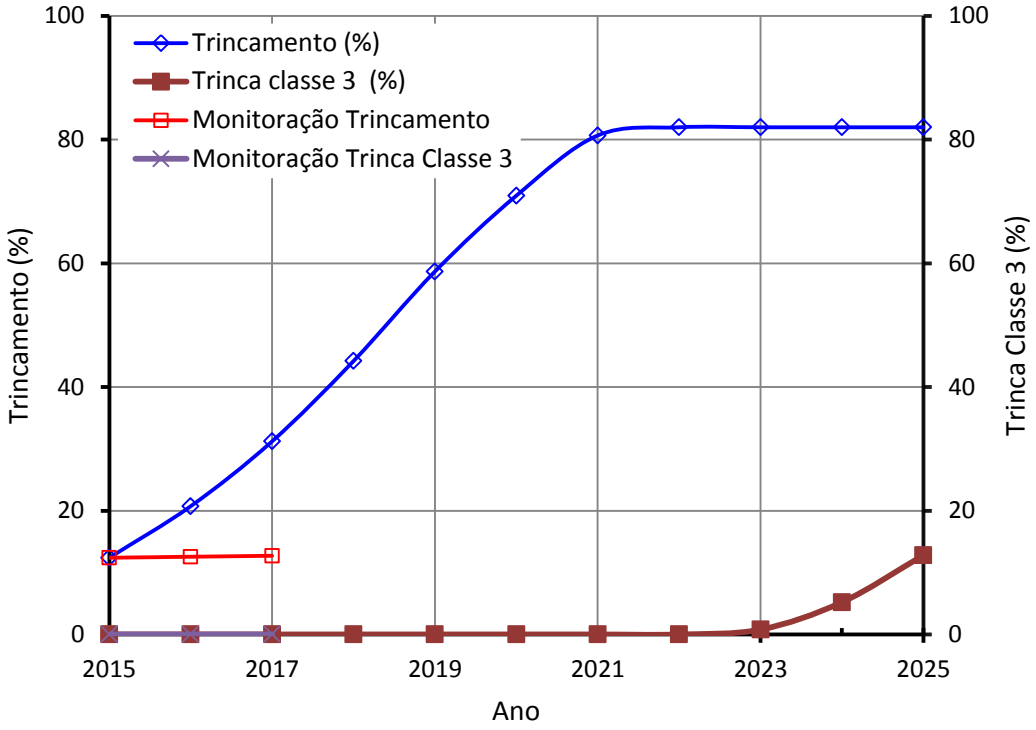


Figura 153 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA03-B (km 194+300, UF: MG)

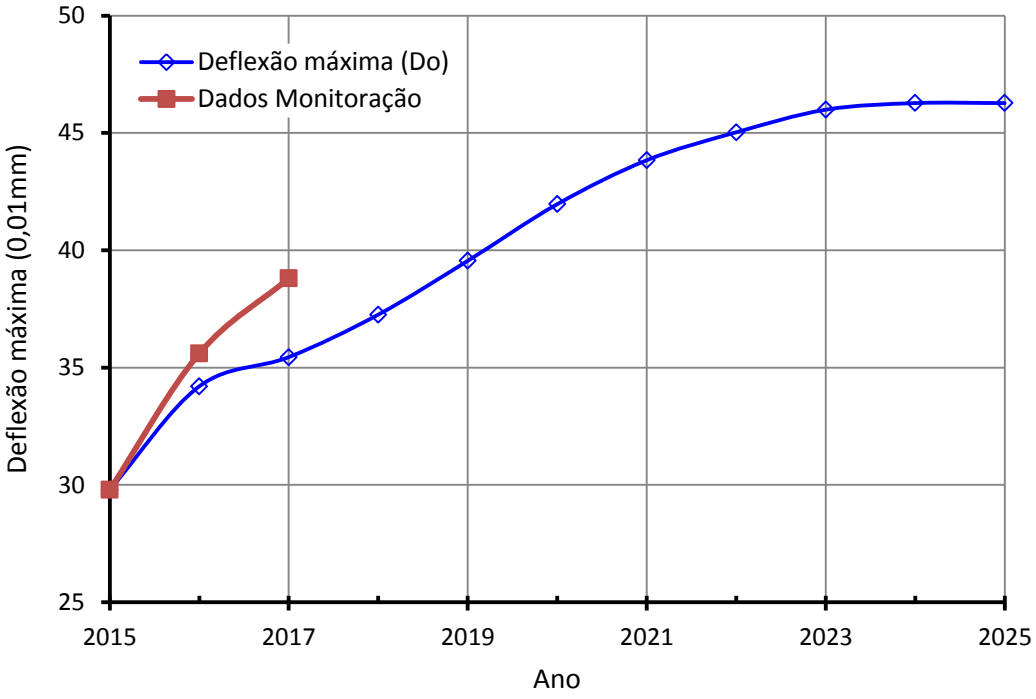


Figura 154 – Previsão e monitoração da deflexão máxima ($x10^{-2}$mm) x tempo (anos).

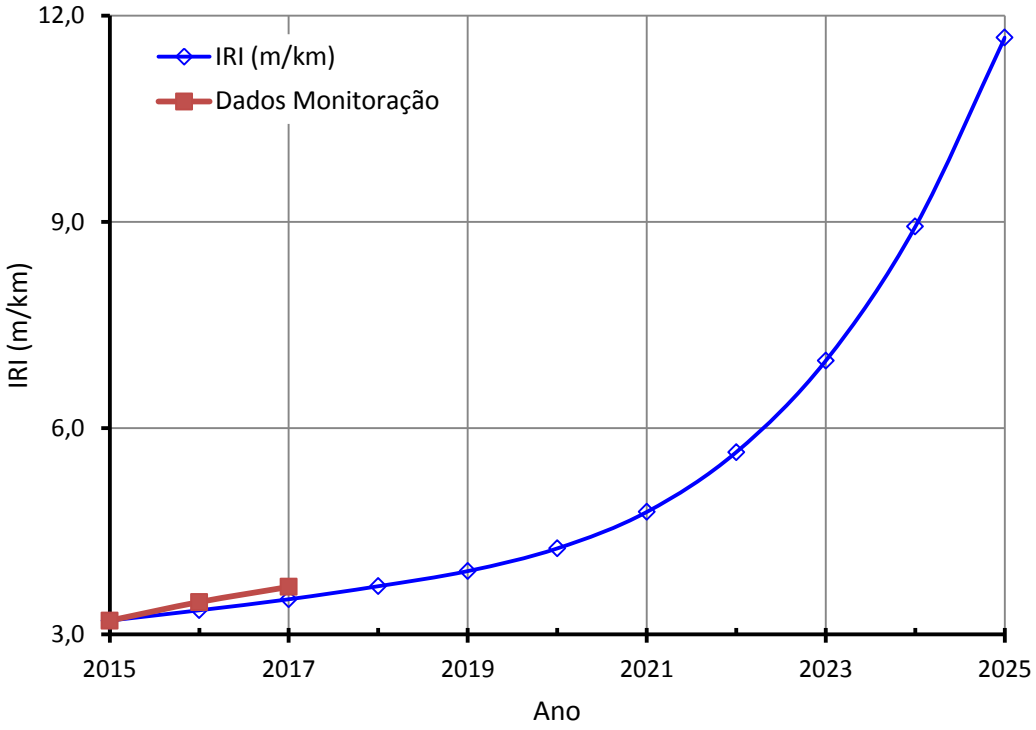


Figura 155 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

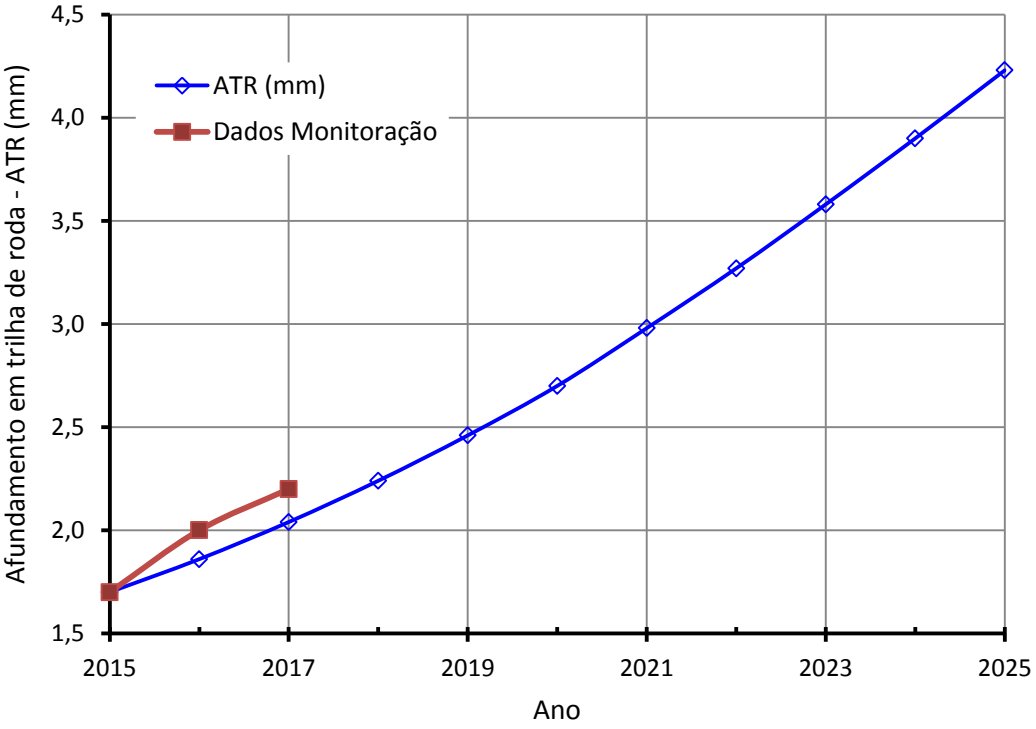


Figura 156 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

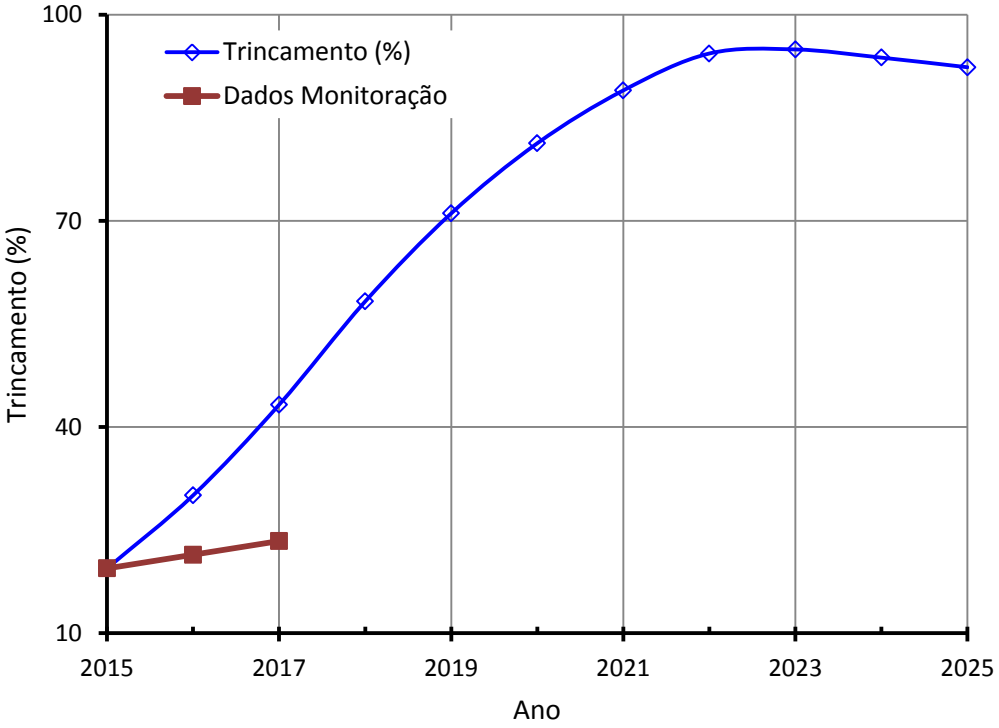


Figura 157 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

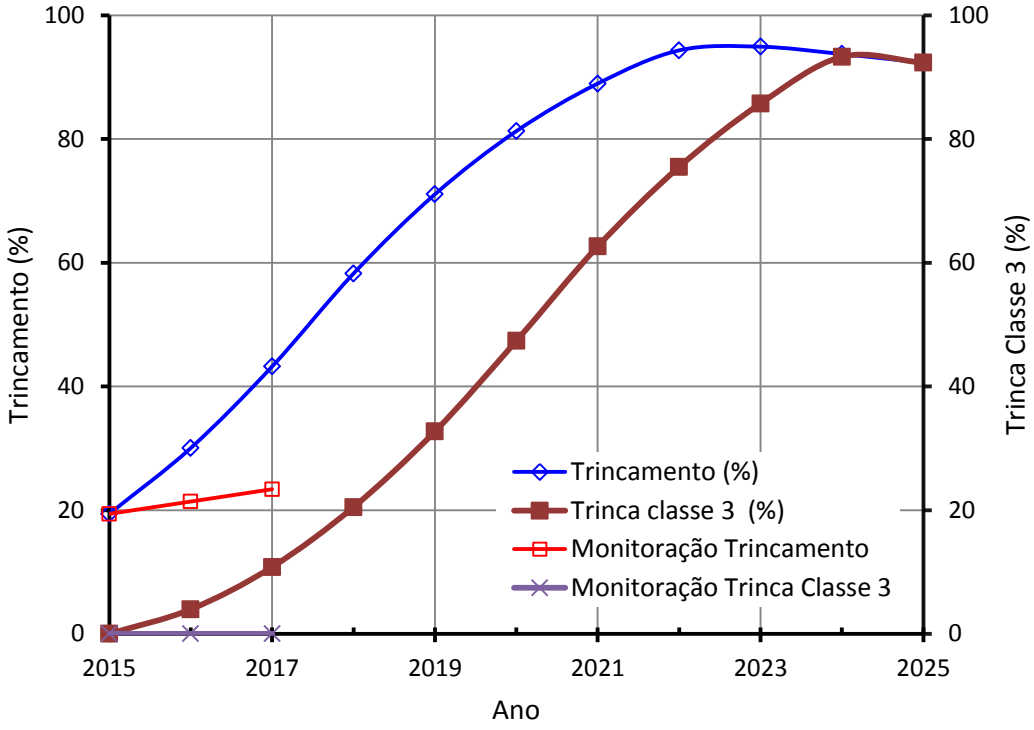


Figura 158 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA04 (km 260+470, UF: MG)

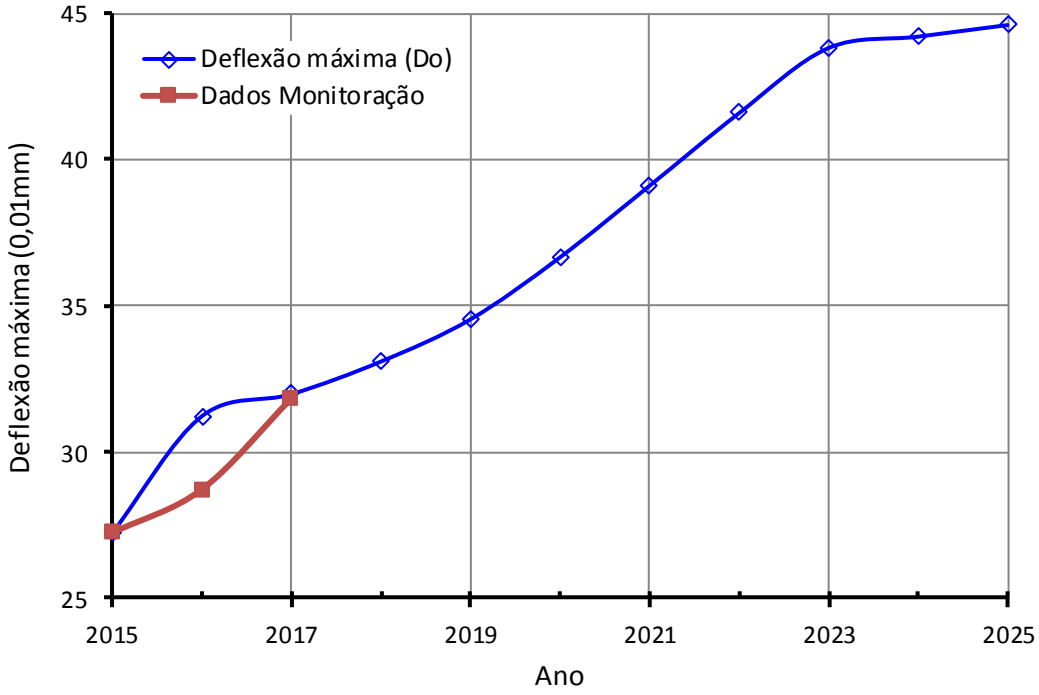


Figura 159 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

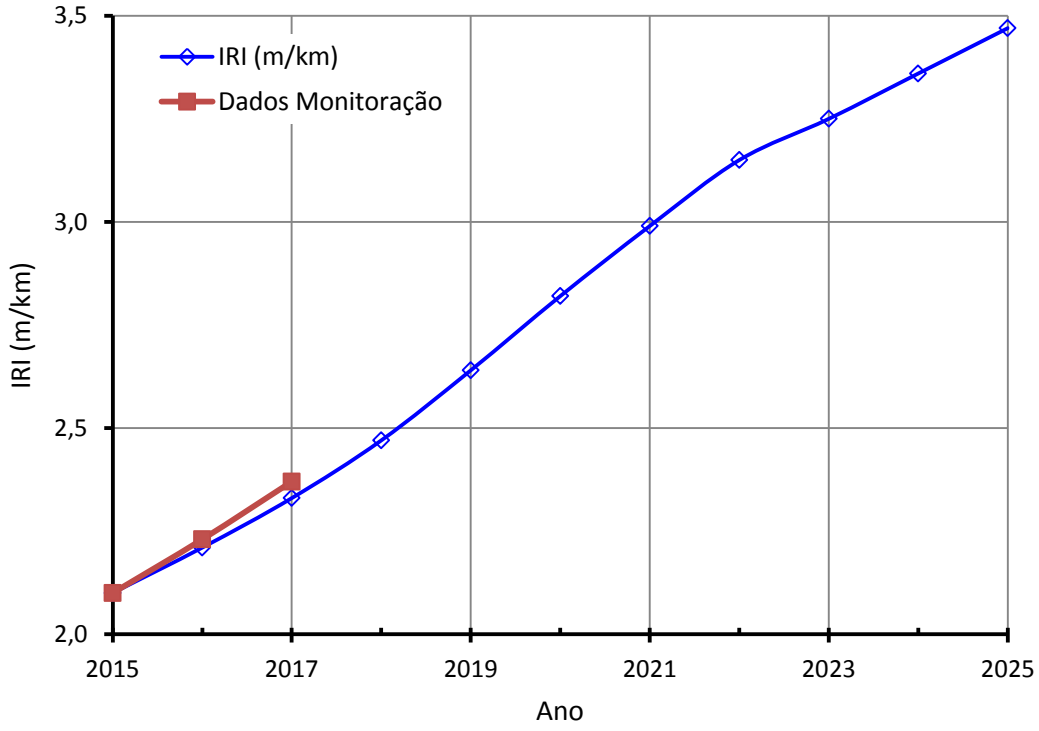


Figura 160 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

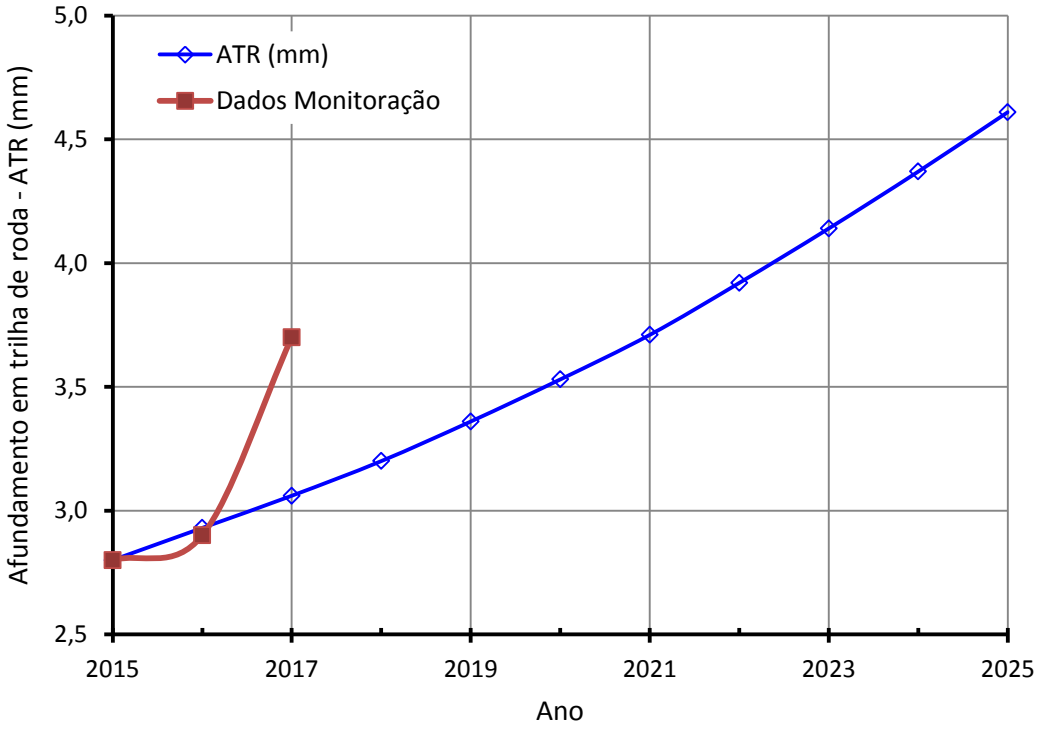


Figura 161 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

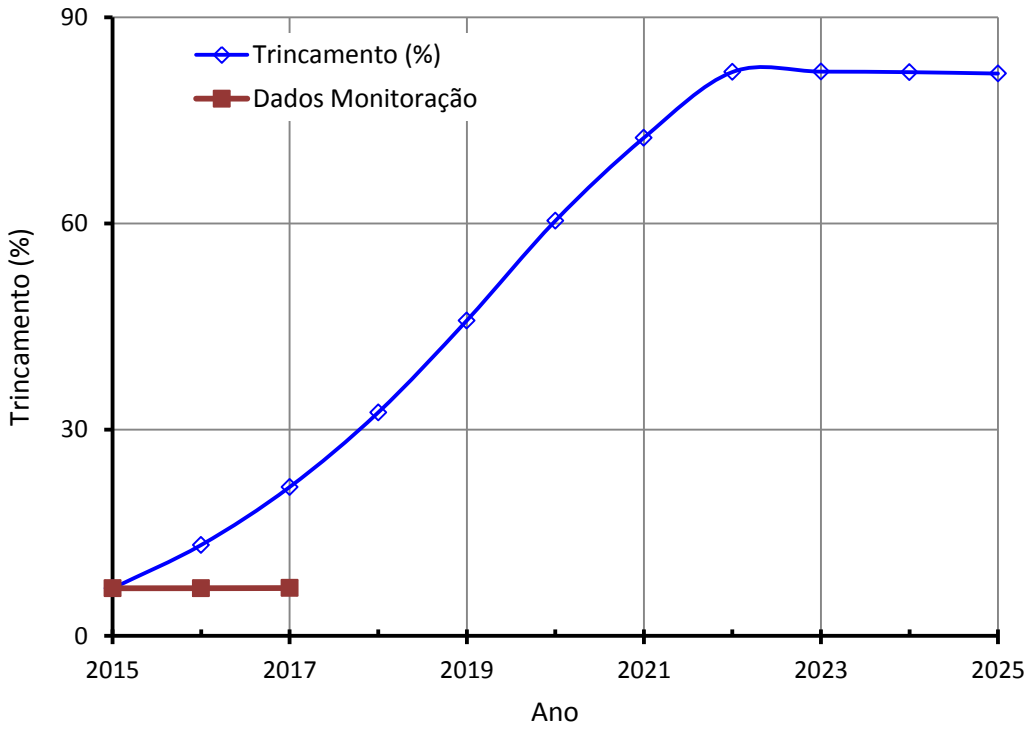


Figura 162 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

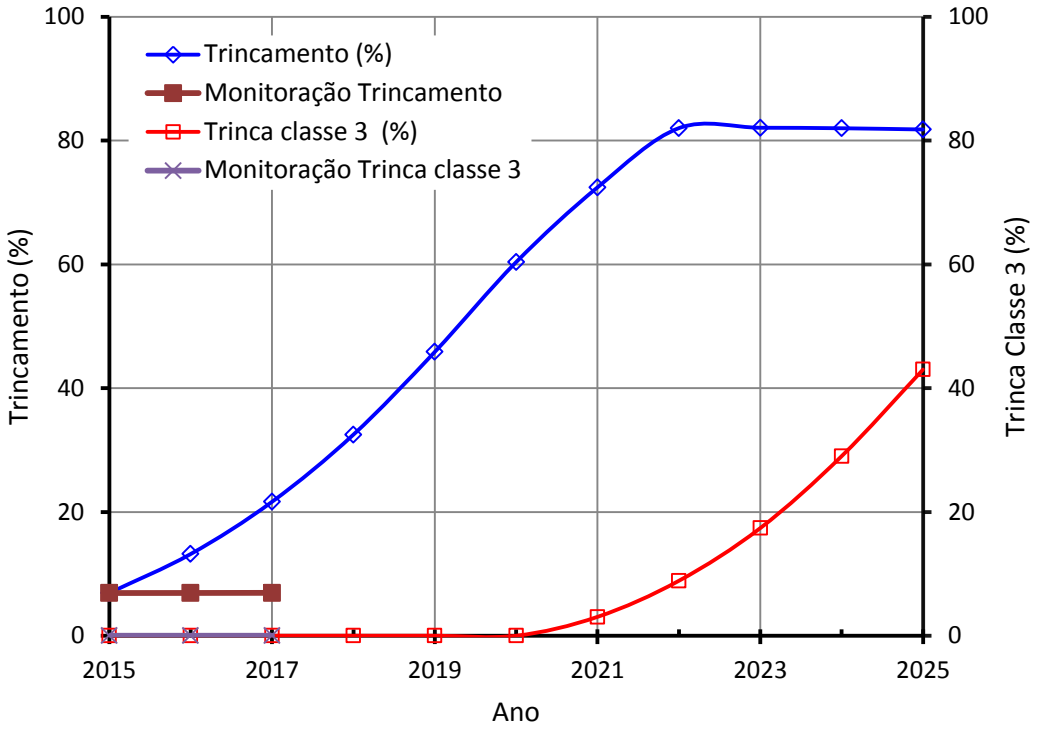


Figura 163 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA04-B (km 244+500, UF: MG)

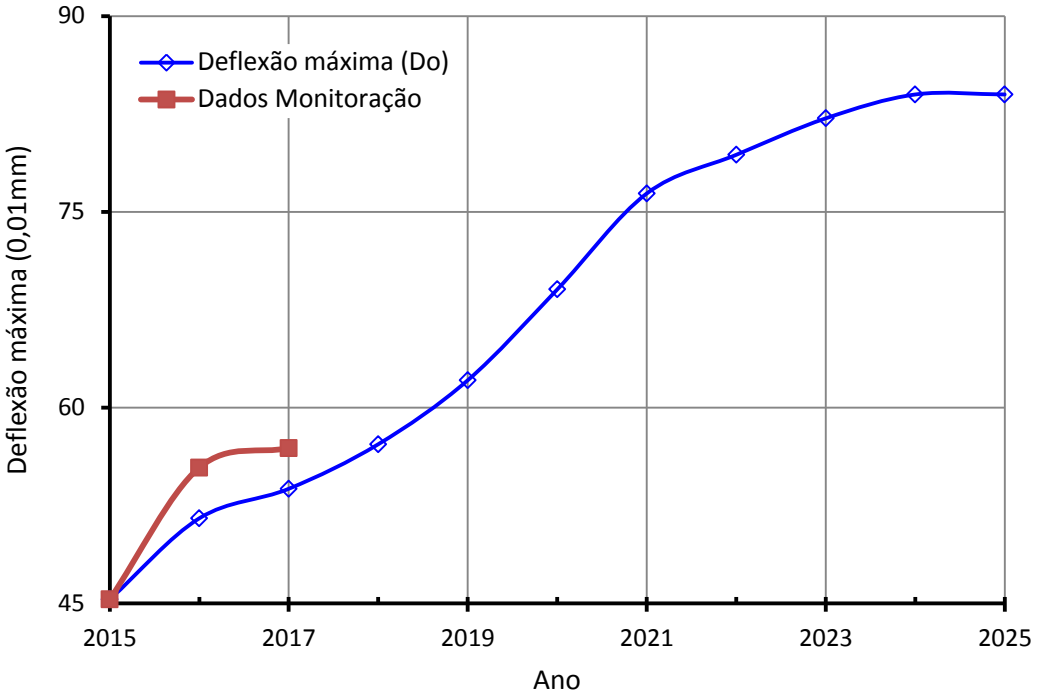


Figura 164 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

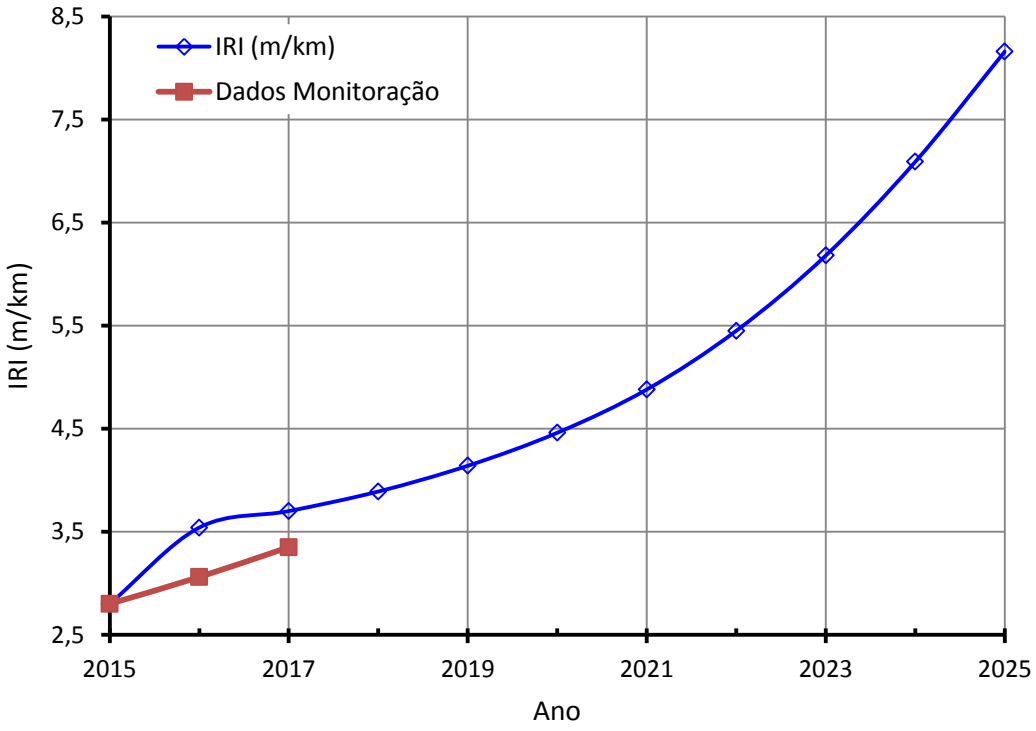


Figura 165 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

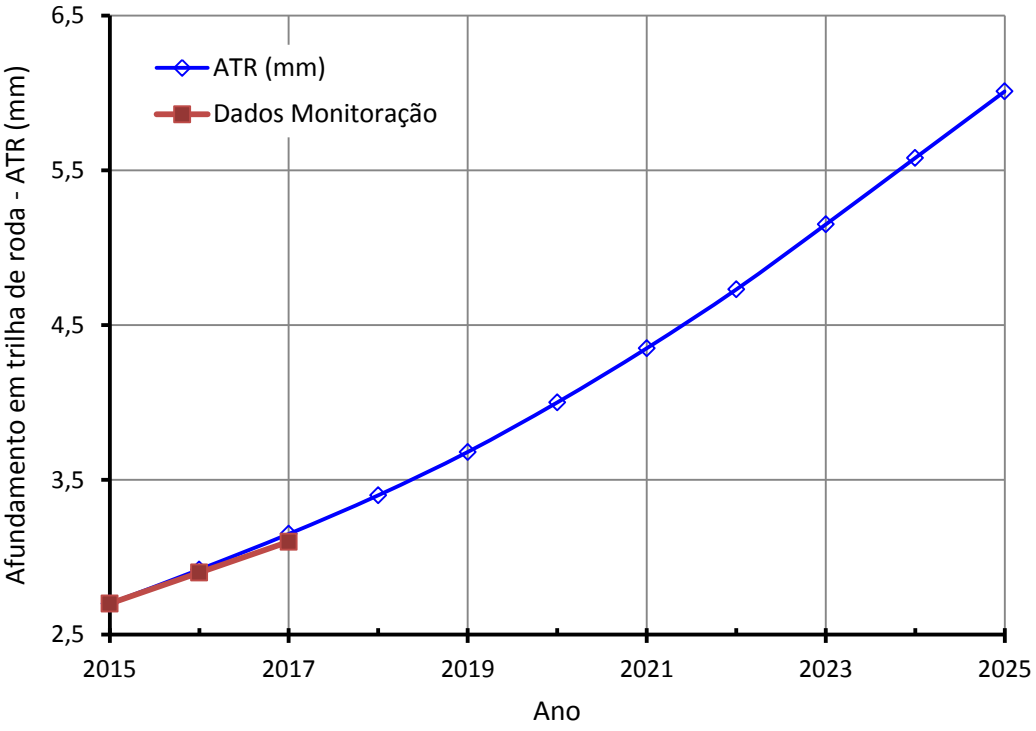


Figura 166 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

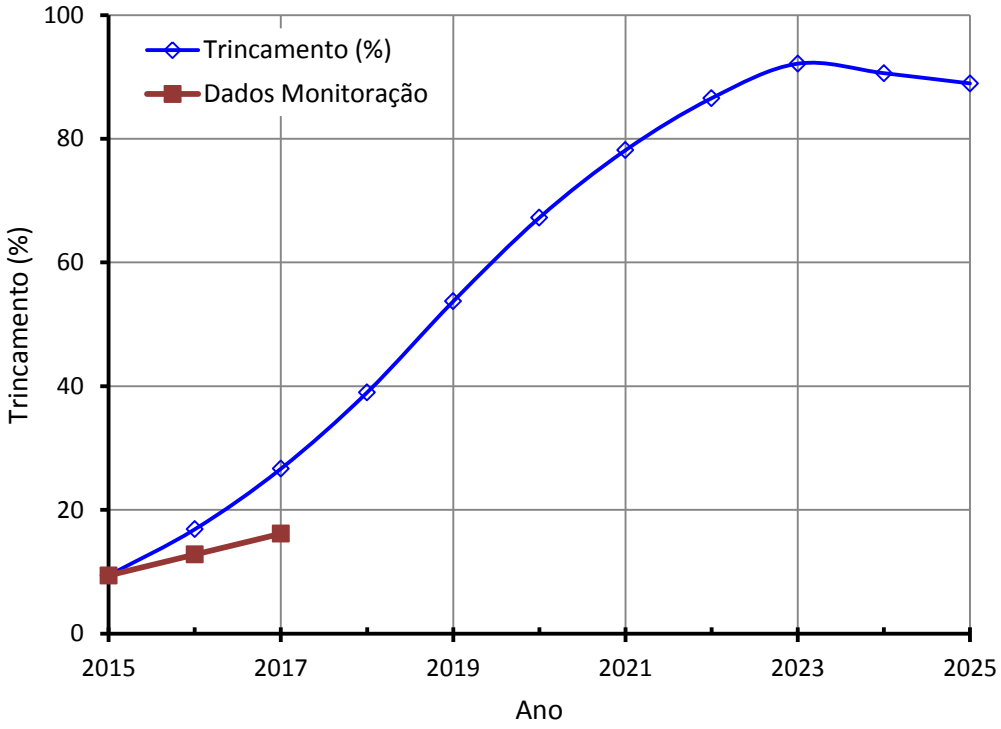


Figura 167 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

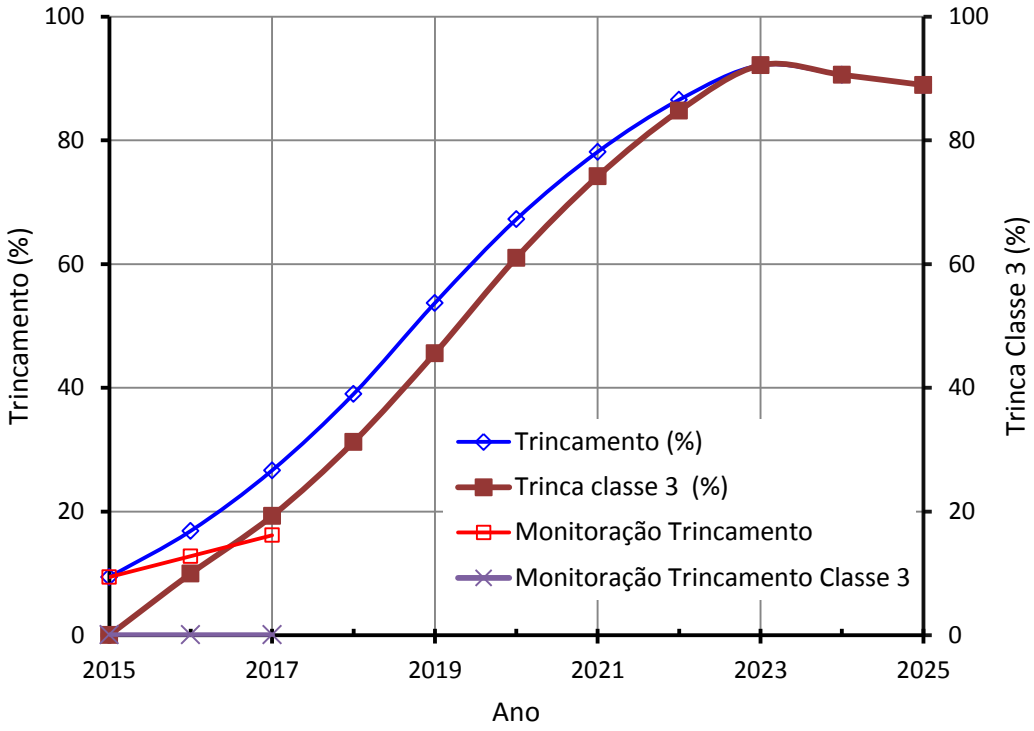


Figura 168 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

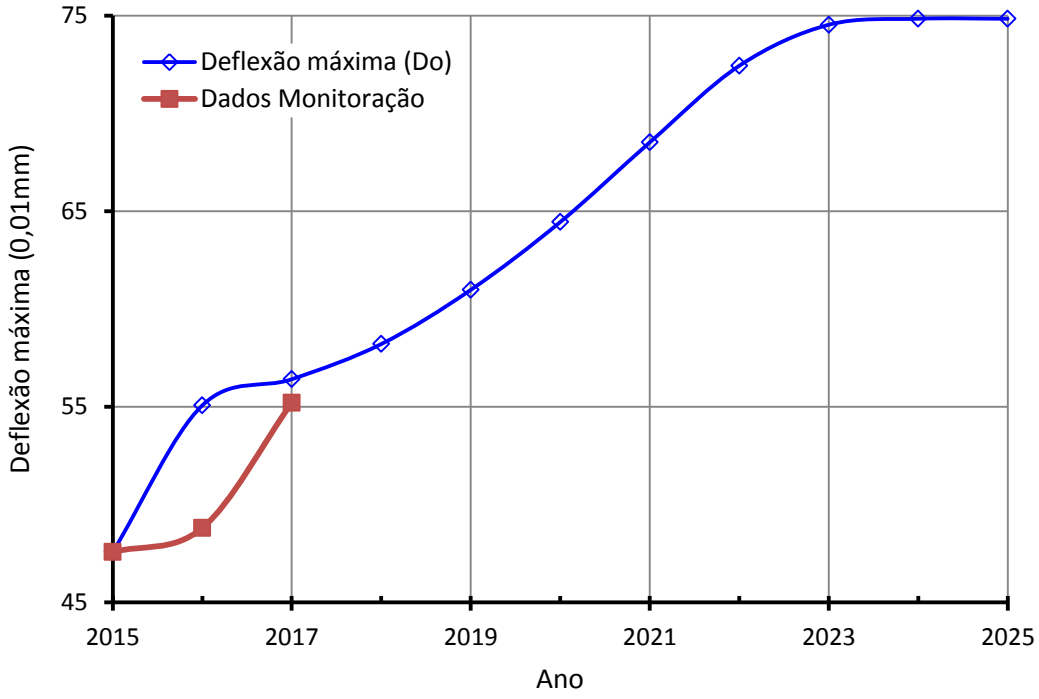


Figura 169 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

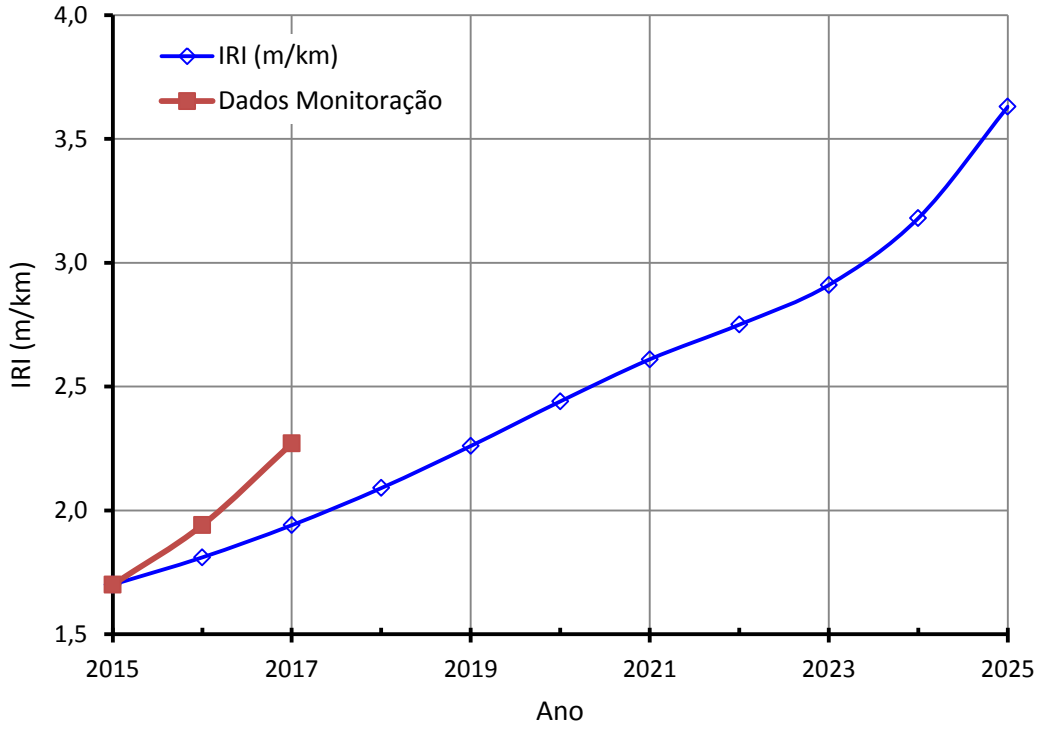


Figura 170 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

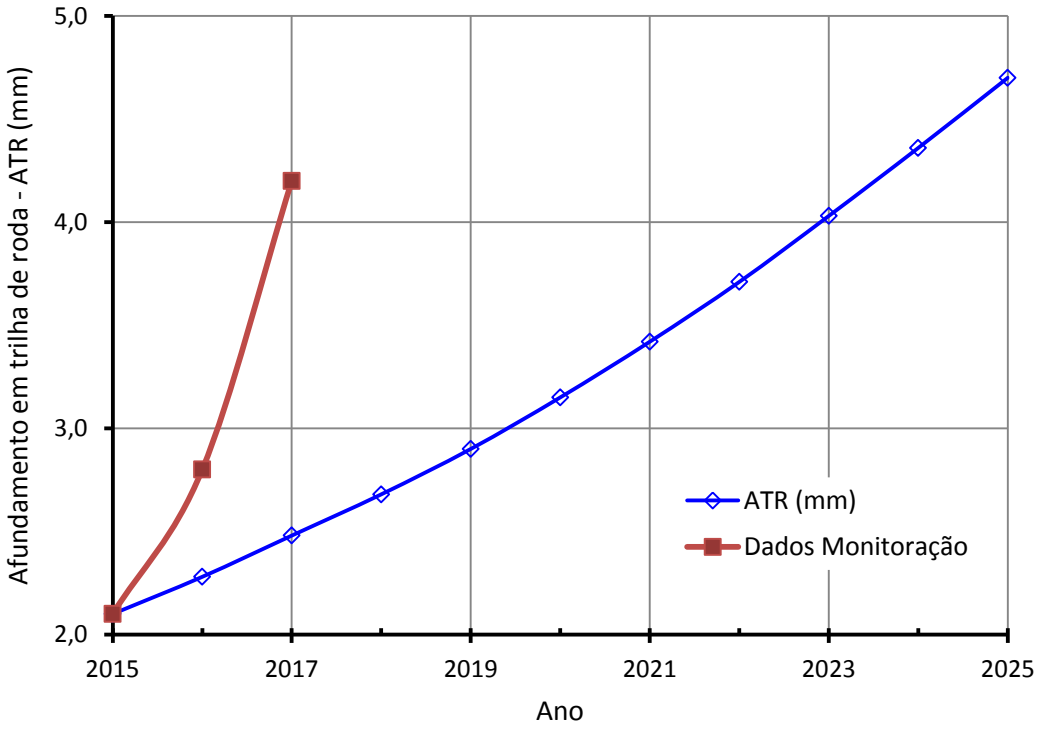


Figura 171 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

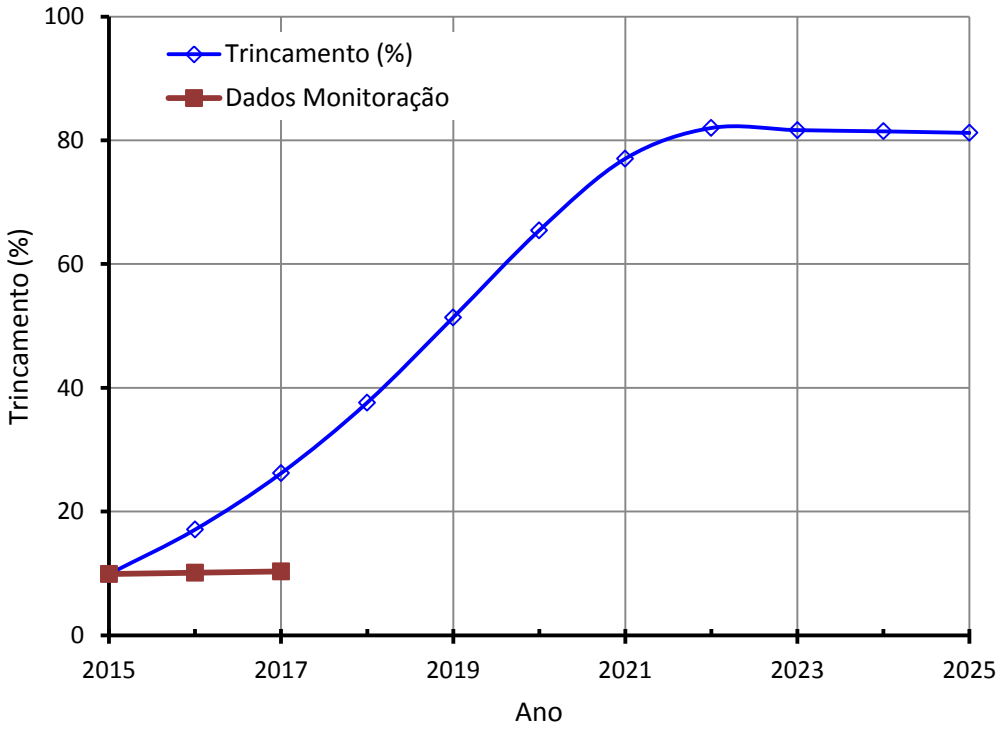


Figura 172 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

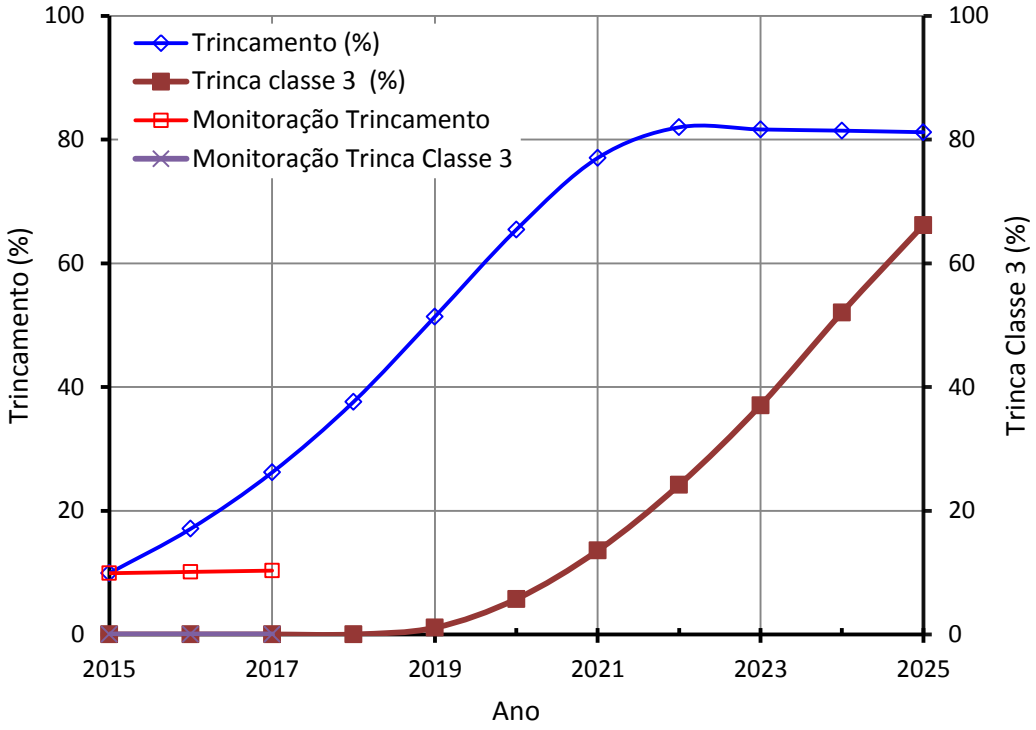


Figura 173 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA05-B (km 338+000 UF: MG)

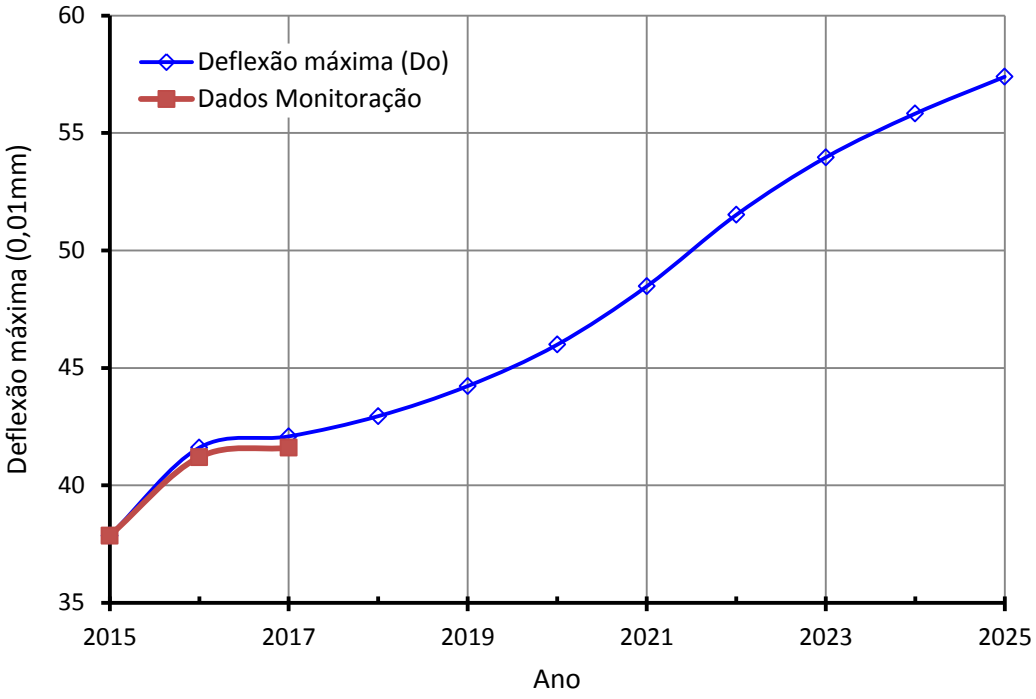


Figura 174 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

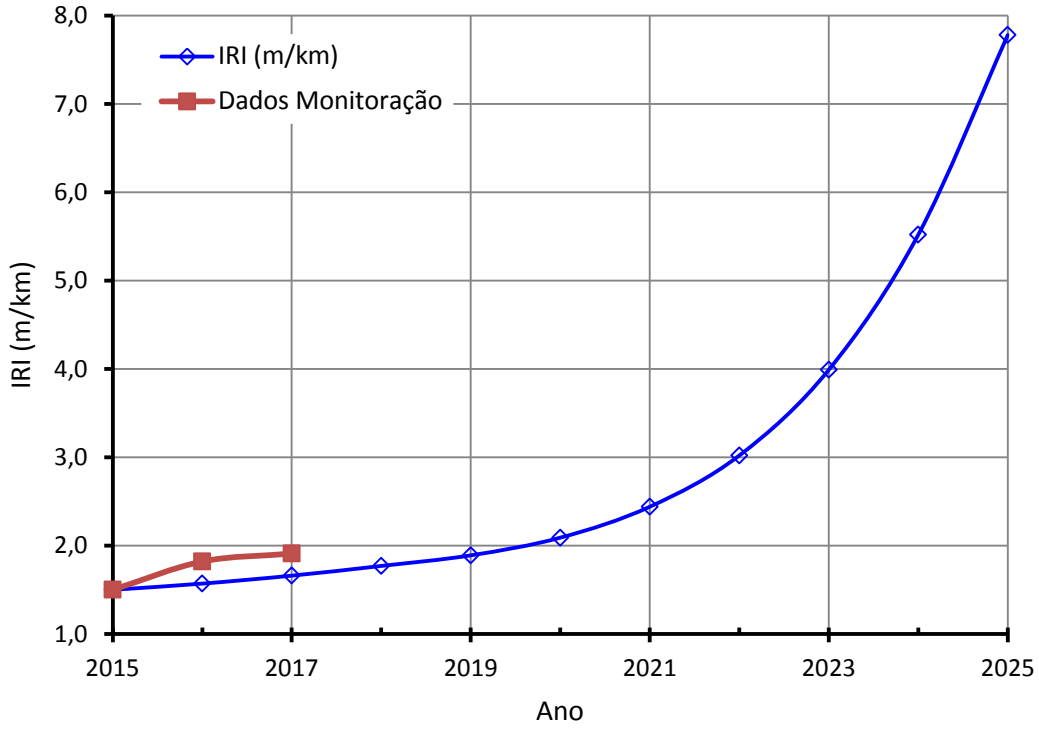


Figura 175 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

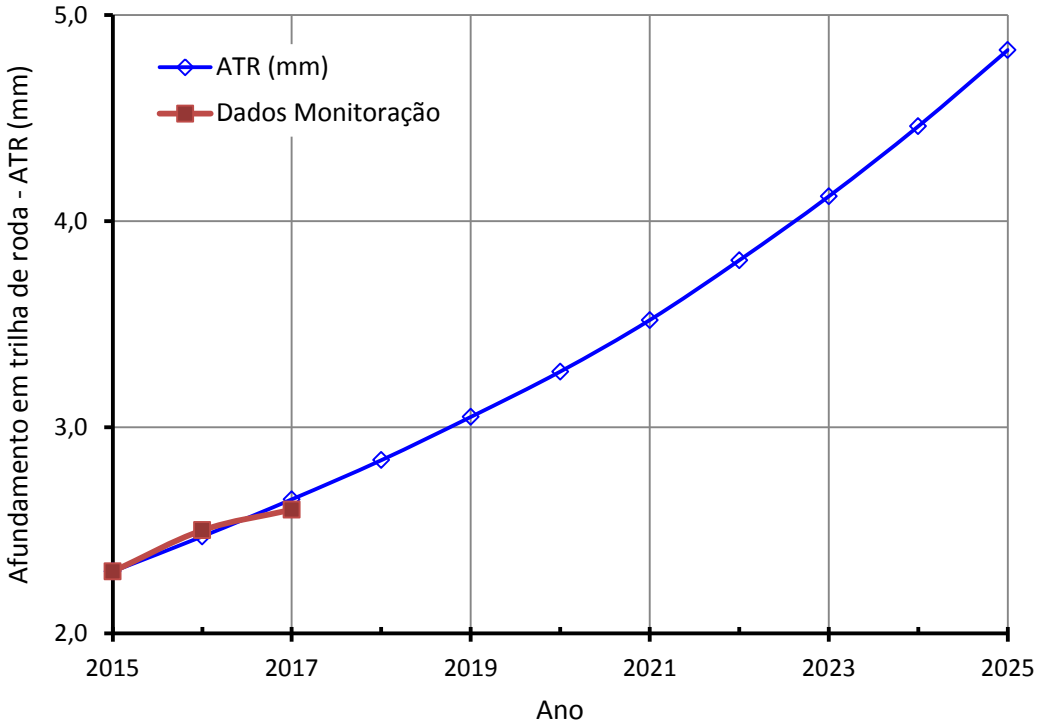


Figura 176 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

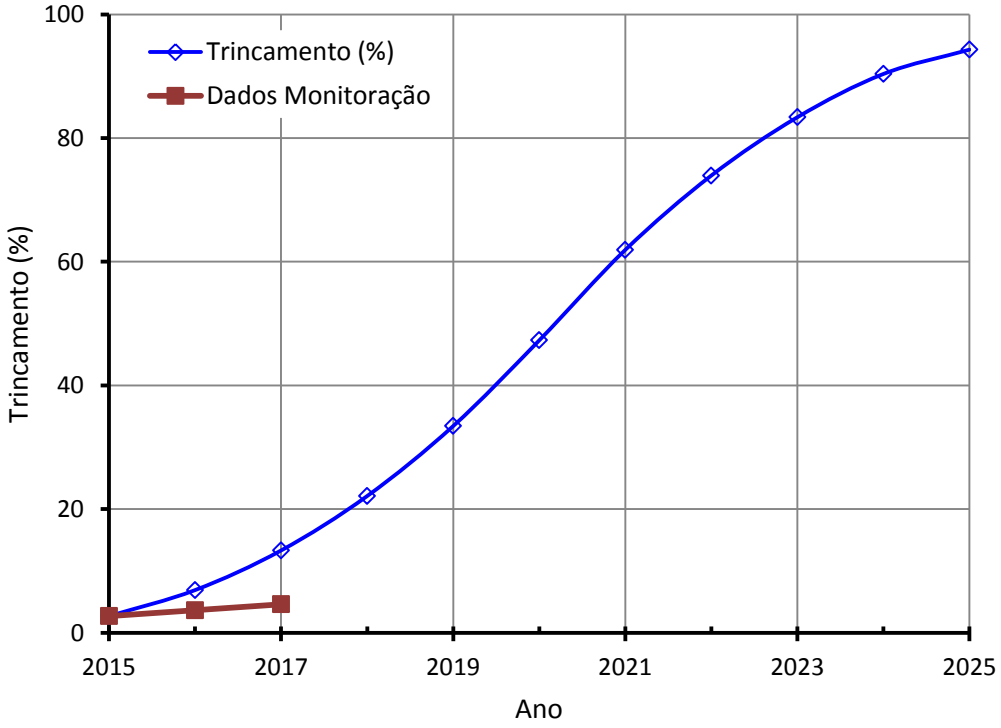


Figura 177 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

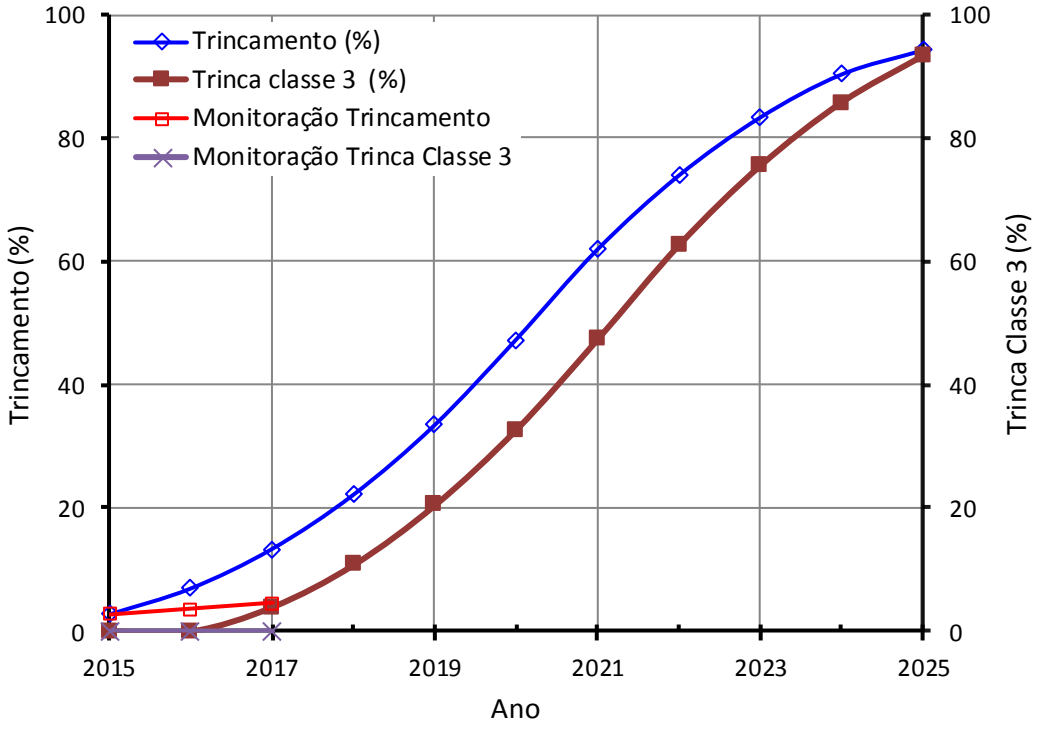


Figura 178 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA06 (km 407+650, UF: MG)

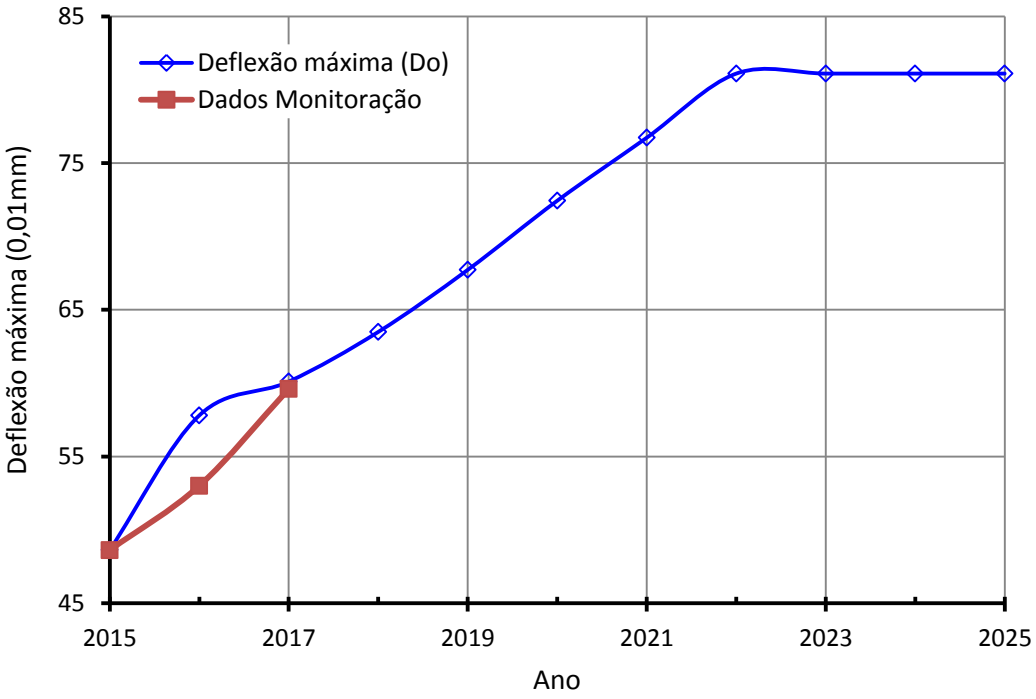


Figura 179 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

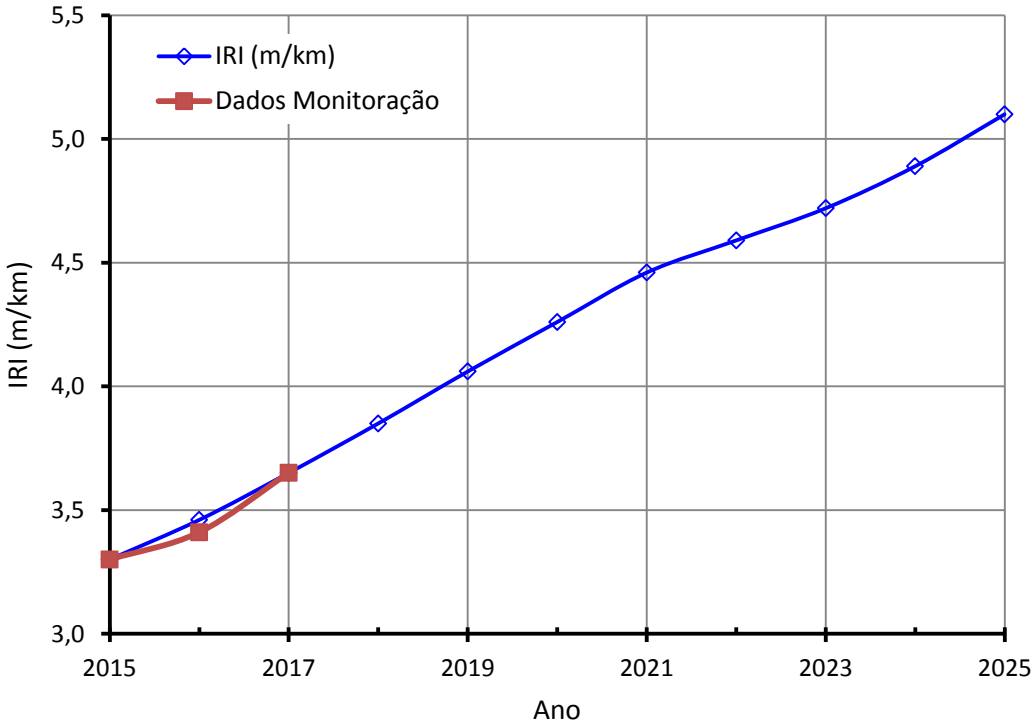


Figura 180 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

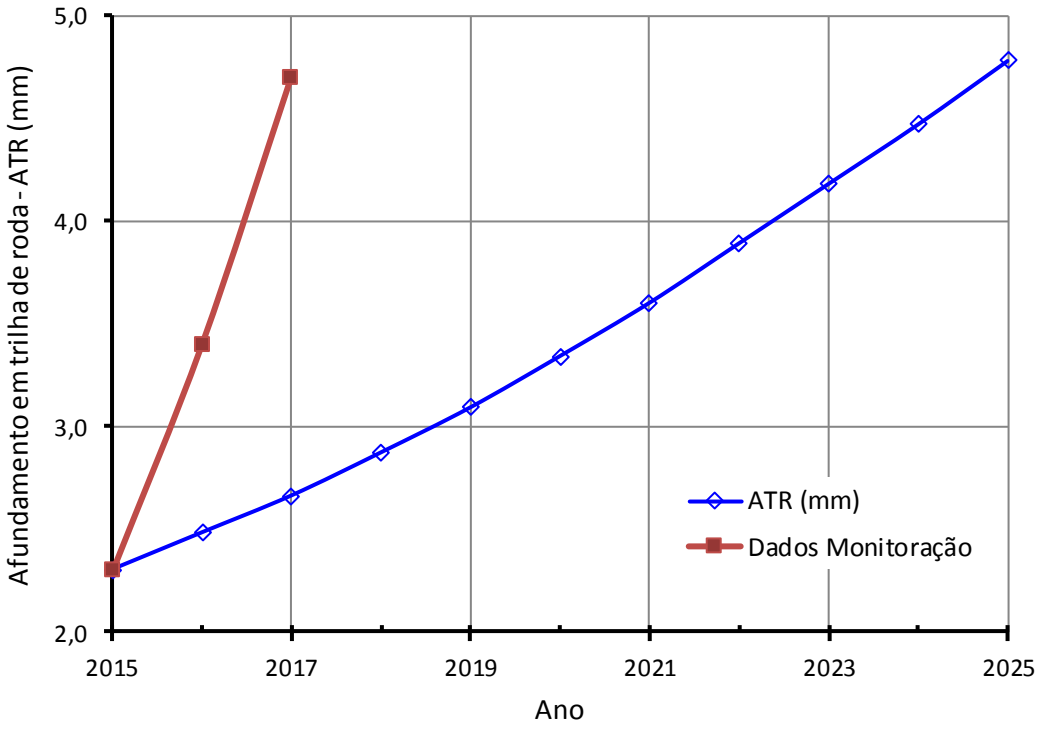


Figura 181 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

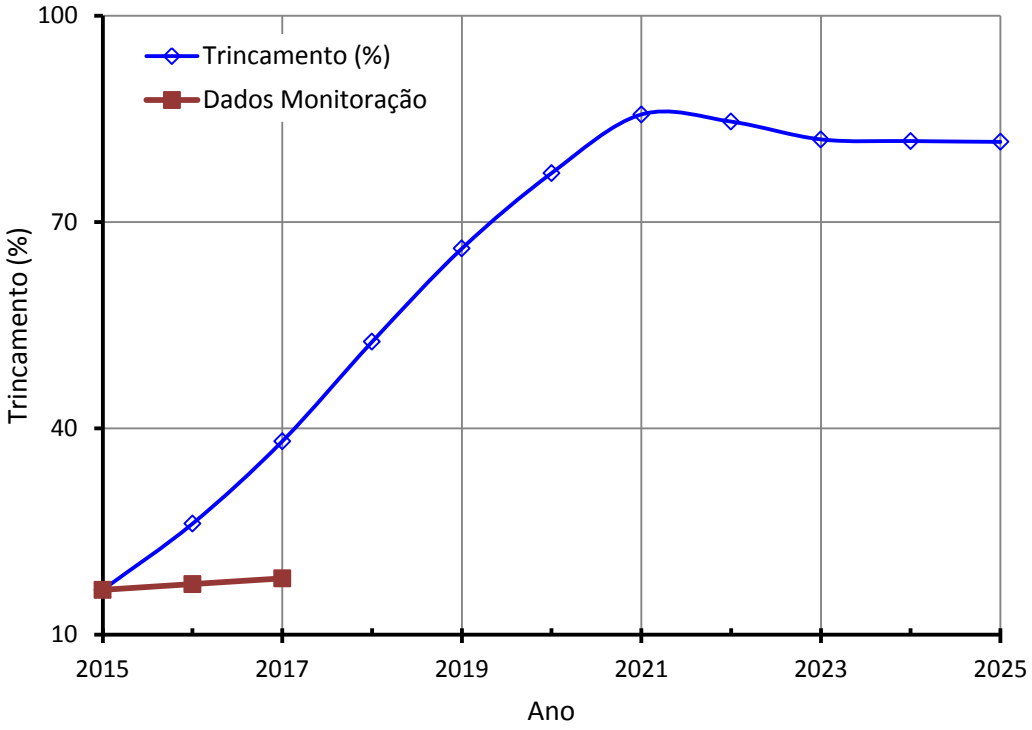


Figura 182 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

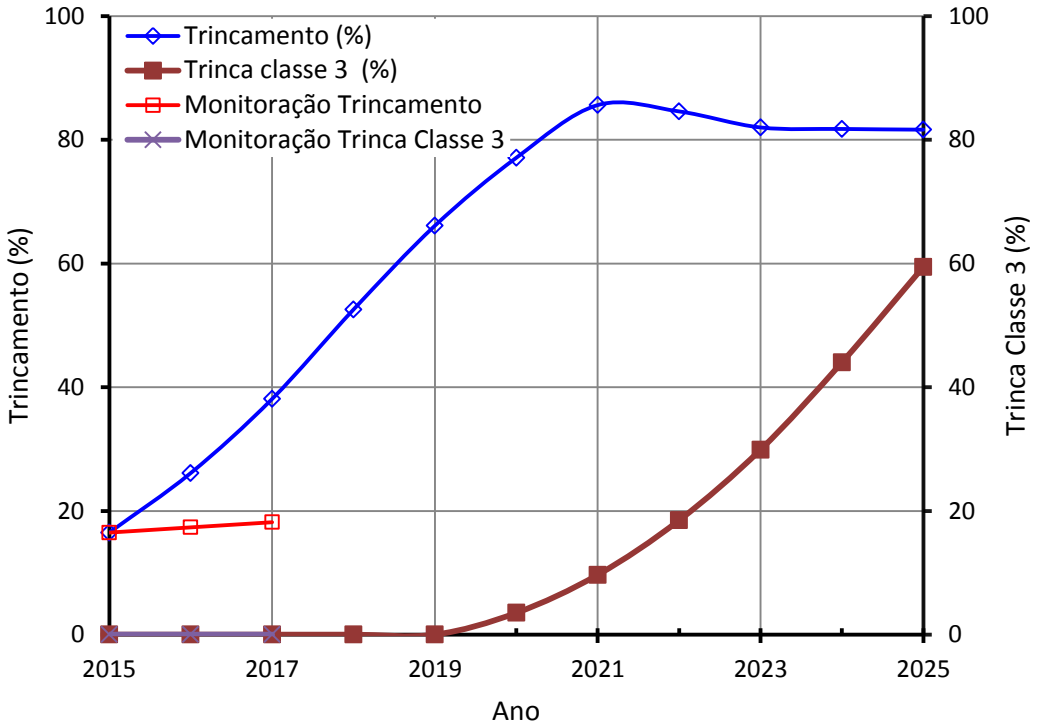


Figura 183 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA06-B (km 412+600, UF: MG)

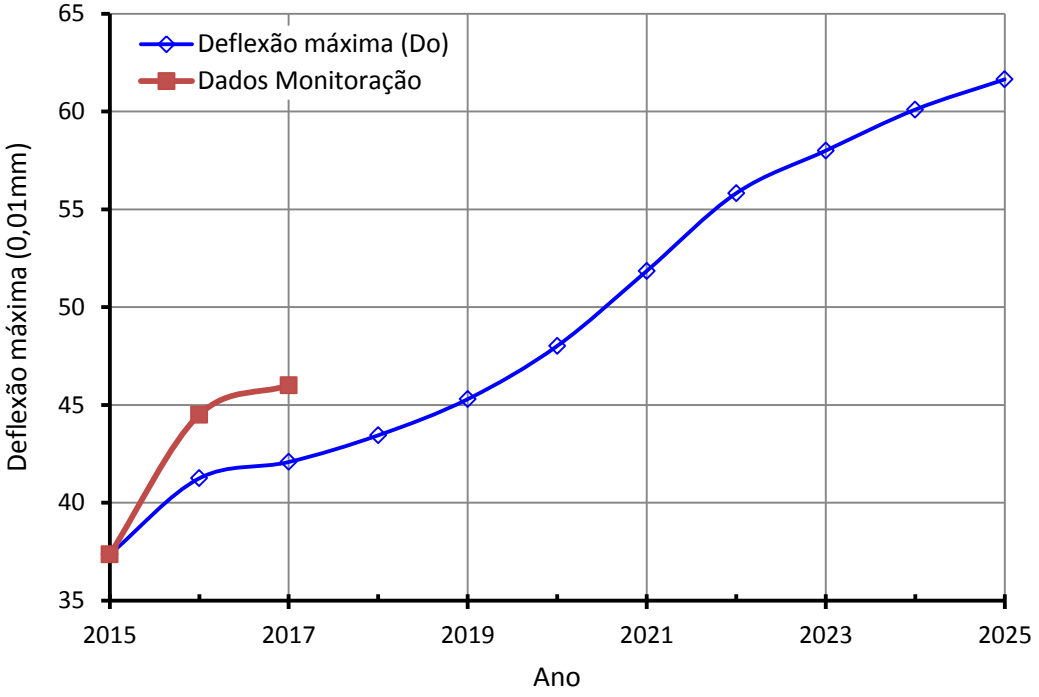


Figura 184 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

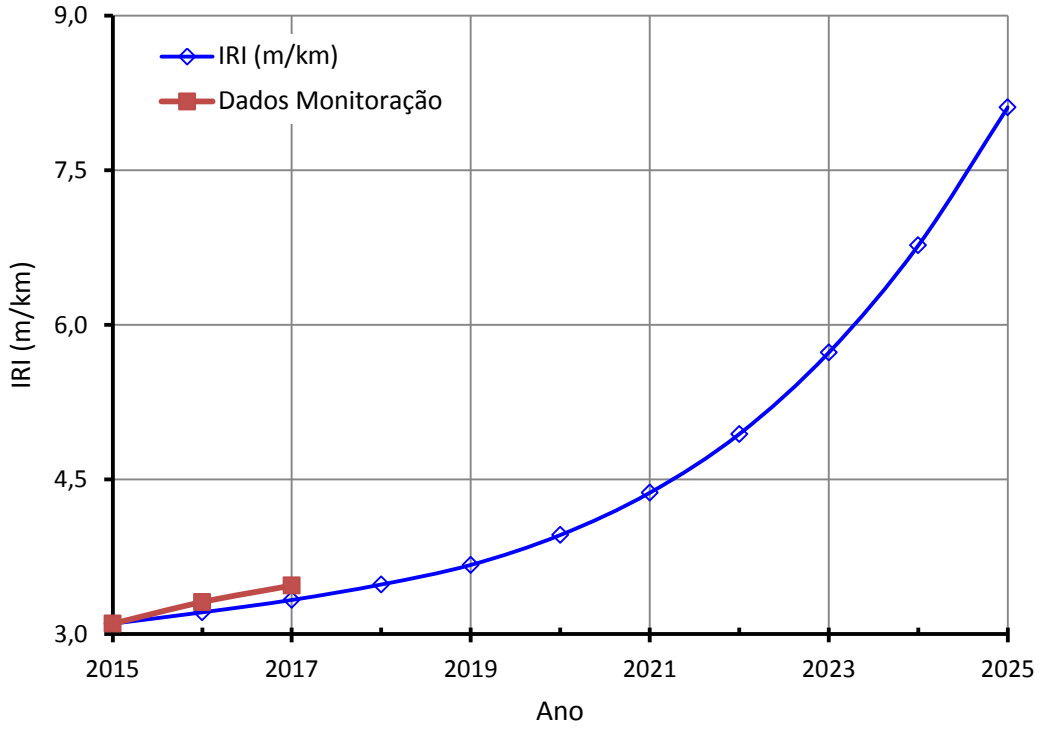


Figura 185 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

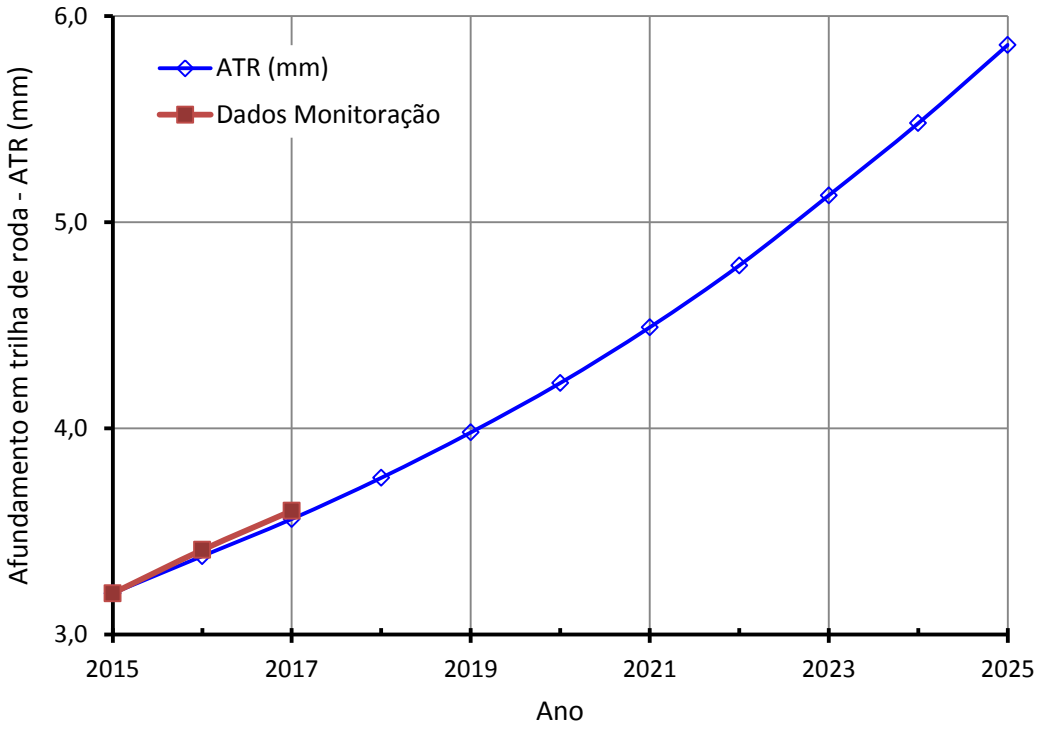


Figura 186 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

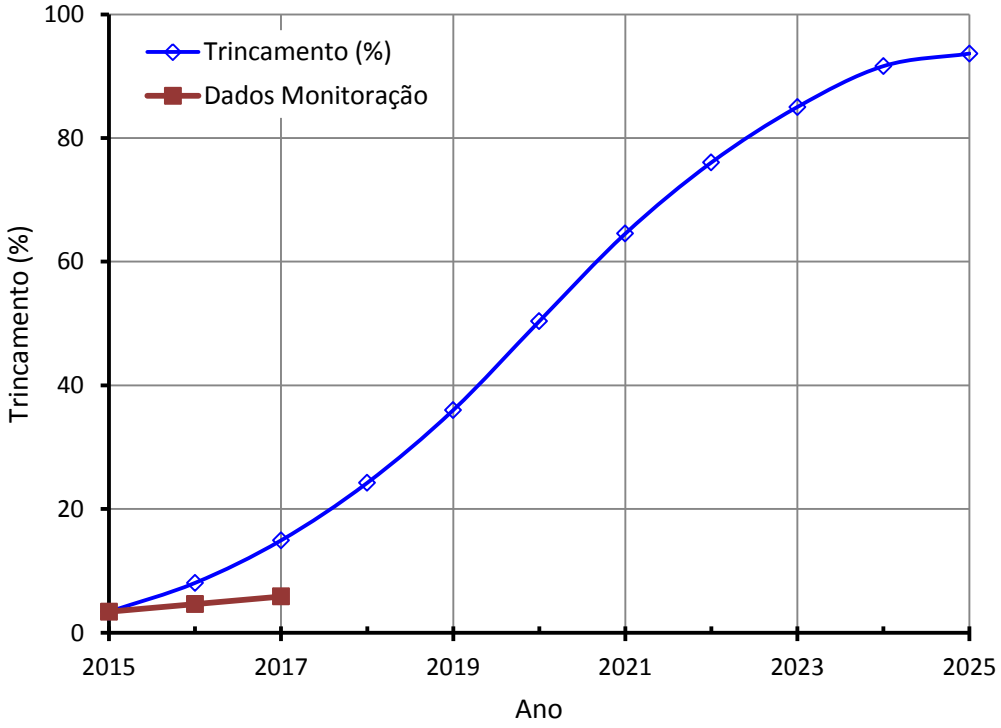


Figura 187 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

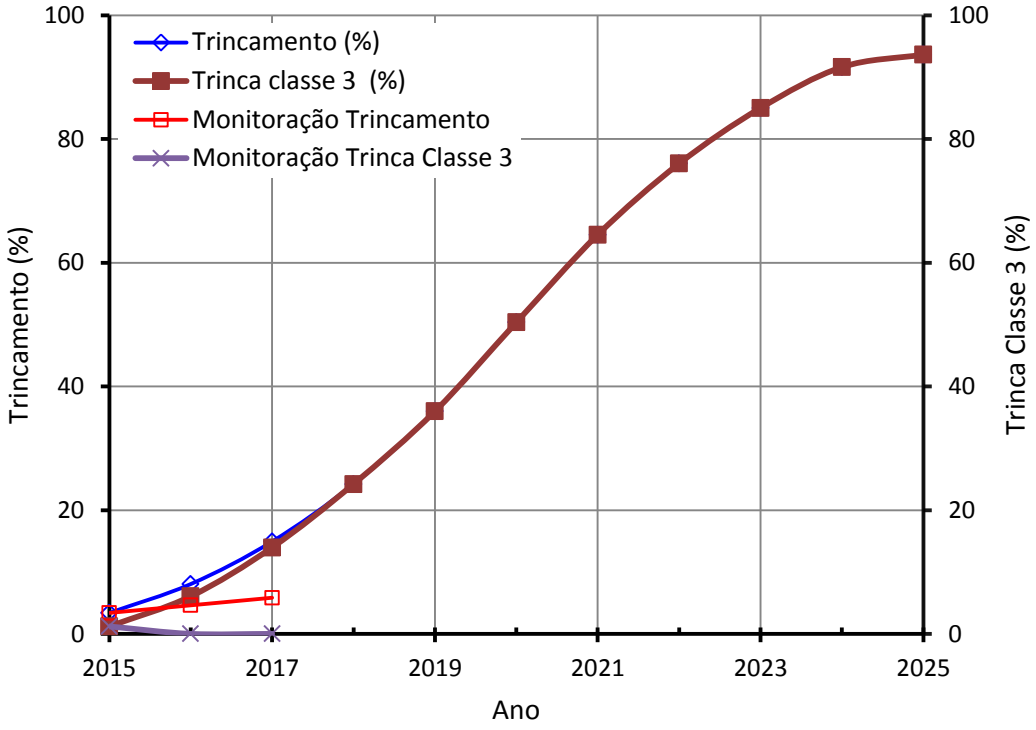


Figura 188 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

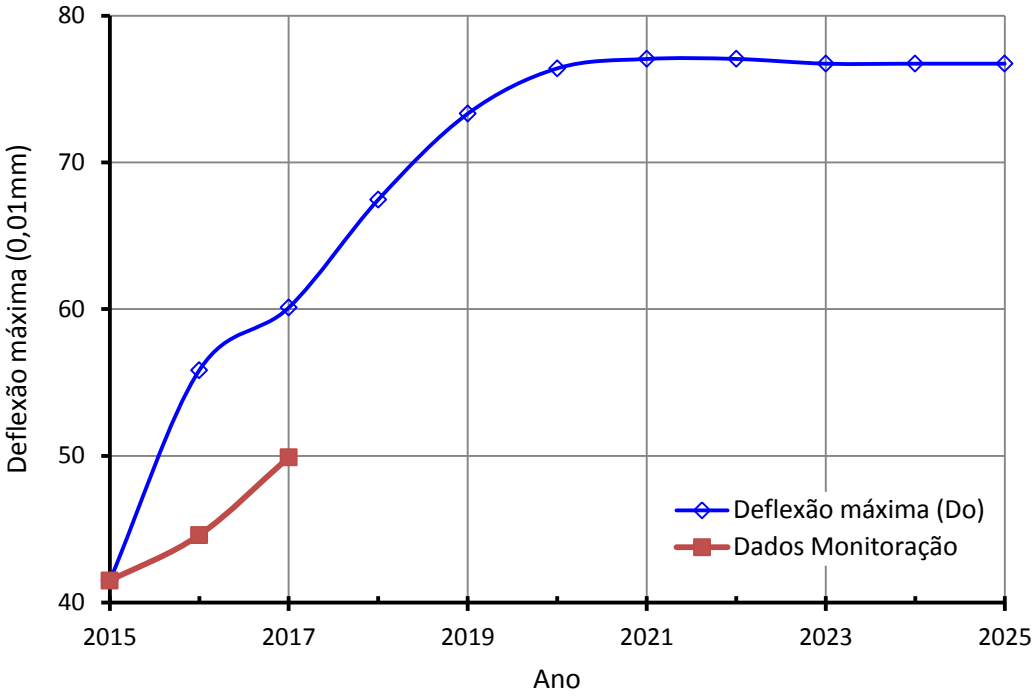


Figura 189 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

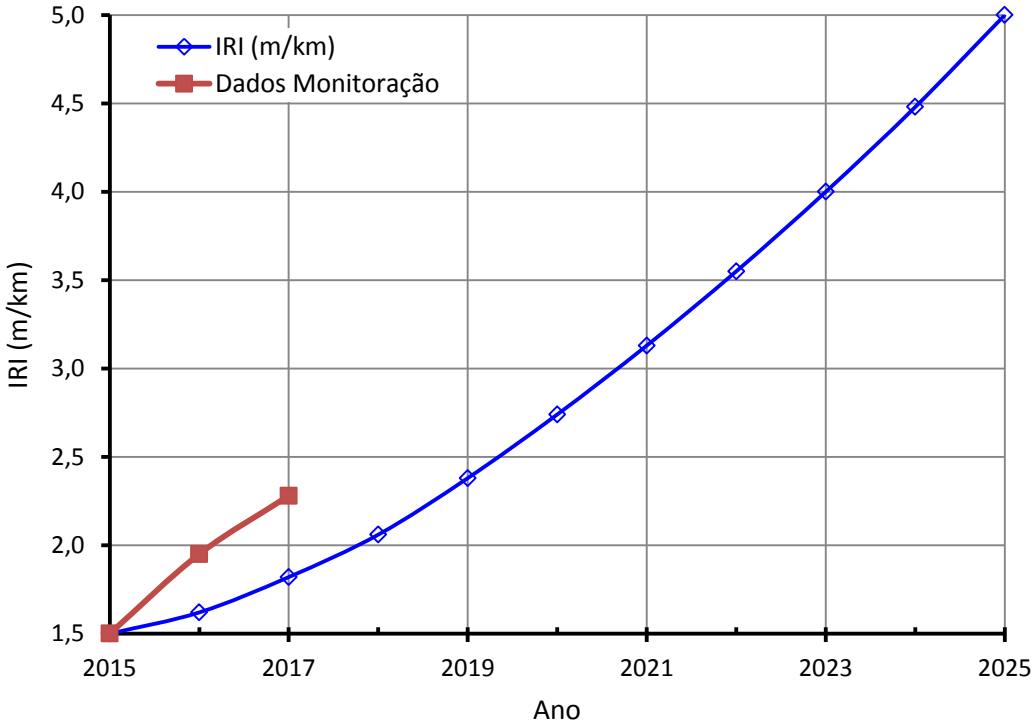


Figura 190 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

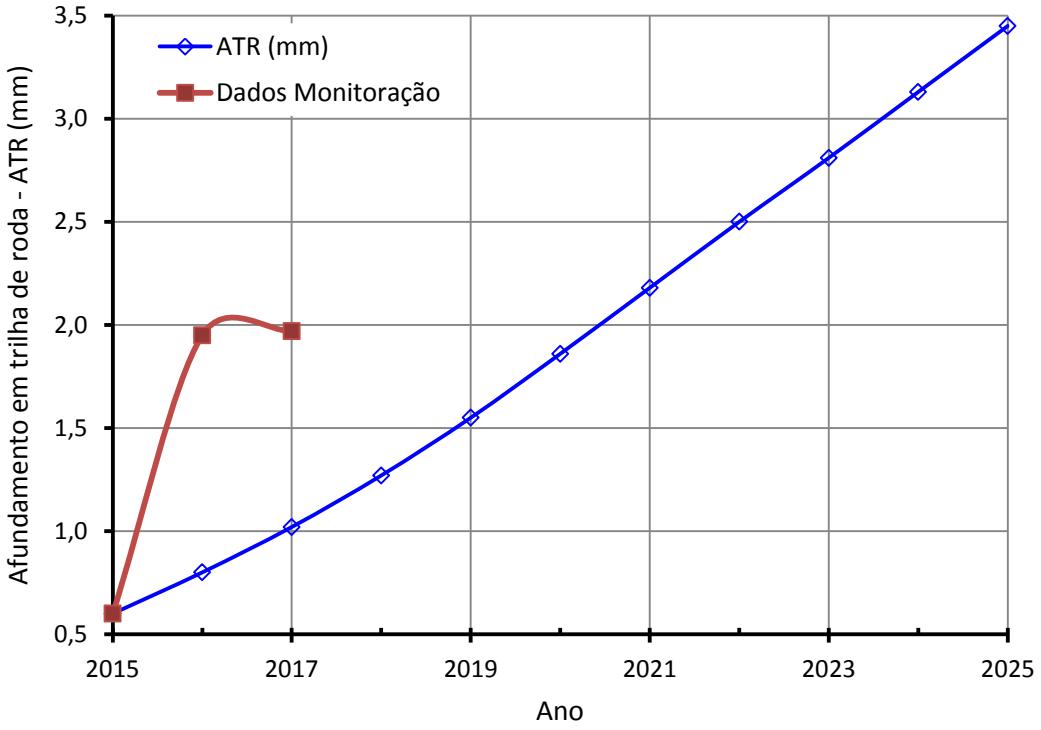


Figura 191 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

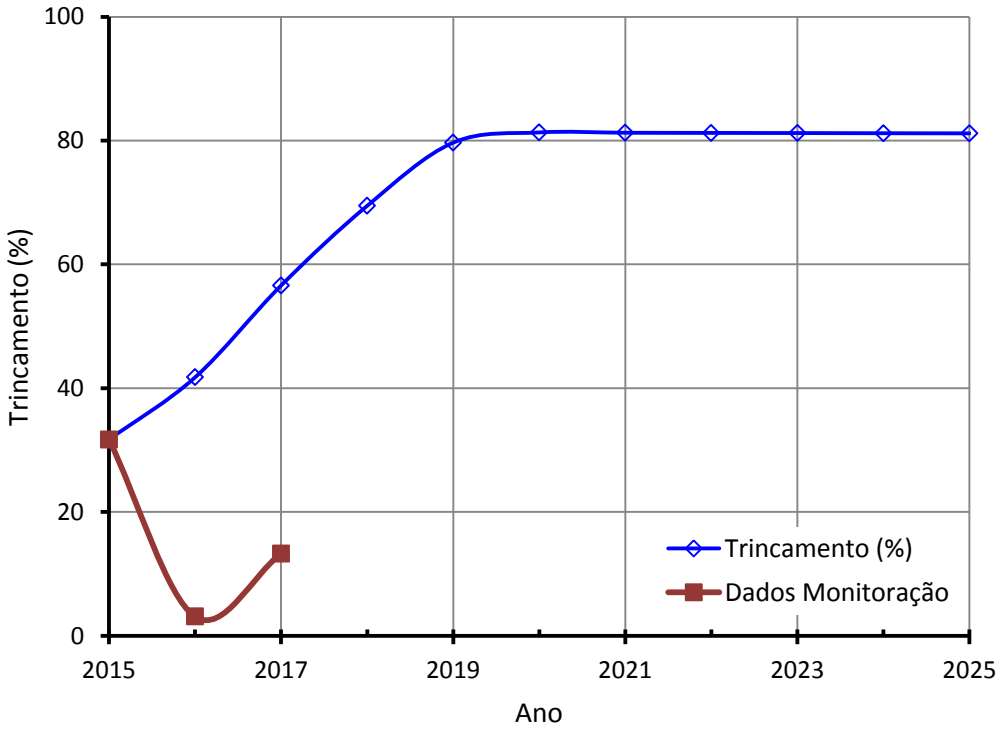


Figura 192 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

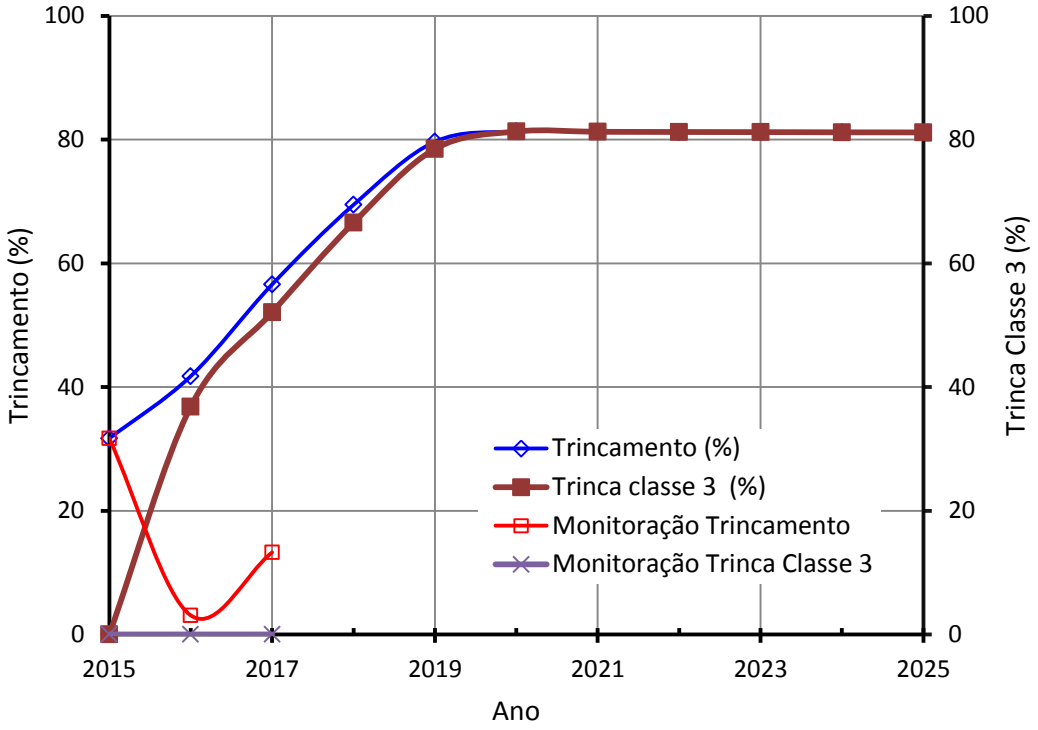


Figura 193 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA07-B (km622+500, UF: MG)

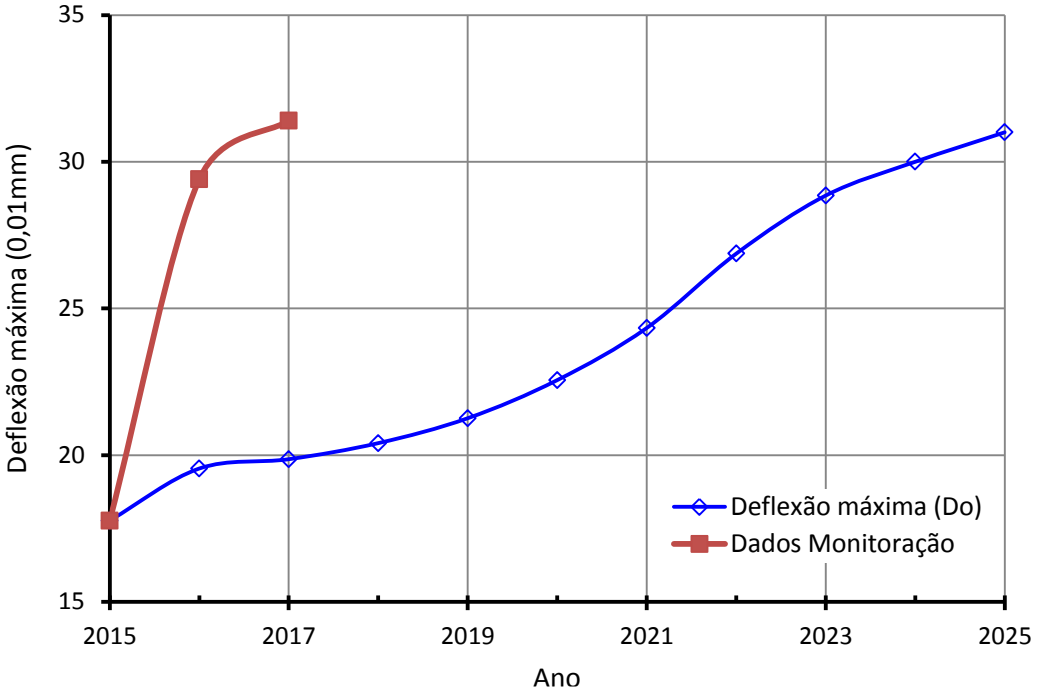


Figura 194 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

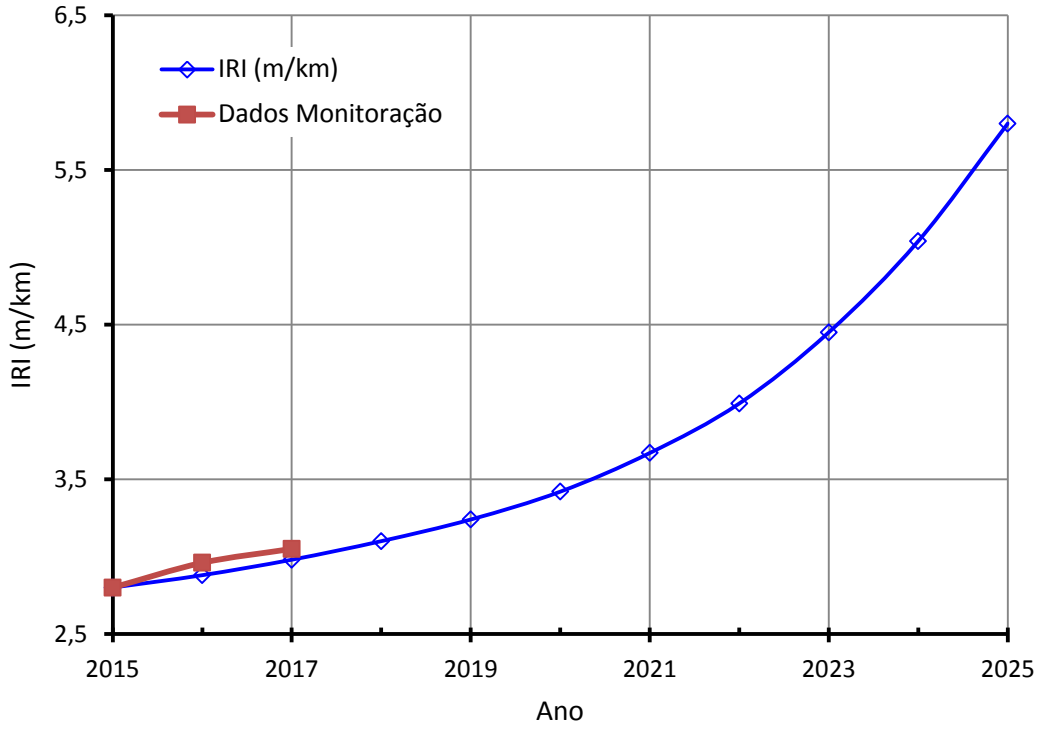


Figura 195 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

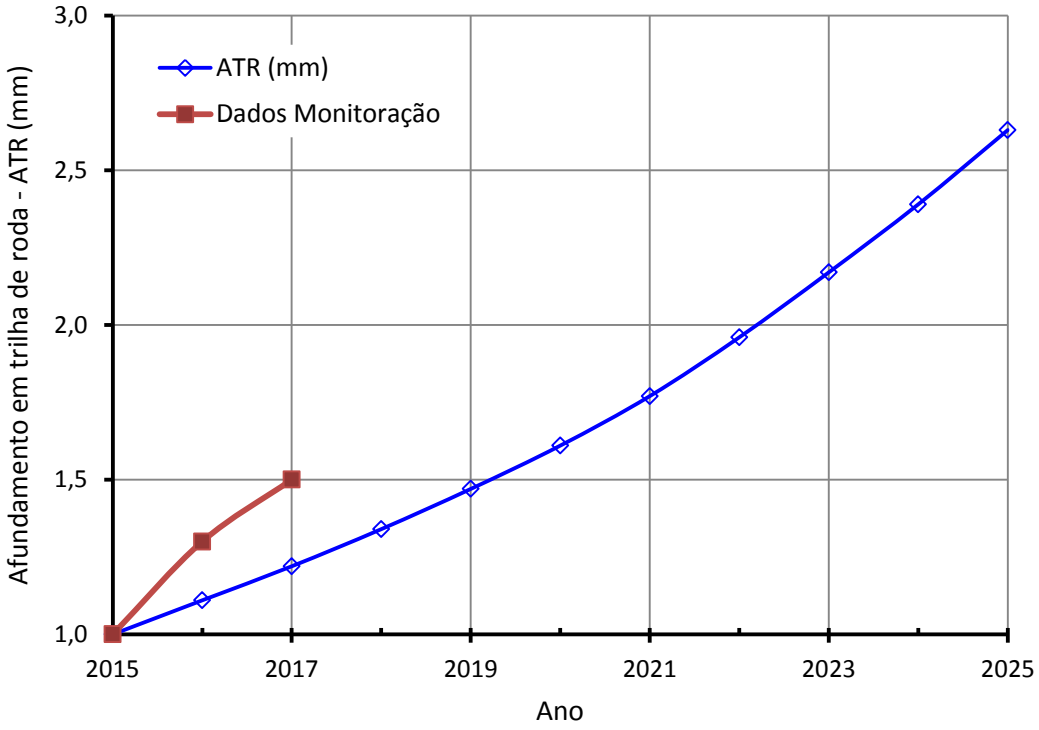


Figura 196 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

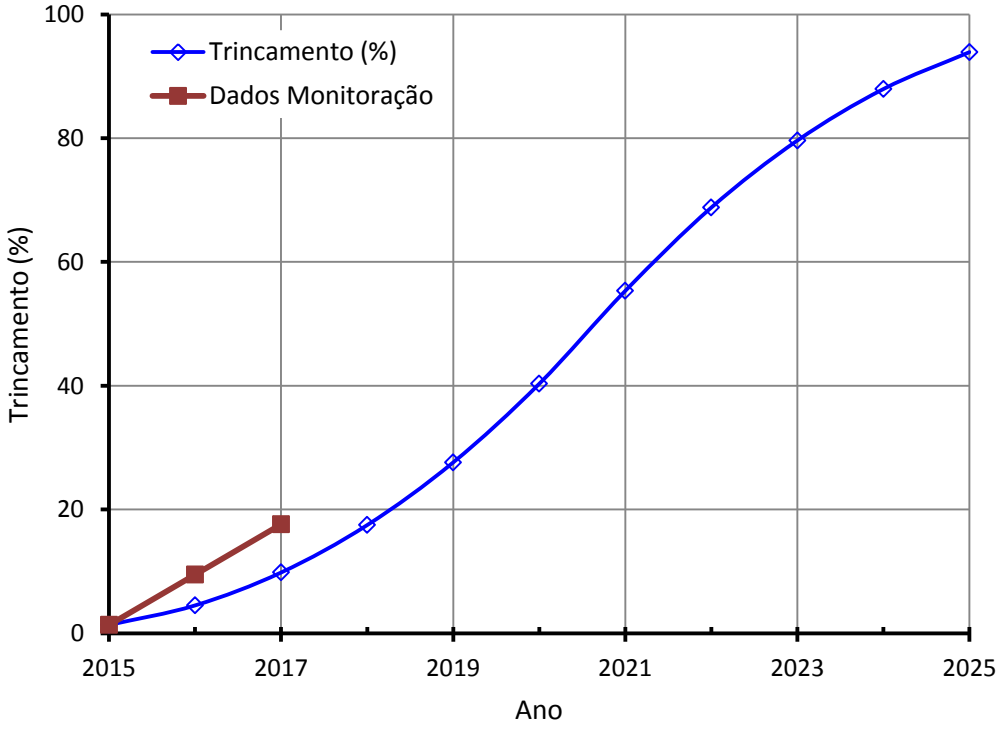


Figura 197 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

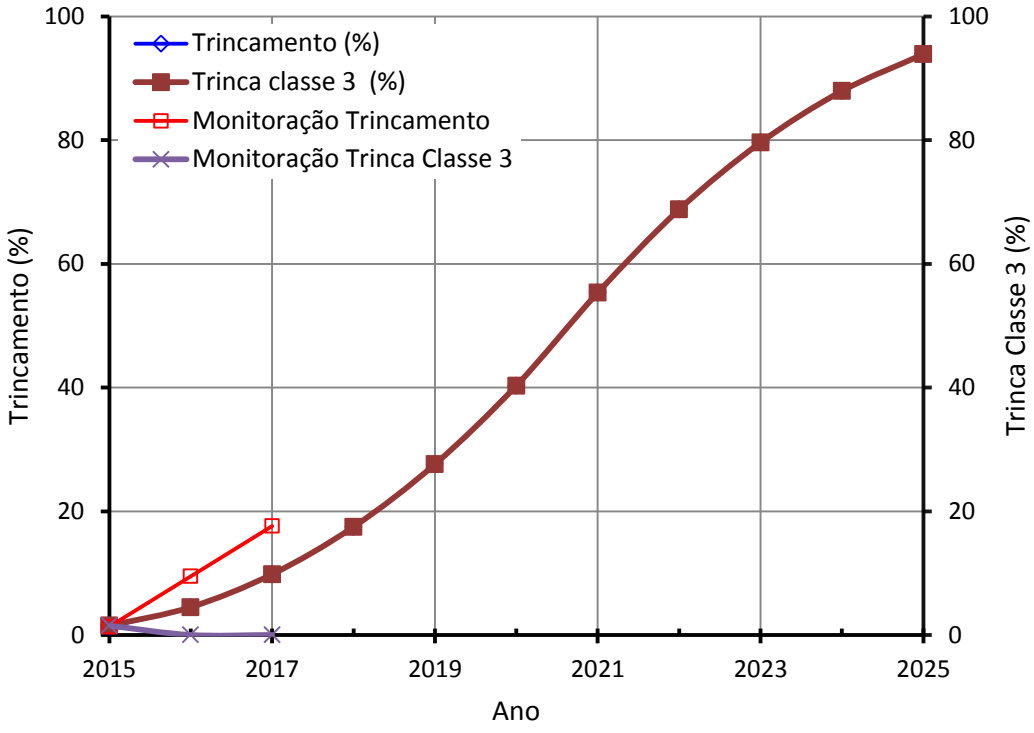


Figura 198 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

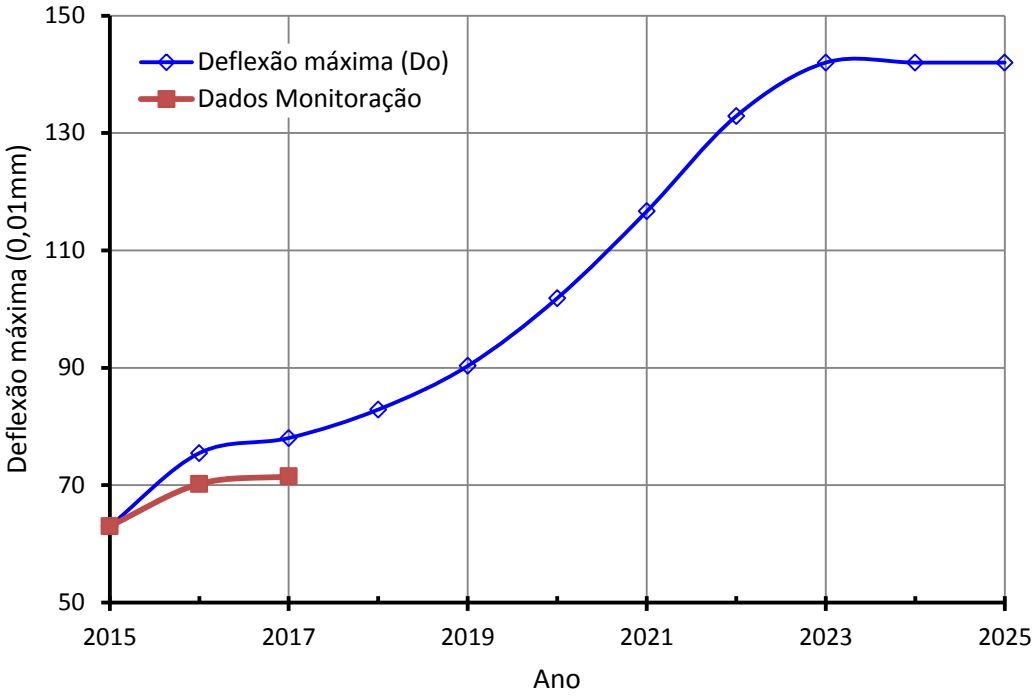


Figura 199 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

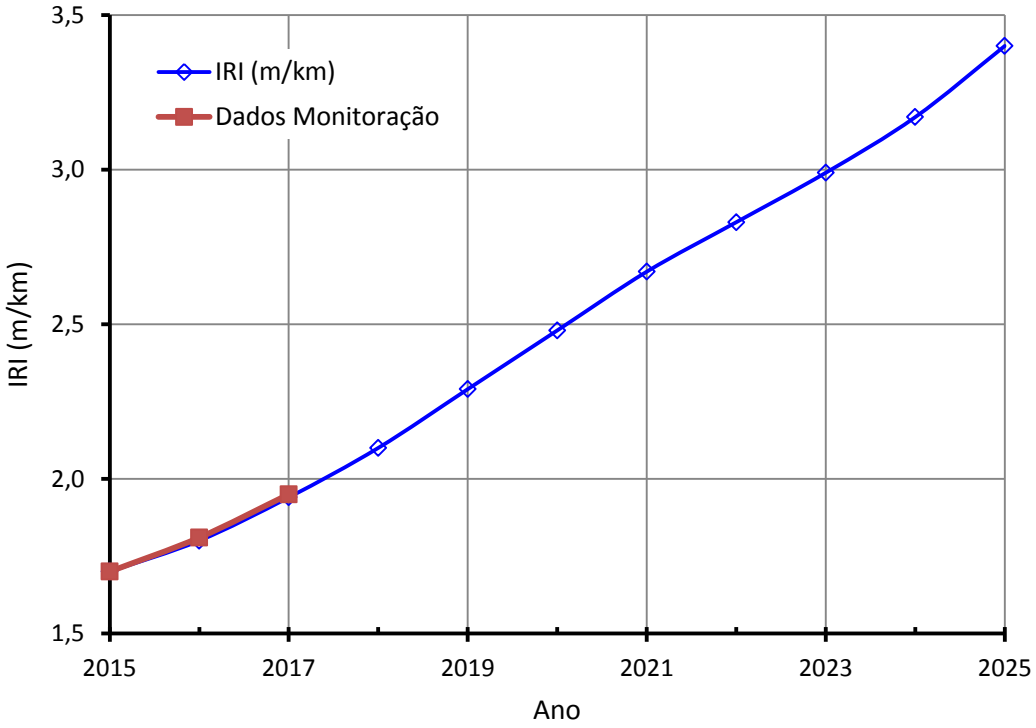


Figura 200 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

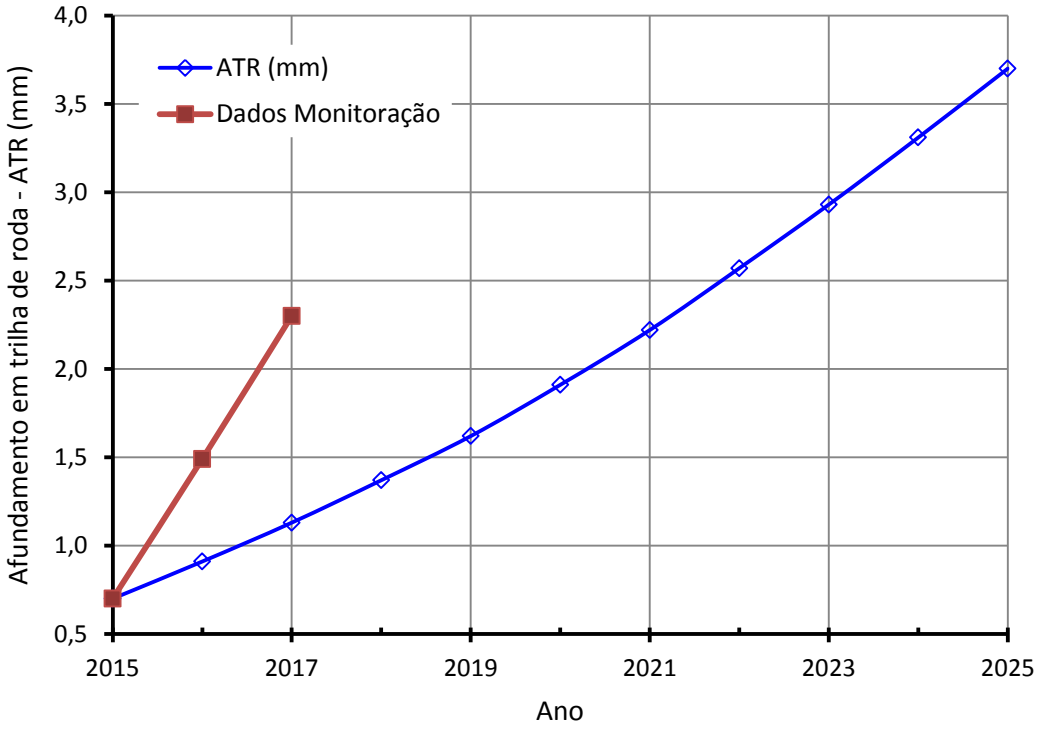


Figura 201 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

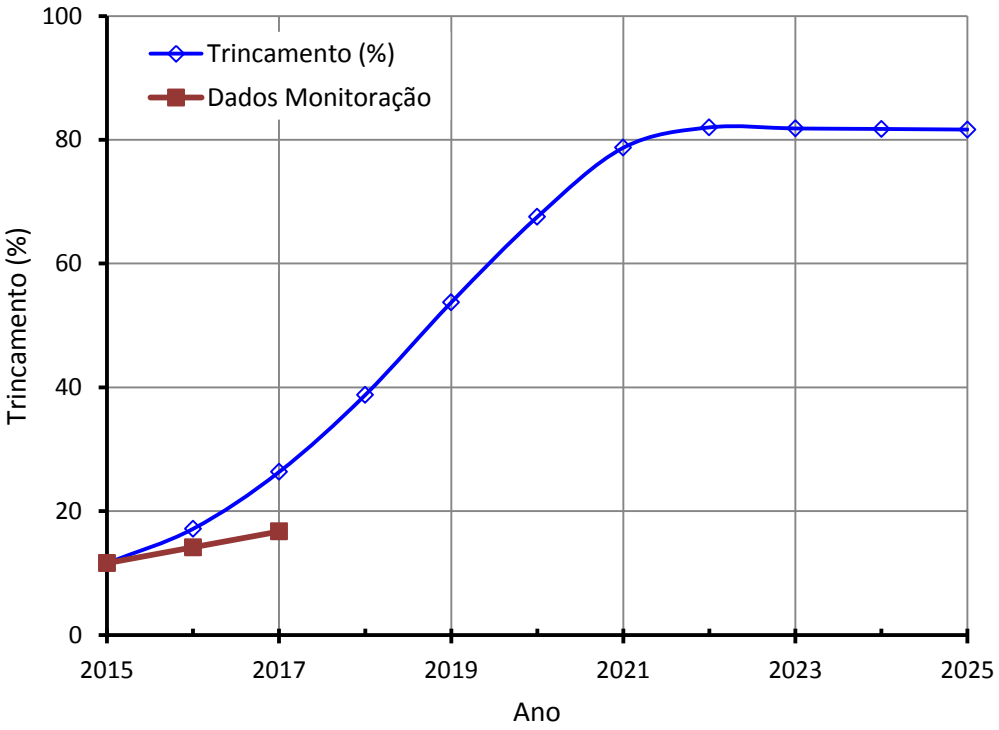


Figura 202 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

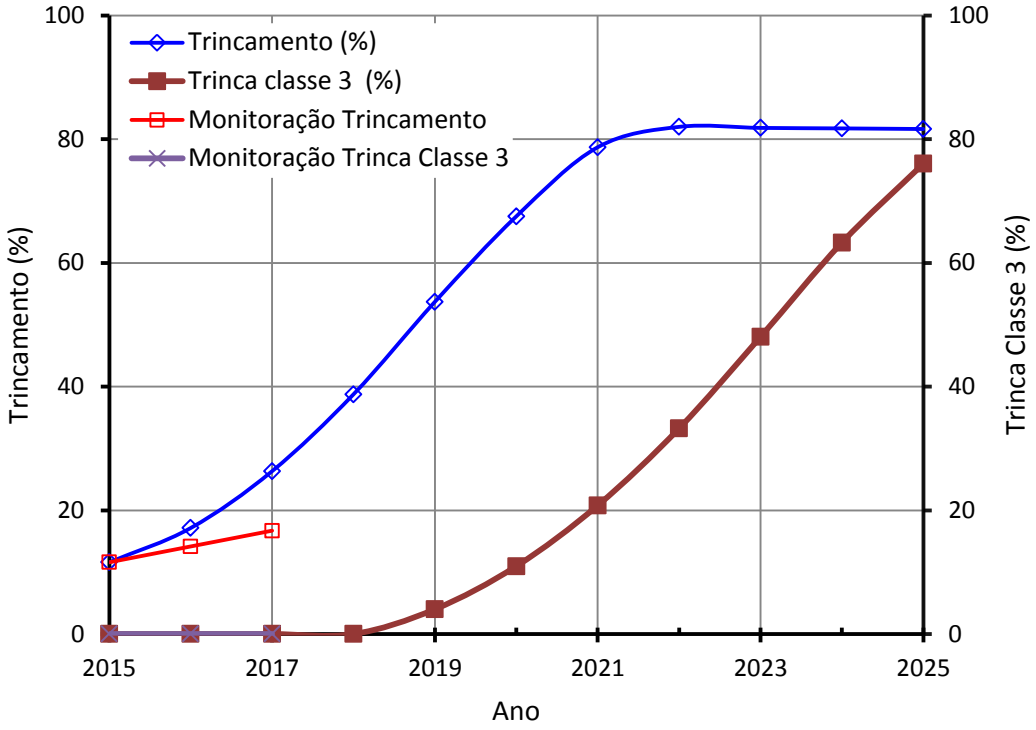


Figura 203 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA08-B (km 631+550, UF: MG)

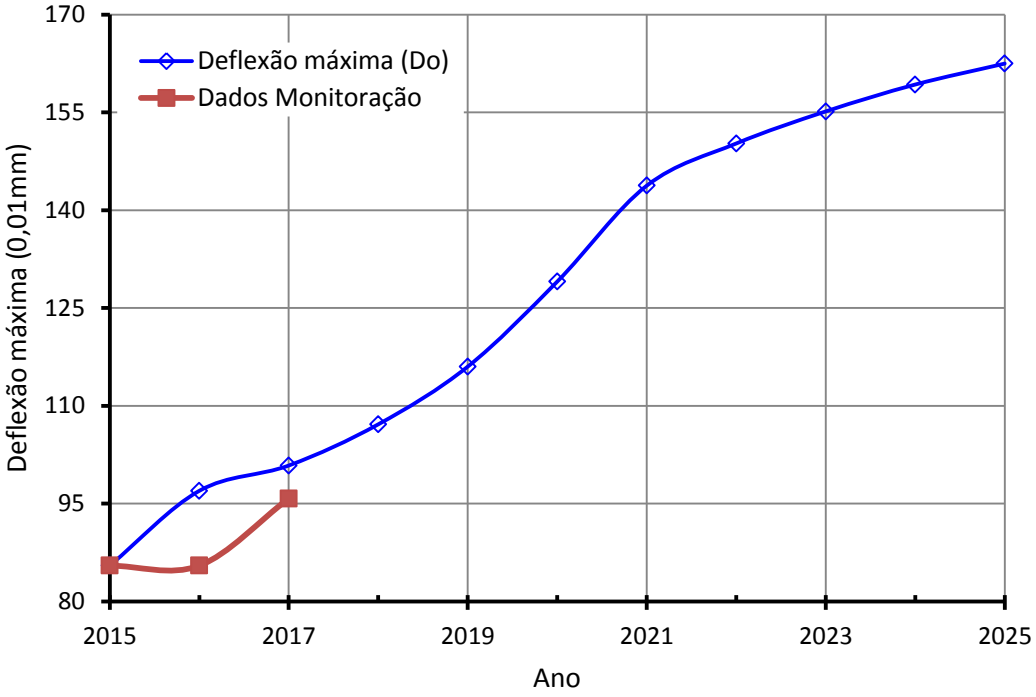


Figura 204 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

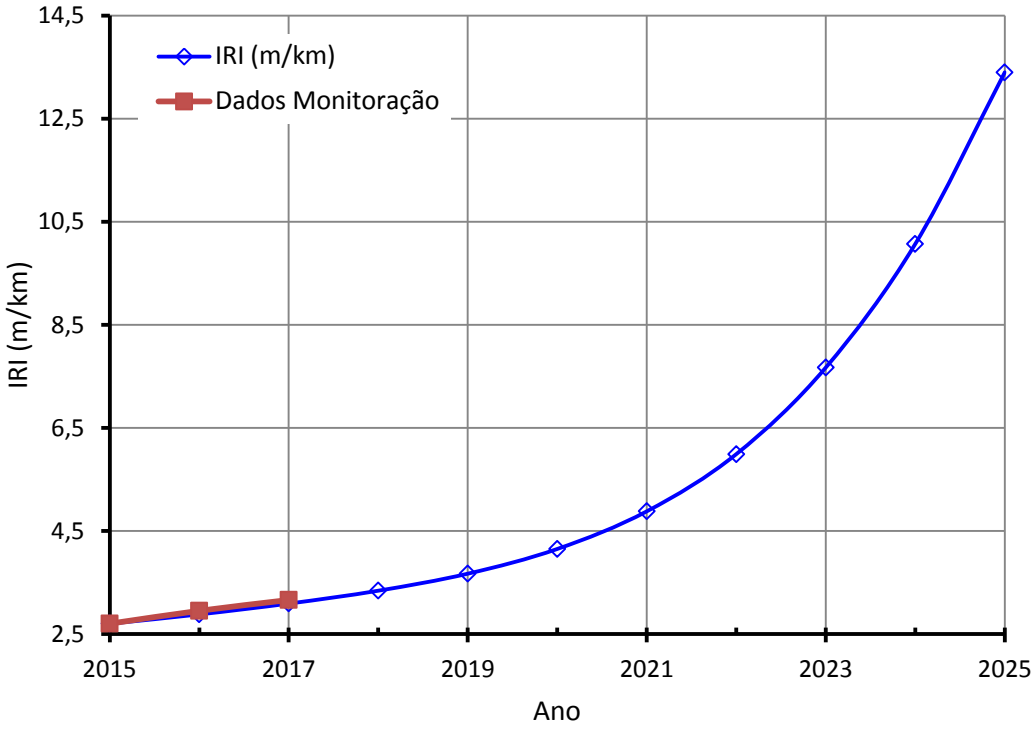


Figura 205 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

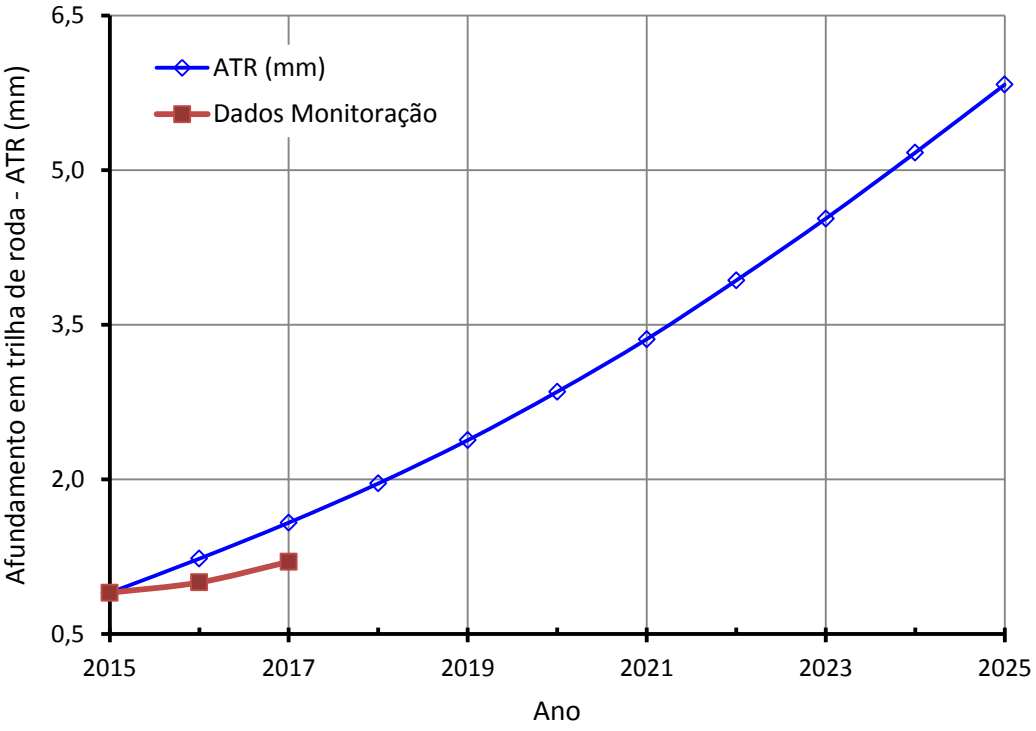


Figura 206 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

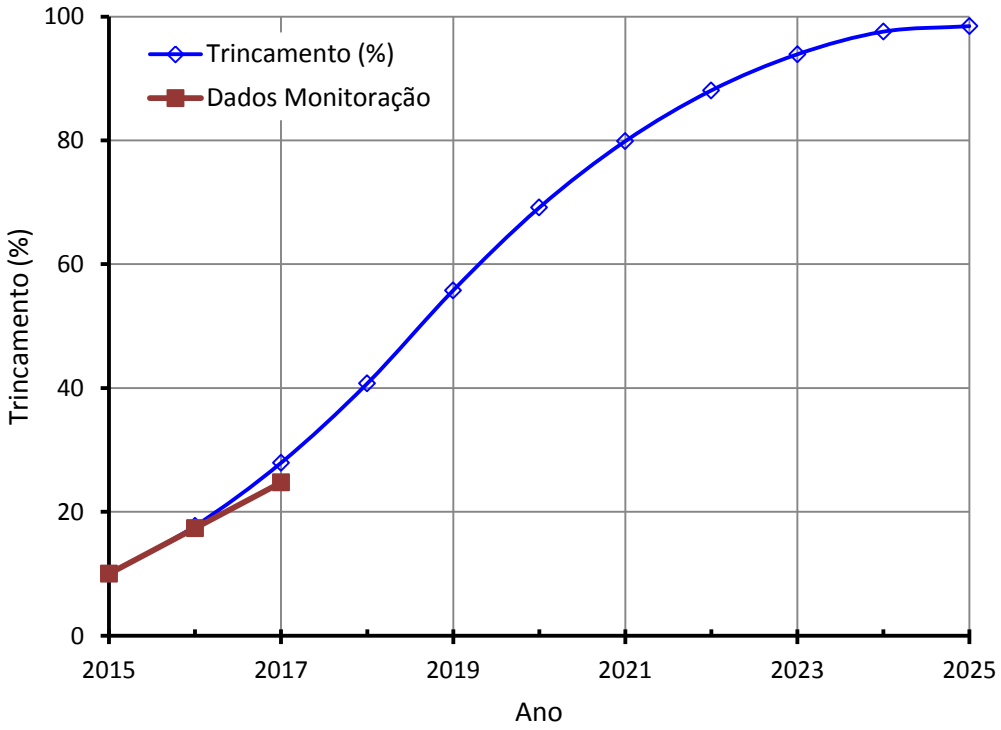


Figura 207 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

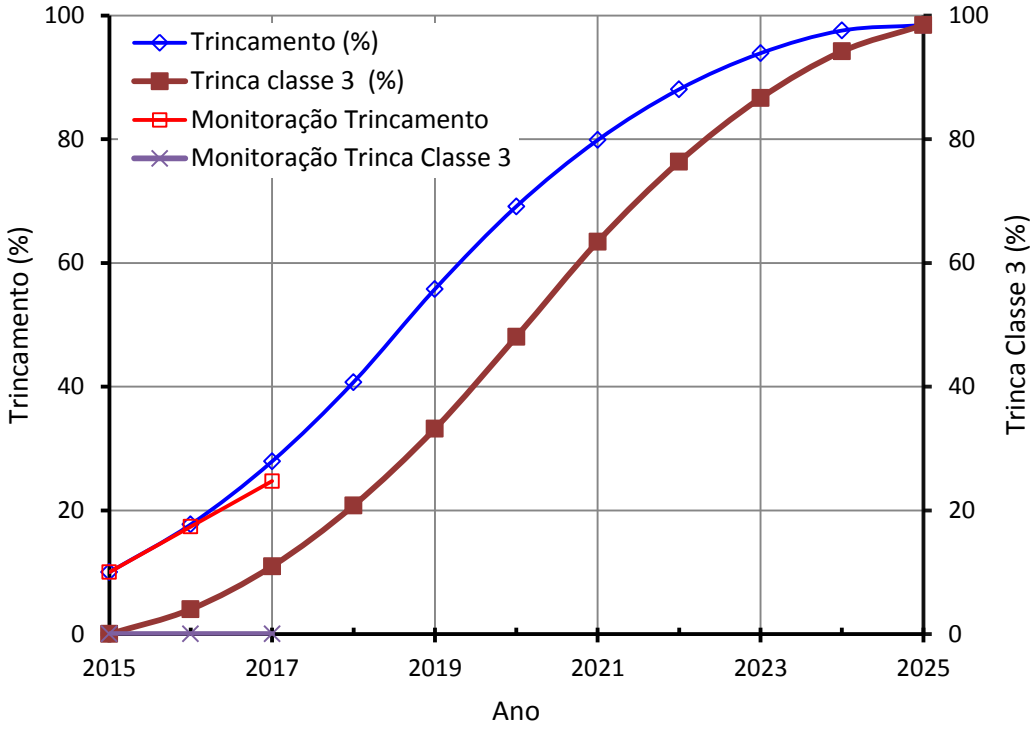


Figura 208 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

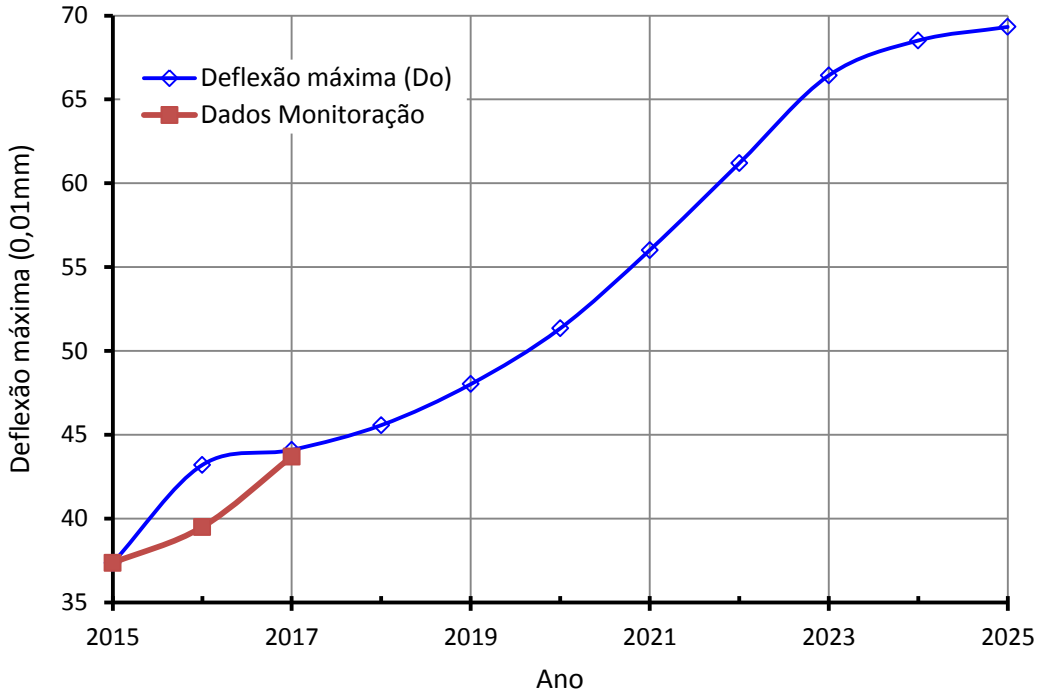


Figura 209 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

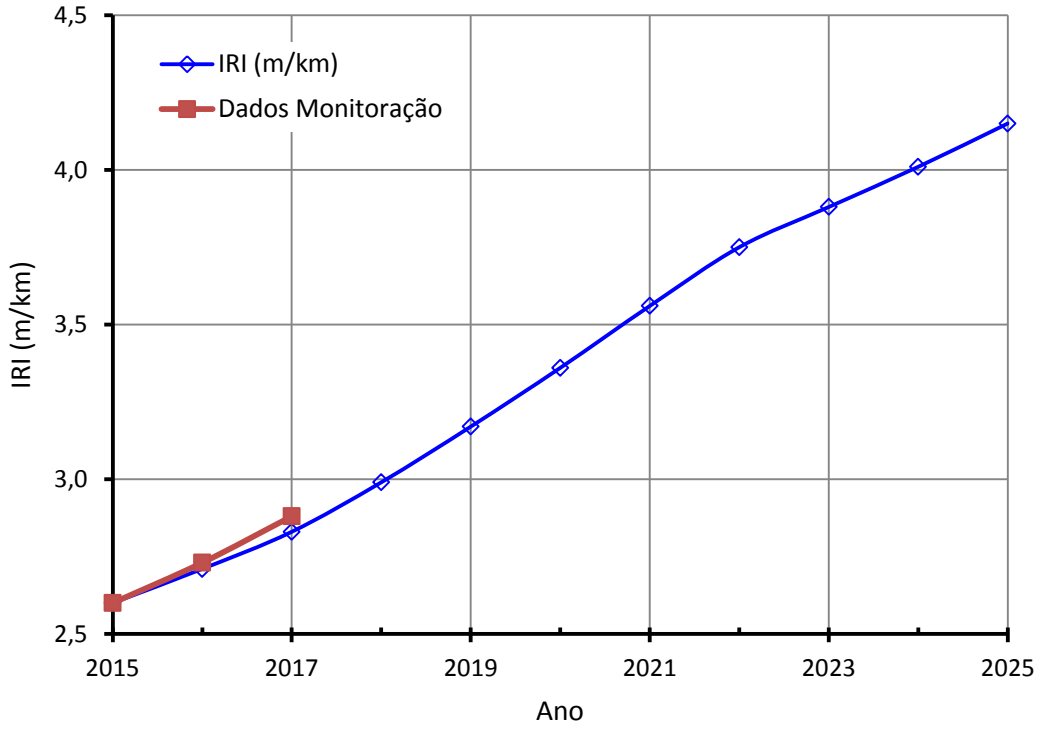


Figura 210 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

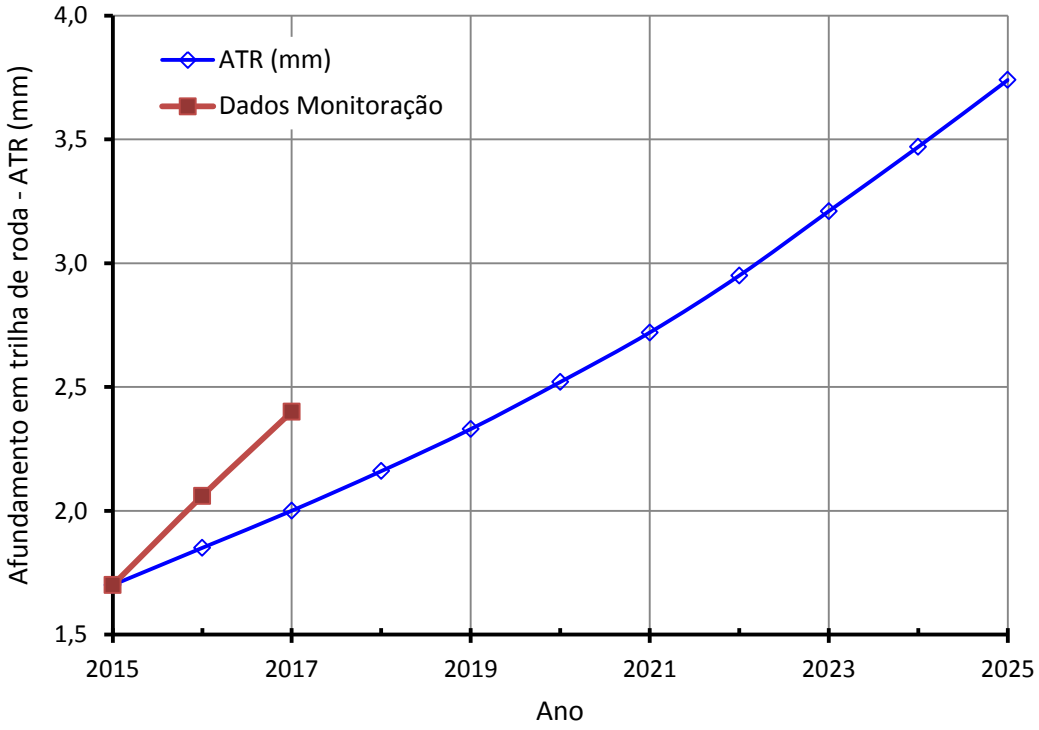


Figura 211 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

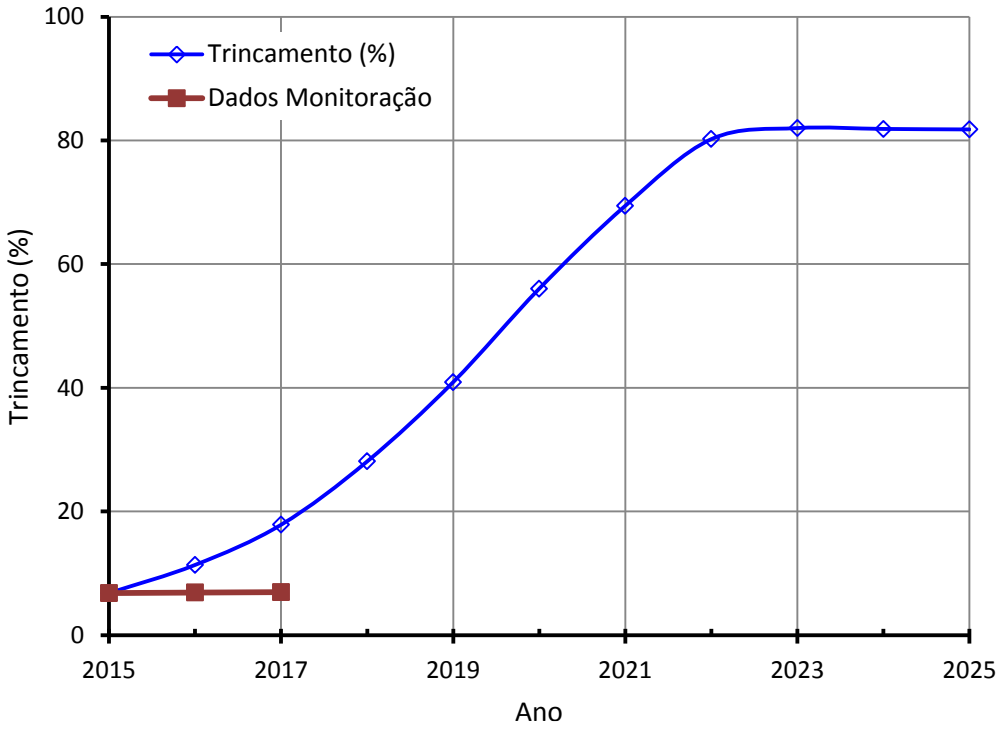


Figura 212 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

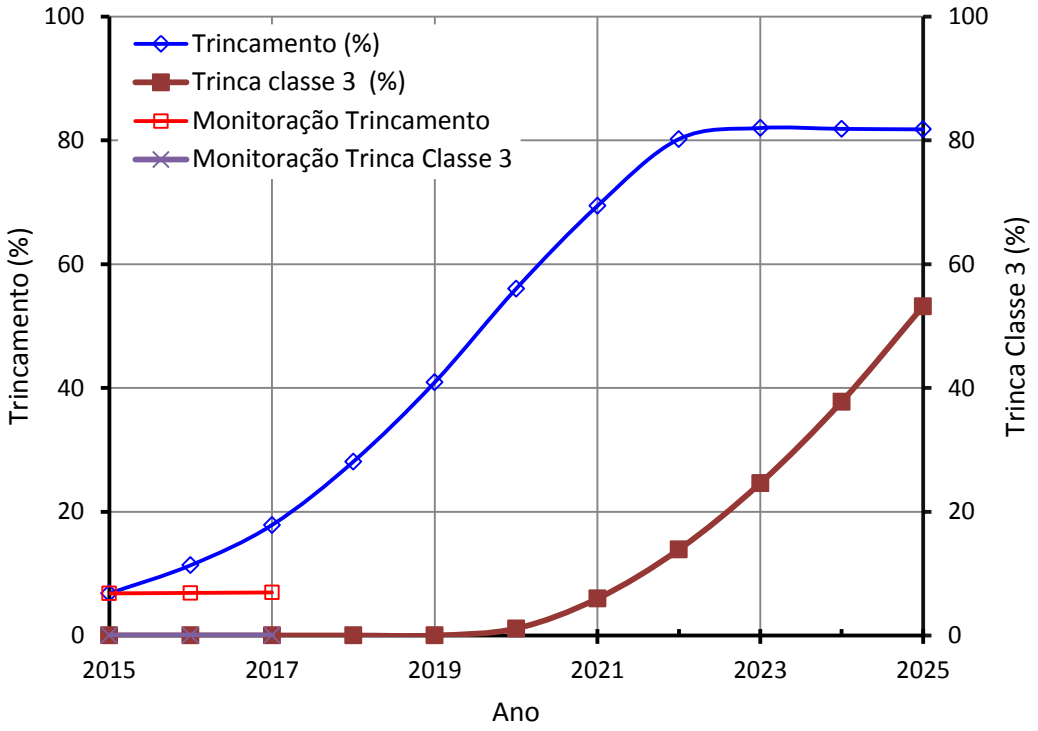


Figura 213 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA09-B (km 728+500, UF: MG)

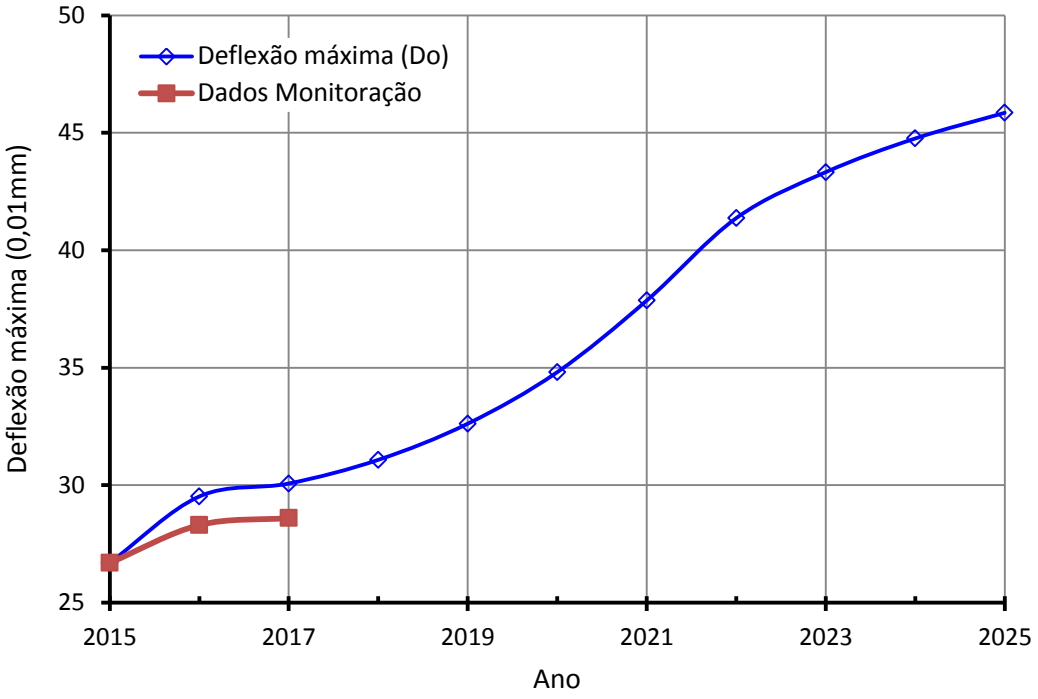


Figura 214 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

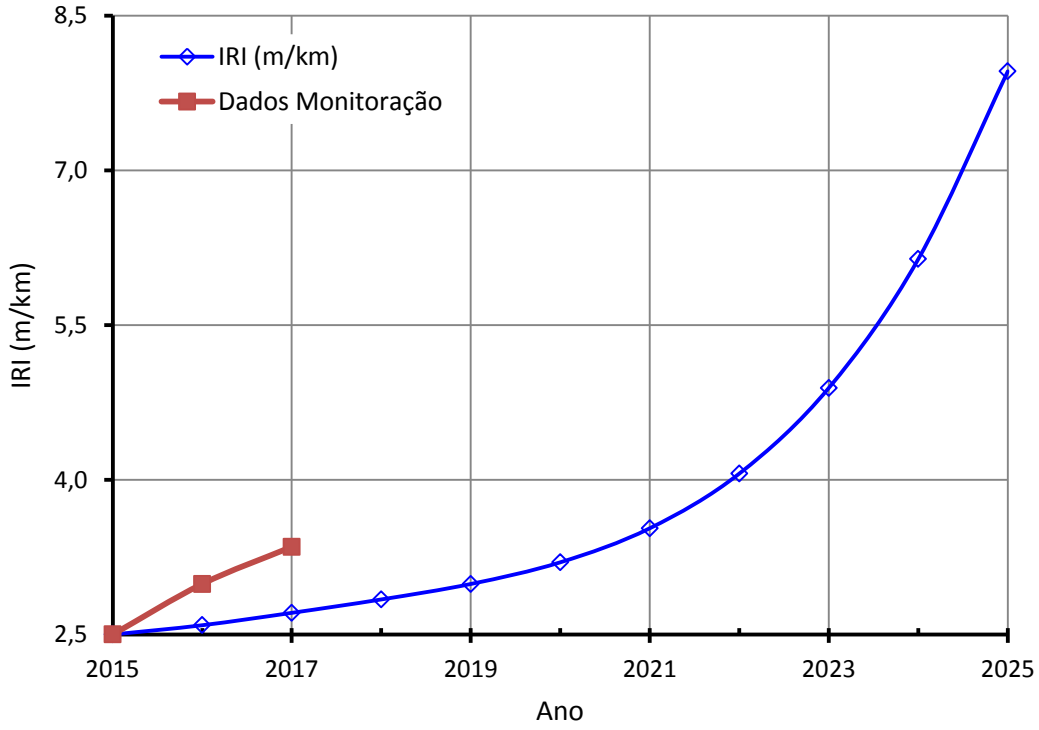


Figura 215 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

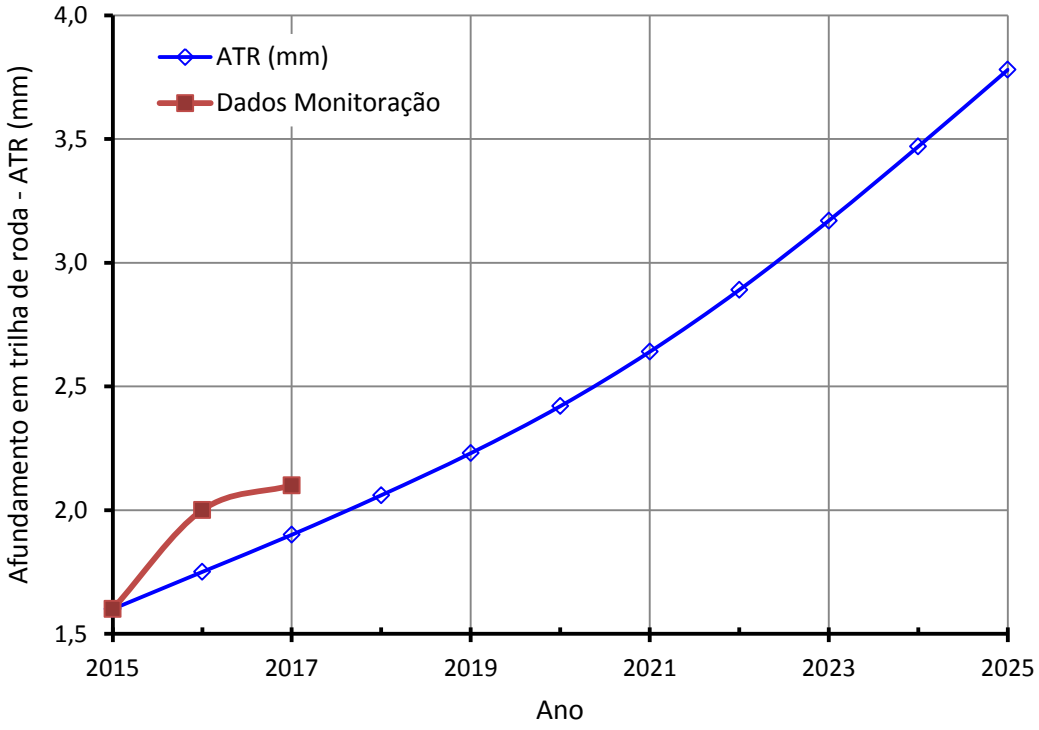


Figura 216 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

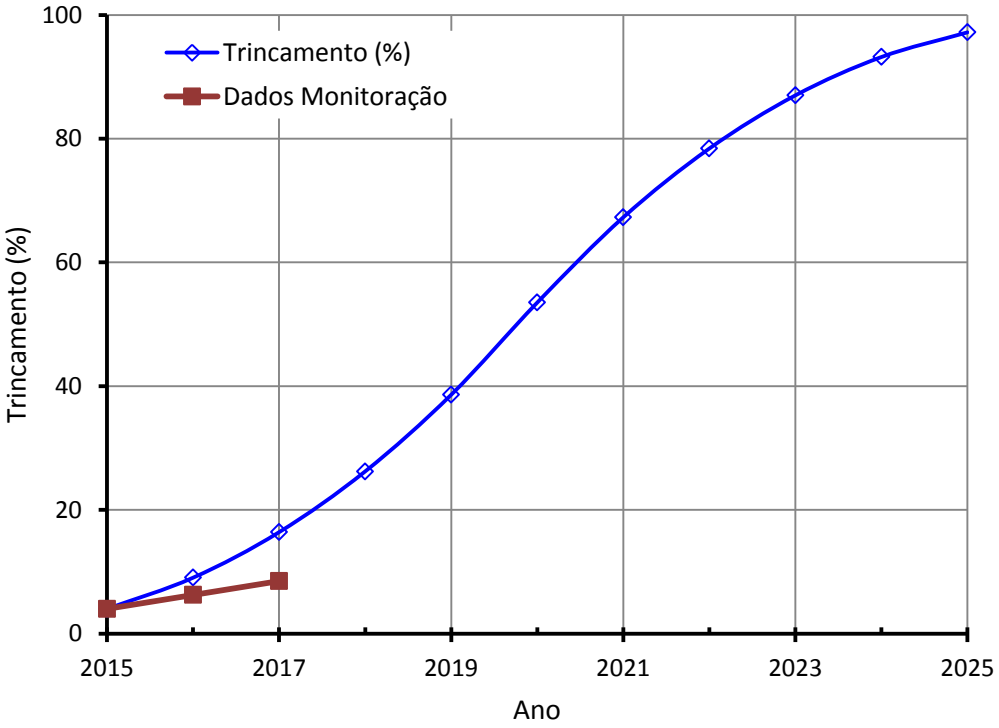


Figura 217 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

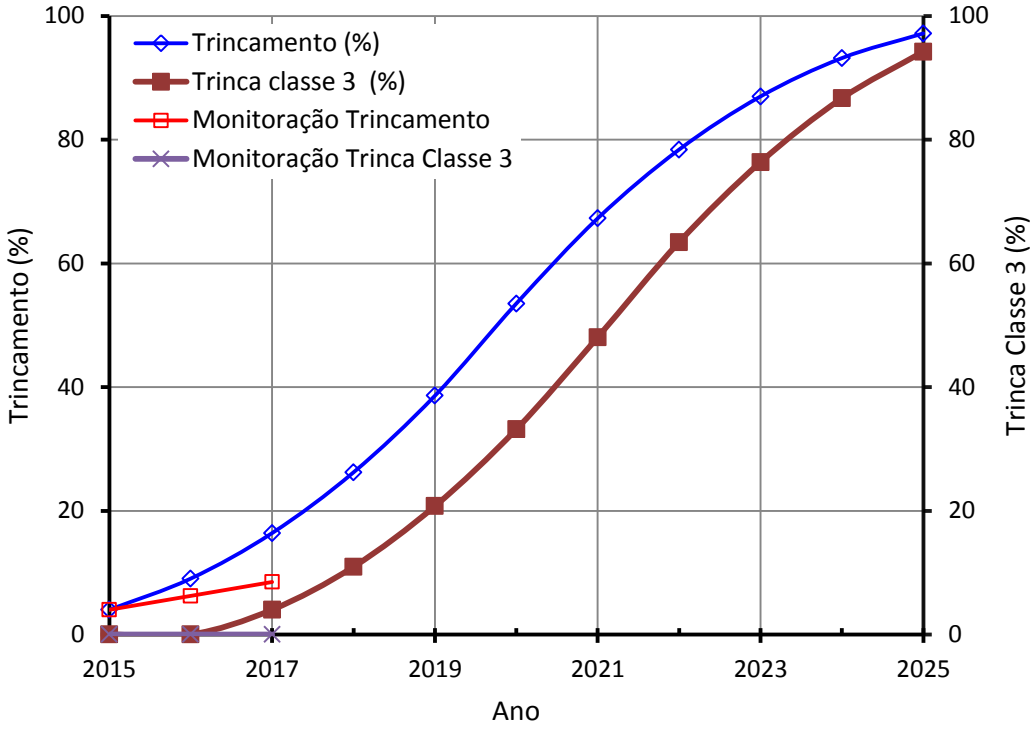


Figura 218 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

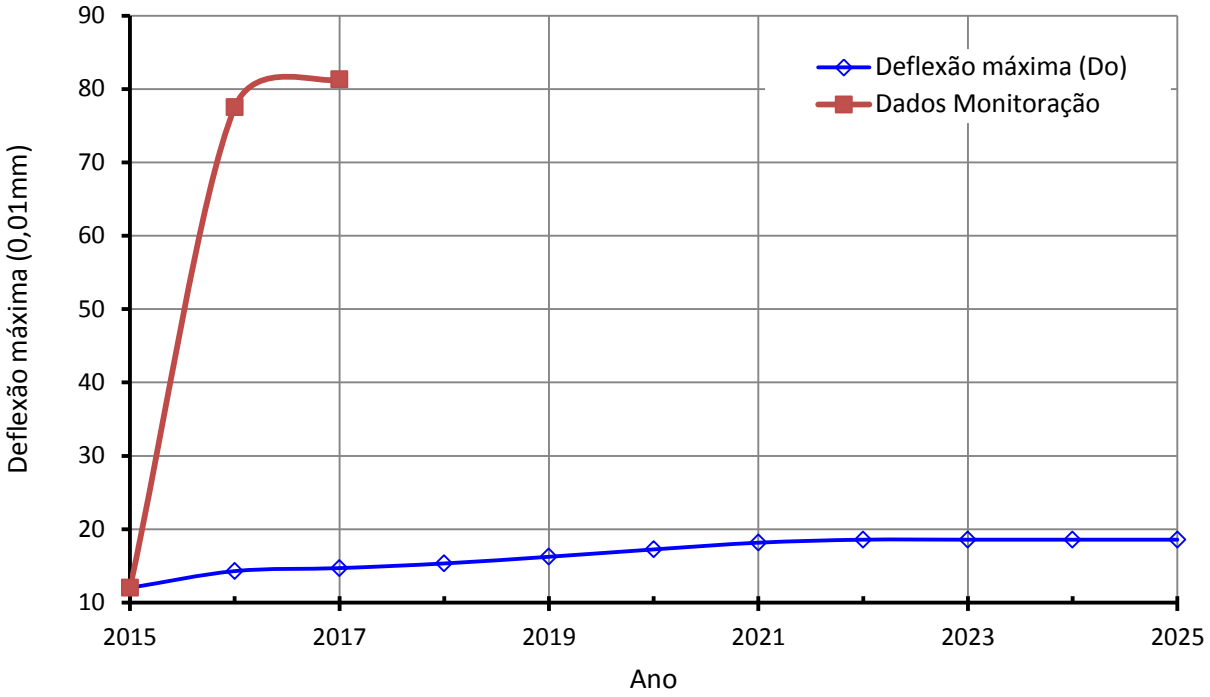


Figura 219 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

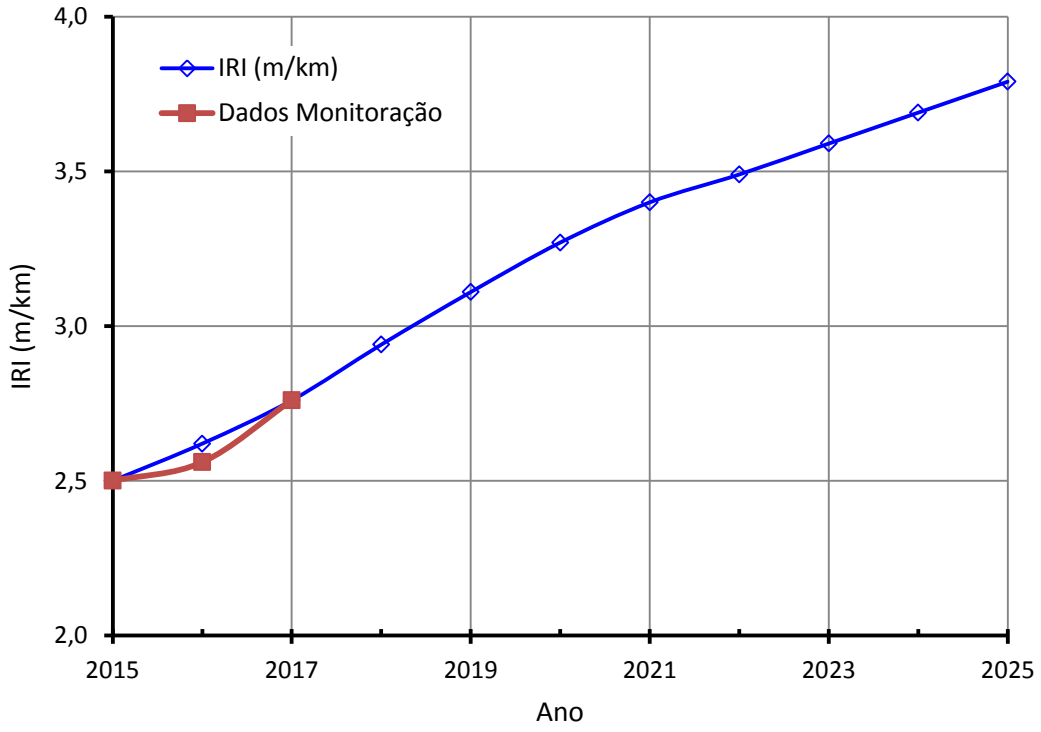


Figura 220 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

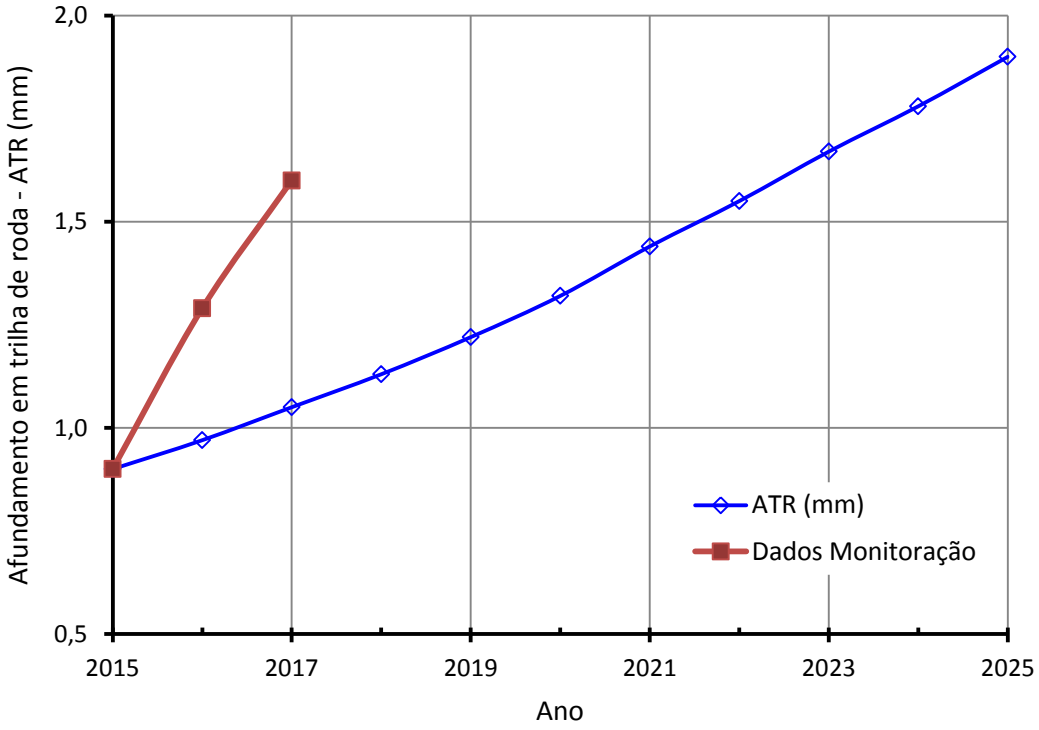


Figura 221 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

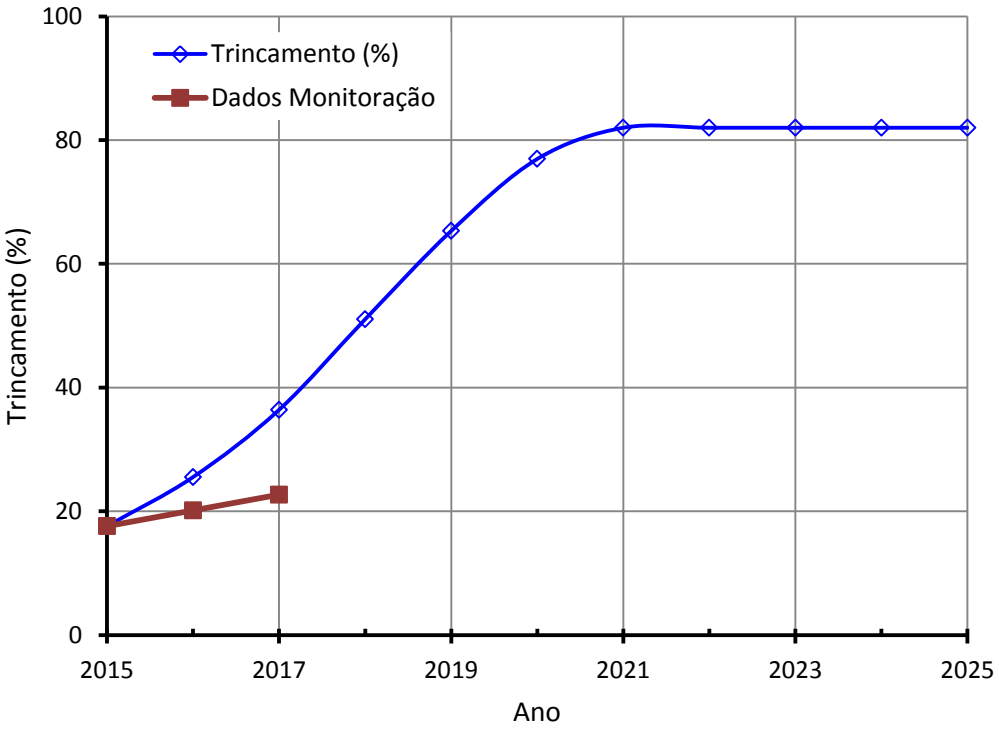


Figura 222 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

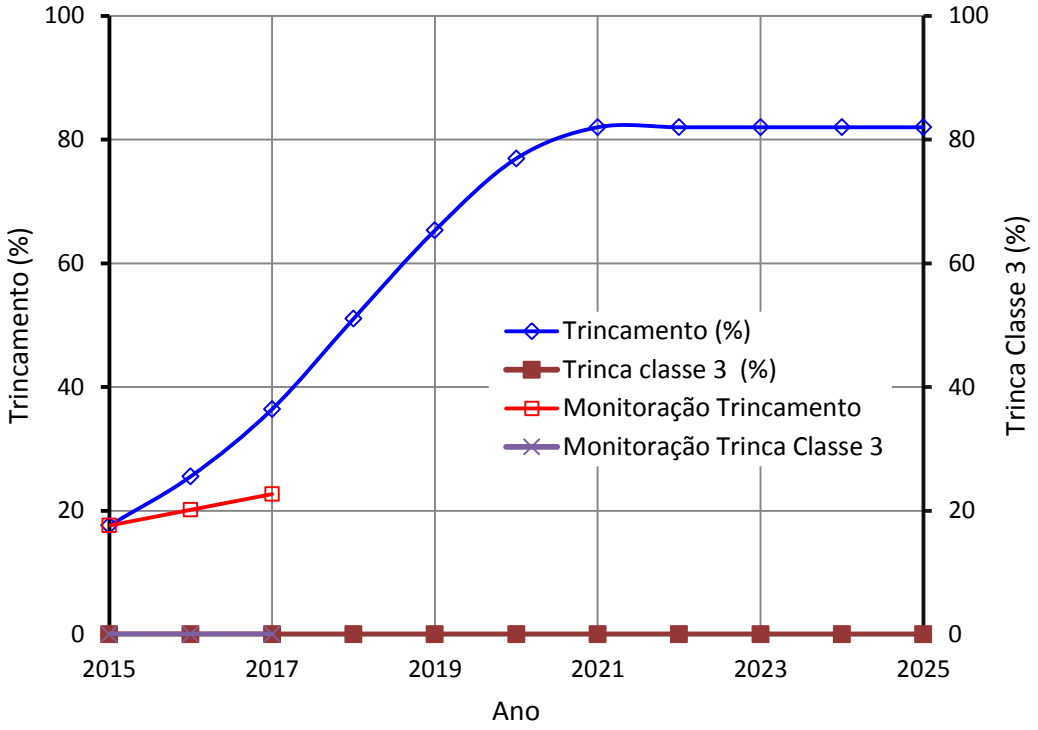


Figura 223 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

Unidade de Amostragem UA10-B (km 743+450, UF: MG)

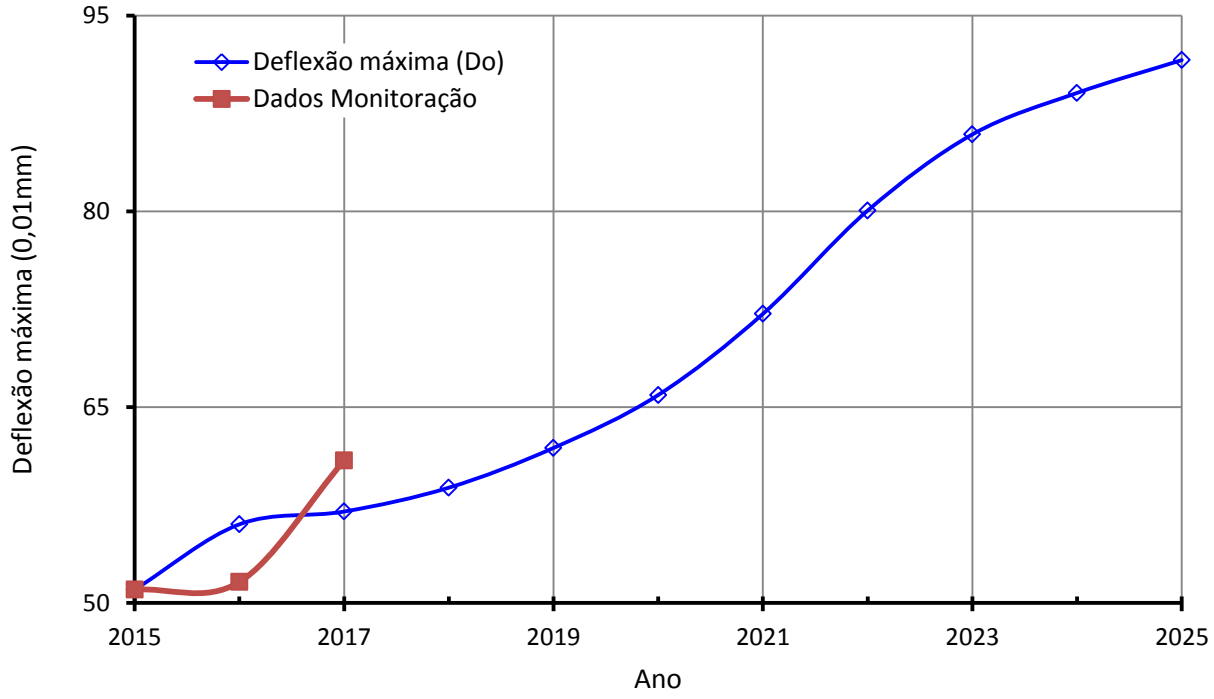


Figura 224 – Previsão e monitoração da deflexão máxima (x10^{-2}mm) x tempo (anos).

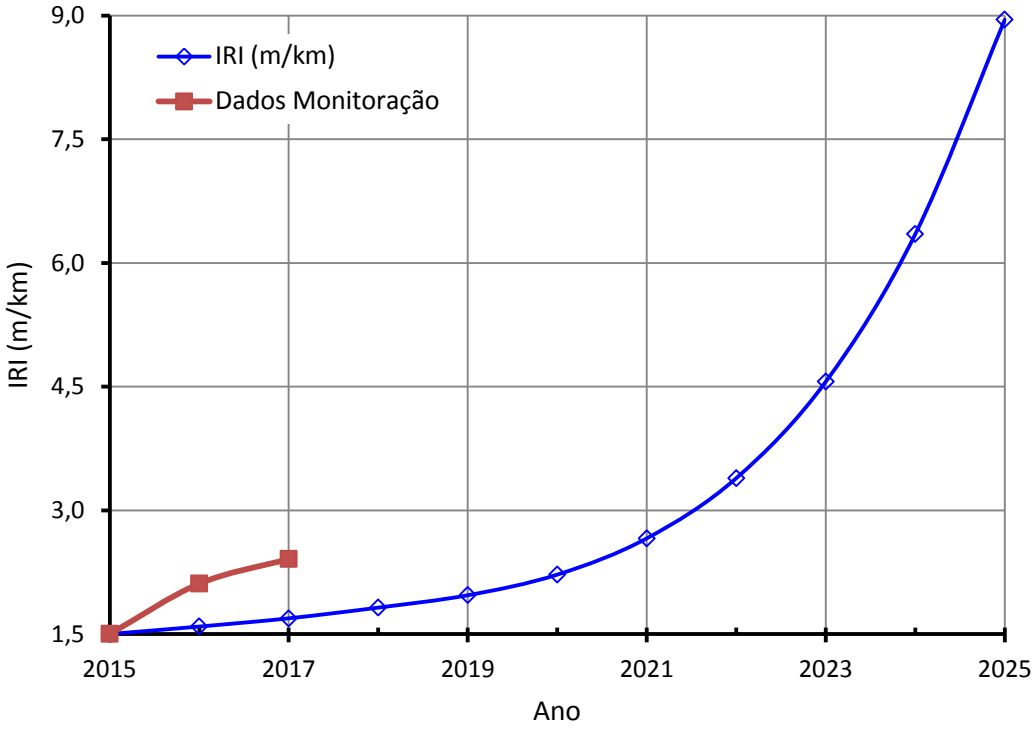


Figura 225 – Previsão e monitoração do índice de irregularidade longitudinal (m/km) x tempo (anos).

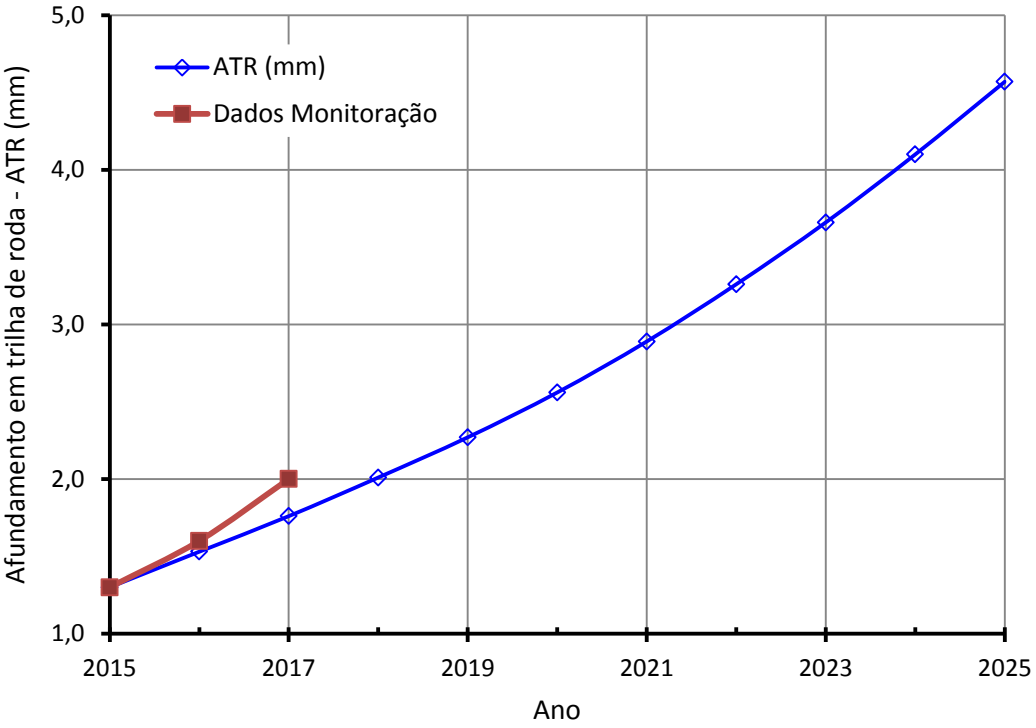


Figura 226 – Previsão e monitoração do afundamento em trilhas de roda (mm) x tempo (anos).

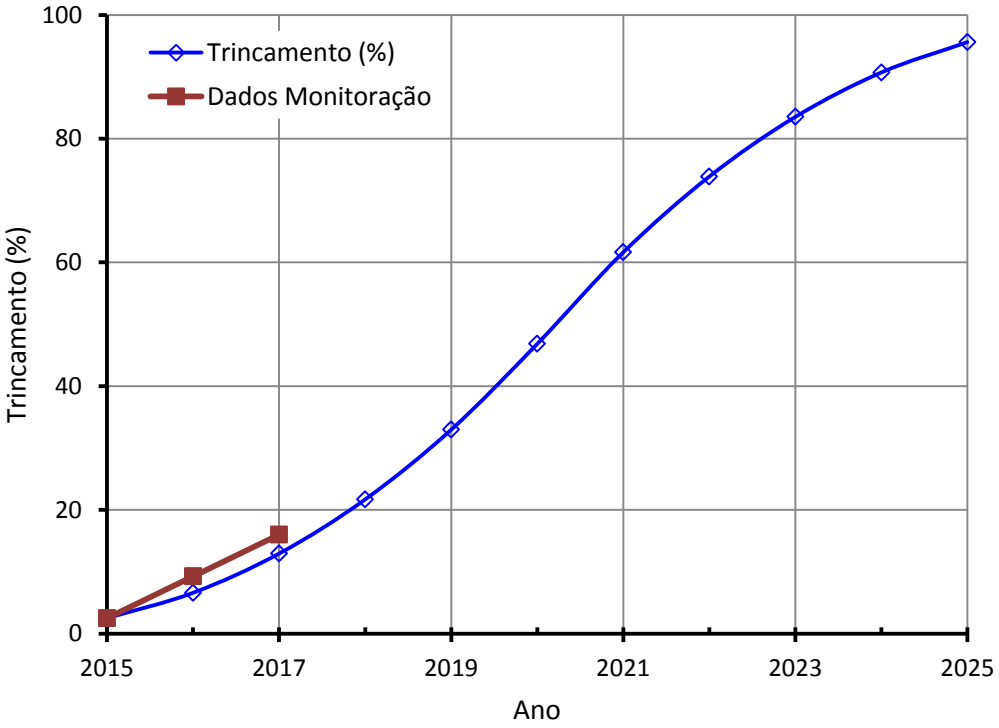


Figura 227 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) x tempo (anos).

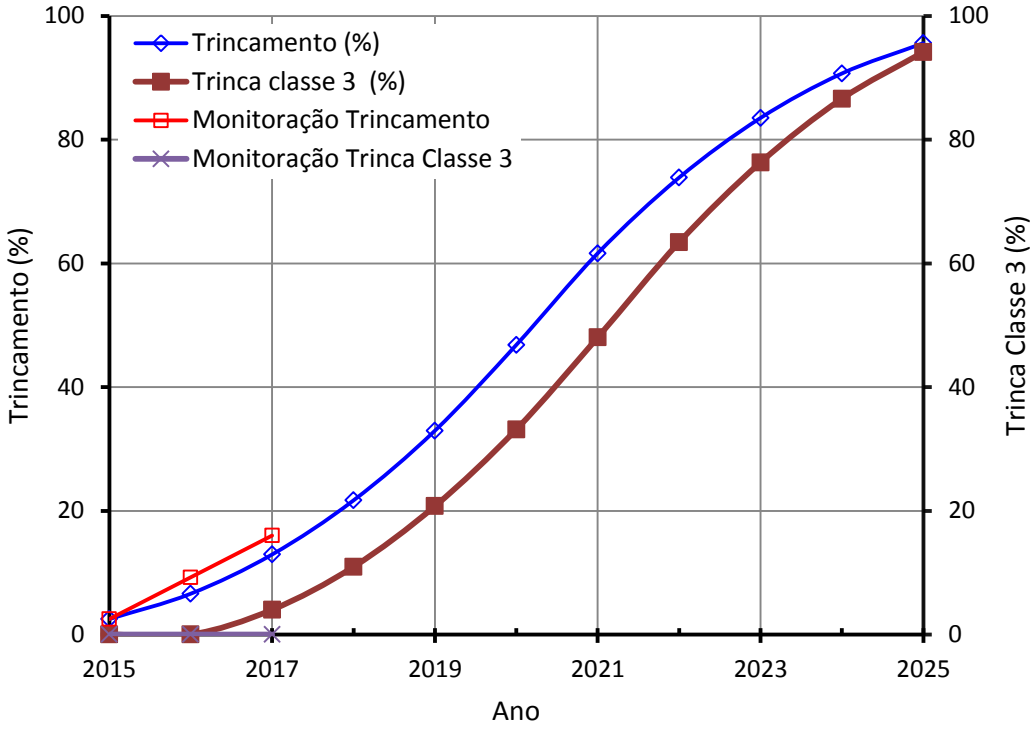


Figura 228 – Previsão e monitoração do trincamento total (%) e trincas classe 3 (%) x tempo (anos).

VI.7 - MANUAIS

Com base na experiência adquirida e nos conteúdos dos cursos e treinamentos foram montados, pela equipe técnica da Via040, manuais, devidamente ilustrados com fotos, figuras e infográficos, com a descrição e manuseio dos equipamentos, os detalhes dos ensaios e padronização de todas as etapas envolvidas nas atividades, sejam de campo ou laboratório. Os manuais são apresentados no ANEXO 3 (Manuais).

VII - CONCLUSÕES

Pavimentação é uma área tecnológica com atraso bastante significativo no Brasil e a Via040 vem fazendo investimentos ordenados nos setores de pesquisa, engenharia consultiva, construção e controle de qualidade, através do RDT e das obras em execução. Os pavimentos rodoviários representam um valioso patrimônio cuja conservação e restaurações oportunas são essenciais para a sua preservação (Visconti, 2000) e para o tráfego de veículos. A melhor compreensão do comportamento dos pavimentos resultará em intervenções corretas no momento oportuno, que irá resguardar a vida útil do pavimento e oferecer as condições ideais de conforto e segurança para os usuários, de forma sustentável para preservação e melhoria da qualidade ambiental.

No projeto de RDT para avaliar o desempenho dos pavimentos foram definidas Unidades de Amostragem (UAs) distribuídas ao longo da Via040 (Brasília/DF e Juiz de Fora/MG). Nessas UAs concentraram-se os esforços de pesquisa, sendo realizadas as monitorações e os ensaios de campo e laboratoriais com recursos humanos, estrutura e equipamentos próprios do Recurso de Desenvolvimento Tecnológico (RDT). As análises e tratamento dos dados das monitorações e ensaios dos pavimentos nas Unidades de Amostragem (UAs) contribuíram para proporcionar uma compreensão dos mecanismos que governam o comportamento dos pavimentos e aprimorar técnicas de ensaios e análises de resultados. Implantou-se um Banco de Dados, contendo informações e parâmetros sobre as condições dos pavimentos, e Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP). Análises comparativas das condições de campo com os resultados dos ensaios laboratoriais são atividades importantes para iniciar estudos sobre fatores laboratório-campo (FLC). Adotaram-se os modelos de previsão de desempenho do HDM-4 para avaliar o comportamento dos diversos pavimentos ao longo do tempo. À medida que a quantidade e qualidade das informações do Banco de Dados forem aumentando obter-se-á modelos de deterioração mais consistentes com o comportamento dos pavimentos frente às ações dos agentes externos. Verificou-se que mesmo com as simplificações adotadas nos modelos do HDM-4, a ferramenta é útil no gerenciamento a nível de rede, fornecendo um panorama expedito da evolução do processo de deterioração dos pavimentos. Com o envolvimento de acadêmicos de engenharia civil nas atividades do projeto de RDT foi promovida a capacitação técnica de futuros profissionais da área de pavimentação.

Entende-se que a definição de modelos de previsão de desempenho dos pavimentos e obtenção dos fatores laboratório-campo (FLC) não são objetivos fáceis de serem alcançados e que exige tempo de pesquisa, comumente dividida por etapas. A ideia concebida certamente não será esgotada com apenas as atividades apresentadas na pesquisa de RDT desenvolvida, sendo consideradas no plano de trabalho como uma das etapas a serem vencidas para atingir o objetivo almejado.

REFERÊNCIAS

AASHTO (1993). *AASHTO guide for design of pavement structure*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, USA.

AASHTO (1996) TP 31-96 - Standard Method of Test for Determining Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension. In: AASHTO

ABNT (2011) NBR 16018 - Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro.

ABNT (2012) NBR 15087 - Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro.

ADEDIMILA, A. S. e KENNEDY, T. W. (1975) Fatigue and resilient characteristics of asphalt mixtures by repeated – load indirect tensile test. Research Report 185-5, Center for Highway Res., Univ. of Texas, Austin.

ALBUQUERQUE, F. S. (2007). *Sistema de Gerência de Pavimento para Departamentos de Estradas do Nordeste Brasileiro*. Tese de DSc, UFRGS, Porto Alegre.

AMARAL, S.J. (2013). Conservação e Manutenção nos Pavimentos Rodoviários e a sua Importância. Dissertação de MSc, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), Lisboa.

ASTM (2009) D 7369 - Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test.

BALBO, J. T. (2007). Pavimentação Asfáltica – Materiais, Projeto e Restauração. Editora Oficina de Textos, São Paulo/SP, 560 p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2007). *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro/RJ, 504 p.

BORGES, C.B.S. (2001). Estudo Comparativo Entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e Fwd em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina. Dissertação de MSc, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

BRITO, L. A. T. (2006) Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; VICTORINO, D. R. (2008). *Indicadores do desempenho de misturas asfálticas determinados através do ensaio de compressão diametral*. TRANSPORTES, volume XVI, número 1, de junho de 2008. ISSN: 1415-7713

BUSTOS, M., ECHAVEGUREN, T., SOLMINIHAC, H. e CAROCA, A. (2006). Development of correlation equations between different measurements of skidresistance in pavements, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 13, pp. 117-122.

COSTA, G.M., ALBUQUERQUE, F.S., MENDONÇA, A.T. (2015). Análise Comparativa Entre Resultados de Módulo de Resiliência Obtidos por Retroanálise de Bacias Deflectométricas de Fwd e por Ensaios de Laboratório. 44ª Reunião Anual de Pavimentação, Foz do Iguaçu, PR.

DÍAZ, J.T. (2014). Cálculo Mecánico de Pavimentos a Partir de Ensayos no Destructivos. Dissertação de MSc, Departamento De Ingeniería Y Ciencia De Los Materiales Y Del Transporte, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, Espanha.

DNER – PRO 10/79 (1979). Procedimento – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A. Rio de Janeiro.

DNER (1994) ME 133 - Misturas Betuminosas - Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

DNER 159-PRO (1985). *Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos*. MT, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.

DNER, (1998). Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos. IPR/DNER/ABNT Publ. 704, 1 ed. Rio de Janeiro, 243 p.

DNER-ME 061/94, (1994)**.** Delineamento da Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação por intermédio da viga Benkelman. Rio de Janeiro, RJ.

DNER-ME 24/94, (1994)**.** Determinação das Deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, RJ.

DNIT (2010) ME 135 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

DNIT (2010) ME 136 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

DORMON, G. M. e C. T. METCALF (1965). Design Curves for Flexible Pavements Based on Layered System Theory. Highway Research Record 71, Highway Research Board. Washington, D.C.

EUROPEAN STANDARD (2003). EN 12967-26 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. European Committee for Standardization.

FABRÍCIO, J. M., GONÇALVES, E.A., FABRÍCIO, O. F. (1988). Metodologia Não Destrutiva para Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis Através da Interpretação das Bacias de

Deformação. In: 23a Reunião Anual de Pavimentação. V. 3, pp. 1415- 1446, Florianópolis, SC, Brasil. Apud Nóbrega (2003).

FERREIRA, J. G. H. M. (2008). Tratamento de Dados Geotécnicos Para Predição de Módulos de Resiliência de Solos e Britas Utilizando Ferramentas de Data Mining. Tese de DSc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

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

FRITZEN, M. A. (2005). Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimento Asfáltico com Simulador de Tráfego na Rodovia Rio-Teresópolis, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pró-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 291 p.

GEIPOT (1982). Pesquisa sobre Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias. Relatório Final – 1981, 12 volumes. Ministério dos Transportes, Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Brasília/DF.

GONÇALVES, F. P. (1999). *O Diagnóstico e a Manutenção dos Pavimentos.* Notas de Aula.

GONTIJO, P.R.A., GUIMARÃES, F.H.R., NOGUEIRA, C.L. (1994). Uma Nova Metodologia para Auscultação de Pavimentos Rodoviários. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG.

HICKS, R. J. (1970). Factors influencing the resilient properties of granular materials. Tese (Doutorado, Ph.D.), Univ. California, Berkeley, 510 p.

HIGHWAYS AGENCY (2015). Design Manual for Roads and Bridges, HD 28/15, UK.

HVEEM, F. N. (1955). Pavement Deflection and Fatigue Failures. Bulletin n. 114, HRB (TRB), Washington, D.C., p. 43-87.

IBGE (2006). Mapa de Unidades de Relevo do Brasil, Domínios Morfoestruturais e Morfoclimáticos / Compartimentos de Relevo. IBGE, Brasil.

IPR-720 (2006). Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Ministério dos Transportes, DNIT, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília/DF.

IPR-745 (2011). Manual de Gerência de Pavimentos. Ministério dos Transportes, DNIT, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 189 p.

KERALI, H.G.R.; MCMULLEN, D.; ODOKI, J.B. (2000). The Highway Design and Maintenance Standards Model, Volume 2: Applications Guide. World Bank, Washington, DC.

KERKHOVEN, R. E. e G. M. DORMON (1953). Some Considerations on the California Bearing Ratio Method for the Design of Flexible Pavements. Shell Bitumen Monograph Nº 1, Amsterdam.

KLEIN, F.C. (2005). Análise da Influência de Características Geométricas de Rodovias nos Custos dos Usuários utilizando o Programa HDM-4. Dissertação de MSc, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

KOHLER, E. R.; SANTERO, N. J.; HARVEY, J. T. (2006). Pilot Project for Fixed Segmentation of the Pavement Network. UCPRC-RR-2005/11 – Part of PPRC Strategic Plan Item 3.2.4, California Department of Transportation, Berkeley.

MACEDO, M.C.; RODRIGUES, R.M., (2003). Sistema de gerência de pavimentos: resultados da simulação com os aeroportos do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 20 -24 de Outubro, 2003, Facultad de Ciências Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santigo, Chile, 11p.

MEDINA, J. (1997). *Mecânica dos Pavimentos*. Editora UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 380 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2005). *Mecânica dos Pavimentos*. Editora UFRJ, 2 ed., Rio de Janeiro/RJ, 570 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2015). *Mecânica dos Pavimentos*. Editora Interciência, 3 ed., Rio de Janeiro/RJ, 619 p.

MEDINA, J.; PREUSLLER, E. S. (1980). *Características resilientes de solos em estudos de pavimentos*, Solos e Rochas, vol. 3 , no. 1.

MORAES, O. L. P. (2006). Programação e Avaliação de Investimentos em Redes de Rodovias, Manual Curso HDM-4, 2006.

MORAES, C.G. (2015). Análise de Bacias Deflectométricas Obtidas por 4 Equipamentos do Tipo Falling Weight Deflectometer (FWD). Dissertação de MSc, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

MOTTA, L. M. G (1991). Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pró-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NÓBREGA, E.S., (2003). Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

OLIVEIRA, C. G. M. (2003). Estudo de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante. Dissertação de MSc, Universidade de Brasília (UNB), Brasília.

PAOLUCCI, H.V.N., FARIAS, M.M., CARVALHO, J.C. (1995). – Análise de Dimensionamento de Reforço de um Pavimento Flexível através de um Programa de

Elementos Finitos. In: 29a Reunião Anual de Pavimentação. V. 2, pp.464-493, Cuiabá, MG, Brasil. Apud Nóbrega (2003).

PATERSON, W. D. O. (1987). Road Deterioration and Maintenance effects: models for planning and management, Banco Mundial, 1987.

PINTO, S. (1991). Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 478 p.

PONTE, R. S., CASTELO BRANCO, V. T. F., HOLANDA, A. S. E SOARES, J. B. (2014). Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas. Transportes, v. 22, p.86-95, Rio de Janeiro.

PREUSSLER, E. S., PINTO, S., MEDINA, J. (1981). Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação no dimensionamento de reforço de pavimentos. In: Reunião Anual de Pavimentação, 16., Recife. Anais... Recife: ABPV, p. 67-122.

QUEIROZ, P. E. S.; SILVA, R. C. (2004). *Estudos e Pesquisas para Calibração e Aferição do Modelo HDM-4 às Condições das Rodovias Brasileiras. Relatório Final.* MT Ministério dos Transportes, DNIT Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes DNIT, DPP Diretoria de Planejamento e Pesquisa.

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

RODRIGUES, R. M., (1995). Aplicações da Mecânica dos Pavimentos ao projeto e à avaliação estrutural dos pavimentos asfálticos. In: 29° Reunião de Pavimentação, V.2, p.p 323-345, Cuiabá, MT.

SAAL, R. N. e P. S. PELL (1960). Fatigue of bituminous road mixes. Kolloid-Zeitschrift. 171 p.

SILVA, R. C.; SOUZA JR., J. G. . Análises de desempenho dos pavimentos com uso do HDM-4. In: JACQUES DE MEDINA: Visionário Humanista, Rio de Janeiro, pp. 371-379, 2016.

SILVA, R. C.; AMARAL, L. S. ; MUNIZ, D. D. ; ROMEIRO JUNIOR, C. L. S. . Análises do Comportamento e Desempenho dos Pavimentos da Via040, Brasília/DF a Juiz de Fora/MG. Revista ANTT, v. 7, p. 1-15, 2015.

SILVA, R. C. ; SOUZA JR., J. G ; COSTA, D. P. ; AMARAL, L. S. ; ROMEIRO JUNIOR, C. L. ; MUNIZ, D. D. .Desempenho Funcional e Estrutural de Pavimentos Flexíveis. In: 45ª Reunião Anual de Pavimentação RAPv / 19° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária ENACOR, 2016.

SILVA, R. C. ; SOUZA JR., J. G ; COSTA, D. P. ; AMARAL, L. S. ; ROMEIRO JUNIOR, C. L. ; MUNIZ, D. D. .Análises do Comportamento e Desempenho dos Pavimentos da Via040 - Brasília/DF a Juiz de Fora/MG. In: X Workshop RDT Recurso de Desenvolvimento

Tecnológico nas Concessões Rodoviárias, Brasília/DF. Recurso de Desenvolvimento Tecnológico - Soluções Técnicas e Aplicadas. Brasília/DF: ANTT Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2016.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1975). Test procedures for characterizing dynamics stress-strain properties of pavement materials. Special Report n. 162, Washington, DC, 40 p.

VISCONTI, T. S. (2000). *O Sistema de Gerencial de Pavimentos*. MT Ministério dos Transportes, DNER Dep. Nacional de Estradas de Rodagem, IPR Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 84 p.

WATANATADA, T.; HARRAL, C.G.; PATERSON, W.D.O.; DHARESHWAR, A.M.; BHANDARI, A.; TSUNOKAWA K. (1987). The Highway Design and Maintenance Standards Series. Baltimore: Johns Hopkins for the World Bank.

ANEXOS