

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GLAUCIO FETTER**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA ESTIMATIVA  
DA VARIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO –  
ESTUDO DE CASO NA RODOVIA RSC-377**

**Alegrete  
2024**

**GLAUCIO FETTER**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA ESTIMATIVA  
DA VARIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO –  
ESTUDO DE CASO NA RODOVIA RSC-377**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Materiais e Estruturas

Orientador: Jaelson Budny

**Alegrete  
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

F421a Fetter, Glaucio

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA  
ESTIMATIVA DA VARIACÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO  
PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA RODOVIA RSC-377 / Glaucio Fetter.  
81 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2024.

"Orientação: Jaelson Budny".

1. Gerência de pavimentos. 2. Modelos de previsão de  
desempenho. 3. Índice Internacional de Irregularidade. I.  
Título.

**GLAUCIO FETTER**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA ESTIMATIVA DA  
VARIACÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO – ESTUDO DE CASO  
NA RODOVIA RSC-377**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 27/02/2024

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Jaelson Budny

Orientador

Unipampa

---

Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

UFSM

---

Prof. dr. Luis Eduardo Kostascki

Unipampa



Assinado eletronicamente por **JAEISON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2024, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Luciano Pivoto Specht, Usuário Externo**, em 26/03/2024, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/03/2024, às 08:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1375908** e o código CRC **D2BD2E58**.

## RESUMO

A infraestrutura rodoviária possui influência direta no desenvolvimento econômico regional, uma vez que desempenha função fundamental no transporte de mercadorias, com especial destaque ao escoamento agrícola, além do transporte de passageiros e integração as demais regiões do país. Para tanto, os Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) possuem importância vital para a garantia da qualidade de todos os componentes do sistema viário. No contexto de um SGP eficiente, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos de previsão de desempenho é uma das principais tarefas na gestão de pavimentos. Modelos de previsão de desempenho são desenvolvidos com o objetivo principal de obter uma estimativa quanto à variação de condições do pavimento, sejam essas funcionais ou estruturais, com base na avaliação dos fatores que ocasionem essa variação. A adoção desses modelos permite aos gestores o conhecimento acerca da condição de um determinado trecho do pavimento, permitindo a seleção de trechos prioritários e alocação de recursos de forma mais racional. No entanto, devem ser adotados modelos que sejam representativos das particularidades locais para permitir a correta inferência acerca das condições do pavimento. Nesse sentido, esta pesquisa possui como objetivo a aplicação de diferentes modelos de previsão de irregularidade longitudinal para trechos da rodovia RSC-377, a partir de dados disponíveis ao público como volume diário médio e irregularidade longitudinal. Foram selecionados quatro métodos de previsão de desempenho disponíveis na literatura brasileira, sendo dois destes com avaliação do Índice Internacional de Irregularidade (IRI) e os outros dois com avaliação do Quociente de Irregularidade (QI). Como resultado, busca-se contribuir para o entendimento do processo de degradação do pavimento em função da irregularidade longitudinal e aplicar conhecimentos teóricos acerca de previsão de desempenho de pavimentos aos trechos da rodovia selecionada.

Palavras-chave: Gerência de pavimentos. Modelos de previsão de desempenho. Índice Internacional de Irregularidade.

## **ABSTRACT**

Road infrastructure has a direct influence on regional economic development, as it plays a fundamental role in the transport of goods, with special emphasis on agricultural flow, in addition to passenger transport and integration with other regions of the country. To this end, the Pavement Management System (PMS) is vitally important for ensuring the quality of all components of the road system. Performance prediction models are developed with the main objective of obtaining an estimate regarding the variation in pavement conditions, whether functional or structural, based on the assessment of the factors that cause this variation. The adoption of these models allows managers to gain knowledge about the condition of a given section of pavement, allowing the selection of priority sections and allocation of resources in a more rational way. However, models that are representative of local particularities must be adopted to allow correct inference about pavement conditions. In this sense, this research aims to apply different performance prediction models for sections of the RSC-377 highway, based on publicly available data such as average daily volume and longitudinal roughness. Four performance prediction methods available in Brazilian literature were selected, two of which were assessed using the International Roughness Index (IRI) and the other two were assessed using the Irregularity Quotient (IQ). As a result, we seek to contribute to the understanding of the pavement degradation process due to longitudinal roughness and apply theoretical knowledge about predicting pavement performance to the selected highway sections.

**Keywords:** Pavement management. Performance prediction models. International Roughness Index.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de um SGP em níveis de rede e projeto . . . . .	17
Figura 2 – Fatores, subfatores e interações que podem afetar o desempenho do pavimento . . . . .	22
Figura 3 – Evolução da deterioração em rodovias pavimentadas . . . . .	23
Figura 4 – Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via . . . . .	25
Figura 5 – Diversas faixas de variação do IRI dependendo do caso e situação .	28
Figura 6 – Princípio de definição das irregularidades e configuração da barra laser para medida do IRI . . . . .	31
Figura 7 – Fluxograma de um SGP com alternativas das estratégias de M&R .	34
Figura 8 – Modelos de previsão de desempenho aplicados a seções de pavimento candidatas a tratamentos de manutenção preventiva . . . . .	35
Figura 9 – Extensão da rodovia RSC-377 no estado do Rio Grande do Sul . . .	42
Figura 10 – Trecho em estudo – 377RSC0170 . . . . .	44
(a) Localização geográfica . . . . .	44
(b) Imagem local . . . . .	44
Figura 11 – Trecho em estudo – 377RSC0180 . . . . .	45
(a) Localização geográfica . . . . .	45
(b) Imagem local . . . . .	45
Figura 12 – Trecho em estudo – 377RSC0185 – localização geográfica . . . . .	46
(a) Localização geográfica . . . . .	46
(b) Imagem local . . . . .	46
Figura 13 – Trecho em estudo – 377RSC0230 . . . . .	47
(a) Localização geográfica . . . . .	47
(b) Imagem local . . . . .	47
Figura 14 – Esquema da metodologia empregada . . . . .	48
Figura 15 – Exemplos de posicionamento dos sensores . . . . .	53
(a) Barra com cinco sensores e medidor de macrotextura . . . . .	53
(b) Barra com sensores para medida de irregularidade (1, 2, 5) , sensores para medida de afundamento de trilha de roda (1, 2, 3, 4 e 5) e sensor para medida de macrotextura (MT) . . . . .	53
Figura 16 – Exemplo de Tabela preenchida com resultados de IRI, QI, ATR e MT	54
Figura 17 – Variação do IRI nos anos de 2018 e 2022 para os diferentes trechos avaliados . . . . .	55
Figura 18 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Marcon (1996) - pt. 1 . . . . .	60
(a) Trecho 377RSC0170 . . . . .	60
(b) Trecho 377RSC0180 . . . . .	60
Figura 19 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Marcon (1996) - pt. 2 . . . . .	61
(a) Trecho 377RSC0185 . . . . .	61
(b) Trecho 377RSC0230 . . . . .	61
Figura 20 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Lerch (2002) . .	63
(a) Trecho 377RSC0170 . . . . .	63
(b) Trecho 377RSC0180 . . . . .	63



(c) Trecho 377RSC0185 . . . . .	63
(d) Trecho 377RSC0230 . . . . .	63
Figura 21 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Yshiba (2003) -	
pt. 1 . . . . .	66
(a) Trecho 377RSC0170 . . . . .	66
(b) Trecho 377RSC0180 . . . . .	66
Figura 22 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Yshiba (2003) -	
pt. 2 . . . . .	67
(a) Trecho 377RSC0185 . . . . .	67
(b) Trecho 377RSC0230 . . . . .	67
Figura 23 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Vitorello (2008) -	
pt. 1 . . . . .	70
(a) Trecho 377RSC0170 . . . . .	70
(b) Trecho 377RSC0180 . . . . .	70
Figura 24 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Vitorello (2008) -	
pt. 2 . . . . .	71
(a) Trecho 377RSC0185 . . . . .	71
(b) Trecho 377RSC0230 . . . . .	71
Figura 25 – Síntese de resultados para IRI com os modelos – Trecho 377RSC0170	72
Figura 26 – Síntese de resultados para IRI com os modelos – Trecho 377RSC0180	73
Figura 27 – Síntese de resultados para IRI com os modelos – Trecho 377RSC0185	74
Figura 28 – Síntese de resultados para IRI com os modelos – Trecho 377RSC0230	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais atividades e decisões dentro de um SGP completo . . . .	19
Tabela 2 – Níveis de serventia . . . . .	24
Tabela 3 – Condição do pavimento em relação ao QI e ao IRI . . . . .	27
Tabela 4 – Correlação do IRI com as condições de rolamento . . . . .	28
Tabela 5 – Indicadores de Desempenho - Avaliação Anual . . . . .	29
Tabela 6 – Classificação dos equipamentos medidores de irregularidade longitudinal . . . . .	30
Tabela 7 – Trechos avaliados da RSC 377 . . . . .	43
Tabela 8 – Camadas do pavimento conforme projeto . . . . .	43
Tabela 9 – Fator de veículo em função da classificação quanto às cargas . . . .	49
Tabela 10 – Fatores de equivalência de carga da AASHTO . . . . .	50
Tabela 11 – Fatores de equivalência de carga do USACE . . . . .	50
Tabela 12 – Modelos de desempenho selecionados e variáveis necessárias para aplicação . . . . .	54
Tabela 13 – Volume Diário Médio e porcentagem relativa a cada tipo de carga para os diferentes trechos avaliados . . . . .	56
Tabela 14 – Valores de número N por ano e acumulados para os trechos avaliados	57
Tabela 15 – Valores mínimos exigidos quanto ao CBR e expansão para diferentes camadas do pavimento . . . . .	57
Tabela 16 – Valor de CBR adotado para as diferentes camadas do pavimento . .	57
Tabela 17 – Valores de Número Estrutural Corrigido pré-intervenção (SNC1) para os diferentes trechos avaliados . . . . .	58
Tabela 18 – Valores de Número Estrutural Corrigido pós-intervenção (SNC2) para os diferentes trechos avaliados . . . . .	58
Tabela 19 – Resultados para o trecho 377RSC0170 - método de Marcon . . . .	59
Tabela 20 – Resultados para o trecho 377RSC0180 - método de Marcon . . . .	59
Tabela 21 – Resultados para o trecho 377RSC0185 - método de Marcon . . . .	59
Tabela 22 – Resultados para o trecho 377RSC0230 - método de Marcon . . . .	59
Tabela 23 – Resultados de variação do IRI ( $\Delta$ IRI) obtidos pelo método de Lerch	62
Tabela 24 – Resultados para o trecho 377RSC0170 - método de Yshiba (2003)	64
Tabela 25 – Resultados para o trecho 377RSC0180 - método de Yshiba (2003)	64
Tabela 26 – Resultados para o trecho 377RSC0185 - método de Yshiba (2003)	65
Tabela 27 – Resultados para o trecho 377RSC0230 - método de Yshiba (2003)	65
Tabela 28 – Resultados para o trecho 377RSC0170 - método de Vitorello (2008)	68
Tabela 29 – Resultados para o trecho 377RSC0180 - método de Vitorello (2008)	68
Tabela 30 – Resultados para o trecho 377RSC0185 - método de Vitorello (2008)	69
Tabela 31 – Resultados para o trecho 377RSC0230 - método de Vitorello (2008)	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CBR – *California Bearing Ratio*, Índice de Suporte Califórnia

CNT – Confederação Nacional dos Transportes

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

GEIPOT – Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes

HDM – *Highway Development and Management System*

IRI – Índice de Irregularidade Internacional

N – Número de solicitações de eixo padrão

PMF – Pré-misturado a frio

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

QI – Quociente de Irregularidade

SGP – Sistema de Gerência de Pavimentos

SMITR – Sistema medidor de irregularidade do tipo resposta

SN – Número estrutural

SNC – Número estrutural corrigido

VDM – Volume Diário Médio

VSA – Valor de Serventia Atual

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Estrutura do trabalho	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	Sistemas de Gerência de Pavimentos	16
2.2	Avaliação de pavimentos	20
2.2.1	Deterioração de pavimentos	20
2.2.2	Avaliação das condições de superfície	23
2.2.3	Irregularidade longitudinal	25
2.2.4	Número Estrutural Corrigido (SNC)	31
2.3	Estratégias de Manutenção e Reabilitação de pavimentos	33
2.4	Modelos de desempenho de pavimentos	35
2.4.1	Modelo proposto por Marcon (1996)	38
2.4.2	Modelo proposto por Yshiba (2003)	39
2.4.3	Modelo proposto por Lerch (2002)	41
2.4.4	Modelo proposto por Vitorello (2008)	41
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>42</b>
3.1	Delimitação	42
3.1.1	Trecho 377RSC0170	43
3.1.2	Trecho 377RSC0180	44
3.1.3	Trecho 377RSC0185	45
3.1.4	Trecho 377RSC0230	46
3.2	Métodos empregados	47
3.2.1	Levantamento de dados	48
3.2.1.1	Determinação do Número N	48
3.2.2	Dados de Índice de Irregularidade Longitudinal - anos 2018 e 2022	51
3.2.3	Aplicação dos modelos de previsão de desempenho	54
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>55</b>
4.1	Levantamento de dados	55
4.1.1	Dados de IRI	55
4.1.2	Cálculo do número N	55
4.1.3	Cálculo do Número Estrutural Corrigido (SNC)	57
4.1.4	Modelos de previsão de desempenho avaliados	58
4.1.4.1	Modelo proposto por Marcon (1996)	58
4.1.4.2	Modelo proposto por Lerch (2002)	62
4.1.4.3	Modelo proposto por Yshiba (2003)	64
4.1.4.4	Modelo proposto por Vitorello (2008)	68
4.2	Comparação com a conversão de QI para IRI para os modelos avaliados	71

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um país com dimensões continentais como o Brasil, uma infraestrutura de transportes eficiente é de fundamental importância na construção de uma economia competitiva e produtiva. A predominância do modal rodoviário é originada no final da década de 1950, onde políticas públicas priorizaram a utilização da malha rodoviária como estratégia para integração do território nacional. Características como a flexibilidade e capilaridade, relacionados aos pontos de embarque, desembarque e acesso aos demais modais, contribuíram para a ratificação do modal rodoviário como preponderante no país. Embora seja reconhecidamente um pilar da economia brasileira, a infraestrutura rodoviária carece de direcionamento de recursos para expansão e manutenção de sua extensão (Conselho Nacional de Trânsito, 2022a).

Conforme levantamento realizado pelo Conselho Nacional de Trânsito (2022b), o modal rodoviário é responsável por 65% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros no país. Como particularidade do estado do Rio Grande do Sul, dados de 2017 indicam o modal rodoviário é responsável por 88% do volume transportado (Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2022). Da extensão total de rodovias no país, de 1.720.909,0 km, apenas 12,4% é pavimentada – o que corresponde a uma densidade de malha rodoviária inferior a países como Equador, Canadá, Argentina, Uruguai e Rússia. A disparidade também é refletida na distribuição geográfica das rodovias no país. Enquanto a região Sul apresenta a maior extensão de rodovias federais pavimentadas, com aproximadamente 20,5 km/km<sup>2</sup>, se observa uma densidade de pouco mais de um décimo na região Norte, com 2,6 km/km<sup>2</sup> (Conselho Nacional de Trânsito, 2022b).

Dentre os principais benefícios obtidos pela constante melhoria no estado do pavimento, destaca-se o acréscimo da segurança e do conforto; a redução no custo de operação dos veículos; a redução dos custos futuros de conservação; a economia do tempo na viagem de passageiros e cargas; a redução dos acidentes e o estímulo ao desenvolvimento econômico em nível regional e nacional. Dessa forma, a garantia de qualidade e conservação da malha rodoviária é indissociável do desenvolvimento econômico do país como um todo.

Verifica-se, no entanto, um déficit de investimentos na ampliação da disponibilidade e na distribuição da malha rodoviária, oriundo de uma sucessão de restrições orçamentárias nas últimas décadas (Conselho Nacional de Trânsito, 2022b). Como resultado, restringiu-se a aplicação de recursos na manutenção e na recuperação das rodovias existentes no país, de modo a acompanhar a demanda proveniente do transporte de cargas e passageiros.

Para além da contribuição sócio-econômica do pavimento rodoviário ao seu contexto geográfico, é necessário que o mesmo atenda ao seu objetivo básico enquanto

obra de engenharia: a garantia de trafegabilidade sob quaisquer condições climáticas, garantindo ao seus usuários conforto ao rolamento e segurança, aliado à seleção da melhor técnica e visando a economia (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Este objetivo se traduz na garantia de um adequado desempenho do pavimento para com seu usuário. O conceito de desempenho está associado a três aspectos distintos: funcional, estrutural e de segurança (BERNUCCI *et al.*, 2022). A avaliação estrutural, fora do escopo deste trabalho, está relacionada ao conceito de capacidade de carga do pavimento para suportar as cargas provenientes do tráfego, enquanto a avaliação de segurança diz respeito às condições de aderência pneu-pavimento devido à textura da superfície de rolamento.

A avaliação funcional é relacionada às condições da superfície do pavimento e como esta condição influencia no conforto ao rolamento. Na década de 1960, uma extensa pesquisa foi realizada no âmbito de pavimentação rodoviária nos Estados Unidos da América, sob jurisdição da AASHO (*American Association of State Highway Officials*). A partir de pistas experimentais, foi concebido o primeiro método para avaliação funcional de um trecho de pavimento – o da serventia (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2022).

O conceito de serventia, desenvolvido por Carey e Irick (1960), é definido como a habilidade de um trecho de pavimento, em determinada época de observação, de servir ao tráfego solicitante com elevado volume e elevada velocidade. A capacidade de servir satisfatoriamente ao tráfego é entendido como o seu desempenho, interpretado como a variação da serventia a partir do tempo e/ou tráfego (FERNANDES JÚNIOR; ODA; ZERBINI, 2006). A pesquisa desenvolvida teve metodologia de avaliação subjetiva, através da qual uma equipe de avaliadores atribui pareceres sob a forma de notas, em uma escala de zero (péssimo) a cinco (ótimo) para o trecho em análise. Dentre as diversas considerações obtidas através do *AASHO Road Test*, concluiu-se que a irregularidade longitudinal é o atributo do pavimento que mais impacta a percepção do usuário quanto a qualidade ao rolamento.

A irregularidade longitudinal é definida como o conjunto dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal do projeto geométricos, que resultam no decréscimo da qualidade do rolamento. Dois parâmetros são comumente utilizados para a sua medição: o Índice Internacional de Irregularidade (IRI) e o Quociente de Irregularidade (QI).

A relevância da irregularidade longitudinal é justificada pelo seu emprego em decisões inerentes aos sistemas de gerência de pavimentos. A partir dos valores obtidos de irregularidade longitudinal de uma pista ou trecho de pavimento, é possível estimar de forma quantitativa a serventia, além de subsidiar no processo de diagnóstico da situação do pavimento e da definição das soluções de restauração ou manutenção necessárias (PINTO; PREUSSLER, 2010; BERNUCCI *et al.*, 2022).

O emprego de modelos de previsão de desempenho, no contexto de um Sistema de Gerência de Pavimentos, permite aos órgãos rodoviários inferir acerca de um tempo ótimo de implementação de atividades de manutenção, otimizando a alocação de recursos orçamentários e atendendo a critérios de priorização entre os trechos avaliados.

Em um cenário de escassez de base de dados disponível para consulta, vale-se da aplicação de métodos de previsão de desempenho constantes em literatura para a estimativa de parâmetros relativos à avaliação funcional do pavimento, como o IRI e o QI, fornecendo indicativos do mecanismo de variação funcional do pavimento.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste da aplicação de diferentes métodos de previsão de irregularidade tendo em vista as condições de irregularidade longitudinal observadas em trechos da rodovia estadual RSC-377.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Aplicação de base de dados aberta disponibilizada pelo DAER/RS nos modelos de previsão de desempenho previamente definidos;
- Comparação dos resultados obtidos quanto ao Índice Internacional de Irregularidade (IRI) e Quociente de Irregularidade (QI).

## 1.2 Justificativa

Historicamente, se observa o contingenciamento de recursos financeiros destinados ao modal rodoviário no País. Esta limitação orçamentária é refletida, em um primeiro momento, na deterioração da condição de rolamento do pavimento para seu usuário.

Em pesquisa desenvolvida no ano de 2022, o Conselho Nacional do Trânsito enumera diversas considerações sobre as condições da malha rodoviária do país. Pela metodologia desenvolvida pelo órgão, são apontados indicadores e características quanto o pavimento, a sinalização e a geometria da malha pavimentada (Conselho Nacional de Trânsito, 2022b). O levantamento realizado no estado do Rio Grande do Sul com extensão de 8.786 km, correspondente a 8,0% do total pesquisado no Brasil, teve como síntese os resultados que seguem:

- **Estado geral:** 66,0% da malha rodoviária pavimentada do estado apresenta algum tipo de problema, sendo considerada regular, ruim ou péssima. 34,0% da malha é considerada ótima ou boa.



- **Pavimento:** 56,7% da extensão da malha rodoviária avaliada do estado apresenta problemas, 43,3% está em condição satisfatória, e 0,1% está com o pavimento totalmente destruído.
- **Sinalização:** 55,0% da extensão da malha rodoviária da região é considerada regular, ruim ou péssima. 45,0%, ótima ou boa. 3,9% da extensão está sem faixa central e 9,8% não tem faixas laterais.
- **Geometria da via (traçado):** 68,8% da extensão da malha rodoviária do estado apresenta algum tipo de problema. 33,2% está ótima ou boa. As pistas simples predominam em 91,5% da extensão. Falta acostamento em 37,3% dos trechos avaliados. 29,3% dos trechos com curvas perigosas não tem sinalização.
- **Pontos críticos:** a Pesquisa identificou 31 no estado.
- **Custo operacional:** as condições do pavimento no estado geram um aumento de custo operacional do transporte de 32,5%. Isso reflete na competitividade do Brasil e no preço dos produtos.
- **Investimentos necessários:** para recuperar as rodovias do Rio Grande do Sul, com ações emergenciais, de restauração e de reconstrução, são necessários R\$ 6,43 bilhões.
- **Meio ambiente:** em 2022, estima-se que haverá um consumo desnecessário de 87,1 milhões de litros de diesel devido à má qualidade do pavimento da malha rodoviária no estado. Este desperdício custará R\$ 397,36 milhões aos transportadores. (Conselho Nacional de Trânsito, 2022b, p. 28)

Destaca-se, em específico, a porcentagem do pavimento determinada com problemas, correspondente a 56,7% do total no estado. Este percentual se reflete na diminuição da competitividade e dificuldade do escoamento dos produtos agropecuários produzidos no Rio Grande do Sul, responsáveis pelo desenvolvimento da economia estadual e impulsionadores do Produto Interno Bruto (PIB) estadual. O estado é o maior produtor de arroz com casca, fumo em folha, segundo maior produtor de trigo e terceiro maior produtor de soja no País, além da significativa contribuição da pecuária de bovinos, ovinos e suínos (Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2022).

Sendo o desenvolvimento econômico a níveis regional e estadual fortemente dependente das condições da infraestrutura rodoviária, justifica-se a necessidade do constante levantamento e acompanhamento da situação da malha rodoviária quanto ao seu desempenho. No entanto, para a execução desta atividade, encontra-se o principal gargalo: recursos orçamentários e de pessoal para a constante avaliação funcional e estrutural da malha rodoviária estadual. Na ausência de indicadores anuais das condições das rodovias, podem ser desenvolvidos e utilizados modelos de previsão de desempenho para obter uma estimativa de situações futuras e da necessidade de intervenções de manutenção ou recuperação. A aplicação destes modelos de desempenho proporciona indicativos matemáticos que tornem o processo de priorização de manutenção mais racional, com a vantagem da fundamentação em dados do próprio trecho em estudo.

Utilizando a base de dados disponibilizada pelo Sistema Estadual Rodoviário do DAER (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem, 2023b), esta pesquisa fundamenta-se na aplicação de modelos de previsão de desempenho propostos por pesquisadores nacionais aplicados aos dados locais da rodovia RSC 377.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Essa dissertação está dividida em cinco capítulos, descritos na sequência.

No **Capítulo 1**, estão descritos uma introdução à temática abordada, onde são apresentados conceitos introdutórios aos modelos de previsão de desempenho de pavimentos. São descritos os objetivos desta pesquisa e a relevância de seu desenvolvimento.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica consultada para o embasamento teórico da presente pesquisa.

No **Capítulo 3**, é apresentada a metodologia utilizada na execução do trabalho, visando atingir os objetivos apresentados anteriormente. São abordados aspectos como a localização dos trechos avaliados, sua extensão e a metodologia empregada para a estimativa da variação do Índice Internacional de Irregularidade e do Quociente de Irregularidade a partir de diferentes métodos de previsão de desempenho apresentados em literatura nacional.

No **Capítulo 4**, são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da aplicação da metodologia previamente definida. Na sequência, no **Capítulo 5**, faz-se as conclusões e recomendações para pesquisas futuras que abranjam a temática abordada.

Ao final desta pesquisa, estão enumeradas as referências bibliográficas consultadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, serão apresentando os conceitos bibliográficos norteadores desta pesquisa, sendo contemplados os preceitos básicos de Sistemas de Gerência de Pavimentos e seus níveis e a avaliação de pavimentos flexíveis quanto a serventia e à irregularidade longitudinal. São abordadas também as principais definições e estratégias para a recuperação de pavimentos flexíveis e sua importância no contexto rodoviário.

Ao fim do Capítulo, são retratados alguns dos principais modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis desenvolvidos no Brasil, aplicados e avaliados nesta pesquisa.

### 2.1 Sistemas de Gerência de Pavimentos

A gerência de pavimentos, de acordo com *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, é definida como "um conjunto de ferramentas ou métodos que ajudam os tomadores de decisão a encontrar estratégias ótimas para fornecer, avaliar e manter pavimentos em condições de serviço por um determinado período de tempo" (AASHTO, 2012, p. 20).

De acordo com o Manual de Gerência de Pavimentos (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011), o objetivo principal de um SGP consiste na obtenção da melhor aplicação possível para os recursos públicos disponíveis, no sentido de oferecer um transporte rodoviário seguro, compatível e econômico. Ainda, são objetivos de um SGP a melhoria na eficiência do processo de tomada de decisões e garantir a consistência na tomada de decisões dentro da organização responsável (PETERSON, 1987).

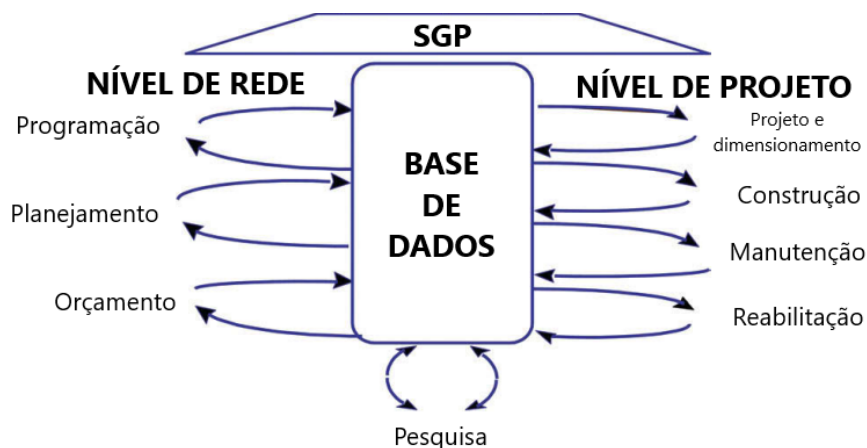
A gerência de pavimentos permite aos órgãos administrativos a desempenhar as seguintes funções:

1. Avaliar as condições presentes e futuras do pavimento;
2. Estimar os recursos necessários para atingir níveis de condições especificados;
3. Identificar as recomendações de preservação e restauração do pavimento que otimizem o uso dos recursos disponíveis;
4. Ilustrar as consequências de diferentes níveis de investimento e estratégias de manutenção nas condições de curto e longo prazo do pavimento;
5. Justificar e garantir o aumento na destinação de recursos para a manutenção e restauração do pavimento;
6. Avaliar os impactos a longo prazo da mudança nas propriedades dos materiais, práticas construtivas ou procedimentos de dimensionamento, ou a combinação destas mudanças, no desempenho do pavimento (AASHTO, 2012, p. 20)

De forma genérica, as atividades relacionadas à gerência de pavimentos e os componentes do sistema são definidos a partir de dois níveis administrativos: nível

de rede e nível de projeto (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994). Na Fig. 1, estão apresentadas as principais atividades executadas em cada um destes níveis.

Figura 1 – Componentes de um SGP em níveis de rede e projeto



Fonte: Adaptado de Haas e Hudson (2015)

A gerência em nível de rede tem como característica estudar uma grande área ou malha viária, ou seja, deve identificar trechos prioritários para manutenção. Neste nível, as necessidades de manutenção e de reabilitação dos pavimentos abrangidos são ordenadas, hierarquizadas e priorizadas, a partir de critérios técnico-econômico ou políticos, cuja resposta primária é a elaboração de um programa prioritário de manutenção, reabilitação ou construção de novos pavimentos. Em nível de rede, as decisões são tomadas para um grande número de projetos, ou ainda, para uma rede inteira (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; BASÍLIO, 2002). Um exemplo de gerência de pavimentos em nível de rede é a utilização de gráficos para o estabelecimento de programas de reabilitação do pavimento e a justificativa orçamentária por detrás deste.

Algumas características de aplicações da gerência em nível de rede são:

- Identificação de projetos candidatos à melhoramentos, considerando a taxa de deterioração;
- Priorização de projetos candidatos, considerando características de desempenho, tráfego, custo ao usuário, e outros fatores locais;
- Geração de requisitos orçamentários a curto e longo prazo para atendimento das necessidades do órgão rodoviário;
- Avaliar a condição atual do sistema viário e prever as condições futuras com base no financiamento aplicado (PETERSON, 1987).

A gerência em nível de projeto tem atuação em atividades detalhadas do próprio projeto e da execução de obras em um trecho específico da malha viária (Departamento

Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011). Neste nível, um SGP deve ser capaz de sintetizar as necessidades anuais da malha viária, cuja avaliação é baseada nos levantamentos de condições dos pavimentos. A partir dessa avaliação, é facilitada a coerência no planejamento, programação e alocação de recursos financeiros (BASÍLIO, 2002). Exemplos de atividades incluídas na gerência em nível de projeto são:

- Estabelecimento de prioridades para manutenção, reabilitação e reconstrução a partir dos critérios definidos por agentes superiores de gerência;
- Obtenção de *feedback* relativo à performance do pavimento para fornecer informações para o projeto de pavimentos, construção e atividades de manutenção;
- Aplicação de análises de custo por ciclo de vida quando avaliando alternativas;
- Consideração de parâmetros de projeto, como a resistência do solo de fundação, número de solicitações de eixo padrão de projeto, especificações de materiais, etc., quando projetando um pavimento (PETERSON, 1987).

A Tabela 1 apresenta, em resumo, as principais atividades e decisões dentro de um Sistema de Gerência de Pavimentos, em nível de rede e de projeto.

Tabela 1 – Principais atividades e decisões dentro de um SGP completo

Atividades Básicas	Nível operacional	
	Nível de Rede	Nível de Projeto
<b>Dados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Segmentos homogêneos;</li> <li>• Dados:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Inventário de campo: irregularidade, deterioração da superfície, atrito, deflexão, geometria;</li> <li>b. Outros: tráfego, custos unitários.</li> </ol> </li> <li>• Processamento de dados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dados detalhados: estruturais, materiais das camadas, tráfego, clima e custos unitários;</li> <li>• Subtrechos homogêneos;</li> <li>• Processamento de dados.</li> </ul>
<b>Crítérios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mínimos: serventia, atrito, adequação estrutural.</li> <li>• Máximos: deterioração.</li> <li>• Custos máximos: do usuário e de conservação.</li> <li>• Custos máximos para os programas de obras.</li> <li>• Critérios de seleção: benefícios máximos e máxima eficácia dos investimentos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máxima irregularidade após a construção;</li> <li>• Mínima adequação estrutural e atrito;</li> <li>• Custos máximos para o projeto;</li> <li>• Interrupção máxima do tráfego;</li> <li>• Critérios de seleção: menores custos totais.</li> </ul>
<b>Análises</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidades atuais da rede;</li> <li>• Previsões de desempenho e necessidades futuras;</li> <li>• Alternativas de conservação e de restauração;</li> <li>• Avaliação técnica e econômica;</li> <li>• Análise para priorização;</li> <li>• Avaliação de níveis orçamentários alternativos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alternativas inerentes ao projeto;</li> <li>• Análises técnicas: previsões de desempenho e de deterioração;</li> <li>• Análises econômicas no ciclo de vida.</li> </ul>
<b>Seleção</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorização final dos projetos de restauração e de construção;</li> <li>• Programação final das operações de conserva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhor alternativa para o projeto: restauração ou reconstrução;</li> <li>• Medidas de conserva para diversas seções.</li> </ul>
<b>Implementação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programação, contratos;</li> <li>• Monitoramento do programa;</li> <li>• Atualização do planejamento orçamentário e financeiro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atividades de construção, controle dos contratos e registros do andamento das obras;</li> <li>• Atividades de conserva, gerenciamento da conservação e registros associados.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Serafini (2005)

## 2.2 Avaliação de pavimentos

Dentro do conjunto de atividades relativas à implementação de um Sistema de Gerência de Pavimentos, a avaliação é uma das etapas de maior importância por ser o ponto de partida para quaisquer decisões a serem tomadas neste sistema (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011).

Três fatores devem ser considerados como subsídios à tomada de decisão quanto à necessidade ou não de restauração do pavimento, no âmbito gerencial. São estes:

- a. **Desempenho Funcional:** relacionado à capacidade de o pavimento satisfazer sua função primordial, ou seja, fornecer uma superfície com serventia adequada, em termos de qualidade de rolamento;
- b. **Desempenho estrutural:** refere-se à capacidade de o pavimento manter sua integridade estrutural, sem apresentar falhas significativas, sendo avaliado pelos ensaios defletoométricos;
- c. **Desempenho Operacional e de Segurança:** envolve aspectos referentes ao pavimento, sinalização, demanda do usuário e comportamento humano. Quanto às características do pavimento, avalia-se o atrito pneu-pavimento (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006b; Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011)

A coleta de dados referente ao desempenho funcional, estrutural e de segurança do pavimento é tarefa prioritária na implantação e manutenção de um SGP eficaz, uma vez que é a partir destes dados que são tomadas decisões quanto a adoção ou não de intervenções de manutenção e restauração (AASHTO, 2012).

### 2.2.1 Deterioração de pavimentos

O pavimento, como estrutura de engenharia, representa complexidade por envolver diversas variáveis interdependentes entre si: solicitações de tráfego, solicitações climáticas e ambientais, técnicas construtivas empregadas, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade dos materiais empregados, dentre outras (PINTO; PREUSSLER, 2010).

Além disso, os pavimentos rodoviários são concebidos para durarem um determinado período ou ciclo de vida, onde a cada período o pavimento apresenta inicialmente uma condição chamada ótima e, devido ao complexo processo de degradação, atinge uma condição ruim. Este decréscimo na serventia do pavimento ao longo do tempo caracteriza a sua degradação (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011).

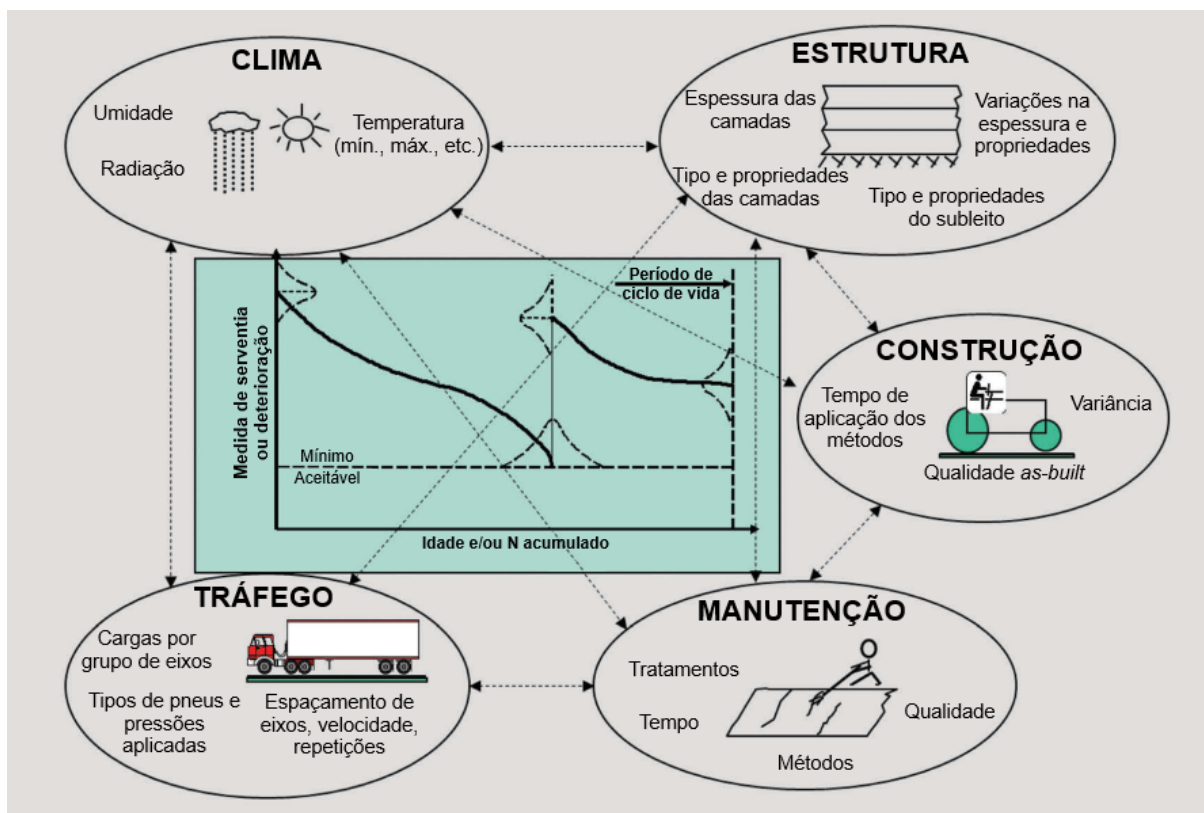
De forma generalizada, a deterioração dos pavimentos pode ser dividida conforme suas causas (FERNANDES JÚNIOR; ODA; ZERBINI, 2006; BERNUCCI *et al.*, 2022):

- **Solicitações do tráfego:** carga por eixo, tipo de eixo (simples, tandem duplo e tandem triplo), tipo de rodagem (simples, duplo e extralargo), pressão de enchimento dos pneus, tipo de suspensão do veículo (feixe de molas e pneumático), excesso de carga permitida;
- **Solicitações climáticas:** exposição solar, contribui para a oxidação e envelhecimento do revestimento asfáltico; variações na temperatura, onde o aumento reduz a viscosidade dos ligantes asfálticos e conseqüentemente a resistência das misturas asfálticas às deformações permanentes, enquanto temperaturas muito baixas podem induzir a formação de trincamento na camada asfáltica por retração; e no teor da umidade; infiltração devido à chuva, reduzindo a capacidade de suporte da estrutura;

Um dos maiores desafios se tratando em modelos de desempenho reside na identificação e caracterização de cada variável independente que afeta a deterioração do pavimento (HAAS; HUDSON, 2015). De forma esquemática, são apresentados na Fig. 2 os principais fatores, subfatores e interações responsáveis pela alteração no desempenho de um pavimento.



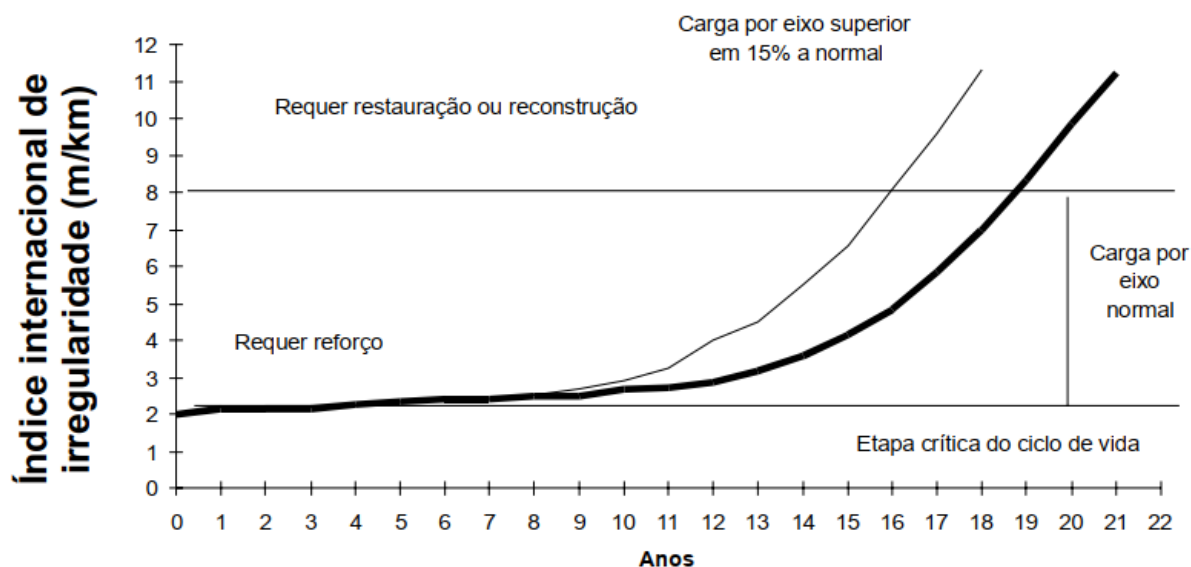
Figura 2 – Fatores, subfatores e interações que podem afetar o desempenho do pavimento



Fonte: Adaptado de Haas e Hudson (2015)

A evolução da deterioração e a velocidade em que acontece é diretamente dependente destes fatores. Conforme apresentado na Fig. 3, a deterioração da rodovia é marcada por três estágios principais, em função da idade do pavimento e das medidas de irregularidade observadas durante esse período.

Figura 3 – Evolução da deterioração em rodovias pavimentadas



Nota: Rodovia em CBUQ; SN = 3,5 e VDM = 2500

Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006b)

Esta progressão de deterioração, conforme descrito pelo Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006b), segue uma trajetória não linear, onde é possível adotar um número maior de opções na escolha e programação de atividades de conservação. Neste período inicial, observa-se que rodovias pavimentadas bem projetadas apresentam deterioração muito pouco visível e sem ônus ao usuário da via. Através de conservação rotineira, é possível manter esse estado por um custo relativamente baixo.

No período seguinte, com a evolução da deterioração em razão dos fatores acima citados, é necessária uma intervenção de modo a permanecer em um bom estado. Intervenções como selagens, recapeamentos ou reforço do revestimento reestabelecem a qualidade ao rolamento e a capacidade estrutural da rodovia.

### 2.2.2 Avaliação das condições de superfície

A avaliação funcional de um pavimento, em conformidade com a definição proposta pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2011), é relacionada à apreciação do estado da superfície e da forma como este estado influencia no conforto ao rolamento do usuário. A serventia é definida como "a capacidade de um pavimento, construído em determinado trecho, servir ao usuário em um dado momento quanto ao seu conforto ao rolamento (e em parte quanto à segurança)" (BERNUCCI *et al.*, 2022). Este critério pode ser avaliado de forma subjetiva ou ainda por medidas físicas correlacionáveis, como o Índice Internacional de Irregularidade (IRI) e o Quociente de Irregularidade (QI).

O primeiro método desenvolvido para a avaliação funcional de pavimentos foi concebido por Carey e Irick (1960) para as pistas experimentais da *AASHO* (*American Association of State Highway Officials*). A partir deste estudo, foi desenvolvida a avaliação subjetiva *Present Serviceability Rating* (PSR), uma atribuição numérica em uma escala de 0 a 5, obtida através da média de nota dos avaliadores para o conforto ao rolamento de um veículo trafegando em um determinado trecho, em um dado momento da vida do pavimento (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011).

No Brasil, esta avaliação subjetiva é denominada de Valor de Serventia Atual (VSA), com normativa do DNIT – Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos (DNIT, 2003). Neste procedimento, um grupo de avaliadores, constituído por cinco membros, percorre o segmento em análise em um veículo de passeio médio, em uma velocidade próxima da velocidade limite estabelecida para o trecho em questão. Os avaliadores deverão atribuir notas no intervalo de 0 a 5, em função do conforto ao rolamento (PINTO; PREUSSLER, 2010). A Tabela 2 apresenta os cinco níveis de serventia associados ao VSA.

Tabela 2 – Níveis de serventia

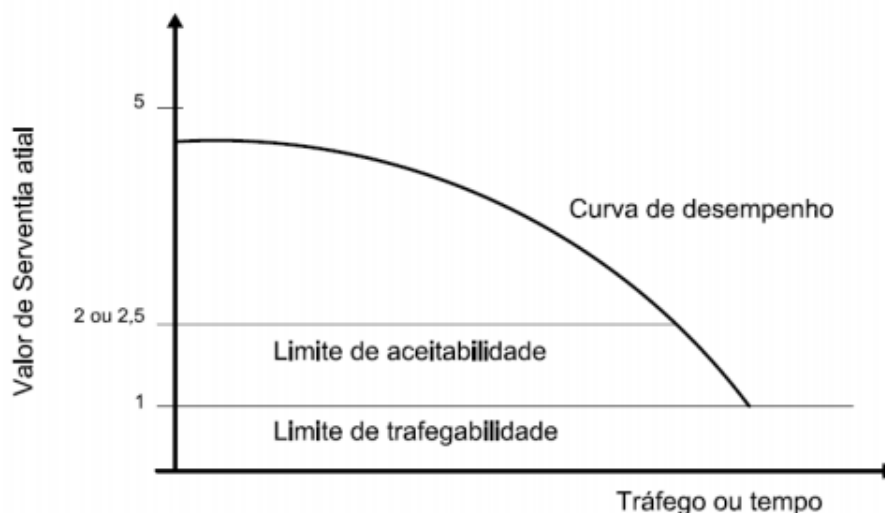
<b>Padrão de conforto ao rolamento</b>	<b>Avaliação (faixa de notas)</b>
Excelente	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

**Fonte:** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2011)

Observa-se, em geral, valores elevados de VSA logo após a construção do pavimento, uma vez que este exibe superfície suave e relativa ausência de irregularidade (BERNUCCI *et al.*, 2022). No entanto, a condição de perfeição, sem qualquer irregularidade (VSA = 5) não é encontrada na prática, uma vez que a avaliação subjetiva depende da qualidade executiva e das alternativas de pavimentação selecionadas (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011).

A serventia tem como característica o seu decaimento em função do tempo e/ou tráfego, conforme ilustrado na Fig. 4. Quando um determinado segmento é avaliado ao longo dos anos, esta variação na serventia resulta em uma avaliação do desempenho do pavimento, cujo resultado pode ser utilizado na definição dos estágios da vida útil e na definição de critérios para intervenções de manutenção (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Figura 4 – Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Os limites de aceitabilidade e trafegabilidade, apresentados na Fig. 4, referem-se a dois valores-limites de VSA relacionados à aceitação do usuário da via e de capacidade da via, respectivamente. O limite de aceitabilidade é associado ao conforto do usuário quanto às condições de rolamento da via, sendo abaixo deste limite inaceitável. O valor limite, de 2 ou 2,5 depende da classe da rodovia e o tráfego atuante. Uma vez que o valor de VSA atinja este valor, deverá ser realizada uma manutenção corretiva, necessária para a elevação do VSA a níveis superiores ao encontrado (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Dada a inexistência ou insuficiência de atividades de manutenção ao atingir este limite, o pavimento terá sua degradação continuada, podendo chegar ao limite de trafegabilidade. Nesta condição, onde o valor de VSA é próximo de 1, exige-se a necessidade de reconstrução do pavimento para novamente atingir valores de VSA compatíveis com o conforto exigido (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011). Ressalta-se que a manutenção não deve ser realizada apenas na chegada ao limite de trafegabilidade, uma vez que o custo associado à reconstrução do pavimento é aproximadamente dez vezes superior ao custo de restauração (BALBO, 2007).

### 2.2.3 Irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal, conforme Bernucci *et al.* (2022), corresponde ao somatório dos desvios da superfície do pavimento, tendo como referência um plano do projeto geométrico, que influencia diretamente na dinâmica do veículo, no efeito dinâmico das cargas, no conforto ao rolamento e na drenagem superficial da via.

A irregularidade longitudinal pode ter origem congênita, decorrente de imperfeições no próprio processo construtivo, e ainda ter origem em problemas ocorridos após construção, resultado da combinação da atuação do tráfego, clima e outros fatores intervenientes (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006b). Para além do perfil do pavimento, Haas e Hudson (2015) indicam que a irregularidade longitudinal depende também das características do veículo (como pneus, suspensão e carroceria) e da sensibilidade do usuário da via quanto às variações na velocidade e na aceleração do veículo.

Quanto às particularidades apresentadas pela irregularidade longitudinal:

- A partir de um valor inicial, função do processo construtivo, a Irregularidade passa a assumir valores crescentes, como decorrência da ação do tráfego, do clima e de outros fatores;
- A Irregularidade influi na interação da superfície da via com os veículos, gerando efeitos sobre os próprios veículos, sobre os passageiros e motoristas, e sobre as cargas transportadas. Tais efeitos dependem também, além da Irregularidade, de fatores vinculados à suspensão dos veículos e à sensibilidade dos passageiros e das cargas;
- A Irregularidade aumenta a ação das cargas dinâmicas dos veículos sobre a superfície do pavimento e, em decorrência, acelera a deterioração de sua estrutura. Ela provoca ainda efeitos adversos sobre a drenagem da superfície do pavimento, na medida em que contribui para a formação de poças d'água que vão afetar negativamente a segurança e o desempenho da Rodovia;
- A Irregularidade afeta a dinâmica dos veículos em movimento, aumentando o seu desgaste e acarreta, também, prejuízos à condução dos veículos. Em consequência, a Irregularidade tem grande influência sobre o custo operacional dos veículos – com o qual apresenta, inclusive, satisfatória correlação estatística. (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006b, p. 24)

Pela relevância deste parâmetro na vida útil do pavimento e na sua interação no conforto e segurança do usuário, a irregularidade é adotada como parâmetro básico para as atividades de planejamento, programação e elaboração de projetos que envolvam a manutenção de pavimentos (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006b; AASHTO, 2012). O grau de segurança e de conforto ao rolamento que um pavimento proporciona ao seu usuário estão relacionados diretamente ao perfil longitudinal, à existência ou não de trilhas de roda severas, e ainda à suavidade apresentada pela superfície do pavimento, ou seja, são inversamente proporcionais ao grau de irregularidade apresentado (SILVA, 2008).

A irregularidade longitudinal pode ser quantificada por dois índices distintos, pelo Quociente de Irregularidade (QI) ou pelo Índice Internacional de Irregularidade (IRI). Suas definições, conforme o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, são apresentadas na sequência:

- **Quociente de irregularidade (QI):** Índice calculado a partir da medição do perfil longitudinal do pavimento e que representa o somatório dos deslocamentos verticais relativos do eixo traseiro de um veículo medidor de irregularidade, dividido pela distância percorrida. É expresso em contagens/km.

- **Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index*– IRI):** índice calculado a partir da medição do perfil longitudinal do pavimento, representando a passagem de um modelo de quarto-de-carro, a uma velocidade de simulação de 80 km/h. O modelo matemático calcula a deflexão da suspensão do quarto-de-carro utilizando os deslocamentos do perfil medido e parâmetros da estrutura do carro. A suspensão de movimento simulado é acumulada e dividida pela distância percorrida. É expresso pelo índice de unidade de inclinação m/km (DNIT, 2023, p. 3).

O valor obtido de QI pode ser relacionado numericamente ao IRI utilizando as expressões apresentadas na sequência (Eq. 2.1 e 2.2), apresentadas por Paterson (1986, 1987) citado por Bernucci *et al.* (2022):

$$QI = 13 \cdot IRI \quad (2.1)$$

$$IRI = (QI + 10)/14 \quad (2.2)$$

Onde a unidade utilizada nesses modelos de correlação é de contagens/km, para o QI; e m/km, para o IRI. Quanto à validade e aderência dessas correlações, Barella (2008) indica que "a correlação entre os índices QI e IRI é amplamente avaliada através de dados reais de perfis de centenas de quilômetros de rodovias que evidenciaram a existência de grande dispersão em tal correlação indicando que o melhor é não os correlacionar" (BARELLA, 2008, p. 7). Em concordância com o sugerido pelo autor, conforme normativa mais recente do DNIT (2023), não deve ser realizada conversão entre os índices IRI e QI, uma vez que "cada um deste atribui pesos diferentes para determinados comprimentos de onda presentes em perfil longitudinal, o que impacta a conversão".

Na Tabela 3, estão apresentados limites de classificação do estado do pavimento em função da irregularidade longitudinal, medida através do QI e do IRI.

Tabela 3 – Condição do pavimento em relação ao QI e ao IRI

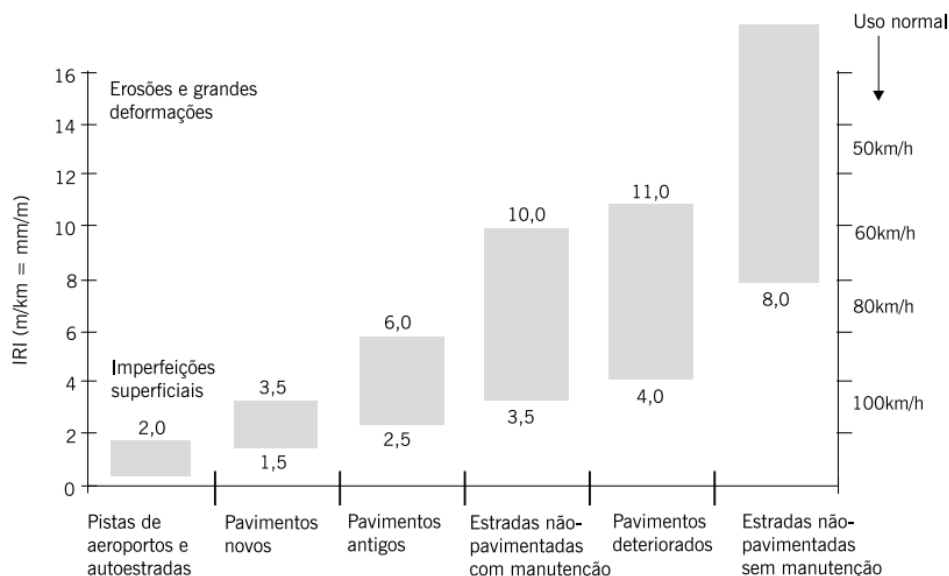
Condição do pavimento	QI (contagens/km)	IRI (m/km)
Ótimo	<29	<2,2
Bom	30 a 44	2,2 a 3,4
Regular	45 a 59	3,4 a 4,5
Ruim	60 a 74	4,5 a 5,7
Péssimo	>75	>5,7

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

O valor do IRI, ao final de um contrato de construção ou restauração, é utilizada como critério de aceitação de obras em diferentes órgãos rodoviários (BERNUCCI *et al.*, 2022). Diferentes faixas de IRI são observadas em função do uso da rodovia e da velocidade o média observada.

Na Fig. 5, são apresentadas faixas de variação do IRI conforme a situação e categorias do pavimento.

Figura 5 – Diversas faixas de variação do IRI dependendo do caso e situação



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Na Tabela 4, está apresentada a correlação entre o valor observado de IRI, em m/km, às condições de rolamento normalmente observadas no pavimento com essa característica funcional.

Tabela 4 – Correlação do IRI com as condições de rolamento

IRI (m/km)	Condições de rolamento
10–12	Excessivas e profundas depressões, panelas e desagregação severa. Velocidades inferiores a 50 km/h.
7–9	Frequentes depressões, panelas, remendos profundos e oscilações bruscas associadas com graves defeitos. Rolamento confortável com velocidade até 50–60 km/h.
5–6	Defeitos associados a depressões e remendos, eventuais panelas, ondulações e corrugações fortes. Rolamento confortável com velocidades até 70–90 km/h.
3–4	Podem ser percebidos deslocamentos moderados, grandes ondulações, depressões, remendos e eventuais panelas oriundas de desgastes em tratamentos superficiais, corrugações moderadas. Rolamento confortável com velocidades até 100–120 km/h.
0–2	Ondulações sentidas somente com velocidades menores de 80 km/h. Pavimento sem depressões, panelas ou corrugações. Rolamento confortável com velocidades maiores de 120 km/h.

Fonte: Stelmach, Mitida e Brito (2018)

No Departamento Estadual de Estradas de Rodagem (DAER), conforme instrução de serviço para projetos de restauração e manutenção do programa CREMA-RS, são apresentados valores indicativos de IRI para verificação do desempenho em avaliação anual, apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 – Indicadores de Desempenho - Avaliação Anual

Definição	Procedimentos para avaliação		Aceitação
Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI)	Procedimentos definidos na Norma DNER-PRO 182/92 com segmentos de 200 m	Recebimento das obras:	IRI <2,5 m/km em 95% das medidas obtidas e IRI <3,0 m/km em 100% das medidas obtidas.
		A partir do final do segundo ano do contrato:	IRI <3,0 m/km em 95% das medidas obtidas e IRI <3,5 m/km em 100% das medidas obtidas.

Fonte: Adaptado de DAER (2021)

Quanto aos equipamentos para a medição da irregularidade, diversos equipamentos e processos foram concebidos ao longo do tempo (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006b). Os procedimentos de medida da irregularidade longitudinal podem ser classificados através de três grupos (SAYERS; GILLESPIE; PATERSON, 1986; BERNUCCI *et al.*, 2022):

- **Avaliação direta:** equipamentos de classe I (nível e mira, Dipstick, perfilômetros) e classe II (perfilógrafo, equipamentos dotados de sensores a laser, APL francês);
- **Avaliação indireta:** equipamentos de classe III do tipo resposta (Maysmeter, TRL Bump Integrator, Rugosímetro);
- **Avaliação subjetiva:** painel de avaliadores.

Na Tabela 6, estão apresentados os principais equipamentos associados a cada classe.



Tabela 6 – Classificação dos equipamentos medidores de irregularidade longitudinal

<b>Classe</b>	<b>Exemplos de equipamentos ou medição</b>
<b>Classe I</b> (Equipamentos de precisão que medem diretamente o perfil dos pavimentos)	- Nível e mira;
	- Dipstick;
	- Z-250;
	- Perfilômetro do TRL;
	- Perfilômetro Walking Profiler da ARRB.
<b>Classe II</b> (Outros métodos perfilométricos)	- Perfilógrafos;
	- Equipamentos com sensores a laser;
	- Infravermelho ou ultrassom;
	- APL francês.
	- Integrador de irregularidade longitudinal IPR/USP;
<b>Classe III</b> (Sistemas medidores do tipo resposta)	- Maysmeter;
	- MERLIN;
	- RILEY;
	- TRL Bump Integrator.
<b>Classe IV</b> (Avaliações subjetivas)	- Painel de avaliadores.

**Fonte:** Santhier e Luvizão (2022)

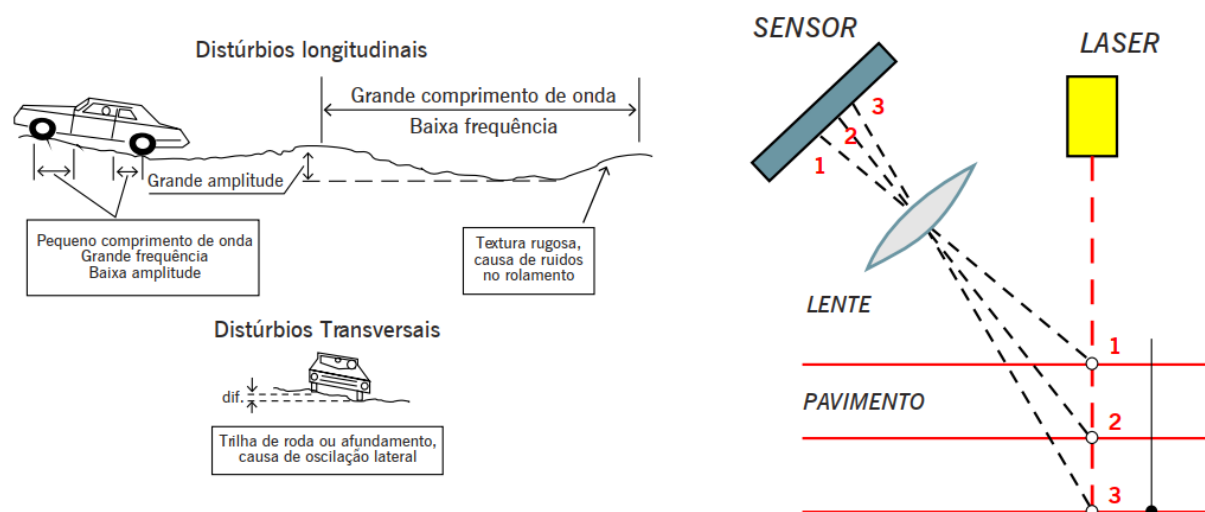
Os sistemas de Classe I, onde são obtidas medidas diretas do perfil, empregam equipamentos de topografia para a medição direta ou manual da geometria vertical do pavimento. São exemplos destes procedimentos o levantamento topográfico através de nível e mira, onde o levantamento é realizado nas trilhas de roda externa e interna a cada 0,50 m (BERNUCCI *et al.*, 2022). Já o equipamento *Dipstick* é baseado na medição da inclinação por um inclinômetro, cuja operação é realizada por uma pessoa. O equipamento *Walking Profiler*, desenvolvido pela empresa AARB Group, aperfeiçoou o conceito por detrás do *Dipstick*, agregando um carrinho leve empurrado pelo operador, resultando em maior produtividade (BARELLA, 2008).

O perfilômetro laser é um sistema de medição do perfil longitudinal e transversal do pavimento, que realiza as medições através de medidores de distância veículo-pavimento sem contato (a laser), medidores de aceleração vertical do veículo (acelerômetros), e um preciso sistema de medição de deslocamento/velocidade. É

gerenciado através de um sistema microprocessador, o qual coordena aquisição dos dados e os envia a um computador portátil em tempo real.

Os medidores de distância a laser funcionam pela triangulação, ou seja, um feixe laser de média potência é apontado perpendicularmente ao pavimento e tem sua posição registrada por um sensor para o qual o reflexo do laser é direcionado (BARELLA, 2008; BERNUCCI *et al.*, 2022). O esquema de triangulação é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Princípio de definição das irregularidades e configuração da barra laser para medida do IRI



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Recentemente, foi divulgada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes a normativa DNIT 442/2003 – PRO – Pavimentação – Levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial. Esta normativa, publicada em abril deste ano, "estabelece o procedimento para a medição e o registro contínuo de perfis longitudinais da superfície do pavimento, utilizando o perfilômetro inercial, para a determinação da irregularidade longitudinal, do afundamento de trilha de roda e da macrotextura do pavimento" DNIT (2023).

#### 2.2.4 Número Estrutural Corrigido (SNC)

Em sua formulação nacional, proposta por Queiroz (1981), o método de cálculo do SNC considera dados de módulo de resiliência para a camada de revestimento asfáltico, enquanto para as demais camadas granulares e o subleito considera-se o CBR. A utilização deste índice pode ocasionar na subestimação da capacidade estrutural das camadas existentes, uma vez que não avalia as deformações recuperáveis de cada material (ALBUQUERQUE, 2008; VITORELLO, 2008).

Conforme Pinto e Preussler (2010), o cálculo do SNC permite que seja feita a análise do comportamento estrutural do pavimento como um todo, de forma em que a contribuição de cada camada é somada, tendo como resultado um índice de comportamento único.

O Número Estrutural Corrigido, apresentado na Eq. 2.3, é obtido através da combinação linear entre os coeficientes estruturais ( $a_i$ ) e as espessuras ( $H_i$ ) de cada camada do pavimento, além da contribuição do subleito na resistência (SNSG):

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i \times H_i + SNSG \quad (2.3)$$

Onde

$a_i$ : coeficiente de equivalência estrutural da camada  $i$  do pavimento, em  $cm^{-1}$ ;

$H_i$ : espessura da camada  $i$  do pavimento, em cm;

$n$ : número de camadas do pavimento, acima do subleito;

$SNG$ : número estrutural modificado do subleito.

$$SNSG = 3,51 \log CBR - 0,85(\log CBR)^2 - 1,43 \quad (2.4)$$

Onde

$SNC$ : número estrutural corrigido;

$CBR$ : Índice de Suporte Califórnia do subleito.

Os coeficientes estruturais  $a_i$  referentes às camadas de revestimento do pavimento são obtidas através das Equações apresentadas na sequência:

- **Revestimentos asfálticos:**

- CAUQ > 30 mm:

$$a_1 = 0,181 \left( 1 - e^{-8,56 \times 10^{-4} MR} \right)$$

- CAUQ ≤ 30 mm:

$$a_1 = 0,07$$

- Tratamentos Superficiais:

$$a_1 = 0,04$$

- **Bases:**

– Granulares:

$$a_2 = (11,471 CBR_2 - 0,0778 CBR_2^2 + 1,772 \times 10^{-4} CBR_2^3) \times 10^{-4}$$

– Solo-cimento:

$$a_2 = 0,04$$

– Macadame betuminoso:

$$a_2 = 0,06$$

• **Sub-bases:**

– Granulares:

$$a_3 = 0,00394 + 0,02559 \log CBR_3$$

– Solo-cimento:

$$a_3 = 0,04$$

– Macadame betuminoso:

$$a_3 = 0,06$$

• **Reforço do subleito:**

$$a_4 = 0,00394 + 0,02559 \log CBR_4$$

### 2.3 Estratégias de Manutenção e Reabilitação de pavimentos

Dentro de um Sistema de Gerência de Pavimentos, a tomada de decisões e estabelecimento de prioridades no escopo de manutenção, reabilitação e reconstrução é fundamental para todo ciclo de vida de um pavimento avaliado (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

A Figura 7 apresenta o Fluxograma de um SGP com alternativas das estratégias de atividades de Manutenção & Restauração.

Figura 7 – Fluxograma de um SGP com alternativas das estratégias de M&amp;R



Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2011)

Em uma primeira etapa, são definidas e identificadas as seções do pavimento que serão objeto de análise. A seguinte etapa consiste no inventário do pavimento, através do levantamento das condições do mesmo quanto as suas características físicas e o estado de deterioração (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011).

Conforme DNIT, "a análise em nível de rede permite a escolha das alternativas das estratégias de M&R" (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011). Na sequência, é realizada uma análise em nível de projeto para a definição das atividades de manutenção ou, caso necessário, do dimensionamento de reforços ou restauração.

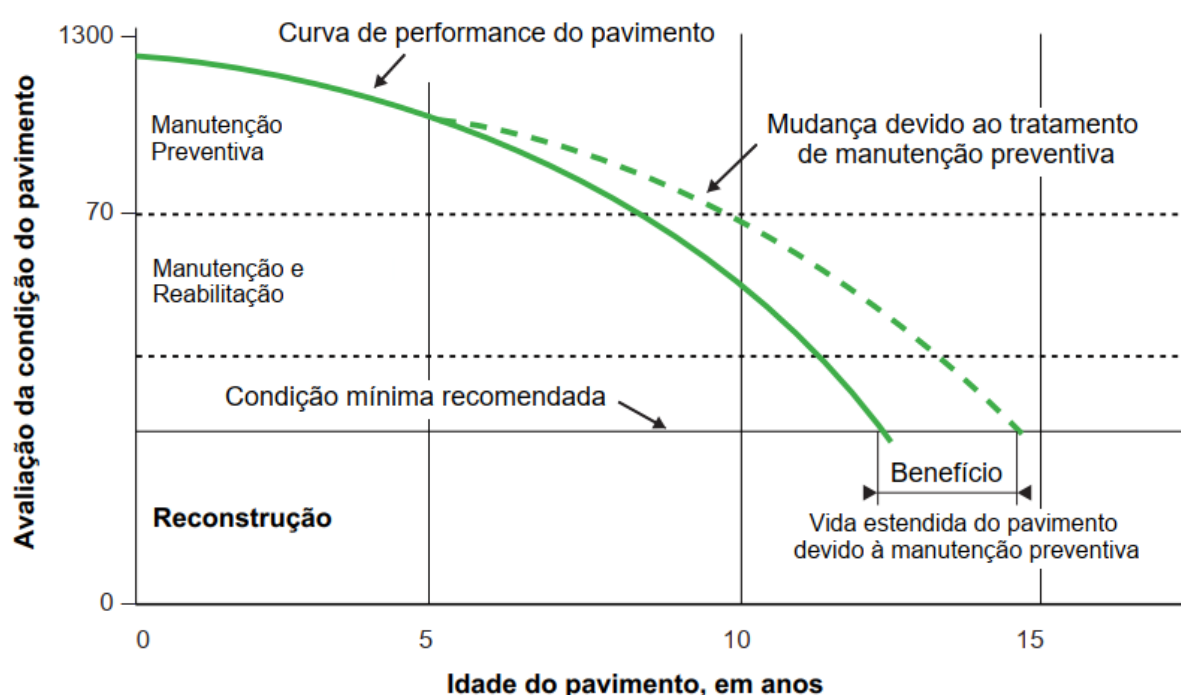
Diante da importância das atividades de manutenção e restauração no contexto da avaliação funcional dos pavimentos flexíveis, são apresentadas as definições de termos importantes relativos à temática:

- **Manutenção Corretiva:** remendos superficiais, reparos localizados, impermeabilização de trincas e outras ações de baixo custo unitário. Para as vias em boas condições, a manutenção corretiva (ou de rotina) é a melhor maneira de utilização dos recursos;
- **Manutenção Preventiva:** atividades de manutenção corretiva, rejuvenescimento da capa asfáltica e recapeamentos delgados. Tem por objetivo conter a deterioração em seu estágio inicial;
- **Ação Postergada:** apenas execução de remendos inadiáveis. Indicada para seções que estão além do ponto de eficácia da manutenção preventiva, mas que ainda não atingiram a necessidade de reabilitação.
- **Reforço:** atividades de manutenção de rotina e preventiva, recapeamento estrutural e reciclagem. Devem ser objeto de estudos de priorização, uma vez que os recursos disponíveis são, geralmente, inferiores às necessidades;

- **Reconstrução:** remoção e substituição de toda estrutura do pavimento, melhoria ou instalação de drenagem e melhoramentos de traçado, de segurança e de capacidade de tráfego. Também devem ser objeto de estudos de priorização. (FERNANDES JÚNIOR; ODA; ZERBINI, 2006, p. 39)

Conforme ilustrado na Figura 8, a execução de tratamentos de manutenção preventiva tem como característica a extensão da performance funcional do pavimento, em um trecho denominado benefício, referente à parcela de vida estendida resultante de intervenções de caráter preventivo.

Figura 8 – Modelos de previsão de desempenho aplicados a seções de pavimento candidatas a tratamentos de manutenção preventiva



Fonte: Adaptado de AASHTO (2012)

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006b), as normativas nacionais pertinentes recomendam a utilização do valor de IRI  $\leq 3,5$  como gatilho para a deflagração da restauração do pavimento, em especial para rodovias com acentuado volume de tráfego.

## 2.4 Modelos de desempenho de pavimentos

O desenvolvimento de modelos de desempenho de pavimentos é uma atividade imprescindível no contexto da gestão de pavimentos, e uma das principais etapas no processo de implantação de um sistema de gerência de pavimentos (LYTTON, 1987; SERAFINI, 2005).

A elaboração de modelos de previsão de desempenho tem como objetivo a estimativa da variação das condições funcionais e estruturais de um pavimento, a partir

da avaliação dos fatores que provocam e aceleram sua degradação, como solicitações do tráfego, idade do pavimento e fatores climáticos (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; YSHIBA, 2003).

Em nível de projeto, estes modelos podem ser utilizados para o dimensionamento do pavimento, para o desenvolvimento de análises de custo por ciclo de vida e para a seleção de um "dimensionamento-ótimo" considerando o menor custo financeiro. Em nível de rede, estes modelos norteiam a previsão do comportamento futuro do pavimento. A partir destas informações, pode-se selecionar estratégias de conservação e restauração, visando a otimização de recursos financeiros em curto e longo prazo, bem como na programação de futuras avaliações em campo para medição da deterioração (LYTTON, 1987; HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; SERAFINI, 2005).

A utilização de modelos de previsão de desempenho permite (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; ESPINDOLA, 2014):

- Determinação da vida restante dos pavimentos, uma vez que se haja o conhecimento de uma condição de limite aceitável;
- Otimização na combinação de projetos, estratégias e o tempo para a agência concluir as metas estabelecidas;
- Avaliação de impactos temporais dos diversos cenários propostos;
- Promoção de retroalimentação para o processo de projeto do pavimento;
- Estimação de custos de ciclo de vida do pavimento.

São requisitos básicos para o desenvolvimento de um modelo de previsão de desempenho (BASÍLIO, 2002):

- **Base de dados adequada:** é necessário que a base de dados seja confiável ou representativa, ou seja, deve conter dados de pavimentos velhos e novos, faixas de volume de tráfego altas e baixas e resistências de pavimento variáveis. Quanto maior o número de trechos enquadrados na combinação entre as faixas de valores das variáveis, maiores serão a confiabilidade e acurácia dos modelos;
- **Seleção de variáveis significativas:** as variáveis de um modelo de desempenho são todos os parâmetros avaliados no campo e capazes de influir ou caracterizar o comportamento dos pavimentos. A seleção destas variáveis deve ser feita considerando critérios como grau de influência e caracterização do comportamento dos pavimentos e disponibilidade de recursos técnicos e financeiros.
- **Seleção da forma funcional do modelo para representar a situação física real;**
- **Critérios para determinar a precisão do modelo.** (BASÍLIO, 2002, p. 15–16)

A seleção e inclusão das variáveis mais significativas é uma tarefa de importante atenção no desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho. São diversos os fatores que impactam direta ou indiretamente o desempenho dos pavimentos, como condições climáticas, tráfego atuante, propriedades dos materiais constituintes

das camadas, entre outros. A incorporação de todas estas variáveis é geralmente impraticável devido a inexistência de base de dados com registros de todos os fatores envolvidos (AASHTO, 2012).

Quanto a classificação destes modelos, autores apresentam quatro tipos básicos em função do método utilizado (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; YSHIBA, 2003; ESPINDOLA, 2014):

- **Modelos puramente mecânicos:** baseados em parâmetros como tensões, deformações ou deflexões do pavimento;
- **Modelos empírico-mecânicos:** relacionam variáveis dependentes do mecanismo de deterioração estrutural ou funcional com uma ou mais variáveis independentes (suporte do subleito; solicitações do tráfego; espessuras e propriedades do pavimento). A sequência lógica destes modelo segue a ordem: dados de entrada, modelo de respostas estruturais, e modelos de deterioração-desempenho.
- **Empíricos ou de regressão direta:** modelos em que as variáveis dependentes que caracterizam a deterioração estrutural ou funcional (como a irregularidade longitudinal, afundamento de trilha de roda, formação de trincas) são relacionadas com uma ou mais variáveis independentes, como suporte do subleito, aplicações de carga por eixo (número N), espessuras e propriedades dos materiais que constituem as camadas do pavimento, idade, fatores ambientais e suas interações. Como vantagens, elenca-se a fácil aplicação e o embasamento em dados históricos reais. Como desvantagem, sua replicação está limitada ao espaço de inferência de formulação;
- **Probabilísticos ou subjetivos:** modelos em que a experiência de engenheiros rodoviários é formalizada por meio de processos de transição, como o processo de Markov, que permite a estimativa da condição futura, geralmente em termos de um índice de defeitos combinado. Esta categoria tem como vantagem a facilidade na aplicação, no entanto, conta com base fundamentalmente empírica.

O grau de acurácia necessário para um modelo de previsão de desempenho depende fundamentalmente do objetivo para o qual este será empregado. Modelos empregados em análises em nível de projeto necessitam de maior acurácia do que os empregados em análises em nível de rede (NASCIMENTO, 2005).

No Brasil, destaca-se a relevância dos estudos desenvolvidos entre os anos de 1975 e 1981 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT). O conjunto de estudos, denominado de Pesquisa Sobre Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de rodovias (PICR), foi executado através de convênio entre o Governo brasileiro e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes,



2011; ALBUQUERQUE, 2008). A PICR teve, como principal objetivo, a obtenção das informações necessárias para a quantificação dos custos totais envolvidos na modalidade rodoviária (NUNES, 2012). A partir do uso da base de dados levantada nos estudos do PICR, foram elaborados dois trabalhos de extrema relevância no contexto de modelos de previsão de desempenho em pavimentos: os trabalhos desenvolvidos por Queiroz (1981) e Paterson (1987).

Queiroz (1981) desenvolveu modelos de desempenho empíricos e mecanísticos a partir dos dados de campo de trechos da malha rodoviária dos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Distrito Federal (NASCIMENTO, 2005; ALBUQUERQUE, 2008). Os modelos desenvolvidos pelo autor estimam a deterioração do pavimento em função da irregularidade longitudinal, trincas e trilhas de roda para pavimentos asfálticos, em função da estrutura do pavimento, do subleito e do tráfego atuante (BASÍLIO, 2002).

Os modelos de desempenho obtidos por Paterson (1987) foram obtidos através de regressão estatística e, em alguns casos, aplicação de conceitos mecanísticos. As equações utilizadas no desenvolvimento do *Highway Design and Maintenance Standards Model* – HDM III foram obtidas a partir de regressão e baseiam-se nos dados experimentais coletadas no Brasil (BASÍLIO, 2002).

No contexto regional, destaca-se a pesquisa desenvolvida por Bueno (2016). O autor, em extensivo programa de ensaios de deflectometria através do equipamento FWD realizados em três trechos de pavimentos na cidade de Santa Maria/RS, realizou a análise de bacias deflectométricas e obteve os módulos de resiliência por retroanálise. Ainda, foram realizados levantamentos de deflexão por meio da Viga Benkelman, de modo a possibilitar a associação entre resultados. Como resultados, o autor desenvolveu modelos de rigidez para as camadas dos pavimentos nos trechos monitorados.

Outros modelos de previsão de desempenho desenvolvidos no Brasil são apresentados na sequência.

#### **2.4.1 Modelo proposto por Marcon (1996)**

A pesquisa conduzida por Marcon (1996) reuniu dados de levantamentos realizados na malha rodoviária de Santa Catarina, para o desenvolvimento de modelos de previsão quanto à irregularidade longitudinal, índice de gravidade global, afundamento de trilha de roda e deflexões. Esses modelos foram desenvolvidos de forma a associar parâmetros como a idade do revestimento e o número N, sendo desenvolvidos para três distintas regiões geológicas do estado.

A Equação 2.5 apresenta o modelo desenvolvido para o Quociente de Irregularidade em função da idade do pavimento:

$$QI = 18,348 + 1,1635 \times IDADE \quad (2.5)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,29$ .

Já a Equação 2.6 apresenta o modelo desenvolvido para o Quociente de Irregularidade em função do número N:

$$QI = 25,783 + 4,10 \times 10^{-6} \times NA - 5,0 \times 10^{-14} \times NA^2 \quad (2.6)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,32$ .

Foram desenvolvidas ainda equações que relacionam a deflexão máxima medida à idade do pavimento (Equação 2.7) e ao número equivalente de repetições do eixo padrão (Equação 2.8), apresentadas na sequência:

$$DEFM = 24,288 + 3,5458 \times IDADE \quad (2.7)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,37$ .

$$DEFM = 44,928 + 1,10 \times 10^{-5} \times NA \quad (2.8)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,50$ .

Onde:

$QI$  = Quociente de Irregularidade, em contagens/km;

$IDADE$  = idade do pavimento desde a construção, restauração ou reconstrução, em anos;

$DEFM$  = deflexão máxima medida, em  $10^{-2}$  mm;

$NA$  = número equivalente de operações com eixo padrão de 8,2 tf, calculado com o fator de carga da AASHTO.

#### 2.4.2 Modelo proposto por Yshiba (2003)

A pesquisa desenvolvida por Yshiba (2003) apresentou o desenvolvimento de modelos estatísticos para a previsão de desempenho de pavimentos flexíveis, a partir de base de dados da malha rodoviária do estado do Paraná, realizadas nos anos de 1995 e 1998.

Para atender às especificidades de horizontes de solo do estado, foi realizada a divisão em regiões de classificação do solo semelhantes, sendo assim agrupadas em Região I (cristalino), Região II (sedimentar), Região III (Basalto), Região IV (arenito)

e Região V (granito). Pela concentração de área geográfica, a região de estudo foi limitada à Região III.

O conjunto de fatores avaliados pelo autor foram as informações ambientais (climáticas e geotécnicas), características do próprio pavimento (tipo e estrutura) e ainda o tráfego atuante. Neste estudo, o desempenho do pavimento foi modelado a partir dos fatores idade, tráfego e número estrutural corrigido (SNC). As variáveis resposta avaliadas foram a deflexão admissível, obtida através da viga Benkelman, e a irregularidade longitudinal da superfície.

Para pavimentos não reabilitados, os modelos desenvolvidos para a irregularidade longitudinal (Eq. 2.9) e deflexão máxima recuperável (Eq. 2.10) são da forma:

$$IRI = 2,8 + 0,38P(I) + 0,31P(N) - 0,16P(S) + 0,09 \cdot P(I) \cdot P(N) - 0,08 \cdot P(I) \cdot P(S) \quad (2.9)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,75$ .

$$DEF = 56,0 + 8,7P(I) + 4,25P(N) - 4,75P(S) + 1,81 \cdot P(I) \cdot P(S) \quad (2.10)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,62$ .

Onde:

*IRI*: índice de irregularidade longitudinal do pavimento (m/km);

*DEF*: deflexão determinada com a Viga Benkelman ( $10^{-2}$  mm);

$P(I) = \frac{I - 13}{8}$ , onde *I* a idade em anos do revestimento;

$P(N) = \frac{N - 5 \cdot 10^4}{10^5}$ , onde *N* representa o número de solicitações de tráfego;

$P(S) = \frac{S - 5,5}{2}$ , onde *S* representa o número estrutural corrigido.

Para pavimentos restaurados, foram desenvolvidos os respectivos modelos para a irregularidade longitudinal (Eq. 2.9) e deflexão (Eq. 2.12):

$$IRI = 2,37 + 0,12P(I) + 0,22P(N) - 0,14P(S) \quad (2.11)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,81$

$$DEF = 47,2 + 2,2P(I) + 3,81P(N) - 2,7P(S) + 1,44 \cdot P(N) \cdot P(S) \quad (2.12)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,83$ .

### 2.4.3 Modelo proposto por Lerch (2002)

O modelo desenvolvido por Lerch (2002), apresentado na Equação 2.13, visa avaliar a redução da irregularidade longitudinal após a aplicação de camada de reforço (recape) no pavimento asfáltico. A pesquisa desenvolvida pelo autor teve como objeto de estudo nove trechos de rodovias da malha viária do estado do Rio Grande do Sul, totalizando aproximadamente 265 km.

$$\Delta IRI = 0,31 \cdot ESP + 0,87 \cdot IRI_{antes} - 3,17 \quad (2.13)$$

Com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,97$ .

Onde

$\Delta IRI$ : redução prevista da irregularidade longitudinal pós recape (m/km);

$ESP$ : é a espessura do recape executado em centímetros ( $3 \leq ESP \leq 8$ );

$IRI_{antes}$ : irregularidade longitudinal medida antes do recape (m/km).

### 2.4.4 Modelo proposto por Vitorello (2008)

O modelo desenvolvido por Vitorello (2008) utiliza dados da rodovia BR-290/RS, no trecho entre os municípios de Osório e Porto Alegre, conhecido como Freeway, sob concessão da CONCEPA desde o ano de 1997.

A estrutura do pavimento avaliada contempla revestimento em CBUQ, com espessura de 8 cm, base em brita graduada de basalto, com espessura de 15 cm, sub-base em material primário pétreo em basalto, com espessura de 30 cm, e reforço do subleito em areia, com 60 cm.

No desenvolvimento dos modelos de desempenho, foram avaliadas como variáveis de resposta as deflexões obtidas através de FWD, o afundamento de tri-lha de rodas, e o Quociente de Irregularidade. O modelo desenvolvido para avaliação do QI está apresentado na Equação 2.14.

$$QI = 19,35 + 0,82 \cdot N_{acum} + 5,81 \cdot i \quad (2.14)$$

Onde

$QI$ : quociente de irregularidade (contagens/km);

$N_{acum}$ : número equivalente acumulado de solicitações de um eixo padrão de 8,2 tf calculado pelo método da AASHTO;

$i$ : fator de realização de intervenção ( $i = 0$ , para não ocorrência de intervenção estrutural, e  $i = 1$ , para ocorrência de intervenção estrutural)

### 3 METODOLOGIA

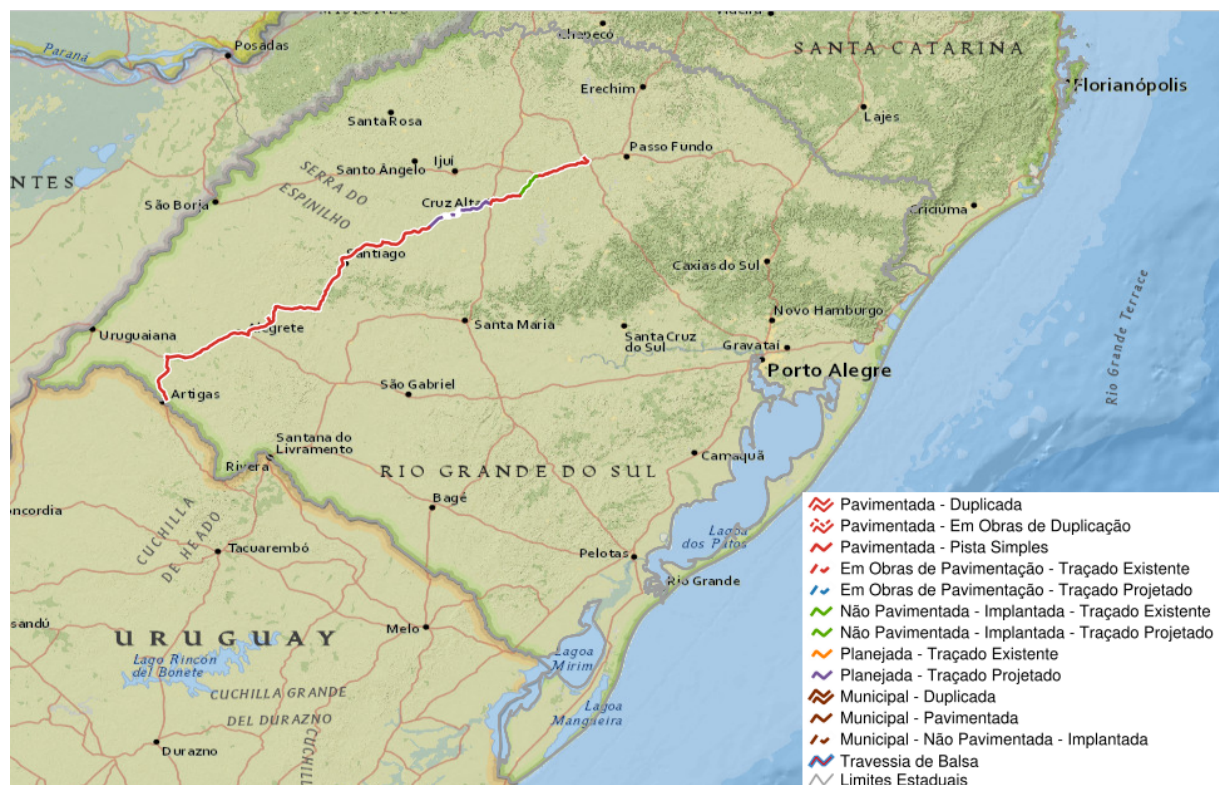
Neste Capítulo, serão apresentados os trechos em estudo na rodovia estadual RSC-377 e suas características quanto a posição geográfica, estrutura do pavimento, volume médio diário e valores médios de IRI registrados nos últimos levantamentos, realizados nos anos de 2018 e 2022.

#### 3.1 Delimitação

A rodovia diagonal RSC-377 está localizada no estado do Rio Grande do Sul, abrangendo as localidades de Quaraí, Alegrete, Manoel Viana, São Francisco de Assis, Santiago, Tupanciretã, Capão do Cipó, Cruz Alta, Santa Bárbara do Sul e Carazinho. A rodovia possui extensão total de 402,69 km, conforme levantamento realizado no ano de 2023 (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem, 2023b).

A localização da RSC-377 em relação ao estado do Rio Grande do Sul está apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Extensão da rodovia RSC-377 no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (2023a)

Os critérios adotados para a escolha dos trechos foram: a existência de dados de VDM; a existência de duas medições de IRI em anos diferentes; a extensão superior a 10 km e estar sob jurisdição da 9ª Superintendência Regional do DAER, com sede

em Alegrete, de modo a viabilizar possíveis avaliações e levantamentos *in loco* em um raio de extensão menor.

Na Tabela 7, estão apresentados a denominação adotada para os trechos em estudo e suas principais características.

Tabela 7 – Trechos avaliados da RSC 377

Código SRE	Local Inicial	Extensão	Rev. original	VDM	IRI (m/km)	
					2018	2022
377RSC0170	Acesso ao Jacaquá	35,67	TSD	889	4,63	3,73
377RSC0180	Manoel Viana	16,39	TSD	1.310	5,06	3,66
377RSC0185	Acesso ao Passo Novo	24,18	TSD	1.379	4,64	3,48
377RSC0230	Entr. BRS-290	48,69	TSD	765	4,46	3,67

**Fonte:** Adaptado de Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (2023b)

Na Tab. 8, estão apresentados os dados relativos às camadas do pavimento conforme os projetos originais dos trechos, obtidos através do Acervo Técnico do DAER. Os valores de espessura de revestimento asfáltico foram atualizados para 5 centímetros de CBUQ conforme recapeamento realizado no ano de 2022.

Tabela 8 – Camadas do pavimento conforme projeto

Trecho	Estrutura		
	Camada	Material	Espessura
377RSC0170, 377RSC0180, 377RSC0185	Revestimento	Tratamento Superficial Duplo + Capa Selante	2,5 cm
	Base	Brita Graduada	15 cm
	Sub-base	Macadame Seco	16 cm
377RSC0230	Revestimento	Tratamento Superficial Duplo + Capa Selante	2,5 cm
	Base	Brita Graduada	14 cm
	Sub-base	Macadame Seco	16 cm

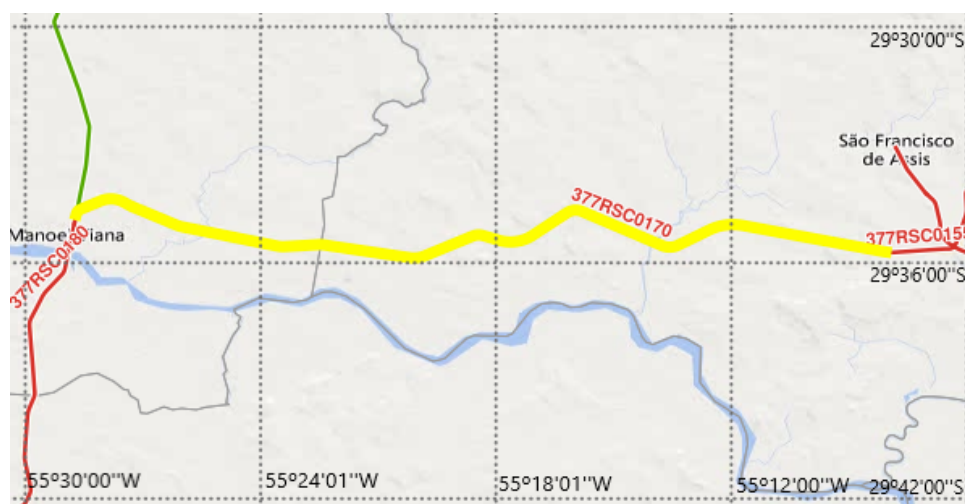
**Fonte:** Acervo Técnico do DAER (1996)

### 3.1.1 Trecho 377RSC0170

O trecho 377RSC0170 liga os municípios de São Francisco de Assis e Manoel Viana. A construção do trecho 377RSC0170 foi autorizada no ano de 2004, através do Decreto n. 43.269, de 28 de julho de 2004 (Estado do Rio Grande do Sul, 2004b).

Na Fig. 10 (a) e (b), estão apresentados respectivamente a localização geográfica do trecho e uma representação do local.

Figura 10 – Trecho em estudo – 377RSC0170



(a) Localização geográfica



(b) Imagem local

**Fonte:** Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (2023a) (Fig. (a)) e Conselho Nacional de Trânsito (2022b) (Fig. (b))

### 3.1.2 Trecho 377RSC0180

O trecho 377RSC0180 liga os municípios de Alegrete a Manoel Viana. A construção do trecho foi autorizada no ano de 2000, através do Decreto n. 40.126, de 7 de junho de 2000 (Estado do Rio Grande do Sul, 2004a).

Na Fig. 11 (a) e (b), estão apresentados respectivamente a localização geográfica do trecho e uma representação do local.

Figura 11 – Trecho em estudo – 377RSC0180



**Fonte:** Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (2023a) (Fig. (a)) e Conselho Nacional de Trânsito (2022b) (Fig. (b))

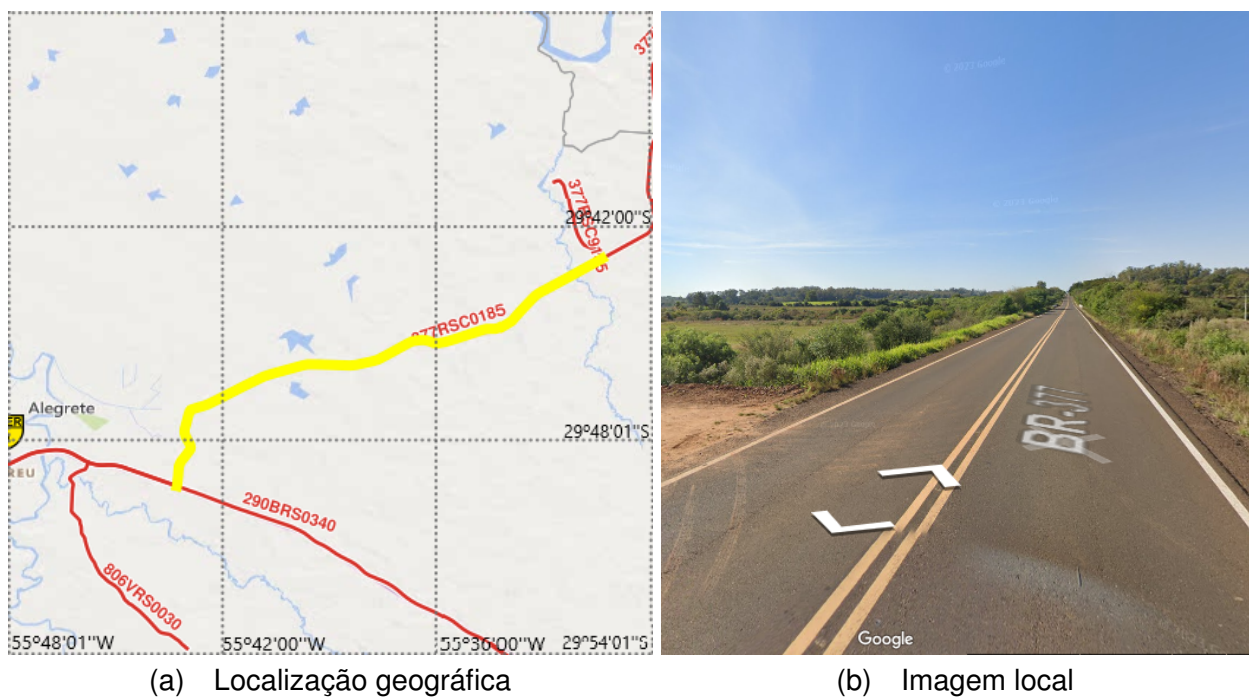
### 3.1.3 Trecho 377RSC0185

O trecho 377RSC0185 está localizado no município de Alegrete, denominado de contorno leste da cidade. Sua construção foi autorizada através do Decreto 40.603, de 23 de janeiro de 2001 (Estado do Rio Grande do Sul, 2001).

Na Fig. 12 (a) e (b), estão apresentados respectivamente a localização geográfica do trecho e uma representação do local.



Figura 12 – Trecho em estudo – 377RSC0185 – localização geográfica

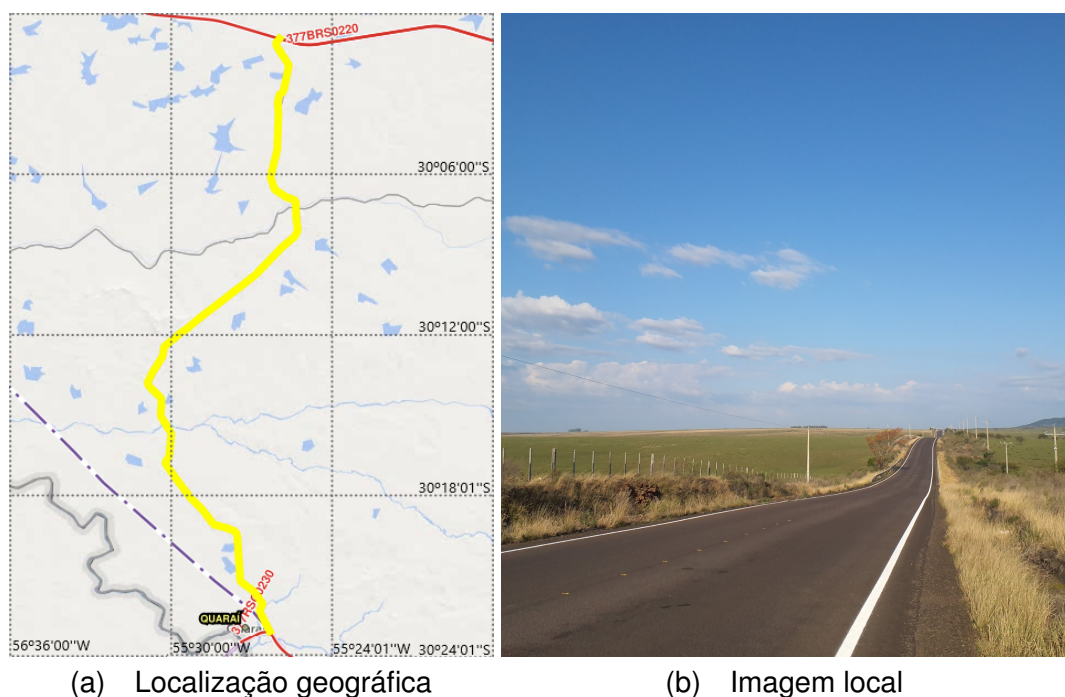


**Fonte:** Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (2023a)

### 3.1.4 Trecho 377RSC0230

Pela Lei Estadual nº 11.786, publicada em 17 de abril de 2002 (Estado do Rio Grande do Sul, 2002), esse trecho é denominado “João Simões Lopes Neto”. Na Fig. 13 (a) e (b), estão apresentados respectivamente a localização geográfica do trecho e uma representação do local.

Figura 13 – Trecho em estudo – 377RSC0230



**Fonte:** Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (2023a) (Fig. (a)) e Conselho Nacional de Trânsito (2022b) (Fig. (b))

### 3.2 Métodos empregados

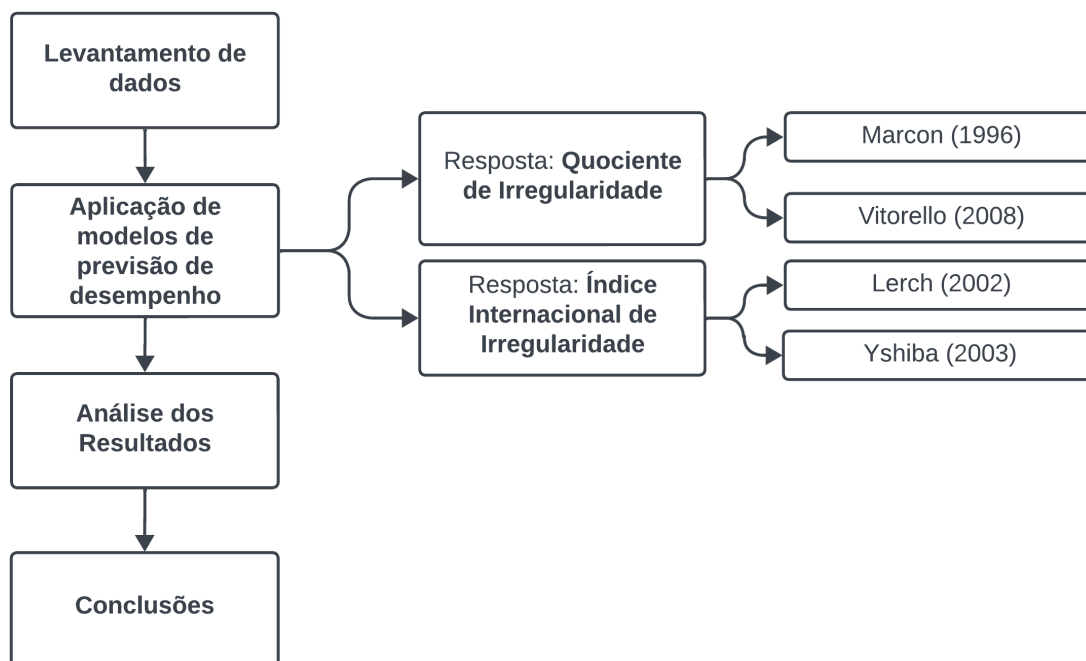
Os métodos empregados nesta pesquisa estão dispostos em quatro etapas sequenciais, ilustradas na Fig. 14.

A primeira etapa, de levantamento de dados, consiste na obtenção dos dados necessários à aplicação dos modelos de previsão de desempenho, referentes às informações de tráfego e medidas de IRI previamente realizadas, obtidos a partir do Sistema Rodoviário Estadual (SRE) do DAER/RS.

A segunda etapa diz respeito à aplicação dos quatro modelos de previsão de desempenho aos dados previamente coletados. Foram selecionados em literatura nacional dois modelos cujo resultado quanto à avaliação funcional seja o Quociente de Irregularidade (QI), sendo estes os modelos propostos por Marcon (1996) e Vitorello (2008); e dois modelos com resultado de Índice Internacional de Irregularidade (IRI), sendo estes os modelos propostos por Lerch (2002) e Yshiba (2003).

A terceira etapa consiste na análise dos resultados obtidos pela etapa anterior, enquanto a quarta etapa visa a elaboração de conclusões pertinentes aos resultados obtidos na pesquisa como um todo.

Figura 14 – Esquema da metodologia empregada



Fonte: O autor.

### 3.2.1 Levantamento de dados

O levantamento de dados acerca dos trechos em estudo consiste na obtenção dos dados a serem utilizados nos modelos de desempenho selecionados para comparação. São os dados necessários:

- O número N acumulado,  $N_{acum}$ ;
- A idade do pavimento, em anos;
- O Número Estrutural Corrigido ( $SNC$ ).

Os procedimentos necessários para obtenção destes dados estão descritos na sequência.

#### 3.2.1.1 Determinação do Número N

O número N, ou  $N_{acum}$ , referindo-se ao valor acumulado até o ano de 2022, será calculado através da Instrução de Serviço IS-110 – Instrução de serviço para estudos de tráfego do DAER/RS, uma vez que os estudos de tráfego utilizados na elaboração desta pesquisa são fundamentados nas condições apresentadas nesta IS.

O método de cálculo do número N através da metodologia do DAER possui algumas particularidades, como a classificação dos veículos por categorias de peso ao invés de número de eixos, como comumente utilizado nos métodos da AASHTO ou USACE.

Os veículos são classificados através das seguintes características:

- **Passeio:**
  - Automóveis, caminhonete e furgão (2 eixos);
  - Automóveis, caminhonete e furgão com semi-reboque (3 eixos);
  - Automóveis, caminhonete e furgão com semi-reboque (4 eixos).
- **Coletivo:**
  - Ônibus e micro-ônibus (2 eixos);
  - Ônibus (3 eixos).
- **Carga leve:** Caminhão (2 eixos e capacidade de carga inferior a aproximadamente 5t.).
- **Carga média:** Caminhão (2 a 3 eixos e capacidade de carga igual ou superior a aproximadamente 5t).
- **Carga pesada:** Caminhão, caminhão trator e caminhão trator com semi-reboque (3 eixos).
- **Carga ultrapesada:** Caminhão com reboque e caminhão trator com semi-reboque (4 ou mais eixos).

O número N é calculado a partir da Equação 3.1, apresentada a seguir:

$$\begin{aligned}
 N = & (\text{volume de coletivo} \times \text{fator de veículo para coletivo} & (3.1) \\
 & + \text{volume de carga leve} \times \text{fator de veículo para carga leve} \\
 & + \text{volume de carga média} \times \text{fator de veículo para carga média} \\
 & + \text{volume de carga pesada} \times \text{fator de veículo para carga pesada} \\
 & + \text{volume de carga ultra pesada} \times \text{fator de veículo para carga ultra pesada}) \\
 & \times 365 \text{ dias} \times 0,5 \text{ pista} \times 1000000 \times (1 + t\%/100)^{n^\circ} \text{ do ano subsequente da contagem}
 \end{aligned}$$

Como fator do veículo, a Instrução de Serviço traz como referência os valores apresentados na Tabela 9:

Tabela 9 – Fator de veículo em função da classificação quanto às cargas

<b>Classificação de carga (DAER)</b>	<b>Fator de Veículo</b>
Coletivo	0,3450
Carga leve	0,0630
Carga média	1,3710
Carga pesada	4,9860
Carga ultra pesada	11,2050

Fonte: Adaptado de DAER (2010)

Como observação, faz-se referência aos diferentes métodos de cálculo de Fator de Equivalência de Carga (FEC) trazidos pela literatura do DNIT, como o método da AASHTO, apresentado na Tabela 10 e pelo método da USACE, apresentado na Tabela 11. Enquanto o método de projeto do DNIT e o TECNAPAV utilizam o método da USACE, o método da AASHTO é referência para a normativa de avaliação estrutural de pavimentos flexíveis, procedimento B (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1979).

Tabela 10 – Fatores de equivalência de carga da AASHTO

Tipos de eixo	Equações (P em tf)
Simplex de rodagem simples	$FC = (P/7,77)^{4,32}$
Simplex de rodagem dupla	$FC = (P/8,17)^{4,32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FC = (P/15,08)^{4,14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FC = (P/22,95)^{4,22}$

**Fonte:** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006c)

Tabela 11 – Fatores de equivalência de carga do USACE

Tipos de eixo	Faixas de cargas (t)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0–8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	$\geq 8$	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0–11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	$\geq 11$	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0–18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	$\geq 18$	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

**Fonte:** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006c)

A taxa de crescimento indicada nesta Instrução de Serviço, e a mesma utilizada nesta pesquisa, é de 3% ao ano.

Ressalta-se que o número N encontrado através da metodologia do DAER-RS não é o mesmo obtido pela metodologia do DNIT, e em função da pesagem e classificação dos veículos ser feita de forma própria, não é possível fazer uma conversão direta entre os valores de número N obtidos pelas metodologias DAER-DNIT. Pesquisa executada por Ritter (2021) apresenta em detalhes a comparação entre os métodos, elucidando as diferenças nos resultados obtidos por cada metodologia. Embora, na prática, a variação nos valores encontrados de N entre os métodos DAER e DNIT possa ser pequena, optou-se por manter a metodologia proposta pela autarquia estadual, de onde originam os dados de estudos de tráfego.

### 3.2.2 Dados de Índice de Irregularidade Longitudinal - anos 2018 e 2022

O levantamento dos dados existentes de IRI nos trechos avaliados será através de relatórios cadastrados no sistema do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem, datados dos anos de 2018 e 2022. Conforme o padrão apresentado pela Instrução de Serviço IS-112 (DAER, 2021) – Instrução de Serviço para Estudos e Projetos CREMA, os levantamentos de irregularidade devem seguir as seguintes diretrizes:

- Os dados dos levantamentos de irregularidade longitudinal e das medidas de afundamento de trilha de roda deverão ser obtidos utilizando um equipamento de avaliação direta com, no mínimo, cinco sensores a laser (Barra Laser);
- Os levantamentos de irregularidade longitudinal e as medidas de afundamentos da trilha de roda deverão ser efetuados nas trilhas-de-roda externas ao longo dos segmentos previstos. Em rodovias duplicadas as medidas deverão ser realizadas nas duas faixas externas de rolamento, nos dois sentidos da rodovia.
- As medições da Irregularidade Longitudinal deverão ser feitas conforme o procedimento DNER/PRO 182/94, com os valores de QI (quociente de irregularidade, expresso em contagens/km) e IRI (International Roughness Index, expresso em m/km) e deverão ser integradas em segmentos de 100m, no sentido crescente do Sistema Rodoviário Estadual (SRE), para todas as faixas de tráfego.
- O levantamento da irregularidade deverá obedecer aos seguintes procedimentos:
  - DNER-PRO-164/94: Calibração e Controle de Sistemas Medidores de Irregularidade de Superfície de Pavimento;
  - DNER PRO-182/PRO-182/94: Medição de Irregularidade de Superfície de Pavimento.
- O levantamento deverá ser amarrado aos marcos quilométricos das rodovias/trechos e ao estaqueamento das rodovias/trecho (DAER, 2021, p. 7).

A normativa DNIT 422 – Pavimentação – Levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial – Procedimento (2023) estabelece as condições exigíveis para a realização das medidas de irregularidade longitudinal com o perfilômetro inercial. Algumas considerações da referente norma são apresentadas a seguir, tendo em vista sua vigência recente:

- **Quantidade de módulos de medição:**

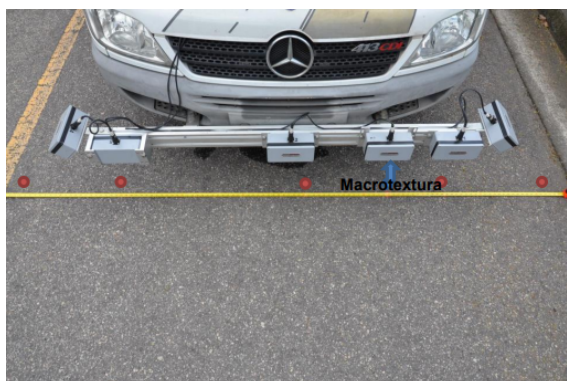
- Para a medição do perfil longitudinal em uma das trilhas de roda, o equipamento deve possuir, pelo menos, um módulo de medição contendo um sensor a laser e um acelerômetro. No caso da determinação simultânea dos perfis longitudinais correspondentes às duas trilhas de roda, são necessários dois módulos de medição no equipamento.
- Para a avaliação do afundamento de trilha de roda, são necessários, no mínimo, três conjuntos de sensores a laser, posicionados de forma a simular uma treliça.

- Para o levantamento das duas trilhas de rodas (interna e externa), devem ser utilizados, no mínimo, cinco sensores a laser e dois acelerômetros, sendo um em cada extremidade da barra, um em cada trilha de roda e um no meio da barra.
- **Requisitos mínimos para os sensores do perfilômetro:**
    - Sensor de aceleração: deve ser montado com seu eixo de medição alinhado ao do medidor do sensor a laser, na direção perpendicular à superfície do pavimento.
    - Sensor de deslocamento vertical: deve estar acoplado ao veículo com o eixo de medição perpendicular à superfície do pavimento e alinhado com o eixo do sensor do acelerômetro. Sua fixação deve permitir acomodar a medição dos deslocamentos da carroceria nos dois sentidos (para cima e para baixo).
    - Sensor de deslocamento longitudinal: Pode ser qualquer sensor que produza uma série de pulsos em intervalos que representem uma distância trafegada sobre a superfície.
  - **Sistema computacional de coleta e gravação de dados:** O sistema de coleta de dados deve permitir ao operador a visualização do estado de funcionamento de todos os componentes do perfilômetro em tempo real, para verificar o perfeito funcionamento dos mesmos. Durante a coleta de dados, o sistema deve possibilitar ao operador o registro de observações vinculadas ao trecho.

A equipe de campo deve ser composta por um motorista e um técnico para a operação e coleta de dados do equipamento.

Quanto ao veículo de transporte do equipamento, este deve acomodar, adequadamente, todos os componentes do perfilômetro e a equipe de campo. O estado de conservação do veículo deve possibilitar um rolamento suave com facilidade de manutenção de uma trajetória que acompanhe as trilhas de rola da faixa de rolamento por onde ele trafegar. Na Fig. 16, estão apresentados o posicionamento dos sensores em relação ao eixo do veículo.

Figura 15 – Exemplos de posicionamento dos sensores



(a) Barra com cinco sensores e medidor de macrotextura



(b) Barra com sensores para medida de irregularidade (1, 2, 5), sensores para medida de afundamento de trilha de roda (1, 2, 3, 4 e 5) e sensor para medida de macrotextura (MT)

**Fonte:** DNIT (2023)

Os levantamentos realizados com sensores de distância baseados em laser dependem de uma superfície seca para que a medição seja feita corretamente, assim, não se deve executar o levantamento em dias chuvosos ou com superfícies úmidas ou molhadas.

Antes do início de registro de dados, o operador deve identificar no sistema o trecho a ser levantado. A medição deve ser realizada de maneira contínua, e no caso de interrupções, deve-se retornar algumas dezenas de metros antes do local de interrupção, de forma que a medição possa ser emendada sem prejuízo no registro de dados. Durante o levantamento, todas as ocorrências que possam causar interferência nos resultados deverão ser registrados de forma que fique referenciada a posição do odômetro do perfilômetro. São ocorrências como: lombadas, praça de pedágio, obras de arte, mudança temporária de faixa, ultrapassagem, desvios, sujeira na pista, mudanças no tipo do revestimento, etc.

A Figura 16 apresenta um modelo de tabela preenchida com os resultados de IRI, QI, afundamento de trilha de roda e macrotextura, a ser preenchida após o fim do



levantamento de campo.

Figura 16 – Exemplo de Tabela preenchida com resultados de IRI, QI, ATR e MT

ESTACA		ATR		IRI (m/km)				QI (contagem/km)				MT (mm)	Velocidade (km/h)
		Trilha Interna (mm)	Trilha Externa (mm)	SENSOR			Médio	SENSOR			Médio	SENSOR	
				1	2	5		1	2	5			
1		2,4	3,1	3,95	3,94	3,50	3,80	51,4	51,2	45,5	49,4	0,98	62
2		3,3	2,8	3,70	3,90	2,73	3,44	48,1	50,7	35,5	44,8	1,11	61
3		2,5	2,9	3,60	3,13	3,20	3,31	46,8	40,7	41,6	43,0	1,03	60

Fonte: DNIT (2023)

### 3.2.3 Aplicação dos modelos de previsão de desempenho

Foram aplicados os quatro modelos de desempenho expostos na Revisão Bibliográfica, sendo estes: o modelo proposto por Lerch (2002), o modelo proposto por Marcon (1996), o modelo proposto por Yshiba (2003), e o modelo proposto por Vitorello (2008).

Na Tab. 12, estão apresentadas as variáveis necessárias para a aplicação de cada um desses modelos.

Tabela 12 – Modelos de desempenho selecionados e variáveis necessárias para aplicação

Modelo	Variáveis necessárias					
	Idade (anos)	Tráfego ( $N_{acum}$ )	IRI existente (m/km)	Existência de reforço	Espessura de reforço (cm)	Número estrutural
Marcon (1996)	X	X				
Lerch (2002)			X		X	
Yshiba (2003)	X	X				X
Vitorello (2008)		X		X		

Fonte: O autor.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste Capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através das metodologias previamente definidas.

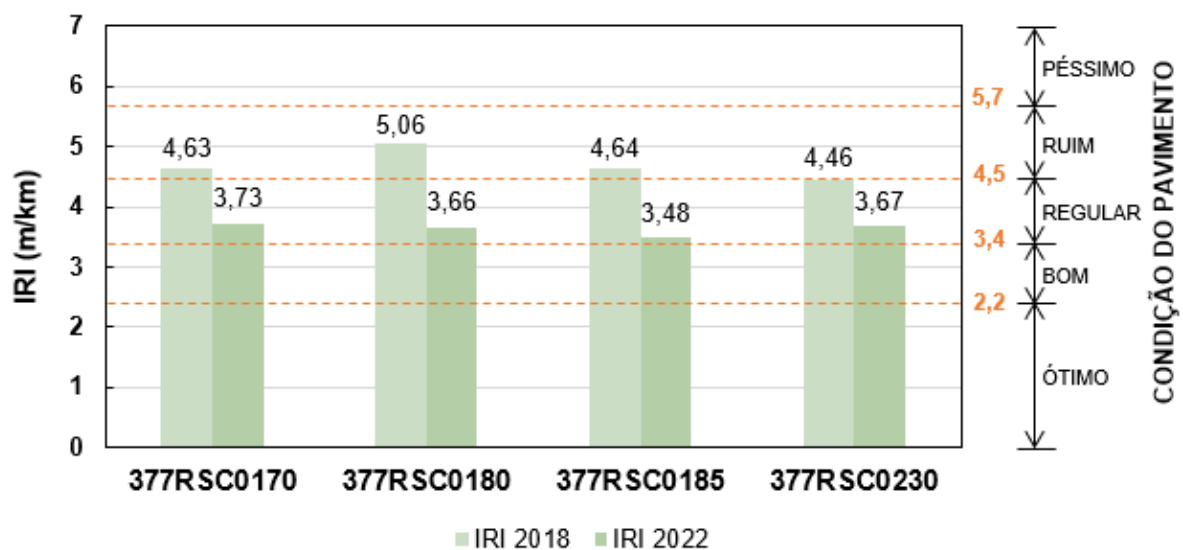
### 4.1 Levantamento de dados

O levantamento de dados necessários para a aplicação dos modelos de previsão de desempenho consistiu na obtenção dos números N e dos Números Estruturais Corrigidos para cada um dos trechos avaliados.

#### 4.1.1 Dados de IRI

Como dado introdutório à análise da variação do IRI dos trechos avaliados, é apresentada na Figura 17 a variação observada no período compreendido entre 2018 e 2022 e o seu resultado na alteração da condição do pavimento.

Figura 17 – Variação do IRI nos anos de 2018 e 2022 para os diferentes trechos avaliados



Fonte: O autor.

A partir da análise desses dados, observa-se a redução do valor de IRI e consequente melhoria na classificação de condição do pavimento em todos os trechos, oriundo da estratégia de recapeamento realizada no ano de 2022.

#### 4.1.2 Cálculo do número N

O cálculo dos diferentes números N para os trechos avaliados foi dividido em três partes, a saber:

$$N_{acum} = N_{projeto} + N_{projeto-2017} + N_{2018-2022} \quad (4.1)$$

Onde

$N_{acum}$  = valor de N referente ao período total de vida do pavimento, até o ano de 2022;

$N_{projeto}$  = valor de N referente ao horizonte de projeto, considerado até o ano de 2006, com valor de  $6,93 \times 10^6$ , conforme dados de projeto executivo;

$N_{projeto-2017}$  = valor de N referente à projeção do valor de  $N_{projeto}$ , considerando a diferença em anos entre 2018 e 2006, e adotada uma taxa de crescimento de 3% ao ano;

$N_{2018-2022}$  = valor de N obtido através de contagens de tráfego realizadas no ano de 2018 e adotada taxa de crescimento de 3% ao ano, até o ano de 2022.

A separação dos valores de  $N_{acum}$  se justifica pela existência de dados de estudo de tráfego no ano de 2018, obtidos através de postos de contagem anual e trimestral nos trechos avaliados da rodovia.

O Volume Médio Diário considerado para cada um dos trechos e a discriminação dos veículos quanto ao tipo de carga está apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Volume Diário Médio e porcentagem relativa a cada tipo de carga para os diferentes trechos avaliados

Trecho	VDM	Porcentagem relativa a cada tipo de carga					
		Passeio	Coletivo	Carga Leve	Carga Média	Carga Pesada	Carga Ultra pesada
377RSC0170	889	69,11	2,40	7,37	8,08	7,11	5,93
377RSC0180	1310	78,77	1,17	5,47	3,93	7,98	2,69
377RSC0185	1379	77,29	1,75	6,50	5,91	5,96	2,59
377RSC0230	765	82,82	1,15	5,61	3,89	5,78	0,74

Fonte: O autor.

A partir dos dados apresentados na Tabela 13, foi aplicada a Equação 3.1 para o cálculo do número N para cada um dos trechos. O resultado está apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de número N por ano e acumulados para os trechos avaliados

Ano	Trecho avaliado							
	377RSC0170		377RSC0180		377RSC0185		377RSC230	
	<i>N</i>	<i>N<sub>acum</sub></i>	<i>N</i>	<i>N<sub>acum</sub></i>	<i>N</i>	<i>N<sub>acum</sub></i>	<i>N</i>	<i>N<sub>acum</sub></i>
2018	1,85E+05	9,30E+06	1,82E+05	9,29E+06	1,71E+05	9,28E+06	6,03E+04	9,17E+06
2019	1,91E+05	9,49E+06	1,87E+05	9,48E+06	1,76E+05	9,46E+06	6,22E+04	9,23E+06
2020	1,97E+05	9,68E+06	1,93E+05	9,67E+06	1,81E+05	9,64E+06	6,40E+04	9,30E+06
2021	2,03E+05	9,89E+06	1,99E+05	9,87E+07	1,86E+05	9,82E+06	6,59E+06	9,36E+06
2022	2,09E+05	1,01E+07	2,05E+05	1,01E+07	1,92E+05	1,00E+07	6,79E+04	9,43E+06

Fonte: O autor.

#### 4.1.3 Cálculo do Número Estrutural Corrigido (SNC)

Na ausência de dados acerca da classificação dos materiais utilizados na construção dos trechos, foram utilizados os valores de CBR mínimos indicados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes conforme a camada estrutural executada, indicados através da Tabela 15.

Tabela 15 – Valores mínimos exigidos quanto ao CBR e expansão para diferentes camadas do pavimento

Emprego no pavimento	CBR (%)	Expansão (%)
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$
Reforço do subleito	$> CBR_{subleito}$	$\leq 1\%$
Subleito	$\geq 2\%$	$\leq 2\%$

Fonte: Adaptado de Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006a).

Em função dos valores apresentados na Tabela 15, discriminam-se os valores utilizados para cada camada através da Tabela 16:

Tabela 16 – Valor de CBR adotado para as diferentes camadas do pavimento

Camada	Material	CBR adotado (%)
Base	Brita Graduada Simples	80
Sub-base	Macadame seco	20
Subleito	Solo local	5

Fonte: O autor.

Por fim, adotando a metodologia de cálculo apresentada na seção 2.2.4 aos dados das seções transversais apresentados na Tabela 7, foram realizados os cálculos do Número Estrutural Corrigido dos trechos divididos em dois espaços temporais: pré-intervenção (denominado *SNC1*), onde foi adotado o revestimento original de projeto; e

pós-intervenção (denominado *SNC2*), sendo adotado como revestimento uma camada de concreto betuminoso usinado à quente com espessura de 5 centímetros, referente à última intervenção de restauração realizada nos trechos avaliados.

Os valores de *SNC1* e *SNC2* estão apresentados nas Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17 – Valores de Número Estrutural Corrigido pré-intervenção (*SNC1*) para os diferentes trechos avaliados

Trecho	Camada	Material	Espessura (cm)	Coefficientes $a_i$	SNC
377RSC0170,	Revestimento	TSD	2,5	$a_1 = 0,04$	2,076
377RSC0180,	Base	BGS	15	$a_2 = 0,051$	
377RSC0185	Sub-base	Macadame seco	16	$a_3 = 0,037$	
377RSC230	Revestimento	TSD	2,5	$a_1 = 0,04$	2,125
	Base	BGS	14	$a_2 = 0,051$	
	Sub-base	Macadame seco	16	$a_3 = 0,037$	

Fonte: O autor.

Tabela 18 – Valores de Número Estrutural Corrigido pós-intervenção (*SNC2*) para os diferentes trechos avaliados

Trecho	Camada	Material	Espessura (cm)	Coefficientes $a_i$	SNC
377RSC0170,	Revestimento	CBUQ	5	$a_1 = 0,166$	2,808
377RSC0180,	Base	BGS	15	$a_2 = 0,051$	
377RSC0185	Sub-base	Macadame seco	16	$a_3 = 0,037$	
377RSC230	Revestimento	CBUQ	5	$a_1 = 0,166$	2,757
	Base	BGS	14	$a_2 = 0,051$	
	Sub-base	Macadame seco	16	$a_3 = 0,037$	

Fonte: O autor.

#### 4.1.4 Modelos de previsão de desempenho avaliados

##### 4.1.4.1 Modelo proposto por Marcon (1996)

Os resultados obtidos para os diferentes trechos avaliados pela metodologia proposta por Marcon (1996) estão apresentados nas Tabelas 19, 20, 21 e 22.

Tabela 19 – Resultados para o trecho 377RSC0170 - método de Marcon

<b>Ano da avaliação</b>	<b>Idade do revestimento</b>	$N_{acum}$ (10 <sup>6</sup> )	<b>QI Idade</b> (contagens/km)	<b>QI <math>N_{acumulado}</math></b> (contagens/km)
2018	14	9,30	34,64	58,65
2019	15	9,49	35,80	59,23
2020	16	9,68	36,96	59,83
2021	17	9,89	38,13	60,44
2022	19	10,09	39,29	61,07

Fonte: O autor.

Tabela 20 – Resultados para o trecho 377RSC0180 - método de Marcon

<b>Ano da avaliação</b>	<b>Idade do revestimento</b>	$N_{acum}$ (10 <sup>6</sup> )	<b>QI Idade</b> (contagens/km)	<b>QI <math>N_{acumulado}</math></b> (contagens/km)
2018	18	9,29	39,29	58,64
2019	19	9,48	40,45	59,21
2020	20	9,67	41,62	59,80
2021	21	9,87	42,78	60,40
2022	22	10,01	43,95	61,41

Fonte: O autor.

Tabela 21 – Resultados para o trecho 377RSC0185 - método de Marcon

<b>Ano da avaliação</b>	<b>Idade do revestimento</b>	$N_{acum}$ (10 <sup>6</sup> )	<b>QI Idade</b> (contagens/km)	<b>QI <math>N_{acumulado}</math></b> (contagens/km)
2018	17	9,28	38,13	58,60
2019	18	9,46	39,29	59,14
2020	19	9,64	40,45	59,69
2021	20	9,82	41,62	60,25
2022	21	10,00	42,78	60,83

Fonte: O autor.

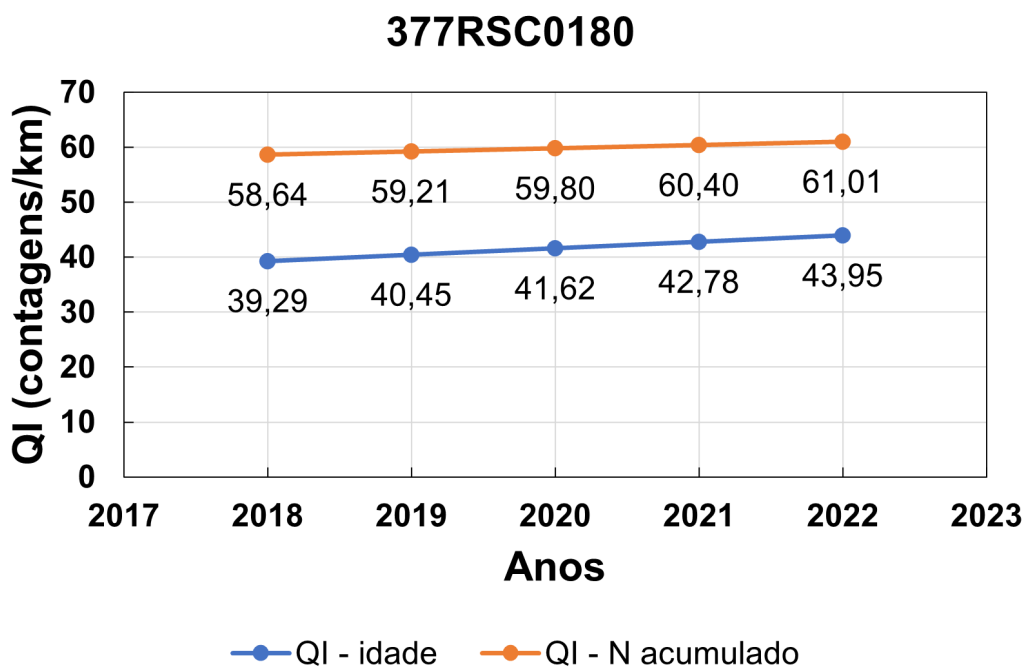
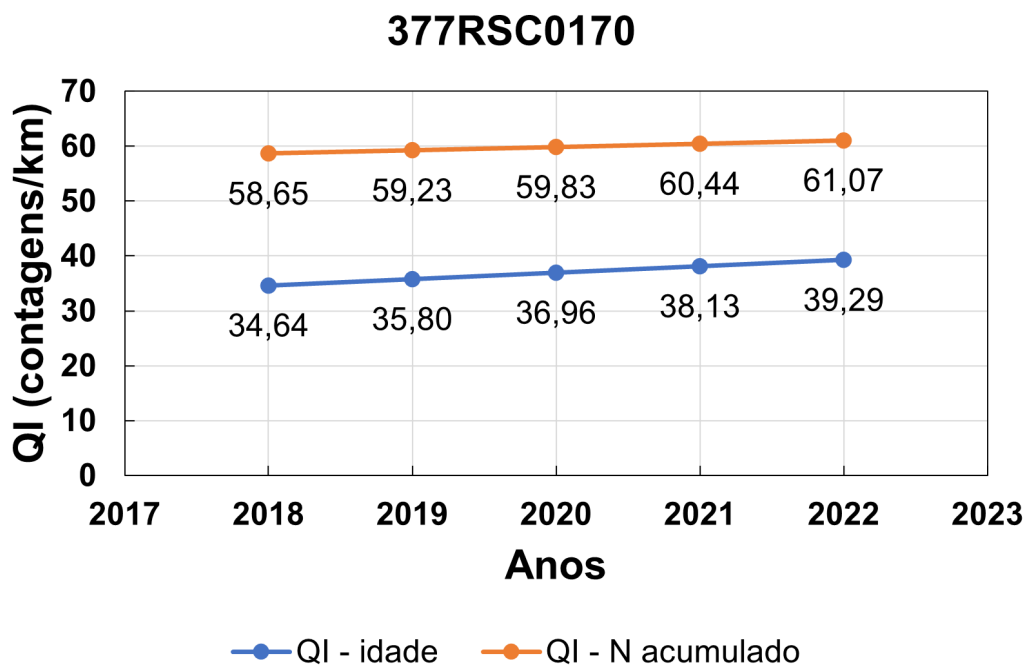
Tabela 22 – Resultados para o trecho 377RSC0230 - método de Marcon

<b>Ano da avaliação</b>	<b>Idade do revestimento</b>	$N_{acum}$ (10 <sup>6</sup> )	<b>QI Idade</b> (contagens/km)	<b>QI <math>N_{acumulado}</math></b> (contagens/km)
2018	16	9,17	36,96	58,26
2019	17	9,23	38,13	58,45
2020	18	9,30	39,29	58,65
2021	19	9,36	40,45	58,85
2022	20	9,43	41,62	59,06

Fonte: O autor.

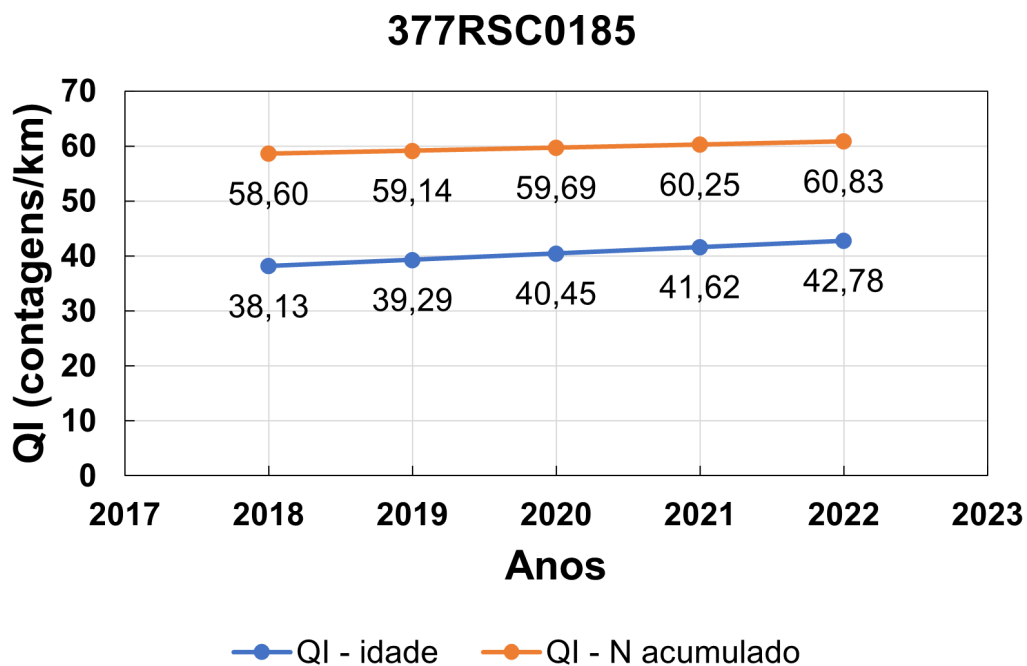
Estes resultados estão ilustrados nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Marcon (1996) - pt. 1

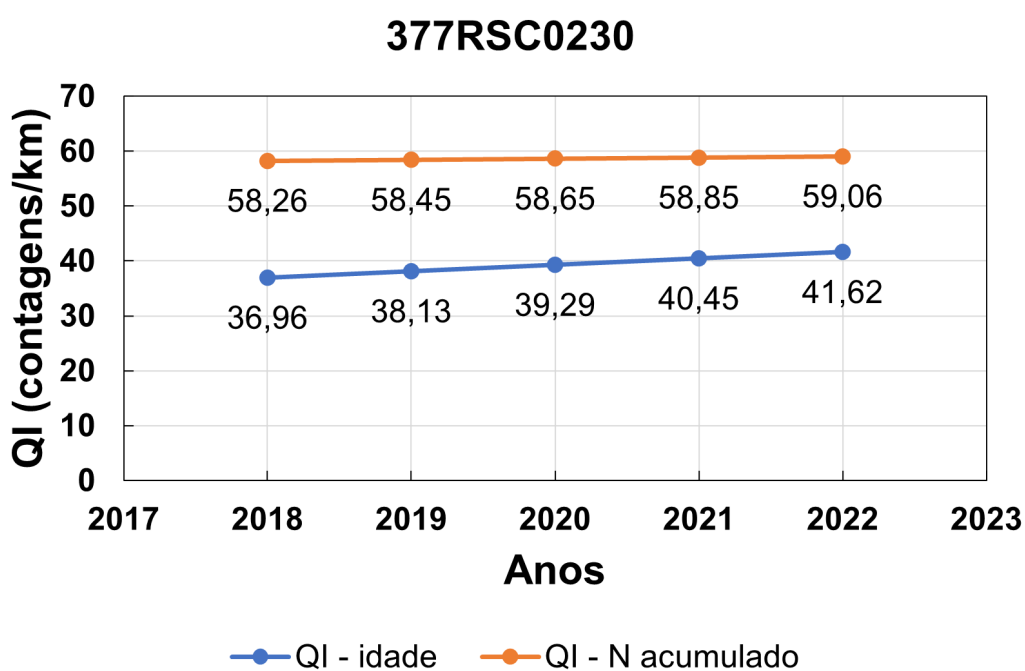


Fonte: O autor.

Figura 19 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Marcon (1996) - pt. 2



(a) Trecho 377RSC0185



(b) Trecho 377RSC0230

**Fonte:** O autor.

Pela metodologia proposta por Marcon (1996), observa-se a semelhança dos valores de QI obtidos entre os trechos. No entanto, a avaliação do QI obtido em função da idade e do QI obtido em função do número N acumulado possui divergências significativas entre si. Para esse comportamento, pode ser considerado o fator de



maior influência o método de obtenção do número N, justificado anteriormente pela metodologia do DAER-RS.

#### 4.1.4.2 Modelo proposto por Lerch (2002)

A variação do IRI obtida através do modelo de Lerch (2002) está apresentada na Tabela 23.

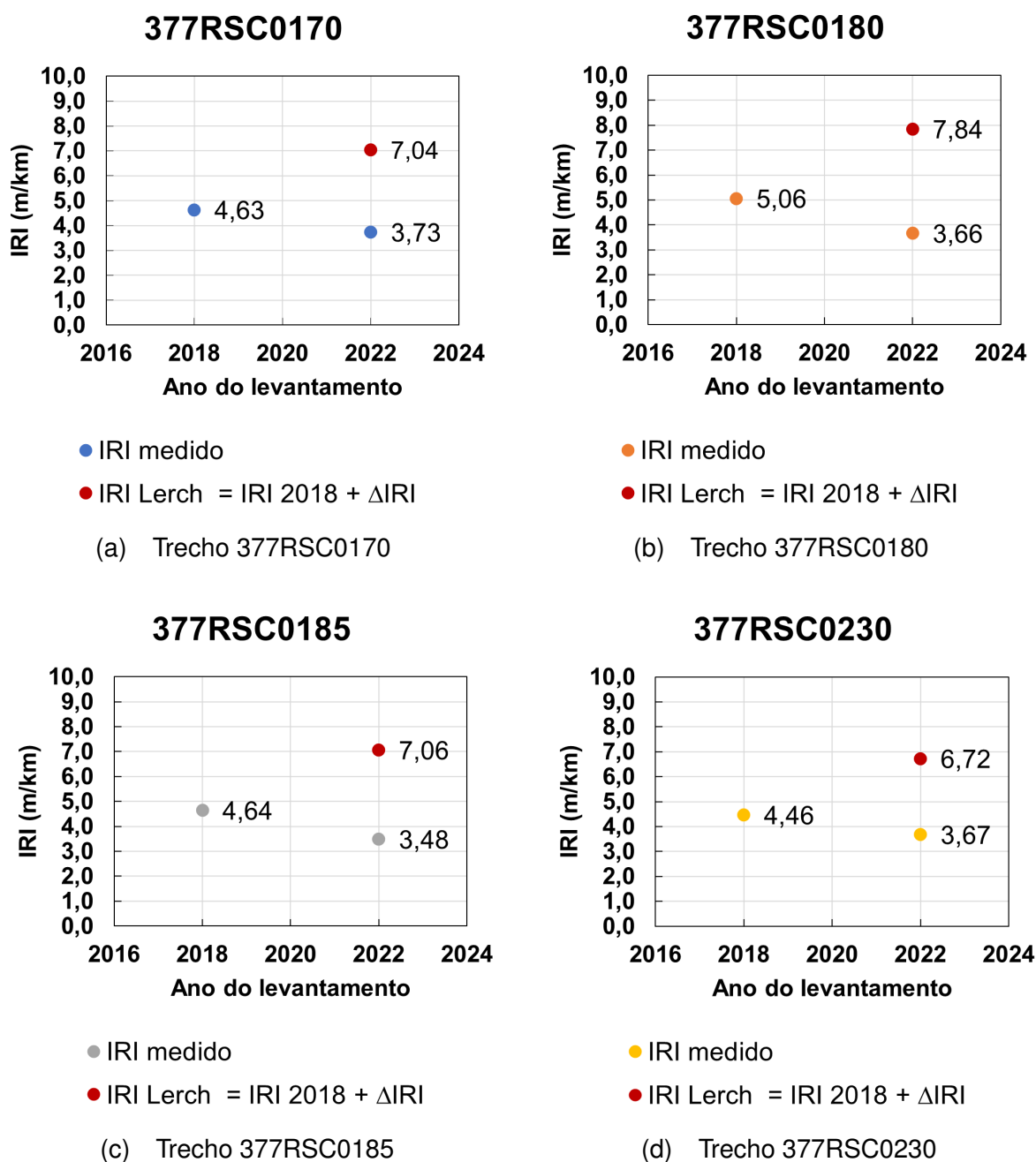
Tabela 23 – Resultados de variação do IRI ( $\Delta$ IRI) obtidos pelo método de Lerch

Trecho avaliado	Espessura do rev. (cm)	Medidas de IRI		$\Delta$ IRI
		2018	2022	
377RSC0170	5	4,63	3,73	2,41
377RSC0180	5	5,06	3,66	2,78
377RSC0185	5	4,64	3,48	2,42
377RSC0230	5	4,46	3,67	2,26

Fonte: O autor.

Na Figura 20, estão apresentados de forma gráfica os resultados obtidos através desse modelo.

Figura 20 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Lerch (2002)



Fonte: O autor.

Para os resultados obtidos pelo modelo proposto por Lerch (2002), observa-se que o modelo apresenta valores de IRI superiores ao medido em campo, uma vez que é calculado apenas o acréscimo na irregularidade desde a última medição realizada no ano de 2018. Esse cenário mostrado pelo método de Lerch (2002) é condizente com o decréscimo esperado em quatro anos de vida útil do pavimento, onde não ocorre atividades de manutenção em tempo adequado.

#### 4.1.4.3 Modelo proposto por Yshiba (2003)

A aplicação do modelo proposto por Yshiba (2003) foi dividida em duas etapas, em razão dos valores distintos de Número Estrutural Corrigido, conforme elucidado na seção 4.1.3. Os resultados obtidos para esse método nos diversos trechos avaliados estão apresentados nas Tabelas 24, 25, 26 e 27.

Tabela 24 – Resultados para o trecho 377RSC0170 - método de Yshiba (2003)

<b>Situação quanto a estrutura</b>	<b>Ano</b>	<b>P(I)</b>	<b>N</b>	<b>P(N)</b>	<b>S</b>	<b>P(S)</b>	<b>IRI calculado</b>
Revestimento de projeto + SNC pré-intervenção	2018	0,056	9,30E+06	9,296			6,03
	2019	0,111	9,49E+06	9,487			6,17
	2020	0,167	9,68E+06	9,684	2,076	-1,712	6,31
	2021	0,222	9,89E+06	9,886			6,45
	2022	0,278	1,01E+07	10,095			6,60
Revestimento recuperado + SNC pós-intervenção	2022	0,278	1,01E+07	10,095	2,808	-1,346	4,81

Fonte: O autor.

Tabela 25 – Resultados para o trecho 377RSC0180 - método de Yshiba (2003)

<b>Situação quanto a estrutura</b>	<b>Ano</b>	<b>P(I)</b>	<b>N</b>	<b>P(N)</b>	<b>S</b>	<b>P(S)</b>	<b>IRI calculado</b>
Revestimento de projeto + SNC pré-intervenção	2018	0,278	9,29E+06	9,292			6,33
	2019	0,333	9,48E+06	9,480			6,47
	2020	0,389	9,67E+06	9,673	2,076	-1,712	6,61
	2021	0,444	9,87E+06	9,871			6,76
	2022	0,500	1,01E+07	10,076			6,91
Revestimento recuperado + SNC pós-intervenção	2022	0,500	1,01E+07	10,076	2,808	-1,346	4,84

Fonte: O autor.

Tabela 26 – Resultados para o trecho 377RSC0185 - método de Yshiba (2003)

<b>Situação quanto a estrutura</b>	<b>Ano</b>	<b>P(I)</b>	<b>N</b>	<b>P(N)</b>	<b>S</b>	<b>P(S)</b>	<b>IRI calculado</b>
Revestimento de projeto + SNC pré-intervenção	2018	0,222	9,28E+06	9,281			6,25
	2019	0,278	9,46E+06	9,457			6,39
	2020	0,333	9,64E+06	9,638	2,076	-1,712	6,52
	2021	0,389	9,82E+06	9,824			6,66
	2022	0,444	1,00E+07	10,017			6,81
Revestimento recuperado + SNC pós-intervenção	2022	0,444	1,00E+07	10,017	2,808	-1,346	4,82

**Fonte:** O autor.

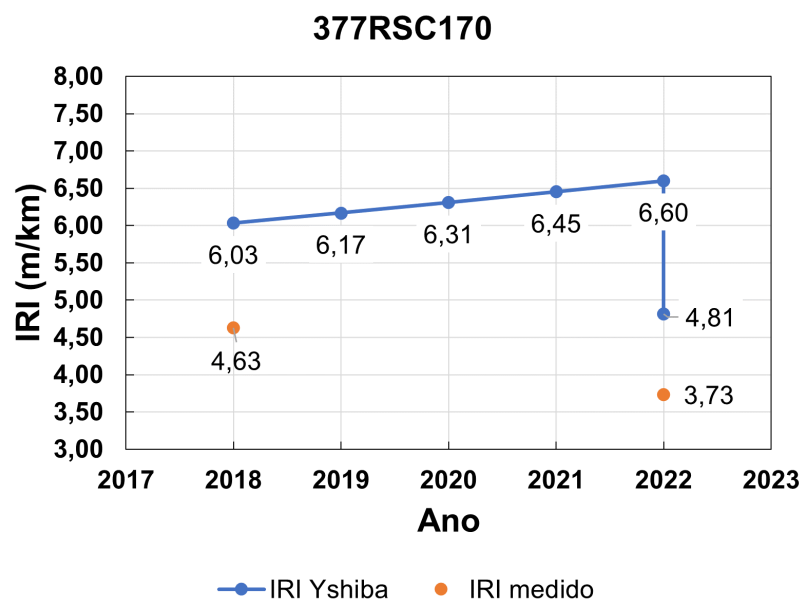
Tabela 27 – Resultados para o trecho 377RSC0230 - método de Yshiba (2003)

<b>Situação quanto a estrutura</b>	<b>Ano</b>	<b>P(I)</b>	<b>N</b>	<b>P(N)</b>	<b>S</b>	<b>P(S)</b>	<b>IRI calculado</b>
Revestimento de projeto + SNC pré-intervenção	2018	0,167	9,17E+06	9,171			6,14
	2019	0,222	9,23E+06	9,233			6,23
	2020	0,278	9,30E+06	9,297	2,125	-1,687	6,33
	2021	0,333	9,36E+06	9,363			6,43
	2022	0,389	9,43E+06	9,431			6,52
Revestimento recuperado + SNC pós-intervenção	2022	0,389	9,43E+06	9,431	2,757	-1,371	4,68

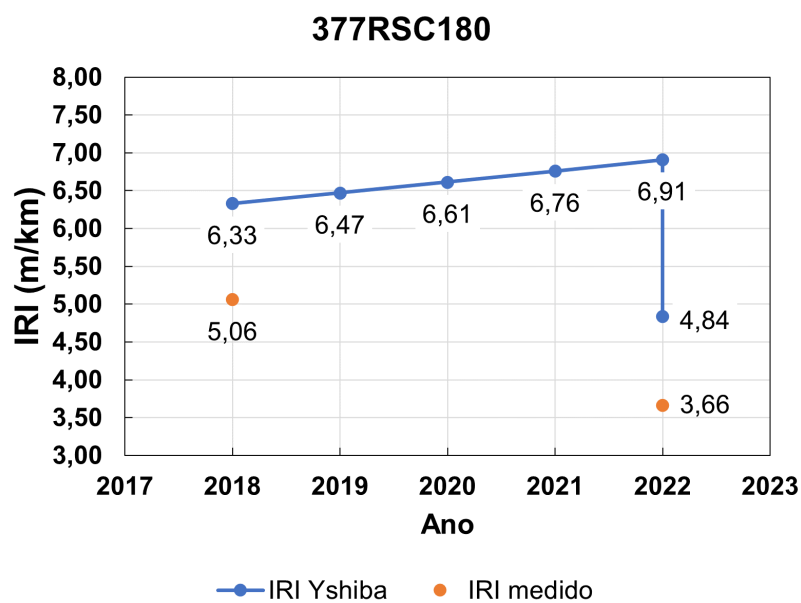
**Fonte:** O autor.

Os resultados obtidos através do modelo proposto por Yshiba (2003) estão apresentados nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Yshiba (2003) - pt. 1



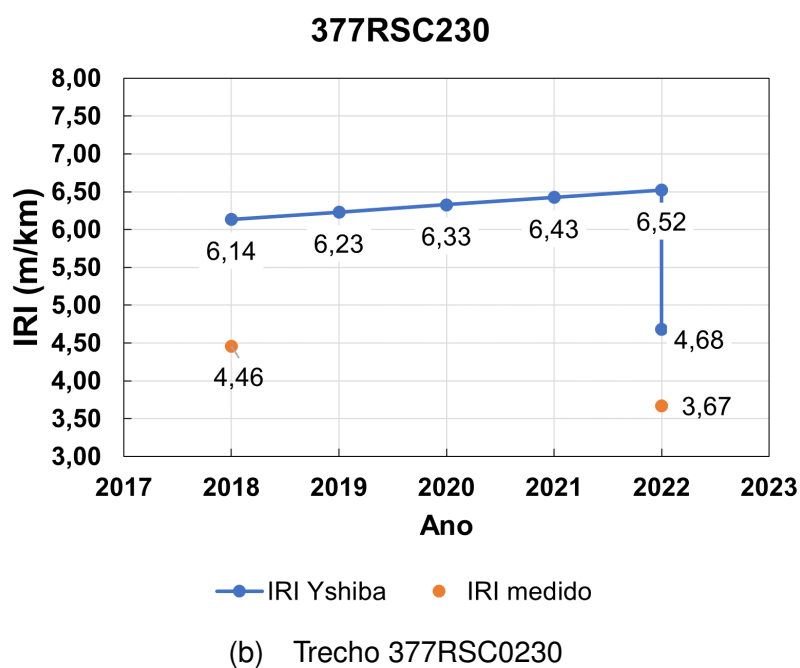
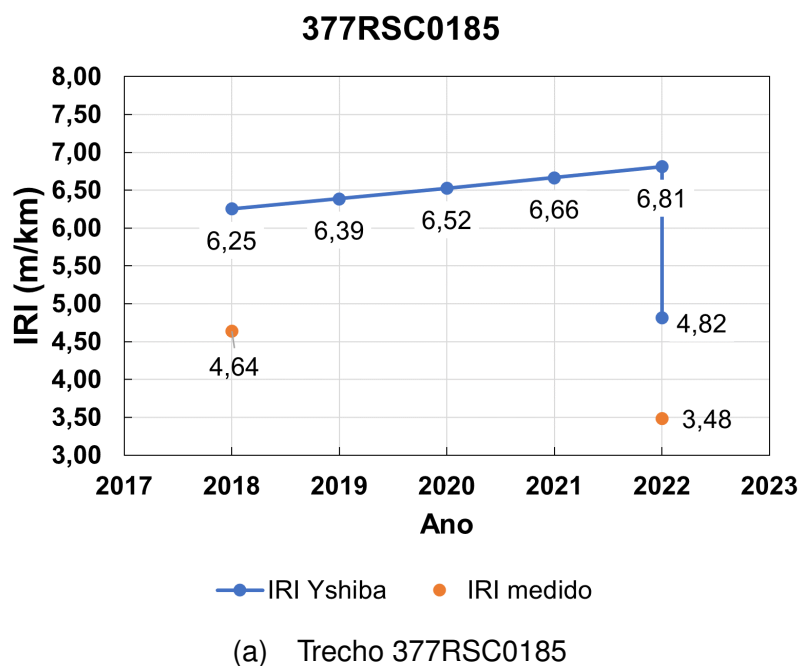
(a) Trecho 377RSC0170



(b) Trecho 377RSC0180

Fonte: O autor.

Figura 22 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Yshiba (2003) - pt. 2



Fonte: O autor.

A maior vantagem apresentada pelo modelo de Yshiba (2003) consiste na avaliação contínua do IRI ao longo dos anos, considerando ainda a possibilidade de intervenção estrutural no pavimento e como resultado a redução no valor de IRI total observado.

#### 4.1.4.4 Modelo proposto por Vitorello (2008)

Os resultados obtidos pelo modelo de desempenho proposto por Vitorello (2008) para os trechos 377RSC0170, 377RSC0180, 377RSC0185 e 377RSC0230 estão apresentados nas Tabelas 28, 29, 30 e 31, respectivamente.

Observa-se que o método proposto pelo autor considera a variável  $i$ , nos valores de 0 para não ocorrência de manutenção, e de 1 para a ocorrência. Assim, foi avaliado o impacto do processo de recapeamento ocorrido no ano de 2022 no valor observado de QI.

Tabela 28 – Resultados para o trecho 377RSC0170 - método de Vitorello (2008)

Ano da avaliação	$N_{acum}$ ( $10^6$ )	Variável $i$	QI (contagens/km)
2018	9,30		26,97
2019	9,49		27,13
2020	9,68	0	27,29
2021	9,89		27,46
2022	10,09		27,63
2022	10,09	1	33,44

Fonte: O autor.

Tabela 29 – Resultados para o trecho 377RSC0180 - método de Vitorello (2008)

Ano da avaliação	$N_{acum}$ ( $10^6$ )	Variável $i$	QI (contagens/km)
2018	9,29		26,97
2019	9,48		27,12
2020	9,67	0	27,28
2021	9,87		27,44
2022	10,07		27,61
2022	10,07	1	33,42

Fonte: O autor.

Tabela 30 – Resultados para o trecho 377RSC0185 - método de Vitorello (2008)

<b>Ano da avaliação</b>	$N_{acum}$ ( $10^6$ )	<b>Variável <math>i</math></b>	<b>QI (contagens/km)</b>
2018	9,28		26,96
2019	9,46	0	27,10
2020	9,64		27,25
2021	9,82		27,41
2022	10,01		27,56
2022	10,01		1

Fonte: O autor.

Tabela 31 – Resultados para o trecho 377RSC0230 - método de Vitorello (2008)

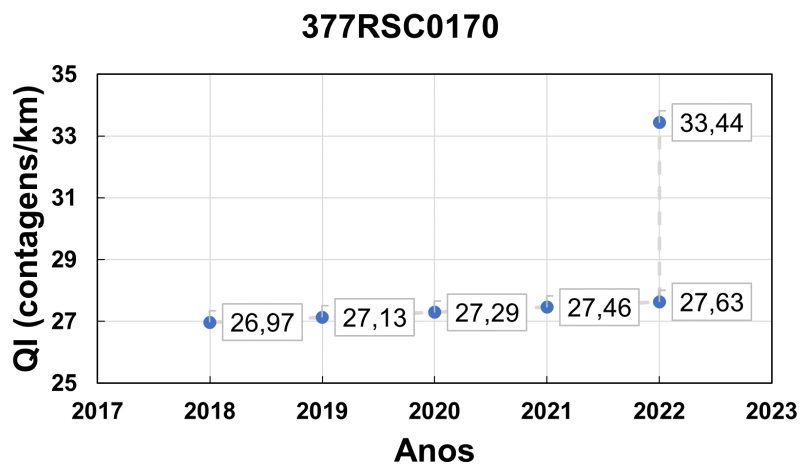
<b>Ano da avaliação</b>	$N_{acum}$ ( $10^6$ )	<b>Variável <math>i</math></b>	<b>QI (contagens/km)</b>
2018	9,28		26,96
2019	9,46	0	27,10
2020	9,64		27,25
2021	9,82		27,41
2022	10,01		27,56
2022	10,01		1

Fonte: O autor.

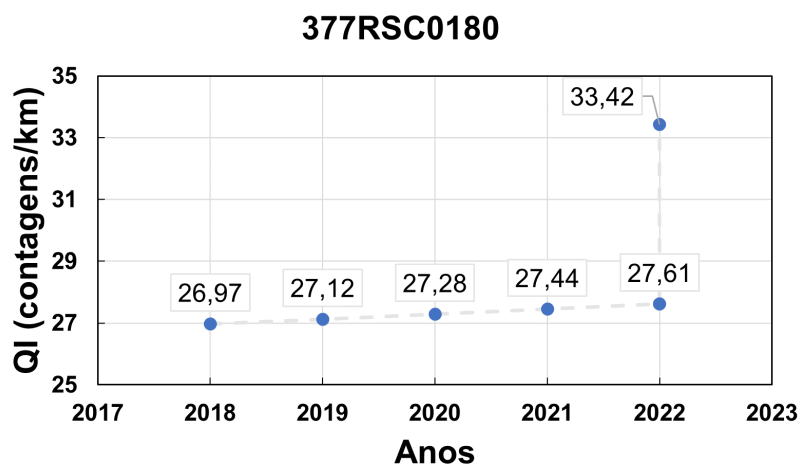
Está apresentada de forma gráfica a síntese de resultados obtidos pelo modelo proposto por Vitorello (2008) nas Figuras 23 e 24.



Figura 23 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Vitorello (2008) - pt. 1



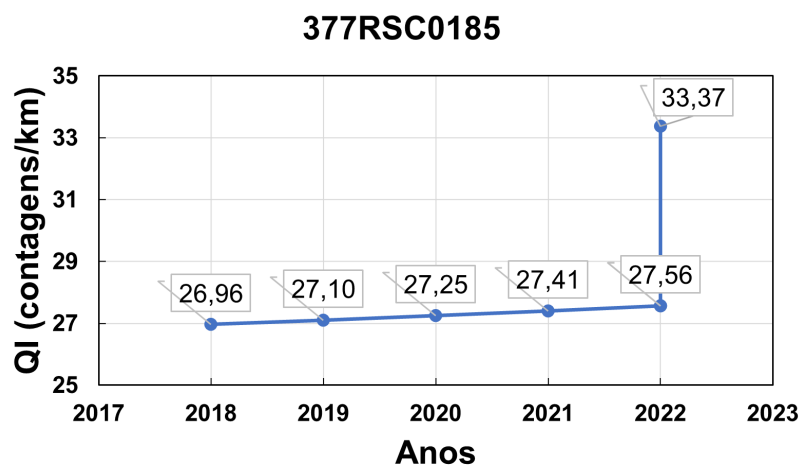
(a) Trecho 377RSC0170



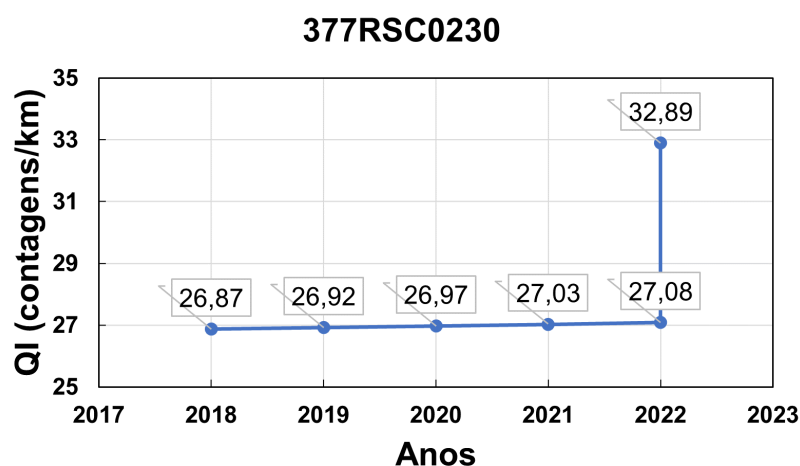
(b) Trecho 377RSC0180

Fonte: O autor.

Figura 24 – Resultados obtidos através do modelo proposto por Vitorello (2008) - pt. 2



(a) Trecho 377RSC0185



(b) Trecho 377RSC0230

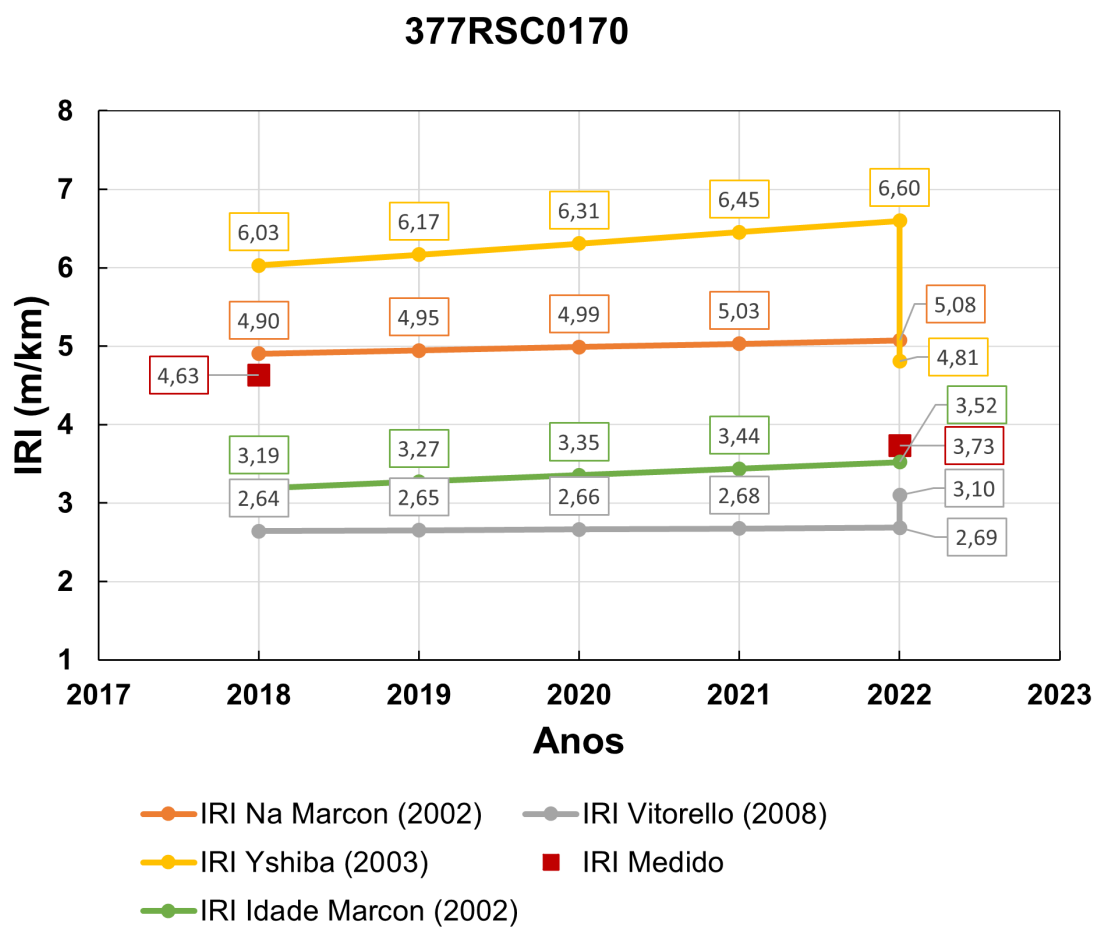
Fonte: O autor.

## 4.2 Comparação com a conversão de QI para IRI para os modelos avaliados

De modo a desenvolver um panorama geral de avaliação com base em um único parâmetro de irregularidade longitudinal, nesse caso, o IRI, foi adotado a Equação 2.2 apresentada no Capítulo 2 para a conversão dos valores obtidos de QI pelos métodos de Marcon (1996) e Vitorello (2008).

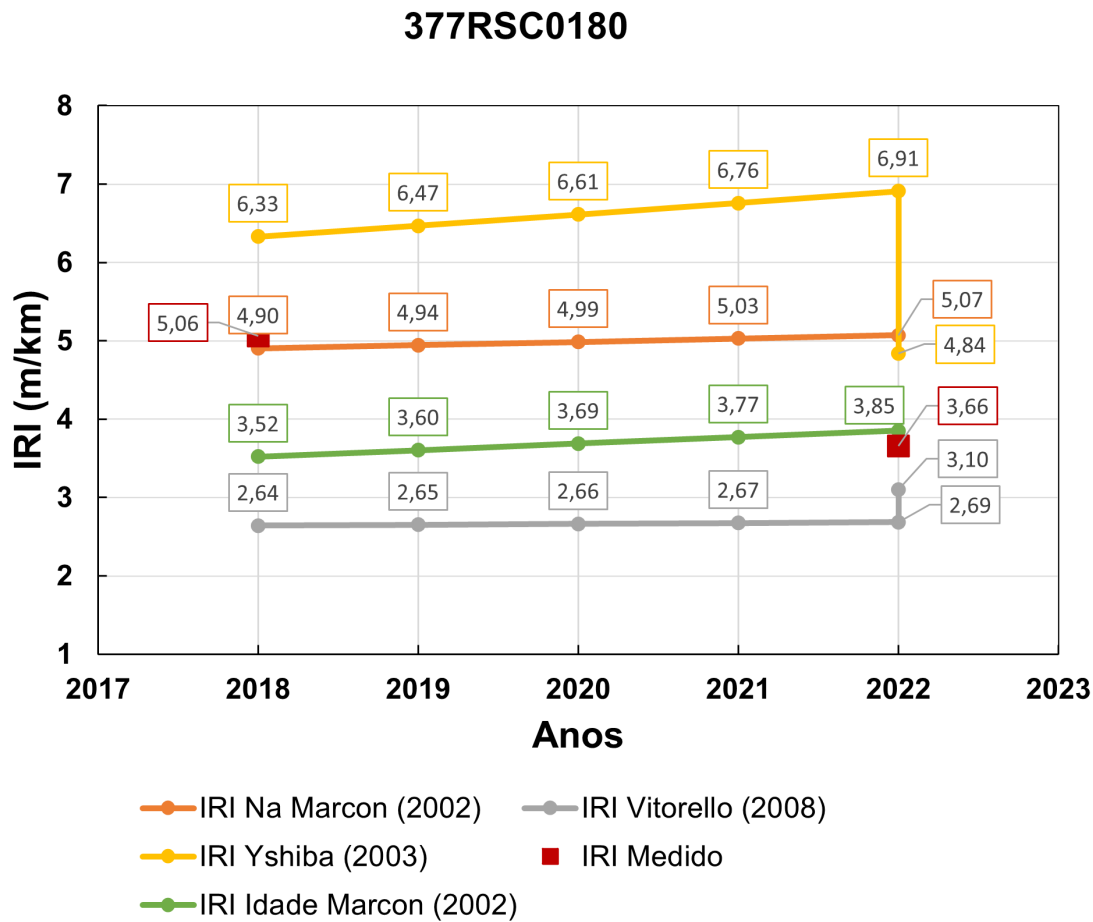
Os resultados para os trechos 377RSC0170, 377RSC0180, 377RSC0185 e 377RSC0230 estão ilustrados nas Figuras 25, 26, 27 e 28, respectivamente.

Figura 25 – Síntese de resultados para IRI com os modelos – Trecho 377RSC0170



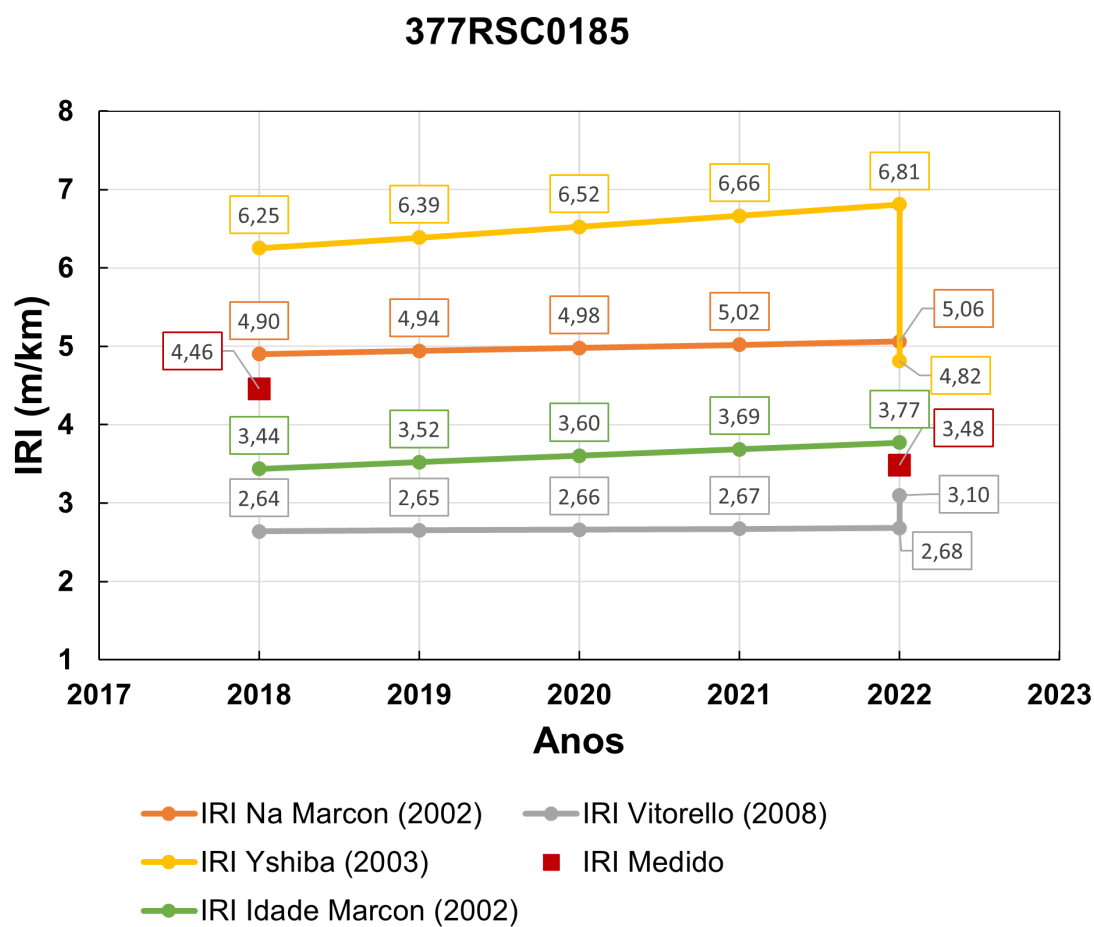
Fonte: O autor.

Figura 26 – Síntese de resultados para IRI com os modelos – Trecho 377RSC0180



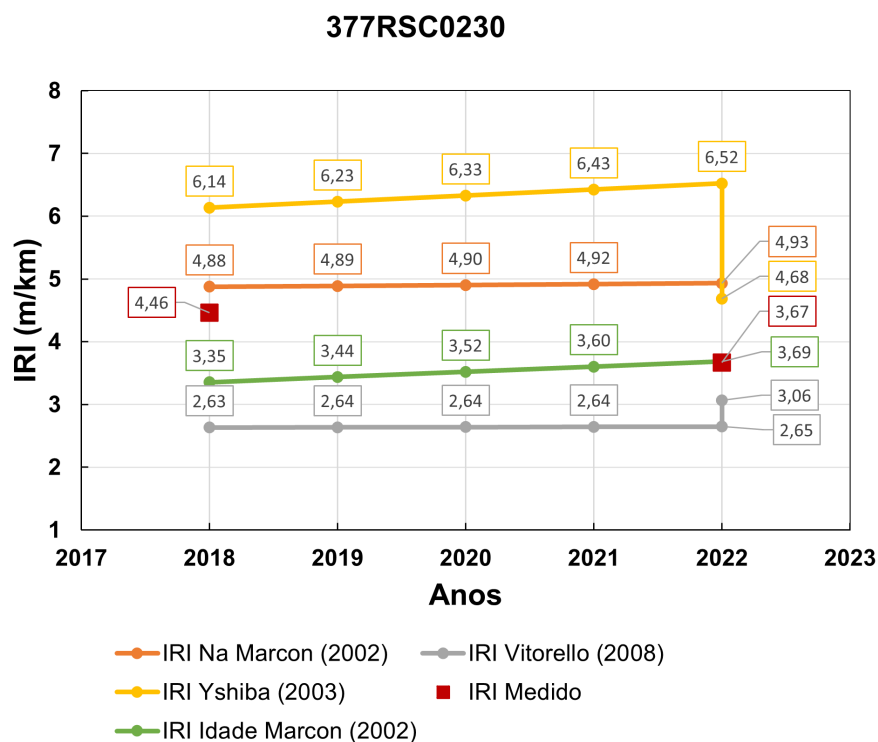
Fonte: O autor.

Figura 27 – Síntese de resultados para IRI com os modelos – Trecho 377RSC0185



Fonte: O autor.

Figura 28 – Síntese de resultados para IRI com os modelos – Trecho 377RSC0230



**Fonte:** O autor.

De forma geral, para todos os trechos avaliados, observa-se que a melhor aproximação da conversão do modelo proposto por Marcon (2002) em função da idade do pavimento aos valores de IRI medidos no ano de 2022, enquanto que para os valores iniciais de 2018 a melhor aproximação corresponde ao modelo proposto por Marcon (2002) em função do número N acumulado. Pela indisponibilidade de dados suficientes para obtenção de uma regressão linear estatisticamente representativa, não foi possível desenvolver um modelo de desempenho para os trechos avaliados na RSC-377, e, por esta razão, a avaliação da aderência estatística dos modelos avaliados foi prejudicada.

No entanto, para uma análise exploratória, pode-se avaliar positivamente a utilização de todos os modelos de desempenho abordados nesta pesquisa, com destaque aos modelos de Vitorello (2008) e Lerch (2002) pelas condições geográficas e de tráfego similares àquelas observadas na rodovia RSC-377.

## 5 CONCLUSÃO

O conhecimento de condições funcionais e estruturais de uma rodovia é de fundamental importância no contexto de Sistema de Gerência de Pavimentos, uma vez que estas informações são norteadoras para a tomada de decisões tanto em âmbito de rede como em âmbito de projeto. Dentre as principais medidas de avaliação funcional direta, destaca-se os parâmetros de Índice Internacional de Irregularidade (IRI) e o Quociente de Irregularidade (QI), cada qual com sua metodologia própria de obtenção e representação da irregularidade longitudinal do pavimento.

Esta pesquisa teve como principal objetivo a aplicação de diferentes métodos de previsão de desempenho apresentados na literatura para a estimação de valores de IRI e QI ao longo de um período de tempo de 2018–2022, o qual se tem registro de medição de IRI em campo. Foram avaliados quatro trechos da rodovia estadual RSC-377, entre os municípios de Alegrete, Manoel Viana e São Francisco de Assis (RS).

Para realizar esta estimação, foram adotados os métodos de Lerch (2002) e Yshiba (2003), para avaliação do IRI; e os métodos de Marcon (1996) e Vitorello (2008), para avaliação do QI.

A adoção de diferentes métodos para a estimação destes parâmetros se mostrou benéfica, uma vez que cada metodologia apresenta características distintas e simplificações próprias para sua aplicação. Desta forma, a utilização de modelos oferecidos em literatura agregam conhecimento acerca dos trechos em estudo, no entanto, não dispensam a realização de levantamentos próprios.

Uma vez que estes modelos foram desenvolvidos para outras rodovias, em condições climáticas, de tráfego e com composições estruturais distintas, é preciso ter cautela com a adoção destes valores como fixos ou mandatórios, ou ainda a extrapolação destes dados para períodos de tempo em que não se disponha de medidas físicas de irregularidade longitudinal para a comparação.

A base de dados disponível para consulta se mostrou limitada, restringindo a realização das propostas iniciais da pesquisa. No entanto, a aplicação dos diferentes métodos de previsão de desempenho foi positiva e permitiu comparar resultados obtidos de parâmetros funcionais com facilidade. Como desvantagem da limitação quanto aos dados, ressalta-se ainda a impossibilidade de comparação direta das estimativas obtidas aos dados *in loco*. Estas comparações possibilitariam uma análise mais criteriosa da acurácia dos modelos adotados e ainda a elaboração de um modelo de previsão de desempenho próprio para a rodovia RSC-377, de importância fundamental à economia da Fronteira Oeste. O desenvolvimento de tal modelo de previsão de desempenho é sugestão do autor para o enriquecimento da temática de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis voltada para a região do estado.

Outro aspecto a ser considerado é a diferença entre a metodologia empregada pelo DAER/RS e o DNIT na obtenção do número N. Na impossibilidade de conversão direta entre os valores de N, em função da metodologia de contagem de tráfego adotada pelo DAER/RS, deve-se considerar uma possível divergência no subdimensionamento deste valor. Nesse trabalho, optou-se por manter a metodologia do órgão do qual se originam os dados de tráfego, de modo a minimizar a intercorrência de ruído nos dados. Assim, é possível que as estimativas encontradas para valores de IRI e QI sejam diferentes dos valores esperados.

De modo geral, em oposição à escassez de dados relativos ao comportamento estrutural e funcional da RSC-377 nos trechos avaliados, este projeto de pesquisa obteve como resultados diferentes estimativas de evolução de parâmetros de irregularidade longitudinal ao longo do período de 2018–2022, com base em destacadas pesquisas realizadas em território nacional.

Como sugestões para a realização de pesquisas futuras em consonância com o tema abordado, enumera-se:

- Obtenção de dados melhor representativos quanto à composição do pavimento, através de sondagens;
- Adoção de outros modelos de desempenho baseados em outros parâmetros funcionais, como o Índice de Gravidade Global (IGG);
- Replicação dos modelos de desempenho utilizados em outros trechos da malha rodoviária estadual, onde estejam disponíveis os dados necessários.



## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Fernando Silva. **Sistema de gerência de pavimentos para departamentos de estradas do Nordeste brasileiro**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Pavement Management Guide**. 2. ed. [S.l.], 2012.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p.
- BARELLA, Rodrigo Maluf. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. 362 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2008.
- BASÍLIO, Rafael. **Análise do comportamento de pavimentos de rodovias estaduais de Goiás: estudo de caso**. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, SC, 2002.
- BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022. 730 p.
- BUENO, Lucas Dotto. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: Estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. Santa Maria: [s.n.], 2016. 460 p.
- CAREY, W. N.; IRICK, P. E. The pavement serviceability-performance concept: Highway research board bulletin, 250. **National Research Council, Washington, DC**, 1960.
- Conselho Nacional de Trânsito. **O transporte move o Brasil: Propostas da CNT ao país**. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://cnt.org.br/propostas-cnt-transporte>>.
- \_\_\_\_\_. **Pesquisa CNT de rodovias**. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>.
- Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **IS-110/10: Instrução de serviço para estudos de tráfego**. 1. ed. Porto Alegre, 2010. 17 p. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Diretoria de Gestão e Projetos.
- \_\_\_\_\_. **IS-112/21: Instrução de serviço para estudos e projetos CREMA**. 1. ed. Porto Alegre, 2021. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Diretoria de Gestão e Projetos.
- \_\_\_\_\_. **Mapa Rodoviário Interativo do Rio Grande do Sul**. 2023. Recurso Online. Seção de Cadastro e Cartografia/SPR/DGP/DAER. Disponível em: <<https://mapa.daer.rs.gov.br/i3geo/interface/ol.htm>>.
- \_\_\_\_\_. **Sistema Rodoviário Estadual (SRE): Levantamento de março/2023**. 2023. Recurso Online. Seção de Cadastro e Cartografia/SPR/DGP/DAER. Disponível em: <<https://mapa.daer.rs.gov.br/i3geo/interface/ol.htm>>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 011/79**: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – procedimento B. Rio de Janeiro, 1979. 16 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 009/2003 - PRO**: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 06 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Publicação IPR - 719**: Manual de pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

\_\_\_\_\_. **Publicação IPR - 720**: Manual de restauração de pavimentos asfálticos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 310 p.

\_\_\_\_\_. **Publicação IPR - 723**: Manual de estudos de tráfego. 1. ed. Rio de Janeiro, 2006. 384 p.

\_\_\_\_\_. **Publicação IPR - 745**: Manual de gerência de pavimentos. 1. ed. Rio de Janeiro, 2011. 189 p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 442/2023 - PRO**: Pavimentação – levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial – procedimento. Rio de Janeiro, 2023. 19 p.

ESPINDOLA, Aline Calheiros. **Modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis para uma rodovia no Rio de Janeiro**. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Instituto Militar de Engenharia – IME, Rio de Janeiro, 2014.

Estado do Rio Grande do Sul. Decreto n° 40.603, de 23 de janeiro de 2001. **Diário Oficial [da] Assembleia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2001. Declara de utilidade pública, para fins de desapropriação, bens necessários à construção do segmento da RST/377 - Trecho: CONTORNO LESTE DE ALEGRETE. Disponível em: [https://www.al.rs.gov.br/legis/m010/M0100099.ASP?Hid\\_Tipo=TEXTO&Hid\\_TodasNormas=2086&hTexto=&Hid\\_IDNorma=2086](https://www.al.rs.gov.br/legis/m010/M0100099.ASP?Hid_Tipo=TEXTO&Hid_TodasNormas=2086&hTexto=&Hid_IDNorma=2086).

\_\_\_\_\_. Lei n° 11.786, de 17 de abril de 2002. Denomina "João Simões Lopes Neto" o trecho da Rodovia RST/377. **Assembleia Legislativa. Gabinete de Consultoria Legislativa**, Porto Alegre, RS, 18 abr. 2002. Disponível em: [http://www.al.rs.gov.br/legis/M010/M0100099.ASP?Hid\\_Tipo=TEXTO&Hid\\_TodasNormas=1218&hTexto=&Hid\\_IDNorma=1218](http://www.al.rs.gov.br/legis/M010/M0100099.ASP?Hid_Tipo=TEXTO&Hid_TodasNormas=1218&hTexto=&Hid_IDNorma=1218).

\_\_\_\_\_. Decreto n° 40.126, de 07 de junho de 2000. **Diário Oficial [da] Assembleia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2004. Declara de utilidade pública, para fins de desapropriação pelo DAER, bens necessários à construção do segmento da RST/377 - Trecho: Alegrete - Manoel Viana. Disponível em: [https://www.al.rs.gov.br/legis/m010/M0100099.ASP?Hid\\_Tipo=TEXTO&Hid\\_TodasNormas=3169&hTexto=&Hid\\_IDNorma=3169](https://www.al.rs.gov.br/legis/m010/M0100099.ASP?Hid_Tipo=TEXTO&Hid_TodasNormas=3169&hTexto=&Hid_IDNorma=3169).

\_\_\_\_\_. Decreto n° 43.269, de 28 de julho de 2004. **Diário Oficial [da] Assembleia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2004. Declara de utilidade pública, para fins de desapropriação pelo DAER, bens necessários à construção da RST/377, trecho: São Francisco de Assis - Manoel Viana. Disponível

em: ([https://www.al.rs.gov.br/legis/m010/M0100099.ASP?Hid\\_Tipo=TEXTO&Hid\\_TodasNormas=47846&hTexto=&Hid\\_IDNorma=47846](https://www.al.rs.gov.br/legis/m010/M0100099.ASP?Hid_Tipo=TEXTO&Hid_TodasNormas=47846&hTexto=&Hid_IDNorma=47846)).

FERNANDES JÚNIOR, José Leomar; ODA, Sandra; ZERBINI, Luiz Francisco. **Defeitos e atividades de manutenção e reabilitação em pavimentos asfálticos**. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2006. 105 p.

HAAS, Ralph; HUDSON, W. Ronald. **Pavement Asset Management**. [S.l.]: Scrivener Publishing LLC, 2015. 387 p.

HAAS, Ralph; HUDSON, W. Ronald; ZANIEWSKI, John P. **Modern pavement management**. Florida: Krieger Publishing Company, 1994. 579 p.

LERCH, Rafael Lucca. **Previsão de irregularidade pós-recape em rodovias do RS**: Ajuste do modelo HDM-4. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LYTTON, R. L. Concepts of pavement performance prediction and modeling. In: **Proceedings of Second North American Conference on Managing Pavements**. Toronto: [s.n.], 1987. v. 2, p. 2.3–2.19.

MARCON, A. F. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

NASCIMENTO, Deise Menezes. **Análise comparativa de modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis**. 154 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

NUNES, Diego Frinhani. **Procedimento para análise de sensibilidade do Programa HDM-4**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PATERSON, William D. O. **Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management**. Baltimore, Maryland: John Hopkins University Press, 1987. 439 p. (The Highway design and maintenance standards series).

PETERSON, Dale E. **National Cooperative Highway Research Program 135 – Synthesis of Highway Practice: Pavement management practices**. Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 1987. 139 p.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto Simões. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. São Paulo: Synergia, 2010.

QUEIROZ, C. A. V. **Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil**. 1981 p. Dissertação (Dissertation for the Degree of Philosophy Doctor) — University of Texas, Austin, TX, 1981.

RITTER, J. A. Análise comparativa entre os métodos utilizados por DAER-RS e DNIT para determinação do número N. Porto Alegre, p. 35, 2021.

SANTHIER, Ana Julia; LUVIZÃO, Gislaïne. Análise da irregularidade longitudinal do pavimento por meio de comparação de dois métodos: perfilômetro a laser e aplicativo de smartphone smartiri – estudo de caso sc-. **Conhecimento em Construção**, v. 9, p. 7–32, jun. 2022. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/conhecconstr/article/view/30050>.

SAYERS, Michael W.; GILLESPIE, Thomas D.; PATERSON, William D. O. **Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements**. Washington D.C., 1986.

Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 7. ed. Porto Alegre, 2022. 125 p. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>.

SERAFINI, Lauson. **Critérios para priorização de intervenções de manutenção em pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.

SILVA, Luiz Antônio da. **Sistema de Gerência de Pavimentos do DER/SP**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

STELMACH, Jéssica Kurz; MITIDA, Nilana Negreiros; BRITO, Lélío Antônio Teixeira. Previsão da redução da irregularidade em pavimentos pós-recapeamento baseado no banco de dados INFOPAVE. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 32., 2018, Gramado–RS. **Anais . . . .** [S.l.]: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2018. p. 1254–1264.

VITORELLO, Thiago. **Análise de desempenho de estrutura de pavimento flexível da rodovia BR-290/RS no trecho Osório-Porto Alegre**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

YSHIBA, José Kiynga. **Modelos de desempenho de pavimento**: estudo de rodovias do estado do Paraná. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.