IRREGULARIDADE LONGITUDINAL: PREVISÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE PAVIMENTOS NO MÉTODO MeDiNa

PAVEMENT ROUGHNESS: PREDICTING THE FUNCTIONAL BEHAVIOR IN THE MeDiNa METHOD

Lucas Dotto Bueno - lucas.bueno@ufsm.br - https://orcid.org/0000-0001-8171-4192

Deividi da Silva Pereira - dsp@ufsm.br - https://orcid.org/0000-0002-7200-7813

Luciano Pivoto Specht - luspecht@ufsm.br - https://orcid.org/0000-0002-8709-6273

Henrique Otto Coelho - henriquesouza@ste-simemp.com.br - https://orcid.org/0009-0003-6275-7543

Jose Antonio Santana Echeverria - jose.echeverria@dnit.gov.br - ttps://orcid.org/0009-0002-3206-0545

RESUMO: O comportamento funcional de uma rodovia é comumente avaliado de maneira quantitativa por meio da irregularidade longitudinal em sua superfície, representada pelo *International Roughness Index* (IRI). A popularização do IRI e dos sistemas de medição de irregularidade no cenário nacional cria uma oportunidade de inserção, dentro do novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), de um mecanismo de ruptura alternativo de avaliação, baseado no critério funcional, possibilitando a previsão do IRI ao longo do tempo. Os trabalhos de Bueno (2019) e Bueno *et al.* (2022) mostraram ser possível prever o comportamento do IRI ao longo do tempo, tanto em caráter empírico quanto mecanístico-empírico; todavia, a adequação dessa ferramenta no sistema MeDiNa não foi consolidada pelos autores. Dentro desse contexto, o presente trabalho apresenta, de maneira preliminar, estratégias que serão utilizadas na tentativa de fornecer uma possibilidade de incorporação da previsão de irregularidade na rotina de resultados do MeDiNa, como parte do Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 545/2022, firmado entre a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). As estratégias propostas consistem em incorporar novos segmentos experimentais ao banco de dados compilado por Bueno *et al.* (2022), além de empregar rotinas empíricas e mecanístico-empíricas para prever a evolução do IRI ao longo do tempo, com base em pavimentos brasileiros, dentro da sistemática de operação do MeDiNa.

PALAVRAS-CHAVE: pavimentos asfálticos; irregularidade longitudinal de pavimentos; MeDiNa.

ABSTRACT: *The functional behavior of a highway is commonly quantitatively evaluated through the roughness on its surface, represented by the International Roughness Index (*IRI*). The popularization of IRI and roughness measurement systems on the national scene creates an opportunity to insert, within the new National Pavement Dimensioning Method (*MeDiNa*), an alternative failure evaluation, based on the functional criterion, enabling the IRI prediction over time. The studies developed by Bueno (2019) and Bueno et al. (2022) showed that it is possible to predict the IRI behavior over time, both empirically and mechanistic-empirically; however, the adequacy of this tool in the MeDiNa system was not consolidated by the authors. Within this context, the present paper presents, in a preliminary way, strategies that will be used in an attempt to incorporate the roughness prediction in the MeDiNa results,*

Submetido em 24/05/2023 e aceito em 22/08/2023.
https://doi.org/10.70859/2764-9539.v2.n2.41

*as part of the Decentralized Execution Term (*TED*) nº 545/2022, signed between Federal University of Santa Maria (*UFSM*) and National Transport Infrastructure Department (*DNIT*). The proposed strategies are to incorporate new experimental sites to the database compiled by Bueno et al. (2022), in addition to employing empirical and mechanistic-empirical routines to predict the evolution of the IRI over time, based on Brazilian pavements, within the MeDiNa systematic of operation.*

KEYWORDS: *asphalt pavements; pavement roughness; MeDiNa.*

1 INTRODUÇÃO

A irregularidade longitudinal medida na superfície é um dos principais parâmetros de avaliação das condições de funcionalidade de uma estrutura de pavimento rodoviário. Apesar de bastante difundidos, os índices que determinam e quantificam a irregularidade longitudinal envolvem uma série de aspectos que podem alterar a magnitude de seus resultados. No cenário nacional e internacional, o *International Roughness Index* (IRI) é considerado o principal quantificador dos desvios da superfície em relação a um plano ideal de referência, responsável por diagnosticar a ruptura funcional do pavimento a partir do grau de irregularidade em sua superfície.

A utilização do IRI como principal indicador do mecanismo de ruptura funcional fez com que, ao longo do tempo, os métodos de dimensionamento de pavimentos novos e restaurações adequassem a sua rotina de previsão também para assimilar os índices funcionais. Em trabalho pioneiro, Paterson (1987), com uso de boa parte do banco de dados compilado por Queiroz (1981), desenvolveu as bases do modelo de previsão de irregularidade incorporado ao *Highway Design and Maintenance Standards Model* (HDM-3), documentado pelo Banco Mundial em Watanatada *et al.* (1987).

Inspirados pelo trabalho de Paterson (1987), tanto no cenário nacional quanto internacional, surgiram variados modelos visando prever o desempenho funcional das estruturas de pavimento, servindo como base para as tomadas de decisão de projetos rodoviários. No Brasil, importantes estudos já foram efetuados visando obter equações que representassem a progressão da irregularidade em rodovias revestidas por material asfáltico. Destacam-se os trabalhos realizados com implantação de trechos experimentais, tais como Yshiba (2003), Nakahara (2005) e Soncim (2011), que modelaram a progressão do IRI baseados em trechos restaurados em rodovias e vias urbanas.

No contexto de pesquisas realizadas dentro do Termo Execução Descentralizada (TED) nº 545/2022, a irregularidade longitudinal é tema central dos trabalhos de Bueno (2019), Pavi (2019), Bueno *et al.* (2022) e Scherer (2022). Nos trabalhos de Bueno (2019) e Bueno *et al.* (2022), foram apresentados modelos de previsão da irregularidade longitudinal ao longo do tempo, tanto em caráter empírico quanto em caráter mecanístico-empírico.

Com a experiência adquirida ao longo dos trabalhos supracitados, entende-se como possível atrelar o mecanismo de ruptura funcional na rotina de dimensionamento do sistema MeDiNa, mediante uso de modelos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal, como parte dos produtos a serem entregues no TED nº 545/2022, firmado entre a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Em vista disso, o presente trabalho busca apresentar os principais modelos presentes na literatura, referentes à progressão de irregularidade longitudinal, além de expor as estratégias preliminares que serão adotadas para possibilitar a introdução da previsão do IRI na sistemática de resultados do MeDiNa.

2 MODELOS DE PREVISÃO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

A irregularidade longitudinal vem sendo utilizada como uma importante ferramenta de aceitação de serviços, controle de obras rodoviárias, avaliação da qualidade do pavimento, determinação da necessidade de intervenção, escolha da alternativa de projeto mais adequada para a estrutura avaliada e determinação dos custos operacionais de usuários de rodovias. Ao longo dos anos, diversos pesquisadores desenvolveram modelos para avaliar a ruptura do pavimento por índices de irregularidade. Por si só, um modelo de previsão de evolução de irregularidade longitudinal de um pavimento pode estimar a qualidade de rolamento de sua superfície e determinar as necessidades de intervenções e restaurações.

2.1 MODELO DE QUEIROZ (1981)

Com base nos dados coletados na PICR (Pesquisa do Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias), Queiroz (1981) desenvolveu modelos de previsão de desempenho para a gerência de pavimentos no Brasil. O projeto experimental desenvolvido pelo autor envolveu dados de campo de pavimentos localizados na rede rodoviária dos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e no Distrito Federal. O texto original foi publicado em 1981, em língua inglesa, em formato de tese de pós-doutorado do autor. Em 1984, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) publicou uma versão traduzindo o referido documento para o português (Queiroz, 1984), disseminando ainda mais o conteúdo gerado.

O modelo de previsão de irregularidade desenvolvido pelo autor está exposto na Equação (1), determinada de forma empírica, relacionando efeitos estruturais, tráfego, idade e parâmetros de resistência e deformabilidade, baseado em medidas de campo. O estudo publicado pelo autor representou uma das primeiras tentativas de inserção da previsão de desempenho da irregularidade longitudinal na análise de pavimentos brasileiros. Dada a época da publicação, o indicador adotado por Queiroz (1981) foi o Quociente de Irregularidade (QI).

$$QI = 12{,}63 - 5{,}16 * RH + 3{,}31 * ST + 0{,}393 * AGE + 8{,}66 * \left(\frac{logN}{SNC}\right) + 7{,}17 * 10^{-5}(D_{MÁX} * logN)^2 \qquad (1)$$
$$R^2 = 0{,}56$$

Em que:

QI é o quociente de irregularidade (contagens/km);

RH é a variável indicadora do estado da restauração (como construído = 0; recapeado = 1);

ST é a variável indicadora do tipo de revestimento (concreto asfáltico = 0; tratamento superficial = 1);

AGE é a idade do pavimento desde a sua construção ou última reabilitação (anos);

N é o número acumulado de repetições do eixo padrão, calculado pelo método da AASHTO;

SNC é o Número Estrutural Corrigido;

$D_{MÁX}$ é a deflexão medida pela viga Benkelman abaixo do ponto de aplicação de carga (0,01 mm).

Posteriormente, a regressão estatística elaborada pelo autor foi adaptada e implantada no método nacional de projeto de restauração de pavimentos, regulamentada pela DNER-PRO 159/85 (DNER, 1985), objetivando prever a irregularidade em pavimentos existentes revestidos em concreto asfáltico (CA) ou

tratamento superficial (TS).

2.2 MODELO DO HDM-4 (ODOKI E KERALI, 2000)

Visando ampliar o escopo do HDM-3 e fornecer um sistema de abordagem de fácil acesso para a gestão rodoviária, com *software* e ferramentas acessíveis aos usuários, um estudo internacional liderado por variados pesquisadores resultou no *Highway Development and Management Tool* (HDM-4). A documentação que orienta a utilização do programa é constituída por sete volumes, desenvolvidos por variados autores que participaram deste processo, sendo a principal referência Odoki e Kerali (2000).

Kerali (2001) afirma que, no modelo de progressão de irregularidade, foi dada ênfase à aplicação do conhecimento existente, ao invés da realização de grandes estudos empíricos. Interpreta-se, assim, que o banco de dados é similar àquele utilizada no HDM-3, com base nas informações apresentadas por Queiroz (1981). Dessa forma, o modelo que prevê o comportamento da irregularidade longitudinal, aplicado ao HDM-4, é formado por variados componentes que contribuem para a evolução do IRI, sendo que o incremento total na irregularidade é dado pela soma destes componentes, expostos na Equação (2):

$$\Delta RI = K_{gp}(\Delta RI_S + \Delta RI_{TR} + \Delta RI_{ATR} + \Delta RI_P) + \Delta RI_E \quad (2)$$

Em que:

ΔRI é o incremento total na irregularidade durante o ano em análise (m/km);

ΔRI_{ATR} é o incremento na irregularidade devido ao afundamento em trilha de roda - ATR (m/km);

ΔRI_E é o incremento na irregularidade devido às condições ambientais (m/km);

ΔRI_P é o incremento na irregularidade devido à presença de panelas (m/km);

ΔRI_S é o incremento na irregularidade devido ao componente estrutural (m/km);

ΔRI_{TR} é o incremento na irregularidade devido ao trincamento (m/km);

K_{gp} é o fator de calibração para progressão da irregularidade.

Na versão 4 do HDM, o fator de calibração para progressão da irregularidade (K_{gp}) deve ser ajustado mediante alteração dos fatores referentes aos componentes que incrementam os acréscimos anuais de IRI, visando obter curvas de irregularidade próximas das séries históricas de dados do pavimento. Um guia sobre a calibração e adaptação dos fatores inseridos nos modelos de evolução dos parâmetros rodoviários previstos pelo HDM-4 pode ser encontrado em Bennett e Paterson (2000).

2.3 MODELO DA AASHTO (2008)

Divulgado como uma atualização do *Guide for Design of Pavement Structures* (AASHTO, 1993), o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), publicado pela AASHTO (2008), surgiu com o objetivo de fornecer para a comunidade rodoviária uma ferramenta de projeto e análise de pavimentos novos e reabilitados, com base em princípios mecanístico-empíricos.

Em termos específicos da previsão de irregularidade longitudinal, Bhattacharjee (2016) descreve sua modelagem baseada em critérios de falha, tais como trincamento por fadiga, trincamento térmico, deformação permanente e irregularidade longitudinal, representada pelo IRI. A Equação (3) exibe a evolução do IRI prevista pelo MEPDG para pavimentos asfálticos.

$$IRI = IRI_i + 0{,}015(SF) + 0{,}4(TR_{TOTAL}) + 0{,}008(TT) + 40{,}0(ATR) \quad (3)$$
$$R^2 = 0{,}56$$

Em que:

ATR é o afundamento em trilha de roda médio (in);

IRI_i é a irregularidade inicial, após a construção (in/mi);

SF é o fator referente à pista;

TR_{TOTAL} é a área total envolvida por trincas de fadiga (%);

TT é o comprimento das trincas transversais (ft/mi).

AASHTO (2008) informa que a Equação (3) pode ser utilizada para avaliar o desempenho frente à irregularidade para pavimentos flexíveis convencionais (revestimento asfáltico sobre materiais granulares) e também para variações de estruturas semirrígidas, com presença de bases ou sub-bases cimentadas ou asfálticas.

O processo de calibração global da Equação (3) foi baseado em 1.926 valores de IRI observados em campo (dados coletados dentro do LTPP - *Long-Term Pavement Performance*), originando a estimativa final com erro padrão de 0,30 m/km. Todavia, salienta-se que a calibração do modelo foi realizada com observações de irregularidade de magnitude relativamente baixa (variando entre valores de IRI aproximados de 0,5 m/km a 3,2 m/km).

2.4 MODELO DE ABDELAZIZ *ET AL.* (2018)

Conforme ocorrido no desenvolvimento do modelo de previsão de desempenho publicado pela AASHTO (2008), para possibilitar a modelagem do IRI, Abdelaziz *et al.* (2018) também utilizaram resultados extraídos do banco de dados do LTPP.

A Análise de Variância (ANOVA) efetuada pelos autores indicou que a irregularidade inicial após o final do processo construtivo e a idade do pavimento após a construção ou reabilitação são as variáveis independentes que mais se associam com a irregularidade longitudinal ao longo do tempo, seguidas dos demais parâmetros avaliados. Depois de sucessivas tentativas de ajuste, o modelo de regressão mais assertivo, conforme escolha dos autores, está exposto na Equação (4):

$$IRI = IRI_i + 0{,}015(AGE) + 0{,}004(TR_{TOTAL}) + 0{,}0005(TT) + 0{,}089(DP_{ATR}) \quad (4)$$
$$R^2 = 0{,}57$$

Em que:

AGE é a idade do pavimento desde a sua construção ou última reabilitação (anos);

DP_{ATR} é o desvio padrão nas medidas de afundamento em trilha de roda (mm);

IRI_i é a irregularidade inicial, após a construção (m/km);

TR_{TOTAL} é a área total envolvida por trincas de fadiga (%);

TT é o comprimento das trincas transversais (m/km).

O erro padrão de estimativa que envolve o modelo elaborado por Abdelaziz *et al.* (2018) foi quantificado em 0,33 m/km. Os valores de irregularidade utilizados na composição do modelo oscilaram entre medidas de IRI determinadas em uma faixa de aproximadamente 0,4 m/km até, aproximadamente, 4,3 m/km.

2.5 MODELOS DE BUENO *ET AL.* (2022)

Em trabalho realizado considerando trechos experimentais monitorados nos estados do Rio de Janeiro/RJ e Rio Grande do Sul/RS, Bueno *et al.* (2022) consideraram 205 observações de IRI, espalhadas por 35 segmentos experimentais, no desenvolvimento de modelos de previsão de irregularidade longitudinal.

No formato mecanístico-empírico, os autores desenvolveram uma metodologia que associa o dano médio acumulado limitado (calculado com base em propriedades fundamentais dos materiais e o auxílio de programa computacional) e a irregularidade longitudinal medida na superfície ao longo do tempo, atrelada com um indicador inicial da qualidade de execução da implantação ou reabilitação de uma estrutura rodoviária $(IRI_{inicial} = IRI_i)$, determinado após o termino do processo construtivo, sem ação do

tempo/tráfego sobre a estrutura. Os autores também exibem um modelo em caráter tradicional, com base unicamente empírica, gerado a partir de informações coletadas ao longo do tempo em pistas experimentais nos estados avaliados. As expressões matemáticas estão expostas na Equação 5 (empírica) e Equação 6 (mecanístico-empírica):

$$IRI_{(t)} = IRI_i + [(3{,}54.10^{-8} * N) + (1{,}42.10^{-4} * (D_{MÁX} * AT))] \quad (5)$$

$$R^2 = 0{,}77$$

$$IRI_{(t)} = IRI_i + (0{,}0124 * DANO_{LVECD} * AGE) \quad (6)$$

$$R^2 = 0{,}79$$

Em que:

AGE é a idade do pavimento desde a sua construção ou reabilitação (meses) no tempo *"t"*;

AT é a área do pavimento com presença de trincas (%) no tempo *"t"*;

$DANO_{LVECD}$ é o dano médio limitado acumulado (calculado com o LVECD) no tempo *"t"*;

$D_{MÁX}$ é a deflexão FWD abaixo do ponto de aplicação de carga (0,01 mm) no tempo *"t"*;

IRI_i é a irregularidade inicial do pavimento após a construção ou reabilitação (m/km);

$IRI_{(t)}$ é a irregularidade longitudinal prevista no pavimento (m/km) no tempo *"t"*;

N é o número acumulado de repetições do eixo padrão (método USACE) no tempo *"t"*.

A Equação 5 resultou em um valor de 0,41 m/km determinado como o erro padrão de estimativa. Já para a Equação 6, o erro padrão de estimativa resultante das previsões de irregularidade efetuadas foi quantificado em 0,39 m/km. Entende-se que, com base nos resultados gerados no estudo desenvolvido pelos autores, pode-se prever o desempenho funcional da estrutura do pavimento avaliado ao longo do tempo, tendo como parâmetro o desempenho da mistura asfáltica, analisada com base nas propriedades dos materiais, empregado em associação a um indicador inicial da qualidade de execução da implantação ou reabilitação de uma estrutura rodoviária $(IRI_{inicial} = IRI_i)$, determinado após o termino do processo construtivo, sem ação do tempo/tráfego sobre a estrutura.

3 INCORPORAÇÃO DA PREVISÃO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL NO MeDiNa

Cientes da necessidade de maiores evoluções nos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, uma iniciativa integrada da Rede de Tecnologia em Asfaltos (fomentada pela ANP/PETROBRAS), juntamente com o antigo Instituto de Pesquisas Rodoviárias, atual Coordenação-Geral do Instituto de Pesquisas em Transportes - CGIPT - IPR/DNIT, a COPPE/UFRJ e uma série de instituições de ensino e pesquisa distribuídas geograficamente pelo Brasil, culminou em uma proposta de atualização no método de dimensionamento nacional de pavimentos asfálticos, regulamentada pela IS-247, que integra a Publicação IPR – 726 (2006) – Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos/instruções de serviço . Isso representa um avanço em relação ao documento anterior, que é baseado na metodologia americana da década de 1920, implementado no Brasil em 1966, modificado em 1981 pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza (DNER, 1981).

O método adaptado pelo Engenheiro Murilo Lopes de Sousa, popularmente conhecido como Método do CBR/USACE, cumpriu um papel de extrema importância para o setor ao longo das últimas décadas; todavia, a migração para processos mecanístico-empíricos em países com maior capacidade econômica e tecnológica indicou um novo caminho para os projetos de pavimentos brasileiros.

Uma importante safra de pesquisas

nacionais, como a de Motta (1991), indicaram possibilidades para inserção de rotinas mecanístico-empíricas no desenvolvimento de projetos de pavimentos brasileiros revestidos por concreto asfáltico. Essa iniciativa resultou no trabalho desenvolvido por Franco (2007), que efetivamente propôs uma plataforma computacional, à época denominada “SisPav”, capaz de incorporar rotinas mecânicas às parcelas empíricas do dimensionamento. Os desdobramentos deste trabalho culminaram na elaboração do MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), documentado por Franco e Motta (2020) e viabilizado pelo TED nº 682/2014 (Processo nº 50607.002043/2013-00), firmado entre o DNIT e a UFRJ.

Em síntese, o MeDiNa constitui um sistema de dimensionamento de pavimentos que integra calibrações em campo mediante observações advindas de pistas experimentais monitoradas, resultados de ensaios laboratoriais para avaliação das propriedades dos materiais e cálculo de esforços gerados nas estruturas submetidas ao tráfego atuante. O novo método é de base mecanístico-empírica, ou seja, avalia os materiais de acordo com suas propriedades mecânicas para calcular tensões e deformações nas camadas, tornando o processo mais próximo da situação que efetivamente ocorre em campo, e possibilitando a previsão dos principais mecanismos de ruptura ao longo do tempo: trincamento por fadiga e deformação permanente (Medina e Motta, 2015; Franco e Motta, 2018 e 2020).

No âmbito prático, órgãos de administração rodoviária e empresas responsáveis por concessões espalhadas pelo país também demandam uma associação mais significativa entre o melhor desempenho dos pavimentos e um indicador funcional da qualidade da rodovia. Ademais, a existência de uma previsão funcional, associada a modelos de desempenho com base em parâmetros estruturais e de tráfego, poderá, por exemplo, permitir a delimitação de bonificações ou penalizações para os executores responsáveis, já que a condição de trafegabilidade na superfície do pavimento interfere de maneira significativa nos custos operacionais demandados por usuários de rodovias.

Neste contexto, a possibilidade de previsão da evolução da irregularidade com o tráfego, representada pelo IRI, permitirá aos gestores rodoviários uma mais ampla tomada de decisões acerca de escolhas de misturas asfálticas e/ou estruturas de pavimentos que entreguem aos usuários menores custos operacionais, uma vez que a irregularidade do pavimento é um índice funcional atrelado à percepção de conforto percebida pelo usuário e também aos custos associados à utilização da via.

Vale salientar, todavia, que os indicadores de irregularidade longitudinal são parâmetros de abordagem relativamente complexa, principalmente quando são investigados os padrões de comportamento em campo destes índices. No decorrer do processo construtivo e da vida de serviço de uma estrutura rodoviária, o IRI pode ser influenciado por variados fatores que intensificam o processo de degradação do pavimento; desta forma, previsões de comportamento dos parâmetros de irregularidade são consideradas desafiadoras.

Dentro dessa temática, entende-se ser possível associar as etapas empíricas e mecanísticas, juntamente com um indicador inicial da qualidade de execução da implantação ou reabilitação de uma estrutura rodoviária ($IRI_{inicial} = IRI_i$, determinado após o termino do processo construtivo, sem ação do tempo/tráfego sobre a

estrutura), em uma rotina de previsão de comportamento da irregularidade ao longo do tempo. Tal associação já se mostrou viável no decorrer dos trabalhos de Bueno (2019) e Bueno *et al*. (2022), em que foram empregadas rotinas mecanístico-empíricas para prever a evolução do IRI ao longo do tempo, com base em pavimentos brasileiros. Todavia, os resultados dos autores não foram atrelados à atual versão do MeDiNa e seus conceitos de danificação.

3.1 PREMISSAS ADOTADAS

No presente estudo, inicialmente, utilizou-se da análise estatística realizada por Bueno *et al.* (2022), que avaliou a associação e significância das variáveis independentes selecionadas na evolução da irregularidade longitudinal (variável dependente). Como etapa inicial do procedimento de análise de dados, Bueno *et al.* (2022) selecionaram os parâmetros quantificados nos trechos monitorados, objetivando encontrar a sua representatividade na evolução da irregularidade longitudinal (variável dependente, representada pelo IRI, em m/km).

A Tabela 1 exibe as simbologias dos parâmetros explicativos escolhidos para modelar o fator de resposta representativo do IRI. Os parâmetros serão repetidos no presente estudo, com adição de uma variável independente mecânica, atrelada ao sistema MeDiNa (ainda a definir em etapas futuras da pesquisa). Essa variável mecânica possivelmente estará atrelada ao dano acumulado por fadiga, que considera as propriedades da curva de fadiga do material asfáltico utilizado, em paralelo com a estrutura do pavimento e o tráfego acumulado ao longo do tempo.

Tabela 1 – Variáveis independentes utilizadas na análise de irregularidade

Variável	Definição
AT	Área do pavimento com presença de trincas (%)
AGE	Idade do pavimento desde a sua construção ou reabilitação (meses)
D_{MAX}	Deflexão FWD abaixo do ponto de aplicação de carga (0,01 mm)
FN	*Flow Number* da mistura asfáltica empregada no trecho
IRI_i	Irregularidade inicial do pavimento após a construção ou reabilitação (m/km)
N	Número acumulado de repetições do eixo padrão (método USACE)
N_A	Número anual de repetições do eixo padrão (método USACE)

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

Dentre as variáveis adotadas na Tabela 1, destaca-se que é corrente a utilização do parâmetro de tráfego calculado pelo método da AASHTO para avaliações funcionais de pavimentos asfálticos. Na presente pesquisa, optou-se por manter as premissas adotadas por Bueno *et al.* (2022), com utilização do método USACE para definição do tráfego (mais comumente utilizado em avaliações estruturais e definições de horizontes de projeto das estruturas de pavimentos). Essa ação justifica-se uma vez que o principal objetivo da elaboração de um modelo mecanístico-empírico de irregularidade é a sua inserção na rotina de projeto do MeDiNa (que adota o tráfego calculado com o método USACE). Sendo assim, os autores entendem que a utilização de um novo padrão de tráfego nessa ferramenta causaria confusão nos usuários durante a fase de projeto/avaliação das estruturas. Então, optou-se por manter a modelagem da irregularidade com referência no tráfego calculado pelo método USACE.

Feito isso, os autores realizaram tentativas de adequação das variáveis aos resultados de irregularidade, utilizando apenas a base de dados empírica, determinada em campo nos trechos

monitorados, ao decorrer dos anos de acompanhamento.

No trabalho dos autores, as tentativas de adequar o caráter mecanicista aos modelos de previsão foram realizadas mediante utilização dos danos médios limitados acumulados, calculados com o LVECD (*Layered Viscoelastic Analysis for Critical Distresses*), desenvolvido na *North Carolina State University*. No presente estudo, será feita uma tentativa de adequar a rotina mecanicista dentro dos parâmetros mecânicos adotados pelo MeDiNa.

Visando identificar os parâmetros mais significativos no desempenho da estrutura de pavimento frente à irregularidade longitudinal, os autores utilizaram o método de Análise de Variância (ANOVA), que busca verificar se determinado fator é responsável pelas variações nas respostas das variáveis dependentes de interesse.

Nos testes ANOVA, busca-se obter o valor do teste F de Snedcor ($F_{OBSERVADO}$), determinado pela relação entre a variância entre grupos e dentro de um determinado grupo. A determinação da significância dos fatores avaliados é realizada mediante comparação de $F_{OBSERVADO}$ com um valor limite de F ($F_{CRÍTICO}$), encontrado em tabelas estatísticas de acordo com o nível de significância adotado, graus de liberdade, número de grupos (soma das variáveis dependentes e independentes) e observações (Field, 2005).

Adicionalmente, as análises estatísticas que adotam a metodologia ANOVA também permitem avaliar o "valor P", denominado como "nível descritivo de teste" ou "probabilidade de significância". Em estudos como este, em que o nível de confiabilidade adotado foi de 95 %, se o "valor P" for maior ou igual ao nível de significância (5 %, ou seja, α = 0,05), entende-se que não é possível concluir a ocorrência de uma associação estatisticamente significativa entre os parâmetros avaliados.

Assim, por meio do teste ANOVA, foi possível verificar se as variáveis independentes, determinadas em paralelo com a irregularidade, causam variações relevantes na resposta da variável dependente de interesse (IRI).

A Tabela 2 exibe o resumo dos resultados da Análise de Variância para o nível de significância de 5 % (confiabilidade = 95 %), classificando em ordem decrescente as variáveis independentes mais significativas no resultado da variável de resposta. A opção por trabalhar com intervalos estabelecidos no nível de confiança de 95 % foi efetuada com base nas recomendações de Zar (1984), Field (2005) e Kasznar (2007), que apresentam algumas orientações sobre a realização de regressões e testes ANOVA para avaliar associações entre variáveis.

Tabela 2 – Resumo da ANOVA para o planejamento fatorial do IRI

Variável	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	$F_{OBSERVADO}$	$F_{CRÍTICO}$	Valor P
IRI_i	4	75,72	18,93	115,68	2,42	4,01E-49
N	4	1,78E+15	4,45E+14	18,03	2,42	1,64E-12
N_A	4	1,56E+13	3,89E+12	13,53	2,42	1,09E-09
AT	4	31.081,06	7.770,26	10,99	2,42	5,20E-08
AGE	4	44.658,80	11.164,70	10,65	2,42	8,70E-08
D_{MAX}	4	6.805,34	1.701,33	7,37	2,42	1,58E-05
FN	4	939.080,38	234.770,10	0,72	2,42	5,77E-01

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

Pela análise da Tabela 2, é possível verificar que, destacadamente, o valor de irregularidade inicial, medido após o final do processo construtivo (IRI_i), é o fator que mais se associa à evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo. Em um segundo grupo, percebe-se os efeitos do tráfego, além dos percentuais de área trincada na superfície (AT), a idade de operação do pavimento (AGE) e as deflexões máximas, medidas abaixo do ponto de aplicação de carga ($D_{MÁX}$).

Cabe aqui um comentário sobre a importância da irregularidade obtida após o final do processo construtivo na evolução dos indicadores funcionais. Em *softwares* de dimensionamento de pavimentos novos e restaurações, entende-se que o IRI inicial poderia ser definido como um critério a ser atingido conforme o tipo de rodovia que se está projetando; ou seja, quanto menos importante a via em termos de capacidade operacional e suporte estrutural, maior pode ser a irregularidade inicial obtida após o final da fase construtiva, e assim sucessivamente. Em tempo, deve-se mencionar a necessidade de uma discussão profunda acerca dos parâmetros limítrofes de irregularidade para a aceitação da execução de concretos asfálticos no Brasil.

Mediante análise dos resultados estatísticos da ANOVA realizada pelos autores, observa-se que o valor do teste F de Snedcor ($F_{OBSERVADO}$) foi maior que o valor limite de F ($F_{CRÍTICO}$) em todas as ocasiões analisadas, exceto para o parâmetro *Flow Number*, indicando a ocorrência de uma associação estatisticamente significativa entre os parâmetros avaliados, salvo o caso supracitado (FN da mistura asfáltica).

Sendo assim, para os casos avaliados por Bueno *et al.* (2022), a Análise de Variância indica que não há uma associação significativa entre os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida e o seu parâmetro *Flow Number* com os valores de irregularidade longitudinal medidos em pista com o perfilômetro inercial. Neste trabalho, será repetida essa avaliação com o novo montante de informações geradas, com o intuito de inserir um parâmetro de deformação permanente da mistura asfáltica na rotina de previsão do IRI (ainda a definir em etapas futuras do trabalho).

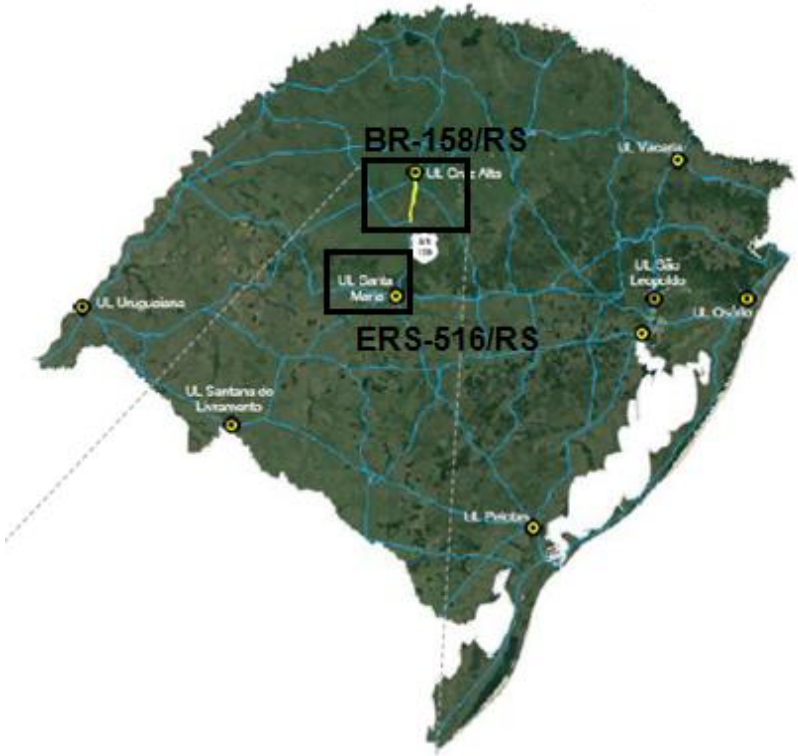
3.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Para as etapas futuras de desenvolvimento deste trabalho, pretende-se incorporar novos segmentos experimentais ao banco de dados compilado por Bueno *et al.* (2022). Para isso, conta-se com a colaboração da iniciativa representada pelo Guia para Execução de Segmentos Experimentais – PRO-MeDiNa (DNIT, 2023), cujo objetivo é incentivar e orientar a implantação e monitoramento de novos trechos, visando avaliar o comportamento de variadas alternativas de pavimentos e o aperfeiçoamento da calibração do sistema MeDiNa. Buscando padronizar os segmentos experimentais a serem construídos, o referido Guia estabelece os passos a serem realizados, tanto nas etapas de planejamento e de execução, quanto na etapa de monitoramento do pavimento ao longo de sua vida útil.

Dentro do escopo das atividades do TED nº 545/2022, firmado entre a UFSM e o DNIT, pretende-se incorporar, no mínimo, cinco novos segmentos experimentais ao banco de dados de irregularidade longitudinal, no que tange ao interesse deste trabalho. Quatro segmentos experimentais já estão em operação desde o final do ano de 2022. Dois deles encontram-se na BR-158/RS, nas proximidades do munícipio de Cruz Alta/RS, entre o km 211+060 e km 211+360. Outros dois estão localizados nas proximidades do município de São Martinho da Serra/RS, na ERS-516/RS, entre o km 005+220 e km 005+550.

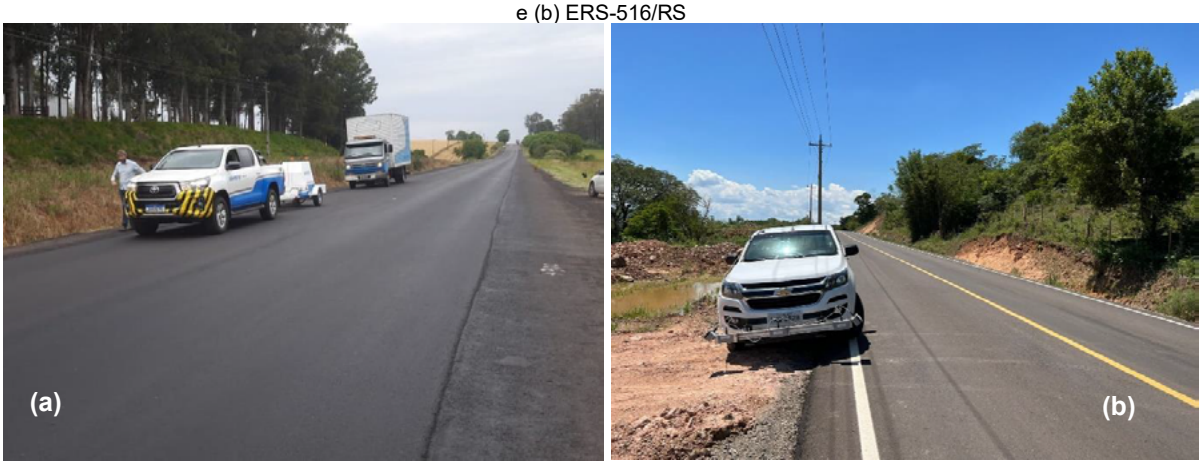
A Figura 1 destaca a localização geográfica aproximada dos trechos experimentais dentro do estado do Rio Grande do Sul. Já a Figura 2 exibe a realização dos levantamentos de campo nos segmentos, logo após a liberação ao tráfego.

Figura 1 – Localização dos segmentos experimentais na BR-158/RS e ERS-516/RS, dentro do estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de DNIT (2020)

Figura 2 – Levantamentos de campo nos segmentos experimentais após a liberação ao tráfego: (a) BR-158/RS e (b) ERS-516/RS



Fonte: Elaboração própria

Destaca-se, ainda, que o banco de dados do IPR/DNIT já tem mais 12 (doze) trechos no RS a serem incorporados ao banco de dados de irregularidade; totalizando, até o presente momento, 16 (dezesseis) segmentos adicionais. Com esses novos segmentos experimentais, pretende-se aumentar as condições de contorno do modelo de previsão empírico de irregularidade longitudinal exposto por Bueno *et al.* (2022) e, posteriormente, incorporar a rotina mecanística na previsão de irregularidade, atrelada às condições atuais de dimensionamento de

pavimentos com uso do sistema MeDiNa. Destaca-se também que, devido às características continentais do território brasileiro, uma maior abrangência de segmentos em localidades distintas àquelas expostas neste trabalho e por Bueno *et al.* (2022) seriam interessantes para ampliar ainda mais as condições de contorno do modelo de irregularidade. Sendo assim, os autores incentivam que estudos futuros com metodologias análogas a este trabalho direcionem esforços para ampliar a base de dados no território brasileiro.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esforços conjuntos exemplificados pelos trabalhos de Franco (2007), Nascimento (2008), Guimarães (2009), Nascimento (2015) e Fritzen (2016) já trouxeram evoluções significativas para a modelagem dos principais mecanismos de ruptura do sistema MeDiNa: deformação permanente e trincamento por fadiga. Todavia, entende-se haver uma lacuna na previsão do comportamento funcional do sistema, atrelado à evolução da irregularidade longitudinal, tal como ocorre em *softwares* internacionais de dimensionamento de pavimentos, como, por exemplo, o *AASHTO Ware Pavement ME Design*.

Entende-se que, com base nos resultados gerados nas etapas futuras do presente estudo, em adição àqueles já obtidos por Bueno (2019) e Bueno *et al.* (2022), será possível prever, dentro da rotina de avaliação do sistema MeDiNa, o desempenho funcional da estrutura do pavimento avaliado ao longo do tempo, empregado em associação a um indicador de qualidade construtiva.

Essa ação abre possibilidades importantes quando se trata do uso da plataforma de dimensionamento, uma vez que os resultados gerados, em caráter funcional, podem ter suas interpretações transferidas para análises econômicas. Sabe-se que a irregularidade longitudinal tem impacto relevante nos custos operacionais de usuários de rodovias, possibilitando definir argumentos para criação de sanções de bonificação e penalização aos responsáveis pela administração das respectivas rodovias, utilizando como critério um indicador que impacta diretamente o usuário.

Ainda, a melhoria na previsão de desempenho atrelada à maior abrangência dos métodos de dimensionamento segue uma tendência mundial de investir em critérios mais rigorosos para a seleção de materiais, dosagem e dimensionamento de estruturas de pavimentos.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IPR/DNIT, ANP/PETROBRAS e Pavesys Engenharia S/S Ltda. pelo apoio às pesquisas realizadas no âmbito do Termo de Execução Descentralizada nº 545/2020, celebrado entre a UFSM e o DNIT.

REFERÊNCIAS

ABDELAZIZ, N; EL-HAKIM, R, T, A; EL-BADAWY, S. M; AFIFY, H. A. International Roughness Index prediction model for flexible pavements. **International Journal of Pavement Engineering**. Taylor & Francis Online, Reino Unido, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E1215/93: Standard Specification for Trailers Used for Measuring Vehicular Response to Road Roughness**. West Conshohocken (EUA), 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E1926/08: Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements**. West Conshohocken (EUA), 2008.

BENNETT, C. R; PATERSON, W. D. O. **A Guide to Calibration and Adaptation (Highway Development and Management - HDM-4)**. 297 p. Highway Development and Management Series, versão 1.0, v.5. Birmingham (Reino Unido), 2000.

BHATTACHARJEE, S. **Imperfect Preventive Maintenance Strategy for Flexible Pavements Based on Threshold Reliability, Cost Optimization and Mechanistic Empirical Analysis**. 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington (EUA), 2016.

BUENO, L. D. **Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos**. 370 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2019.

BUENO, L. D.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. P.; NASCIMENTO, L. A. H.; SCHUSTER, S. L.; FRITZEN, M. A.; KIM, Y. R., BACK, A. H. **Contribution to the mechanistic-empirical roughness prediction in asphalt pavements**. Road Materials and Pavement Design. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2029758, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 159/85. Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos**. Rio de Janeiro/RJ, 1985.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Anteprojeto de engenharia para restauração da BR-158/RS**. Volume 01 - Relatório de Projeto. Superintendência Regional do DNIT no Estado do Rio Grande Do Sul. Cruz Alta/RS, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria-Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas em Transportes. **Publicação IPR-749: Guia para Execução de Segmentos Experimentais – PRO-MeDiNa**. 2ª Edição. Brasília, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **Instrução de serviço – IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 22 p. Brasília, 2021.

FIELD, A. **Discovering statistics using IBM SPSS**. (2nd ed.). London: Sage. Sandra C. Duhé. University of Lousiana, Lafayette (EUA), 2005.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 315 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecanístico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Relatório Parcial IV (A)**. Projeto DNIT TED nº 682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro/RJ, 2018.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecanístico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Manual de Utilização do Programa MeDiNa**. Projeto DNIT TED nº 682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro/RJ, 2020.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. 286 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2016.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 367 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2009.

KASZNAR, I. K. **Regressão Múltipla: Uma digressão sobre seus usos**. IBCI, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

KERALI, H. R. **The role of HDM-4 in Road Management**. Inn: First Road Transportation Technology Transfer Conference in Africa. p. 320 – 333. Tanzania, 2001.

NAKAHARA, S. M. **Estudo do Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Via Urbana sujeita a Tráfego Comercial Pesado**. 312 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2005.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 204p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. 335 p. Tese de Doutorado. North Carolina State University. North Carolina (EUA), 2015.

ODOKI, J. B.; KERALI, H. G. R. **Analytical framework and model descriptions (Highway Development and Management - HDM-4)**. 1184 p. Highway Development and Management Series, versão 1.0, v.4. Birmingham (Reino Unido), 2000.

PATERSON, W. D. O. **Road Deterioration and Maintenance Effects - Models for Planning and Management**. 472 p. World Bank. Washington (EUA), 1987.

PAVI, D. R. **Identificação de fatores construtivos que contribuem para o aumento da irregularidade longitudinal a partir do monitoramento de implantação e restauração de trechos rodoviários**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2019.

QUEIROZ, C. A. V. **Modelos de Previsão do Desempenho para Gerência de Pavimentos no Brasil** – GEIPOT, Brasília/DF, 1984.

QUEIROZ, C. A. V. **Performance prediction models for pavement management in Brazil**. 317 p. Tese de Doutorado. Faculty of the Graduate School of the University of Texas, Austin (EUA), 1981.

SCHERER, R. G. **Influência da irregularidade longitudinal de pavimentos na perda de carga no transporte de soja e nos demais custos operacionais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2022.

SONCIM, S. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia**. 241 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2011.

WATANATADA, T; HARRAL, C. G; PATERSON, W. D. O; DHARESHWAR, A. M; BHANDARI, A; TSUNOKAWA, K. **The Highway Design and Maintenance Standards Model** – Vol1: Description of the HDM-3 Model. 290 p. Washington (EUA), 1987.

YSHIBA, J. K. **Modelo de Desempenho de Pavimentos: Estudo de Rodovias do Estado do Paraná**. 340 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2003.

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. Prentice Hall International. New Jersey (EUA), 1984.