

Universidade de Passo Fundo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil e Ambiental  
Infraestrutura e Meio Ambiente

Paula Weber Prediger

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS  
DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL E  
AFUNDAMENTO EM TRILHAS DE RODA PARA UM  
TRECHO DA BR 285

Passo Fundo  
2016

Paula Weber Prediger

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS  
DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL E  
AFUNDAMENTO EM TRILHAS DE RODA PARA UM  
TRECHO DA BR 285

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa e coorientação do Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto.

Passo Fundo  
2016

Paula Weber Prediger

**Desenvolvimento de Modelos de Irregularidade Longitudinal e Afundamento em Trilhas de Roda para um trecho da BR 285**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia, na área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Data de aprovação: 15 de dezembro de 2016.

Os membros componentes da Banca Examinadora abaixo aprovam a Dissertação.

Francisco Dalla Rosa, Dr.  
Orientador

Pedro Domingos Marques Prietto, Dr.  
Coorientador

Márcio Muniz de Farias, Dr.  
Universidade de Brasília

Adalberto Pandolfo, Dr.  
Universidade de Passo Fundo

Antonio Thomé, Dr.  
Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo  
2016

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família e meu companheiro Jean, pelo incentivo e apoio para a conclusão de mais uma etapa de formação acadêmica.

Ao Professor Francisco Dalla Rosa, pela orientação e ensinamentos.

Ao engenheiro Paulo C. Pinto e à empresa Pavesys, pela disponibilização das informações necessárias à realização deste estudo e pelas imprescindíveis contribuições.

Ao Professor Pedro Domingos Marques Prietto, pelas indispensáveis sugestões.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta etapa.

## RESUMO

A idade dos pavimentos brasileiros, juntamente à intensa solicitação do tráfego e o limitado investimento em infraestrutura resultou em uma malha rodoviária deficiente. Os orçamentos restritos exigem um sistema de gerenciamento para decidir acerca dos investimentos para cada trecho de um pavimento, através da utilização de modelos de previsão de desempenho. O objetivo deste estudo foi desenvolver modelos de previsão de desempenho para um trecho de uma rodovia com pavimentação asfáltica, localizado na região norte do estado do Rio Grande do Sul, visando sua aplicação em nível de rede. Os modelos foram desenvolvidos para a deformação permanente em trilha de roda (ATR) e para a irregularidade longitudinal (IRI), duas importantes medidas do desempenho de um pavimento. A idade do pavimento foi definida pelo ano em que se observou diminuição do valor do defeito maior do que o mínimo estabelecido. Observou-se que tanto o IRI quanto o ATR evoluíram de forma não linear e foram desenvolvidas equações logarítmicas. Os modelos foram desenvolvidos através de análise de regressão entre a variável dependente (IRI ou ATR) e a variável independente (idade do pavimento e condição inicial do pavimento), determinando os coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$ . Para melhorar os resultados da regressão foi aplicada a técnica estatística de *bootstrapping*. A equação criada para estimar a evolução do IRI apresentou rmse igual a 0,6772 e a equação para a evolução do ATR, rmse igual a 5,2577. A dificuldade de acesso às informações acerca de materiais e sistemas construtivos detalhados e atuais fez com que todo o trecho fosse considerado homogêneo e impossibilitou a criação de modelos mais adequados às características de cada parte do pavimento. Concluiu-se que o modelo de IRI foi adequado e, mesmo sendo um modelo simples, representa melhor o pavimento do que outros modelos conhecidos. O modelo de ATR não foi adequado e deve ser definida outra relação para a análise de regressão. Foi possível determinar, através destes modelos, quais trechos necessitam manutenção, prevendo, a partir daí, as prioridades e os gastos com manutenção em cada ano.

**Palavras-chave:** análise de regressão; afundamento em trilhas de roda; *bootstrapping*, irregularidade longitudinal.

## ABSTRACT

The age of Brazilian pavements, along the intense traffic and the limited investment in infrastructure has resulted in a poor road network. Restricted budgets require a management system to decide on investments for each section of a pavement, through the use of performance prediction models. The goal of this research was to develop performance prediction models for part of a road with asphaltic pavement at the northern region of Rio Grande do Sul, aiming their application on network level. The models were developed to predict wheel track rutting and roughness, through the international roughness index (IRI), two important measures of pavement performance. The age of the pavement was set by the year that showed defect value reduction larger than the minimum established. It was observed that both rutting and IRI evolved non-linearly and logarithmic equations were developed. The equations were developed through regression analysis between the dependent variable (rutting or IRI) and the independent variable (pavement age and initial pavement condition), determining the coefficients  $b_1$ ,  $b_2$  and  $b_3$ . To improve regression results was applied the statistical technique *bootstrapping*. The equation created to estimate IRI evolution showed rmse equal to 0,6772 and the equation for rutting evolution, rmse equal to 5,2577. The difficulty to access detailed and current information about material and building systems made the whole pavement be considered homogeneous and made it impossible to create models more suited to each part of the pavement characteristics. It was concluded that the IRI model was adequate and, even as a simple model, represents the pavement better than other known models. The rutting model was not adequate and needs a more suitable relation to regression analysis. It was possible to determine, through these models, which sections needs maintenance, predicting, then, the priorities and the spendings with maintenance in each year.

**Key-words:** regression analysis; wheel track rutting; bootstrapping; roughness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Indicação conceitual dos efeitos da qualidade de rolamento nos custos de logística .....	16
Figura 2: Corte transversal de uma seção de um pavimento flexível .....	21
Figura 3: Afundamento nas trilhas de roda – por consolidação .....	24
Figura 4: Afundamento nas trilhas de roda – por plástico .....	25
Figura 5: Faixas de valores de IRI por tipo de pavimento .....	26
Figura 6: Tipos de curvas de afundamento em trilhas de roda considerando os efeitos de umidade e conservação .....	29
Figura 7: Afundamento em função do tempo .....	33
Figura 8: Irregularidade em função do tempo .....	33
Figura 9: Componentes de um sistema de gerência de pavimentos .....	34
Figura 10: Crescimento do consumo de combustível em função do crescimento do IRI .....	37
Figura 11 – Ilustração conceitual do ciclo de vida das condições de um pavimento .....	38
Figura 12: Trecho de estudo situado no território nacional .....	47
Figura 13: Trecho de estudo situado no estado do Rio Grande do Sul .....	48
Figura 14: Trecho da rodovia a ser analisado .....	48
Figura 15: Km 291 da BR-285, a 600m do início do trecho .....	49
Figura 16: Km 384 da BR-285, a 10m do final do trecho .....	49
Figura 17: Km 337+200: início do trecho de projeto .....	50
Figura 18: Km 403, a 698 metros do final do trecho de projeto .....	50
Figura 19: Combinação dos dados de monitoramento e projeto da rodovia .....	51
Figura 20: Planta do trecho entre o km 337+200 e o km 403+698 da rodovia BR-285.....	53
Figura 21: Perfil longitudinal da rodovia BR-285 entre o km 337+200 e o km 403+698 .....	54
Figura 22: Camadas existentes no pavimento do trecho analisado.....	55
Figura 23: Trecho da BR-285 no mapa geotécnico do norte do estado do RS.....	56
Figura 24: Trechos por faixas de valores de IRI por ano.....	64
Figura 25: Variação do IRI antes e após a manutenção.....	66

Figura 26: Comportamento esperado do IRI em função do tempo e da ocorrência de manutenções.....	66
Figura 27: Número de trechos com evolução por anos consecutivos.....	67
Figura 28: Histogramas IRI por idade.....	68
Figura 29: Valores de IRI inicial para os anos iniciais.....	69
Figura 30: Relação da idade do pavimento com a variação do IRI .....	69
Figura 31: Evolução do IRI por ano para trechos com IRI inicial diferentes.....	70
Figura 32: Evolução não linear do incremento do IRI .....	71
Figura 33: Comparação do IRI previsto com o IRI medido .....	73
Figura 34: Comparação do IRI previsto com o IRI medido – constantes estimadas .....	74
Figura 35: Comparação do IRI previsto com o IRI medido – mediana do IC .....	75
Figura 36: Comparação do IRI previsto com o IRI medido por idades .....	75
Figura 37: Relação entre b1 e b2, b1 e b3 e b2 e b3 .....	74
Figura 38: Histogramas dos coeficientes .....	77
Figura 39: Tempo até a necessidade de manutenção .....	78
Figura 40: Distribuição dos trechos por faixa de valores de ATR .....	80
Figura 41: Número de trechos com evolução por anos consecutivos .....	81
Figura 42: Histogramas ATR por idade .....	82
Figura 43: Valores de IRI medidos para os anos iniciais .....	82
Figura 44: Relação da idade do pavimento com a variação do ATR .....	83
Figura 45: Evolução do ATR por ano para trechos com ATR inicial diferentes.....	83
Figura 46: Comparação do ATR previsto com o IRI medido .....	85
Figura 47: Comparação do ATR previsto com o ATR medido – constantes Estimadas.....	86
Figura 48: Comparação do ATR previsto com o ATR medido – medianas do IC. 86	
Figura 49: Comparação do ATR previsto com o ATR medido por idades .....	87
Figura 50: Relação entre b1 e b2, b1 e b3 e b2 e b3 .....	88
Figura 51: Histogramas dos coeficientes .....	88
Figura 52: Tempo até a necessidade de manutenção .....	90
Figura 53: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho A.....	90
Figura 54: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho B .....	91



Figura 55: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho C .....	91
Figura 56: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho A .....	92
Figura 57: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho B .....	92
Figura 58: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho C .....	92

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classes de irregularidade longitudinal segundo o DER/SP.....	27
Quadro 3: Conceitos do ICPF.....	27
Quadro 4: Índice do Estado da Superfície do Pavimento.....	28
Quadro 5: Relação do incremento do custo do usuário em função do aumento da irregularidade longitudinal do pavimento.....	36
Quadro 6: Trechos excluídos e motivos das exclusões.....	52
Quadro 7: Número N para dez anos.....	57
Quadro 8: Composição da frota comercial para a BR-285.....	58
Quadro 9: Disponibilidade de dados por ano.....	58
Quadro 10: Apresentação parcial da planilha com os valores de QI por ano e por trecho.....	63
Quadro 11: Apresentação parcial da planilha com valores de IRI por ano e por trecho.....	63
Quadro 12: Número de trechos para as faixas de valores de IRI por ano.....	64
Quadro 13: Constantes resultantes da regressão.....	73
Quadro 14: Constantes resultantes do <i>bootstrapping</i> .....	74
Quadro 15: Apresentação parcial da planilha com os valores de ATR (mm) por ano e por trecho.....	79
Quadro 16: Classificação dos trechos por faixa de valores de ATR.....	80
Quadro 17: Constantes resultantes da regressão.....	84
Quadro 18: Constantes resultantes do <i>bootstrapping</i> .....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials  
AI – Asphalt Institute  
ASTM – American Society for Testing And Materials  
ATR – Afundamento em Trilhas de Roda  
B1, B2 E B3 – Constantes Parâmetros de Regressão  
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente  
COMP – Índice de Compactação  
CNT – Confederação Nacional do Transporte  
DER – Departamento de Estradas de Rodagem  
DEF – Deflexão do Pavimento  
DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
 $D_{VB}$  – Deflexão medida com a Viga Benkelman  
 $D_{FWD}$  – Deflexão medida pelo FWD  
EXP - Expoente  
FWD - Falling Weight Deflectometer  
ICPF – Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis  
IES – Índice do Estado da Superfície do Pavimento  
IGGE – Índice de Gravidade Global Expedito  
IRI – International Roughness Index  
 $IRI_0$  – Irregularidade Inicial  
 $IRI_n$  – Irregularidade no Tempo N  
LN – Logaritmo Natural  
LVC – Levantamento Visual Contínuo  
MM&R – Manutenção, Reabilitação e Reconstrução  
NE – Número Equivalente Acumulado de Solicitações do Eixo Padrão de 80kN;  
PCA – Portland Cement Association  
QI – Quociente de Irregularidade  
RDM – Profundidade Média das Trilhas de Roda  
RMSE - Residual Mean Square Error  
SGP – Sistemas De Gerenciamento de Pavimentos  
SNC – Número Estrutural Corrigido

TRI – Profundidade Média das Trilhas de Roda

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UMTRI – University of Michigan Transportation Research Institute

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1.	Problema da pesquisa.....	15
1.2.	Justificativa .....	16
1.3.	Objetivos .....	18
1.3.1.	Objetivo Geral .....	18
1.3.2.	Objetivos Específicos .....	19
1.4.	Escopo e Delimitação da Pesquisa.....	19
1.5.	Estrutura da Dissertação .....	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1.	Pavimento .....	21
2.2.	Desempenho de pavimentos .....	22
2.3.	Defeitos .....	24
2.4.	Avaliação do Desempenho .....	25
2.5.	Fatores que Influenciam no Processo de Deterioração dos Pavimentos.....	30
2.6.	Sistemas de Gerenciamento de Pavimentos.....	34
2.7.	Modelos de Previsão de Desempenho .....	40
3.	METODOLOGIA.....	49
3.1.	Contextualização do Local de Estudo.....	49
3.2.	Delimitação do Trecho.....	51
3.3.	Caracterização do Trecho .....	54
3.3.1.	Materiais e Sistemas Construtivos .....	54
3.3.2.	Fatores Ambientais.....	57
3.3.3.	Características do Solo da Região.....	58
3.3.4.	Fator Carregamento.....	59
3.4.	Análise da Série Histórica de Dados.....	60
3.5.	Desenvolvimento de Modelos .....	61

3.6. Comparação com Modelos Existentes.....	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	64
4.1. Quociente de Irregularidade (QI).....	64
4.2. Afundamento em Trilhas de Rodas (ATR).....	81
4.3. Comparação com modelos existentes .....	94
5. CONCLUSÕES .....	98
5.1. Recomendações para trabalhos futuros.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	101

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Problema da pesquisa

O problema do sistema rodoviário brasileiro é composto pela idade dos pavimentos e pela solicitação intensa do tráfego, especialmente nas rodovias federais, onde grande parte da malha já superou a vida útil dos projetos originais (DNIT, 2006).

A pesquisa da Confederação Nacional do Transporte - CNT de Rodovias (2015) apontou que apenas uma parcela da malha rodoviária brasileira encontra-se pavimentada e, desta parcela, parte oferece condições de trafegabilidade com segurança e conforto para os usuários e outra, em estado crítico, oferece risco para os usuários que nelas trafegam, necessitando de intervenções em maior ou menor escala. Dos 213.299 km de rodovias pavimentadas existentes no Brasil, 100.763 km foram avaliados pela pesquisa. Desses, 12,5% apresentaram condições classificadas como ótimo e 30,2% classificadas como bom, sendo estas, satisfatórias. Os outros 57,3% dos trechos apresentam deficiências, sendo que, destes, 34,9% se encontram em estado regular, 16,1% ruim e 6,3% péssimo.

Em decorrência desta infraestrutura rodoviária problemática, antiga e com insuficiente manutenção, ocorre a elevação dos custos logísticos, ampliando as desigualdades regionais, potencializando a ocorrência de acidentes e, com isso, comprometendo o desempenho de todos os setores econômicos (CNT, 2014).

Segundo Soncim (2011), nas últimas décadas o investimento em infraestrutura rodoviária tem sido muito aquém das necessidades do país e, dentre suas consequências, percebe-se a redução de competitividade dos bens produzidos no Brasil.

Bernucci et al. (2008) afirmaram que existe uma crescente insatisfação do setor produtivo com o baixo nível de investimento, pois, ainda que os bens produzidos no país sejam mais competitivos na fase de produção, perdem competitividade no quesito infraestrutura de transportes devido a uma matriz modal deficiente, onde as estradas encontram-se em estado tal que não são capazes de atender às necessidades de transporte de carga nacionais, tornando os produtos nacionais pouco competitivos no mercado exterior.

A pesquisa CNT (2015), considerando a análise das rodovias feita em 2014, apontou que o investimento necessário em infraestrutura rodoviária no Brasil é de R\$293,88 bilhões.

A decisão acerca dos investimentos para cada trecho de um pavimento é função do processo de gerência de pavimentos e depende, dentre outros fatores, da estimativa da evolução da condição do pavimento ao longo do tempo. Tal estimativa pode ser obtida por uma função que relaciona as causas e os efeitos da deterioração dos pavimentos, denominada modelo de desempenho (YSHIBA e FERNANDES JUNIOR, 2005).

Os modelos de desempenho de pavimentos dão subsídios para análise do custo do ciclo de vida do pavimento. O custo do ciclo de vida estabelecido para o pavimento analisado em uma pesquisa não se adapta diretamente às características do pavimento analisado em outra. Desta forma, se torna necessário conhecer as características do pavimento em questão para melhor quantificar os benefícios da manutenção e preservação em termos de aumento da vida do pavimento, aumento da serventia e redução nos custos em geral (CUELHO et al., 2006).

Considerando que em locais distintos as variáveis que influenciam no desempenho de um pavimento são diferentes, não se pode utilizar os mesmos critérios para estimar o desempenho de duas rodovias. Por isso, se torna necessário o desenvolvimento de modelos de previsão específicos para cada caso, considerando as características ambientais, o tráfego estimado e as características de projeto.

Se a gestão da rodovia define o valor máximo aceitável para os defeitos no pavimento, então a idade na qual será atingido este valor pode ser determinada a partir do uso de um modelo apropriado e a gerência, em nível de rede, pode definir quando e onde executar serviços de manutenção no pavimento (KARGAH-OSTADI et al., 2009).

Nesse contexto, o problema para o qual se busca a solução nessa pesquisa é a previsão das condições de um pavimento flexível em um trecho de uma rodovia federal localizado no norte do Rio Grande do Sul.

Dessa forma, tem-se como questão de pesquisa: como pode ser descrita, em forma de um modelo matemático simples, a relação entre a idade do pavimento e o seu desempenho?

## **1.2. Justificativa**

No Brasil o principal meio de transportes é o rodoviário. Ao longo dos anos esse tem desempenhado o importante papel de contribuir para o crescimento da nação e de fazer a integração entre os demais modais de transporte. A pesquisa CNT de Rodovias

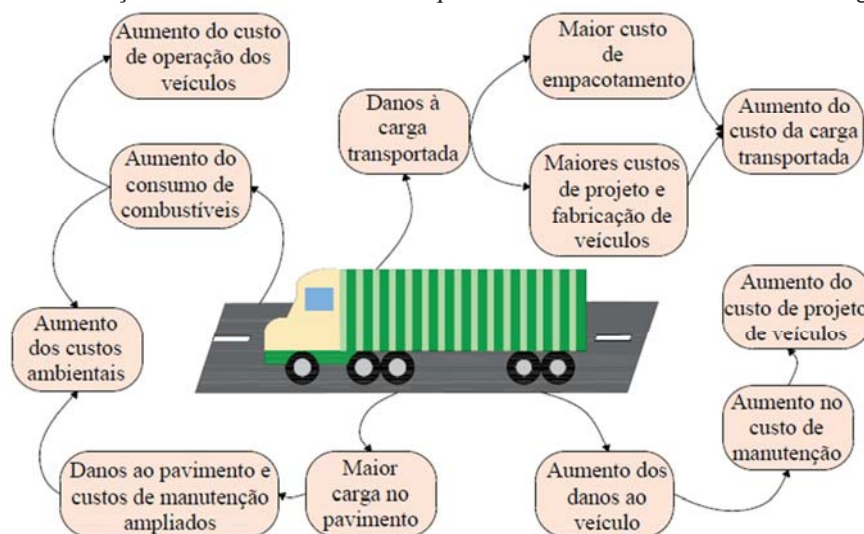


aponta que cerca de 60% do transporte de cargas no país é realizado por meio rodoviário, assim como mais de 90% do transporte de passageiros (CNT, 2014).

O funcionamento eficiente do setor de transporte viabiliza o fluxo contínuo de distribuição de insumos e produtos, impulsionando a atividade econômica e o desenvolvimento nacional. Isto porque um serviço de transporte de boa qualidade propicia redução de custos e maior flexibilidade e agilidade para os deslocamentos de pessoas e mercadorias, elevando o potencial de crescimento do país. Para que se tenha um desempenho adequado do transporte rodoviário é necessária a disponibilização de infraestrutura adequada em qualidade e quantidade. Hoje esse é um dos maiores entraves ao desenvolvimento do Brasil (CNT, 2014).

Steyn et al. (2011) explicam que os custos de logística (transporte de bens) tem efeito direto na economia de um país, já que os custos são, usualmente, absorvidos de forma a aumentar o preço do produto final e que este aumento de preço pode diminuir a competitividade do país. Com a Figura 1, Steyn et al. (2011) detalham o aumento do custo do transporte em decorrência das más condições dos pavimentos.

Figura 1: Indicação conceitual dos efeitos da qualidade de rolamento nos custos de logística



Fonte: Adaptado de Steyn et al. (2011).

Segundo o DNIT (2011), qualquer interrupção ou redução na intensidade ou na frequência dos serviços necessários à manutenção dos pavimentos rodoviários implica em aumentos substanciais nos custos de operação dos veículos e na necessidade de investimentos cada vez mais vultosos para sua recuperação.

De acordo com Serafini e Gonçalves (2004), quando os órgãos públicos ou empresas privadas responsáveis por redes viárias encontram-se em situação financeira

desfavorável, não dispondo dos recursos necessários para a execução dos reparos identificados como necessários na sua totalidade, surge a necessidade de priorizar os serviços de manutenção.

Enquanto não for possível garantir recursos para manter toda a malha rodoviária em condições satisfatórias, deve-se garantir a melhor aplicação dos recursos disponíveis. Para isso, é essencial que se possam programar as manutenções e reabilitações necessárias para cada trecho de rodovia em função do grau de deterioração em que se encontram. É indispensável a utilização de sistemas de gerenciamento de pavimentos que, com o auxílio de modelos de previsão de desempenho, tornam possível a organização de cronogramas de manutenção e reabilitação dos trechos para que estes serviços sejam realizados no momento ideal de acordo com o orçamento disponível.

Em função da busca por alternativas de manutenção de pavimentos que tragam melhores resultados, tanto para quem investe quanto para quem os utiliza, é fundamental o estudo do desempenho dos pavimentos em relação à sua deterioração, de modo a possibilitar que sua recuperação seja realizada de forma racional e científica (CAMPOS, 2004).

Nesse contexto, a elaboração de modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis viabiliza um aumento na eficácia da tomada de decisões em relação a ações de conservação e restauração. Ou seja, tais modelos podem colaborar na identificação das melhores estratégias de Manutenção, Reabilitação, Reconstrução (MM&R), colaborando para a melhor aplicação dos recursos financeiros durante o ciclo de vida deste empreendimento.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

O objetivo principal desta pesquisa é o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos para um trecho de uma rodovia federal com pavimentação asfáltica localizado na região norte do estado do Rio Grande do Sul, visando aplicação em gerência de pavimentos em nível de rede.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) Realizar a análise de um conjunto de dados provenientes do monitoramento da rodovia BR-285;
- b) Descrever as características geotécnicas e climáticas da região e as características do trecho da rodovia;
- c) Desenvolver um modelo de desempenho, realizando análises de regressão;
- d) Efetuar a análise comparativa entre estes modelos e modelos existentes.

### **1.4. Escopo e Delimitação da Pesquisa**

Esta pesquisa abrange a rodovia federal BR-285, entre o km 291+600 e o km 384+010, considerando dados resultantes do monitoramento realizado entre os anos de 2006 e 2014 e abrange a irregularidade longitudinal e o afundamento em trilhas de roda do pavimento em questão para analisar a evolução dos defeitos em função do tempo decorrido.

A proposta do modelo de previsão de desempenho do pavimento apresentado nessa pesquisa foi desenvolvida no ano de 2016.

### **1.5. Estrutura da Dissertação**

Além do presente capítulo, no qual se apresenta o problema da pesquisa, a justificativa para sua realização, os objetivos e as delimitações do trabalho, esta dissertação é composta por mais quatro capítulos.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, abordando definição de pavimento, desempenho de pavimento e os fatores que influenciam no desempenho e a avaliação do desempenho, além de apresentar sistemas de gerenciamento de pavimentos e o uso dos modelos de previsão de desempenho.

O capítulo 3 contextualiza o local do estudo, delimita o trecho da rodovia a ser analisado, apresenta a análise da série histórica de dados referentes ao monitoramento do desempenho do pavimento e apresenta o método de desenvolvimento dos modelos de previsão.

O capítulo 4 apresenta, analisa e discute os resultados.

O capítulo 5, por fim, apresenta as conclusões da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros, elaboradas a partir dos resultados obtidos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Pavimento

Balbo (2007) explica que um pavimento é uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, que deve ser adequada para atender ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação,

Bernucci et al. (2008) define pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

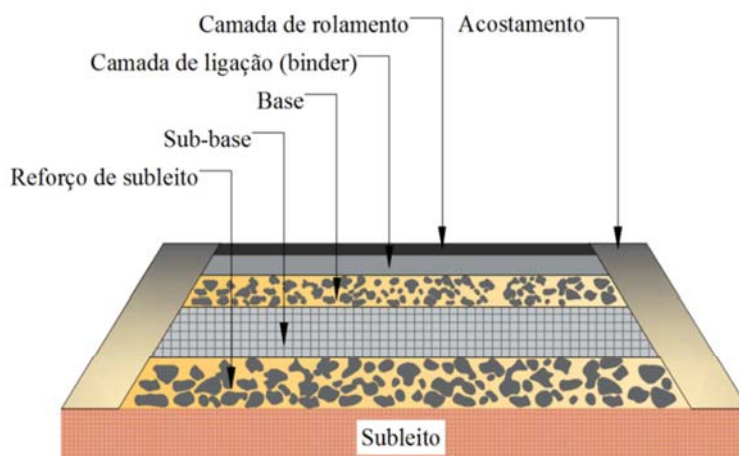
O pavimento de uma rodovia pode ser apontado como o seu principal componente, segundo Campos (2004), que aponta este como o responsável pela durabilidade da via, quando proporciona um rolamento confortável e apresenta condições adequadas de segurança aos usuários.

De forma geral, os pavimentos são classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos. São considerados flexíveis aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (DNIT, 2006).

Utiliza-se também a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland e pavimentos asfálticos, para indicar o tipo de revestimento do pavimento (BERNUCCI et al., 2008). Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Este tipo de pavimento é formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento, que é a camada que fica em contato direto com as rodas dos veículos, e por camadas intermediárias ou de ligação (*binder*). As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, que é a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros.

A Figura 2 apresenta um corte transversal de uma seção de um pavimento asfáltico.

Figura 2: Corte transversal de uma seção de um pavimento flexível



Fonte: adaptado de Bernucci et al. (2008).

## 2.2. Desempenho de pavimentos

Assim como outras obras de infraestrutura, pavimentos não são concebidos para durarem eternamente, mas apenas para um determinado período. Durante esse período, ou ciclo de vida, o pavimento inicia em uma condição ótima até alcançar uma condição ruim. O decréscimo da condição do pavimento ao longo do tempo é conhecido como desempenho. Já o fenômeno que rege a mudança da condição do pavimento é conhecido como deterioração (DNER, 1998). Segundo Prozzi (2001), a deterioração dos pavimentos acontece continuamente sob as ações combinadas das cargas de tráfego e das condições ambientais.

Balbo (2007) explica que os materiais de construção se degradam ao longo de sua vida de serviço, causando a alteração das suas propriedades mecânicas, que são as que governam o comportamento do pavimento sob a ação de cargas de diversas naturezas. Segundo o autor a degradação dos pavimentos é motivada por cargas de veículos, produtos químicos e ações ambientais.

O desempenho de um pavimento pode ser avaliado em função das características estruturais ou superficiais. O desempenho estrutural refere-se à capacidade de um pavimento em manter sua integridade estrutural sem apresentar falhas significativas. Já o desempenho funcional de um pavimento se refere à capacidade de fornecer uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento (DNER, 1998).

Yoder e Witzak (1975) explicam que o aspecto estrutural inclui o colapso da estrutura do pavimento ou há a fratura de uma ou mais partes da estrutura do pavimento,

em tal magnitude que faça o pavimento ser incapaz de suportar as cargas impostas em sua superfície. A ruptura funcional, que pode ou não vir acompanhada da estrutural, ocorre quando o pavimento não cumpre sua função sem causar desconforto aos passageiros ou danos aos veículos que passam sobre o pavimento, devido à sua rugosidade.

Prozzi (2001) define como desempenho a habilidade da rodovia em satisfazer as demandas do tráfego e das condições climáticas durante sua vida útil e aponta que os indicadores de desempenho comumente utilizados são o trincamento por fadiga, o afundamento superficial, a qualidade de rodagem e a resistência à derrapagem. As mudanças dos valores destes indicadores, segundo o autor, indicam a deterioração do pavimento ao longo do tempo.

Os principais conceitos relacionados aos mecanismos de deterioração de pavimentos, apresentado por Hudson (1971, apud SONCIM, 2011), são:

- a) Resposta Estrutural: é a reação do pavimento às cargas e ao meio ambiente, manifestada por uma variação no estado de tensão;
- b) Deterioração: são as consequências visíveis do efeito cumulativo das cargas e do meio ambiente sobre os pavimentos;
- c) Fratura: é o estado em que as partes de uma estrutura são separadas;
- d) Distorção: é a mudança da forma original do pavimento;
- e) Desintegração: é o estado em que o pavimento é decomposto em seus elementos.

Ao se considerarem os possíveis mecanismos de ruptura dos pavimentos, de acordo com Balbo (2007), deve-se pensar que existem sítios geológicos e pedológicos diversos, assim como diferentes condições climáticas e morfológicas, políticas de cargas para diferentes veículos comerciais em diversos países, utilização de diferentes materiais em cada região do planeta, além de processos construtivos muito variados. Balbo (2007) diz que há razões de sobra para que não exista um critério universalmente aceito de como se dá a ruptura de um pavimento.

Deve-se considerar, ainda, a respeito da serventia de um pavimento, que sua aceitabilidade depende da avaliação que está sendo feita do pavimento e do uso para qual este pavimento está destinado. Como um exemplo, menor rugosidade pode ser tolerada em uma via expressa de alta velocidade do que em uma via secundária com baixo volume de tráfego (YODER e WITCZAK, 1975).

### 2.3. Defeitos

A norma DNIT005/2003 divide os defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis em fenda, afundamento, ondulação, escorregamento, exsudação, desgaste, panela e remendo.

As fendas são definidas por Bernucci et al. (2008) como aberturas na superfície asfáltica e podem ser classificadas como fissuras quando a abertura é perceptível a olho nu apenas à distância inferior a 1,5m ou como trincas quando a abertura é superior à da fissura.

Os afundamentos, segundo a norma do DNIT (2003) são as deformações permanentes caracterizadas por depressão da superfície do pavimento. Podem ser causadas pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, acompanhado de solevamento, ou por consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito, sem estar acompanhado de solevamento.

Ondulação ou corrugação é a deformação caracterizada por ondulações ou corrugações transversais na superfície do pavimento (DNIT, 2003). Bernucci et al. (2008), define ondulações como as deformações transversais ao eixo da pista, em geral, decorrentes da consolidação diferencial do subleito, com comprimento de onda entre duas cristas da ordem de metros. Já corrugações são as deformações transversais ao eixo da pista, com depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda entre duas cristas de alguns centímetros ou dezenas de centímetros.

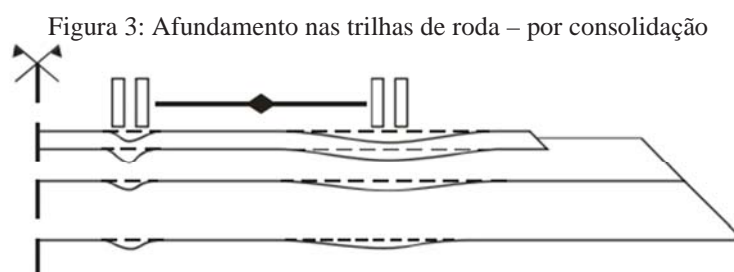
O escorregamento, segundo a norma do DNIT (2003), é o deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia-lua. A exsudação é o excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, causado pela migração do ligante através do revestimento.

O desgaste é o efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego (DNIT, 2003).

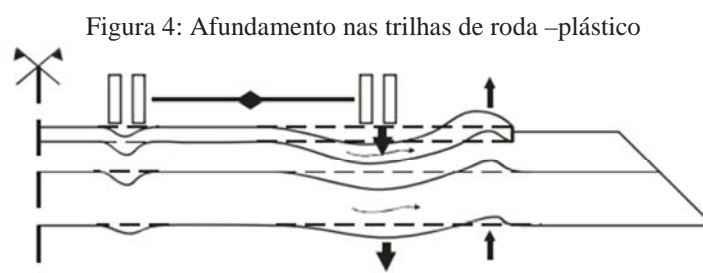
Panela ou buraco é a cavidade que se forma no revestimento por diversas causas (inclusive pela falta de aderência entre camadas superpostas, causando o deslocamento entre camadas) podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação dessas camadas. Os remendos são o preenchimento de uma panela com uma ou mais camadas de pavimento na operação denominada “tapa buraco” (DNIT, 2003).



Um dos mais importantes tipos de defeitos a que um pavimento está sujeito é, segundo Moura (2010), a deformação permanente em trilha de roda, pois além de propiciar uma degradação acelerada da estrutura do pavimento, reduz consideravelmente o conforto ao rolamento e a segurança do usuário e aumenta os custos operacionais. Além disso, em dias chuvosos, há formação de uma lâmina d'água ao longo de todo o trecho nos afundamentos das trilhas de roda, ocasionando dificuldade de escoamento da água e propiciando menor contato entre o pneu e as acículas dos agregados, podendo ocorrer a hidroplanagem (MOURA, 2010). DNIT (2006) define afundamento como uma deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada ou não de solevamento e podendo apresentar-se sob a forma de afundamento plástico (causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou de subleito) ou afundamento de consolidação (causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas de pavimento ou de subleito). Quando os afundamentos ocorrem com extensões de até 6m são chamados de “afundamentos locais” e quando ocorrem com extensões contínuas maiores são chamados de “afundamentos de trilhas de roda”. A Figura 3 e a Figura 4 mostram a diferença entre os afundamentos por consolidação (Figura 3) e plástico (Figura 4).



Fonte: DNIT (2006).



Fonte: DNIT (2006).

## 2.4. Avaliação do Desempenho

A capacidade que um pavimento tem de proporcionar um determinado nível de desempenho funcional é intitulada “serventia do pavimento” (DNIT, 2006). Entre os

vários índices de serventia de um pavimento, o mais frequentemente utilizado pelo DNIT é o IRI – *International Roughness Index* (Índice de Irregularidade de Superfície).

O IRI é definido por Sayers, Gillespie e Paterson (1986) como uma característica do perfil longitudinal de uma rodovia. De acordo com Paterson (1987), descreve uma escala de rugosidade na qual 0 representa uma superfície verdadeiramente plana, em torno de 6 representa rodovias pavimentadas com rugosidade moderada, 12 representa rodovias pavimentadas extremamente irregulares com buracos e remendos e em torno de 20 representa rodovias não pavimentadas muito irregulares.

Arhin, Noel e Ribbiso (2015) descrevem o IRI como uma medida padronizada da reação de um veículo ao perfil da rodovia e à rugosidade da rodovia. Eles explicam que, geralmente, IRI com altos valores representam rodovias mais irregulares.

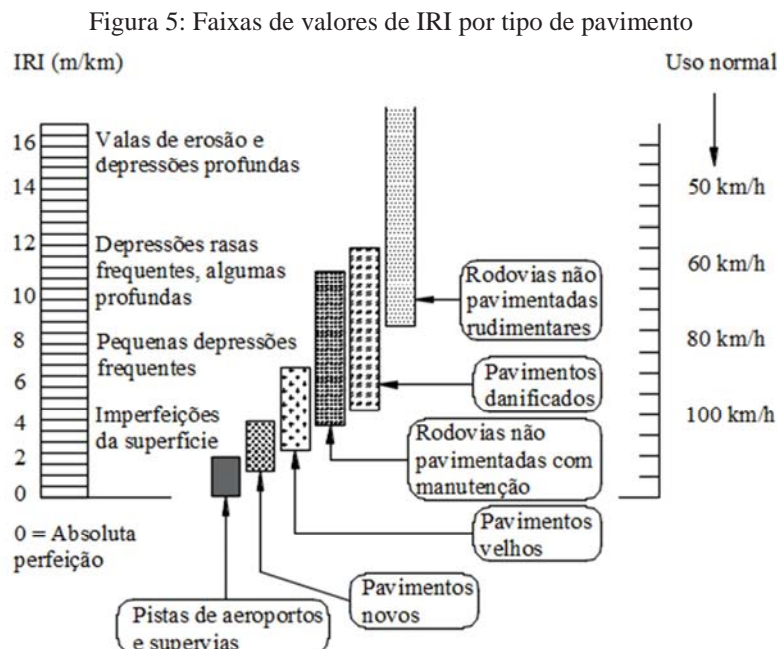
A partir de um valor inicial, resultante do processo construtivo, a irregularidade passa a assumir valores crescentes, como decorrência da ação do tráfego, do clima e de outros fatores. A irregularidade aumenta a ação das cargas dinâmicas dos veículos sobre a superfície do pavimento e, em decorrência, acelera a deterioração da sua estrutura. 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. Além disso, a irregularidade tem grande influência sobre o aumento do custo operacional dos veículos (DNIT, 2006).

A medida da irregularidade longitudinal é realizada através do IRI (índice expresso em m/km) e quantifica os desvios da superfície do pavimento em relação à de projeto. A irregularidade longitudinal é medida ao longo de uma linha imaginária, paralela ao eixo da estrada e, em geral, coincide com as regiões de trilhas de roda (BERNUCCI et al., 2008).

Paterson (1986) classifica a irregularidade da rodovia como um importante determinante da qualidade de rolamento e explica que o IRI resume matematicamente o perfil longitudinal da superfície da rodovia em uma trilha de roda, representando as vibrações induzidas em um típico veículo de passeio através da rugosidade da rodovia.

Sayers, Gillespie e Paterson (1986) explicam que o IRI é um valor numérico que resume as características de rugosidade que impactam na resposta de um veículo viajando sobre o pavimento, sendo um índice apropriado quando a medição da rugosidade é relacionada à qualidade geral de rolamento, carga dinâmica nas rodas e condição geral da superfície.

Os diferentes tipos de pavimentos, de acordo com Sayers, Gillespie e Paterson (1986), apresentam diferentes faixas de valores de IRI. A Figura 5 apresenta esses tipos de pavimentos relacionados com as suas características e os valores de IRI relacionados.



Fonte: Adaptado de Sayers, Gillespie e Paterson (1986).

Diversos índices são utilizados para determinar irregularidade longitudinal e os índices são relacionados entre si através de equações mais ou menos eficientes. Farias e Souza (2009) apresentam a relação entre o IRI e o  $\sigma$  (desvio padrão da irregularidade longitudinal) com alta correlação, tendo  $R^2=0,93$ . Os mesmos autores apresentam a relação entre o IRI e o RMSVA (raiz quadrada média de acelerações verticais), que também tem alta correlação, e  $R^2=0,96$ .

Sayers et al. (1986) relacionam o IRI com o QI através da equação 1, com 10% de erro.

$$IRI = (QI + 10)/14 \quad (1)$$

Em relação ao IRI, o Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP, 2013) classifica os pavimentos com irregularidade baixa, média e elevada, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1: Classes de irregularidade longitudinal segundo o DER/SP

Classe	IRI (m/km)
Irregularidade Baixa	$IRI < 4$
Irregularidade Média	$4 < IRI < 5,5$
Irregularidade Elevada	$IRI > 5,5$

Fonte: Adaptado de DER/SP (2013)

No Brasil, segundo o DNIT (2006), o valor  $IRI \leq 3,5$  m/km deve ser adotado como gatilho para a deflagração da restauração do pavimento.

Chen et al. (2014) classificam os limites de IRI em relação a qualidade do pavimento com mais rigor. Estes limites, utilizados para rodovias dos Estados Unidos, consideram inaceitáveis rodovias com IRI próximo a 4 m/km, enquanto no Brasil, este valor pode classificar uma rodovia com irregularidade baixa. O Quadro 2 mostra os valores limites para o IRI definidos por Chen et al. (2014).

Quadro 2: Limites de IRI em relação a condição da rodovia

Perfeito	Bom	Inaceitável
0,79 a 0,95 m/km	0,95 a 1,10 m/km	$> 2,87$ m/km

Fonte: Adaptado Chen et al. (2014)

Para a avaliação da superfície de pavimentos asfálticos pode ser realizado um procedimento chamado LVC (levantamento visual contínuo). A norma que regulamenta a execução do LVC para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos é a NORMA DNIT 008/2003 PRO. Essa norma fixa as condições exigíveis na avaliação da superfície do pavimento e determina o ICPF – Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis, ao mesmo tempo em que proporciona também os elementos necessários para o cálculo do IGGE – Índice de Gravidade Global Expedito e do IES – Índice do Estado de Superfície do Pavimento (DNIT, 2003).

O ICPF é estimado com base na avaliação visual do pavimento, classificando a superfície do segmento segundo os conceitos mostrados no Quadro 3. A precisão do valor do índice estimado será de aproximadamente 0,5.

Quadro 3: Conceitos do ICPF

CONCEITO	DESCRIÇÃO	ICPF
Ótimo	Necessita apenas de conservação rotineira	5-4
Bom	Aplicação de lama asfáltica - Desgaste superficial, trincas não muito severas em áreas não muito extensas.	4-3
Regular	Correção de pontos localizados ou recapeamento - Pavimento trincado, com "panelas" e remendos pouco frequentes e com irregularidade longitudinal ou transversal.	3-2
Ruim	Recapeamento com correções prévias - Defeitos generalizados com correções prévias em áreas localizadas - remendos superficiais ou profundos.	2-1
Péssimo	Reconstrução - Defeitos generalizados com correções prévias em toda a extensão. Restauração do revestimento e das demais camadas - infiltração de água e descompactação da base.	1-0

Fonte: DNIT (2006).

Segundo a norma do DNIT (2003), o IES, cujo valor está compreendido entre 0 e 10, é avaliado em função do ICPF e do IGGE calculados, sendo, portanto, uma síntese dos dois índices. Os valores do IES juntamente com o Código e o Conceito atribuídos ao estado da superfície do pavimento são determinados de acordo com o Quadro 4.

Quadro 4: Índice do Estado da Superfície do Pavimento

DESCRIÇÃO	IES	CÓDIGO	CONCEITO
$IGGE \leq 20$ e $ICPF > 3,5$	0	A	ÓTIMO
$IGGE \leq 20$ e $ICPF \leq 3,5$	1	B	BOM
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF > 3,5$	2		
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF \leq 3,5$	3	C	REGULAR
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF > 2,5$	4		
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF \leq 2,5$	5	D	RUIM
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF > 2,5$	7		
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF \leq 2,5$	8	E	PÉSSIMO
$IGGE > 90$	10		

Fonte: DNIT (2003).

O DER/SP (2013) classifica os pavimentos quanto ao seu estado em relação a deformação plástica, em função da dimensão da flecha em trilha de roda, sendo:

- a) Pavimento sem deformação plástica significativa, quando o pavimento apresenta afundamento em trilha de roda inferior a 3mm;
- b) Pavimento com deformação plástica moderada, quando o afundamento é inferior a 5mm;

c) Pavimento com deformação plástica significativa, quando o afundamento encontrado no pavimento é superior a 7mm.

No início da vida de serviço, a camada asfáltica está sujeita a uma pequena deformação permanente, caracterizada mais por consolidação que por características do ligante asfáltico, no entanto, nas misturas asfálticas mal dosadas ou mal executadas as deformações podem ser importantes já no início da vida de serviço (MOURA, 2010).

## **2.5. Fatores que Influenciam no Processo de Deterioração dos Pavimentos**

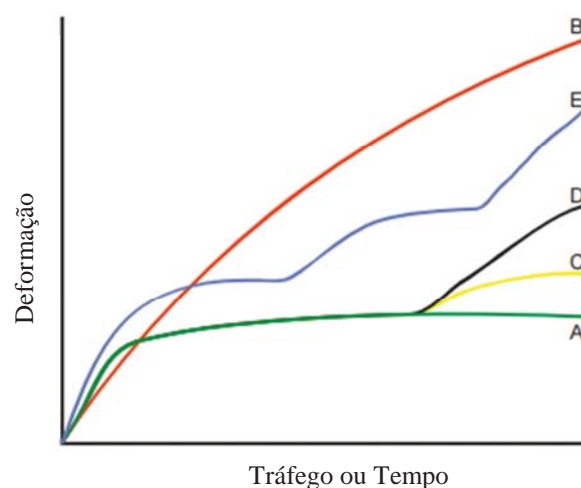
Em cada ciclo de vida do pavimento, as ações interativas do “tráfego + meio ambiente” sobre o contexto do pavimento, iniciam-se imediatamente após a abertura do tráfego causando deteriorações que são inicialmente imperceptíveis, mas que tendem a crescer e se diversificar, afetando o desempenho do pavimento (DNIT, 2006).

Zaabar e Chatti (2011) explicam que todas as superfícies dos pavimentos possuem algum tipo de irregularidade, mesmo quando são novas, e que elas se tornam mais irregulares à medida que envelhecem, dependendo do tipo de pavimento, do volume de tráfego, de condições ambientais, entre outros fatores.

De acordo com DNIT (2006), as causas das deformações permanentes podem estar associadas ao tráfego ou não. Os carregamentos do tráfego causam deformações quando o carregamento é concentrado ou em excesso, causando fluência plástica; quando o carregamento é estático ou de longa duração; causando deformações ao longo do tempo; e quando há grande número de repetições de carga, causando afundamento nas trilhas de roda. As deformações não associadas ao carregamento são consequência do subleito constituído de solo expansivo ou de solos compressíveis na fundação do pavimento. O primeiro causa o inchamento ou empolamento do material e o segundo causa recalque diferencial.

A Figura 6 apresenta a evolução do afundamento nas trilhas de roda em função do tempo ou tráfego, considerando pavimentos sadios (curva A), debilitados (curva B), trincados e com pouca conservação (curvas C e D) e debilitados (curva E)

Figura 6: Tipos de curvas de afundamento em trilhas de roda considerando os efeitos de umidade e conservação



Fonte: DNIT (2006).

Tanto o afundamento nas trilhas de roda quanto a irregularidade longitudinal dos pavimentos se desenvolvem a partir do início da ação do tráfego e podem ser acelerados pelo enfraquecimento do pavimento devido ao trincamento (DNIT, 2006).

Fernandes Jr. (1994 apud SONCIM, 2011) apresenta como principais fatores que contribuem para o início, propagação e acúmulo de deterioração os ambientais (temperatura e teor de umidade) e as solicitações do tráfego (carga por eixo, pressão de enchimento dos pneus, tipo de suspensão etc.). Além desses fatores, qualidade dos materiais, as técnicas e cuidados construtivos e as estratégias de manutenção e reabilitação também podem influir na deterioração dos pavimentos ao longo da vida em serviço.

Soncim (2011) defende que a deterioração dos pavimentos é causada, principalmente, pela ação combinada dos efeitos das cargas do tráfego e da ação do meio ambiente nos materiais que compõe sua estrutura.

Segundo Lytton (1987), as variáveis que afetam o desempenho dos pavimentos podem ser separadas em quatro categorias:

1. Variáveis relacionadas a carregamentos: cargas totais nas rodas e efeitos dinâmicos, distribuição das cargas, número de rodas e configuração dos eixos, movimentação das rodas em diferentes velocidades e intervalos de tempo, posição das rodas na seção transversal;
2. Variáveis relacionadas a fatores ambientais: regimes de mudanças de temperatura, umidade, gelo e degelo durante o dia ou ano e sua distribuição ao longo da profundidade e da distância do eixo da rodovia;

3. Variáveis relacionadas aos sistemas construtivos: espessura das camadas e variação ao longo da seção, porcentagem de compactação, tensões residuais induzidas pela compactação, variações na graduação das misturas asfálticas;

4. Variáveis relacionadas às características dos materiais.

Os dois principais fatores ambientais, de acordo com o Manual da American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO (1993), são a temperatura e a quantidade de chuvas. A temperatura afeta as propriedades de fluência do asfalto, enquanto a quantidade de chuvas influencia as propriedades de todas as camadas do pavimento se permitida a sua penetração através delas (AASHTO, 1993).

Segundo Yoder e Witczak (1975) a infiltração da água das chuvas pode ocorrer por meio de trincas na superfície dos pavimentos, por uma superfície permeável, defeitos nas bordas ou nos acostamentos, etc. O acesso da água ao subleito, com o conseqüente aumento da sua umidade pode causar a ruptura de um pavimento, já que a capacidade de suporte de um pavimento é determinada, em grande escala, pela resistência do solo do subleito. Além disso, o Manual da AASHTO (1993) descreve alguns dos prejuízos causados pela infiltração da água no pavimento, como redução da resistência do subleito e das camadas do pavimento e bombeamento de material fino das camadas inferiores, resultando na perda da capacidade de suporte dos pavimentos flexíveis.

Já os efeitos da temperatura no comportamento dos pavimentos podem ser divididos em três categorias (HAAS, HUDSON e ZANIEWSKI, 1994 apud SONCIM, 2011):

- a) Altas temperaturas durante a mistura e aplicação, que podem afetar a durabilidade do revestimento asfáltico;
- b) Temperaturas médias durante a vida em serviço, cuja variação pode afetar a estabilidade, a susceptibilidade a deformações permanentes e a progressão das trincas; sob a aplicação de cargas repetidas do tráfego;
- c) Baixas temperaturas do pavimento em serviço, que podem resultar no aparecimento de trincas térmicas por retração.

Além das solicitações impostas pelo meio ambiente, um pavimento é construído para resistir às solicitações impostas pelo tráfego. Segundo SONCIM (2011), o processo de deterioração pelo tráfego ocorre devido ao acúmulo do dano causado pela aplicação de cargas sucessivas pelos eixos dos veículos, ou seja, elementos de transferência de carga para os pavimentos.



Fernandes Jr. (1994 apud SONCIM, 2011) concluiu que a carga por eixo, independentemente dos fatores ambientais, do comportamento estrutural dos pavimentos e da ação combinada de outros fatores de tráfego, é a que mais afeta a deterioração dos pavimentos. Mesmo quando não for o único fator significativo, este tem de ser considerado, sempre, quando se tratar dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho dos pavimentos.

O efeito danoso da passagem de um eixo de qualquer massa (comumente chamado de carga) pode ser representado pelo número de eixos equivalentes a 80kN de carregamento (AASHTO, 1993).

O estado das camadas de rolamento e das superfícies destas camadas dependem, segundo Moura (2010), da execução e da manutenção periódica, do tipo de solicitação de carga e características climáticas. A solicitação de carga feita por veículos comerciais, como caminhões e ônibus, é aquela que provoca deterioração e desgaste na superfície dos pavimentos. A presença significativa de veículos comerciais nas estradas brasileiras é uma realidade. Assim, a solicitação dos pavimentos é bastante elevada, o que afeta as condições de conservação da superfície.

Um fator que influencia no desempenho dos pavimentos brasileiros é o fato de as técnicas rodoviárias utilizadas em pavimentação no país serem, em partes, originárias de países já desenvolvidos. Segundo Villibor e Nogami (2009), as normas e instruções desenvolvidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes – DNIT se baseiam nas normas de entidades norte americanas, tais como: *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO, *American Society for Testing and Materials* – ASTM, *Asphalt Institute* – AI e *Portland Cement Association* – PCA.

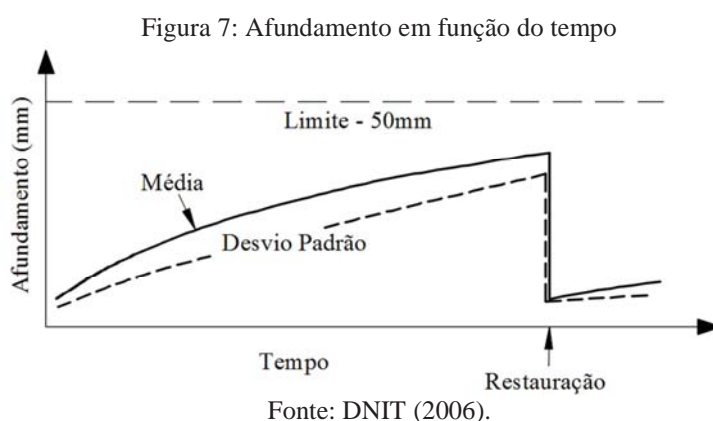
Estas normas, de acordo com Villibor e Nogami (2009), resultaram de estudos relativos a rodovias ou pistas experimentais nos Estados Unidos da América e envolvem condições válidas para os ambientes e solos mais representativos daquele país. Não são consideradas, portanto, as peculiaridades relacionadas com as condições e com os solos mais frequentes no Brasil onde, tanto os solos quanto os climas predominantes, podem ser englobados, genericamente como do tipo “tropical úmido”.

Villibor e Nogami (2009) estudaram as características dos solos lateríticos, bastante presentes no Brasil e classificaram esses solos, para o uso em obras rodoviárias, de forma diferente da classificação americana.

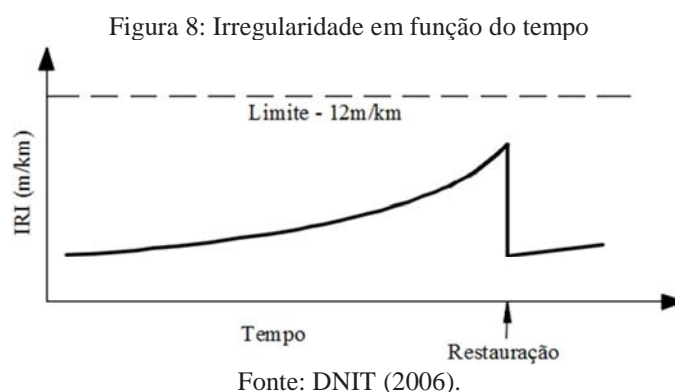
## 2.6. Sistemas de Gerenciamento de Pavimentos

Para atender os preceitos de otimização o pavimento deve estar permanentemente dotado de adequados atributos de natureza estrutural e de natureza funcional. Para que estes atributos sejam mantidos dentro dos níveis desejáveis/admissíveis exigem que o pavimento seja submetido a um contínuo e adequado processo de manutenção (DNIT, 2006).

A Figura 7 apresenta a evolução do ATR (afundamento em trilha de roda) em função do tempo e limita o valor do defeito em 50 mm.



A Figura 8 apresenta a evolução do IRI (irregularidade longitudinal) em função do tempo e limita o defeito em 12 m/km



O valor limite do IRI apresentado por DNIT (2006) é bastante superior ao valor limite utilizado fora do Brasil. Este limite elevado mostra a falta de exigência em relação a um pavimento com maior qualidade no Brasil.

Durante um período inicial, uma rodovia pavimentada pode ser mantida em bom estado mediante conservação rotineira, a um custo bastante baixo. Na etapa seguinte,

com o aumento da deterioração, o pavimento deve ser recuperado de maneira a permanecer em bom estado, por meio de selagem, recapeamento ou reforço do revestimento. Com a conservação rotineira adequada e a conservação periódica oportuna do pavimento, uma rodovia pavimentada nunca se degradará até chegar ao mau estado, quando é necessária a restauração ou mesmo a reconstrução do pavimento (DNIT, 2006).

A conservação periódica, como define DNIT (2006) compreende um conjunto de operações realizadas para evitar o surgimento ou o agravamento de defeitos. Os principais serviços periódicos referentes à pista de rolamento são: capa selante, lama asfáltica, camadas porosas de atrito e recapeamentos esbeltos com misturas densas.

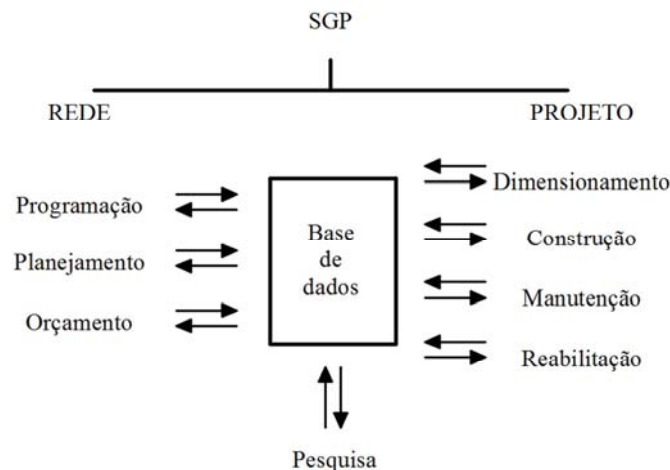
Os Sistemas de gerenciamento de pavimentos – SGP, fornecem métodos para determinar as necessidades de um pavimento em relação à manutenção e reabilitação e para determinar as prioridades e o tempo ideal para os reparos através da previsão das condições futuras do pavimento (SHAHIN, 2005).

Haas et al. (1994 apud NASCIMENTO, 2005) define que a gerência de pavimentos é um processo que abrange todas as atividades envolvidas com o propósito de fornecer e manter pavimentos em um nível adequado de serviço, envolvendo desde a obtenção inicial de informações para o planejamento e elaboração de orçamento até a monitorização periódica do pavimento em serviço, passando pelo projeto e construção do pavimento e sua manutenção e reabilitação ao longo do tempo.

Um sistema de gerência de pavimentos, como explicam Soncim e Fernandes Jr. (2015) pode atuar em nível de rede, para planejamento, estimativa das necessidades totais de manutenção e reabilitação, priorização de projetos e programação de investimentos, e em nível de projeto, para a definição de atividades de manutenção e reabilitação.

As atividades de gerência de pavimento são normalmente separadas em nível de rede e em nível de projeto, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Componentes de um sistema de gerência de pavimentos



Fonte: Adaptado de HAAS et al. (1994 apud NASCIMENTO 2005).

Segundo Nishiyama et al. (1995 apud BECKER, 2012), o interesse e o desenvolvimento da aplicação dos SGP têm sido crescentes em razão de uma série de fatores importantes, dentre os quais se podem citar:

- a) As políticas econômicas de contenção de gastos, causando substancial diminuição dos recursos destinados às vias urbanas;
- b) Os órgãos de financiamento apresentam uma exigência de maior racionalidade na utilização de recursos liberados e esta racionalidade dos recursos é parte fundamental de um SGP correto;
- c) Os recursos energéticos e os materiais de pavimentação tornaram-se escassos e caros, o que obrigou à programação otimizada dos investimentos, o que pode ser obtido com o uso de um SGP;
- d) O efeito que a condição do pavimento causa no custo operacional dos veículos e nos custos de manutenção viária foi reconhecido, conduzindo a estudos para otimizar esses custos. Os bons SGP procuram essa otimização;
- e) Como a tecnologia de avaliação periódica de pavimentos avançou muito, tanto no que se refere a métodos como a equipamentos, tornou-se possível otimizar a programação dos investimentos e as técnicas empregadas, por meio de acompanhamento e análise da implementação desses itens;
- f) Desenvolveram-se métodos de previsão de desempenho dos pavimentos, o que permitiu aos SGP antever o comportamento do pavimento durante a sua vida útil.

Na última década, segundo Abaza, Ashur e Al-Khatib (2004), foi desenvolvido um grande número de sistemas de gerenciamento de pavimentos, desde sistemas simples até muito sofisticados. O que a maior parte dos sistemas tem em comum são os

elementos utilizados como base (as taxas de defeitos dos pavimentos), a recomendação de estratégias de manutenção e reabilitação adequadas, uma política de decisões para estabelecer cronogramas de prioridades e o fato de lidarem com limitações financeiras.

Islam e Buttlar (2012) classificam os custos dos pavimentos em custos para a gerência e custos para o usuário. Ainda, segundo os autores, os custos para a gerência incluem construção inicial, manutenção, reabilitação e administração de serviços de engenharia; os custos do usuário incluem combustível, óleo, reparos e substituição de pneus, manutenção e reparos de veículos, depreciação, atraso em tempo de viagem e danos ou desconforto do motorista.

O custo do transporte rodoviário é afetado pelas condições da infraestrutura disponível, pois quando os veículos trafegam em vias de má qualidade, demanda-se mais do motor para manter a mesma velocidade, o que leva a um maior consumo de combustível e, além disso, o desgaste de pneus e freios é mais acentuado (CNT, 2015).

CNT (2015) exemplifica que se o custo de se locomover por rodovias com pavimento ótimo for de R\$100,00, então o custo de se locomover pela mesma extensão em rodovias onde o pavimento é classificado como bom será de R\$118,80. Em uma rodovia com pavimento péssimo, no entanto, o custo chegaria a R\$191,50.

Analisando-se o incremento no custo do usuário com o aumento da irregularidade longitudinal do pavimento, em relação ao custo de combustível, manutenção e recuperação, depreciação e custo de pneus, Islam e Buttlar (2012) chegaram a um valor total, que cresce em função do crescimento do IRI do pavimento. O Quadro 5 mostra o incremento total do custo para o usuário em função do IRI do pavimento.

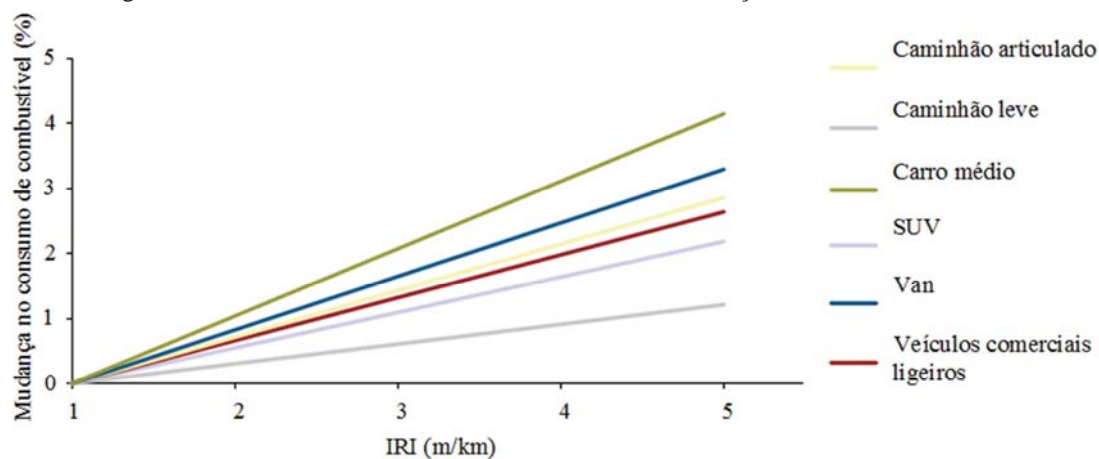
Quadro 5: Relação do incremento do custo do usuário em função do aumento da irregularidade longitudinal do pavimento

IRI (m/km)	Incremento total no custo do usuário (\$/km)
0,99	0,00000
1,20	0,00024
1,31	0,00051
1,41	0,00185
1,55	0,00398
1,60	0,00467
1,71	0,00628
2,13	0,01005
2,76	0,02027
3,16	0,02477
3,95	0,03257

Fonte: adaptado de Islam & Buttlar (2012).

Greene et al. (2013) explicam que a irregularidade da rodovia aumenta a resistência aplicada ao veículo enquanto ele trafega pela rodovia. Maior resistência requer maior consumo de combustível e o quanto a eficiência do combustível é afetada é fortemente ligada a condição da rodovia. A Figura 10 descreve a tendência de crescimento do consumo de combustível com o crescimento do IRI.

Figura 10: Crescimento do consumo de combustível em função do crescimento do IRI



Fonte: Adaptado de Zaabar (2010 apud GREENE et al., 2013).

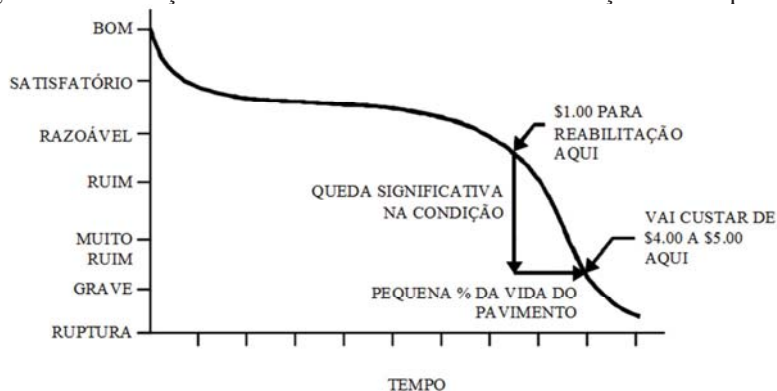
Islam & Buttlar (2012) concluíram que maiores investimentos em ações de manutenção do pavimento (diminuindo o tempo entre estas ações) gerariam economia nos custos dos usuários e gerariam retorno maior do investimento, já que o custo de manutenção e recuperação corresponde a uma parcela de 2,3% a 3,6% do custo total com o pavimento (soma dos custos de gerência e de usuário).

De acordo com estudos de Mandapaka et al. (2011), ações de manutenção e reabilitação podem ser aplicadas a um pavimento adequadamente projetado de modo a mantê-lo em condições aceitáveis de trafegabilidade por mais tempo do que para o qual este foi projetado. Aplicar as estratégias adequadas no tempo apropriado pode levar a reduções substanciais nos custos e a uma boa extensão na vida do pavimento.

Sims e Zhang (2010) explicam que, em função de restrições orçamentárias, aumenta o incentivo ao desenvolvimento de um processo efetivo de locação de recursos para gerenciar e preservar os pavimentos. Segundo esses autores, é importante saber quando um pavimento precisa receber algum tratamento. É necessário, no entanto, tendo um orçamento restrito, definir um tratamento custo-efetivo no momento certo.

Na Figura 11 estão ilustradas as possíveis consequências de um mau planejamento das manutenções em função do tempo do ponto de vista de custos de manutenção. Segundo Shahin (2005), se as ações de manutenção e reabilitação são realizadas durante os estágios iniciais da deterioração do pavimento, antes do declínio acentuado das condições do pavimento, mais de 50% dos custos de reparo podem ser evitados, assim como pode ser evitada a necessidade de longos períodos de interrupção do tráfego e a necessidade de criação de desvios.

Figura 11 – Ilustração conceitual do ciclo de vida das condições de um pavimento



Fonte: Adaptado de Shahin (2005).

Segundo Soncim (2011), a realização das atividades de manutenção, antes que o pavimento atinja níveis mínimos aceitáveis de serventia, pode permitir o prolongamento de sua vida útil em serviço, considerando que o propósito das atividades de manutenção e reabilitação é manter o pavimento em condições mínimas aceitáveis de serventia. As atividades de reabilitação são aplicadas, normalmente, à seções que já atingiram um nível mínimo aceitável de serventia e apresentam um estado avançado de deterioração. Os efeitos das atividades de manutenção e reabilitação podem ser observados, por meio

da melhoria das condições do pavimento e da redução na taxa de deterioração do pavimento.

Um importante recurso de um sistema de gerenciamento de pavimentos é a habilidade de determinar as condições atuais de uma malha do pavimento e prever suas condições futuras (SHAHIN, 2005). Para que a previsão seja confiável, deve ser utilizado um sistema de avaliação que identifique as condições do pavimento.

Um elemento essencial para um sistema de gerência de pavimentos, segundo *University of Michigan Transportation Research Institute - UMTRI* (1999) é o monitoramento da sua superfície, seja através da medida do índice de irregularidade ou de outras propriedades. A tecnologia tem sido utilizada por anos para a leitura destas propriedades, no entanto, existem erros e discrepâncias entre medidas, decorrentes da variação entre equipamentos, procedimentos de operação inapropriados, aspectos do pavimento e do ambiente. Um exemplo utilizado por UMTRI (1999) é o caso de os motoristas dos veículos utilizados para realizar as medições não se mantém por todo o caminho exatamente na mesma linha, o que afeta as medições, mesmo que seja utilizado um equipamento considerado excelente.

## **2.7. Modelos de Previsão de Desempenho**

Dentro de um sistema gerencial de pavimentos, a quantificação das condições dos pavimentos, bem como a previsão da evolução do estado do pavimento ao longo de sua vida útil, é imprescindível para a priorização e seleção de projetos e de estratégias de manutenção e reabilitação, para a previsão orçamentária e para a alocação de recursos (BECKER, 2012).

Torna-se fundamental para um bom sistema de gerenciamento de pavimentos um modelo de previsão de desempenho adequado às características do pavimento em questão, ao tráfego existente no trecho e às condições climáticas da região (ABAZA, ASHUR e AL-KHATIB, 2004).

Os modelos de desempenho utilizados no auxílio ao processo de decisão são úteis quando conseguem explicar o processo de deterioração dos pavimentos, pois a estimativa da sua evolução (ou taxa de deterioração) é importante na determinação da vida em serviço do pavimento, definida como o período compreendido entre o início de aplicação das cargas do tráfego e uma intervenção de reabilitação (SONCIM, 2011).



De acordo com Shahin (2005), não há um modelo de previsão que funcione para todas as locações e condições, portanto, é importante que o sistema de gerenciamento inclua uma ferramenta de modelagem de previsão que possa ser utilizada para formular diferentes modelos para diferentes locações.

Modelos de previsão de desempenho, como explicam Hamdi et al. (2012), variam desde simples modelos de regressão linear até modelos complicados que utilizam abordagens empíricas, mecánísticas ou empírico-mecánísticas.

Segundo Haas et al. (1994 apud NASCIMENTO, 2005), os modelos de previsão de desempenho podem ser agrupados em quatro classes:

- a) Puramente mecánísticos: modelos baseados em parâmetros de respostas estruturais, tais como: tensão, deformação ou deflexão do pavimento;
- b) Empírico-mecánísticos: que utilizam respostas estruturais, mas que são relacionadas com a deterioração funcional ou estrutural através de equações de regressão;
- c) Empíricos ou de regressão: modelos em que as variáveis dependentes, relativas à deterioração funcional ou estrutural, são relacionadas a uma ou mais variáveis independentes, como suporte do subleito, aplicações de carga por eixo, propriedades e espessura das camadas do pavimento, fatores ambientais e suas interações;
- d) Subjetivos: modelos em que a experiência de engenheiros é formalizada através de processos de transição, como, por exemplo, o processo de Markov, que permite a obtenção de modelos de desempenho mesmo sem série histórica de dados.

Prozzi e Madanat (2002) afirmam que os modelos podem ser classificados em dois grupos: modelos empíricos e modelos mecánísticos, dependendo da abordagem seguida para o desenvolvimento da função de desempenho. Um terceiro grupo, chamado de mecánístico-empírico, faz uso tanto dos conceitos mecánísticos e modelamento empírico.

Os modelos empíricos, ou de regressão, relacionam as variáveis dependentes (irregularidade longitudinal, trincas, deflexões), que caracterizam a deterioração estrutural ou funcional do pavimento, com uma ou mais variáveis independentes, como tráfego, estrutura do pavimento, idade e condições climáticas. Este tipo de modelo é aplicável quando se dispõe de uma série histórica de dados e são formulados a partir de uma análise estatística de dados de desempenho levantados em pavimentos existentes (NASCIMENTO, 2005).

Nos modelos empíricos, a variável dependente é algum indicador de desempenho do pavimento. Tanto indicadores subjetivos (qualidade de rolamento, índices de condição, etc.) quanto indicadores objetivos (rugosidade, afundamentos, fissuramento, etc.) são utilizados como variáveis dependentes. Estes indicadores de desempenho são relacionados a uma ou mais variáveis independentes, como resistência estrutural do pavimento, tráfego e condições ambientais. Estes modelos são desenvolvidos, muitas vezes, baseados puramente em considerações estatísticas, sem nenhuma tentativa de representar o fenômeno físico subjacente do processo de desempenho (PROZZI e MADANAT, 2002).

De acordo com Prozzi e Madanat (2002), na maior parte dos trabalhos empíricos encontrados na literatura, variáveis explanatórias são utilizadas e descartadas com base exclusivamente na consideração da estatística envolvendo este parâmetro. Muitas vezes variáveis relevantes são descartadas em função da baixa significância estatística. Por outro lado, por este mesmo motivo, variáveis irrelevantes são, muitas vezes, incorporadas ao modelo. Qualquer modelo desenvolvido seguindo esta abordagem irá sofrer por tendências de especificações. A maioria das especificações são a combinação linear de regressões disponíveis e o critério para a seleção das melhores especificações em meio a diversas alternativas é obter o melhor uso possível das informações.

Como um exemplo de modelo empírico pode ser citado o modelo de Tavakoli, que, segundo Becker (2012), cataloga os pavimentos para reconhecer sua condição atual, verifica suas taxas de deterioração para avaliar a necessidade e os custos de reparo. Serafini e Gonçalves (2004) explicam que o modelo de Tavakoli propõe um método de priorização para a manutenção de trechos viários, baseado em uma fórmula que determina que o índice de prioridade (IP), que é função do inverso do índice de condição do pavimento, da classe da via, do tipo de tráfego e de um fator de nível de manutenção. Para a aplicação deste modelo, de acordo com Serafini e Gonçalves (2004), é imprescindível realizar o inventário da malha viária, que pode ser urbana ou rural, determinar os trechos homogêneos, classificar e denominar as vias, levantar as características geométricas do pavimento e determinar o volume de tráfego e o histórico do pavimento. A partir da verificação dos tipos de defeito existentes no pavimento e da severidade e da porcentagem de área afetada é que se determinam as condições funcionais de cada trecho do pavimento e, então, se define a prioridade das intervenções nos trechos.

Yshiba e Fernandes Jr. (2006) explicam que os modelos empíricos são formulados a partir da análise estatística de dados de desempenho levantados em pavimentos existentes e citam como exemplos os modelos desenvolvidos por Queiroz (1981) e Paterson (1987). Estes autores desenvolveram um modelo estatístico, utilizando planejamento fatorial para identificação dos fatores mais significativos sobre os parâmetros de desempenho dos pavimentos e a análise de variância para o estabelecimento de equações de regressão. Foi realizado o estudo da malha rodoviária, considerando o tipo de solo, a capacidade estrutural do pavimento, o número de solicitações equivalentes do eixo padrão e, com base em inventário existente para seções de pavimento de concreto asfáltico não reabilitados e, a partir deste, foram desenvolvidos modelos estatísticos que representam os efeitos dos fatores idade, tráfego e número estrutural sobre o desempenho dos pavimentos quantificados em termos de irregularidade longitudinal (IRI) e deflexão dos pavimentos (DEF). Neste estudo foram desenvolvidas as seguintes equações:

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

Esta equação tem coeficiente de determinação  $R^2=0,75$ .

$$DEF = 56,0 + 8,7xP(I) + 4,25xP(N) - 4,75xP(S) + 1,81xP(I)xP(S) \quad (3)$$

Esta equação tem coeficiente de determinação  $R^2=0,62$ .

$$P(I) = \frac{I - 13}{8}$$

$$P(N) = \frac{N - 5 \times 10^4}{10^5}$$

$$P(S) = \frac{S - 5,5}{2}$$

Onde: I é a idade, em anos; N é o número de solicitações do tráfego e S é o número estrutural corrigido.

Nos modelos empírico-mecanísticos, segundo Fernandes Jr. (1994 apud SONCIM, 2011), as respostas estruturais, como tensões, deformações e deslocamentos, são correlacionadas com dados experimentais sobre a evolução da deterioração

estrutural ou funcional dos pavimentos, por meio de análise de regressão. Estes modelos são especialmente úteis para a previsão da evolução de formas de deterioração associadas às solicitações do tráfego (trincas por fadiga do revestimento e deformação permanente nas trilhas das rodas).

Yshiba & Fernandes Jr. (2006) definem os modelos empírico-mecanísticos como os que relacionam variáveis dependentes de deterioração estrutural ou funcional com uma ou mais variáveis independentes, como suporte do subleito, solicitações de tráfego, espessuras e propriedades do pavimento. Segundo estes autores, Queiroz (1981) desenvolveu equações que relacionam algumas respostas estruturais (tensões horizontais de tração, deformação e energia de deformação na base do revestimento asfáltico, tensão e deformação vertical de compressão no tipo do subleito) com a irregularidade longitudinal, solicitações do tráfego até o aparecimento da primeira trinca e evolução da área trincada.

Os modelos mecanístico-empíricos, segundo Prozzi e Madanat (2002), fazem uso de caracterização de materiais (em laboratório ou testes *in loco*) e modelos para determinar a resposta de um pavimento. Esta resposta é correlacionada ao desempenho do pavimento e calibrada para uma estrutura de um pavimento. Estes modelos são, usualmente, calibrados aplicando um fator de correção, que é determinado seguindo procedimentos que não são apoiados por rigorosos procedimentos estatísticos. É conhecido, muitas vezes, que estes fatores de correção não são apoiados em informações reais de desempenho, mas sim, no julgamento de engenheiros.

Os modelos mecanísticos, conforme explicam Haas et al. (1994 apud SONCIM, 2011), excluem todas as inferências empíricas na estimativa da deterioração do pavimento. Estas respostas estruturais são utilizadas para prever o desempenho dos pavimentos em termos de deformações permanentes e propagação de trincas. Este tipo de modelo não tem sido completamente desenvolvido por causa da complexidade do processo de deterioração dos pavimentos e também porque as respostas estruturais necessitam estar relacionadas à deterioração dos pavimentos para terem significado para os engenheiros de pavimentação.

Segundo Prozzi & Madanat (2002), modelos mecanísticos são baseados no comportamento dos materiais e nas repostas do pavimento, que se acredita representar o real comportamento da estrutura do pavimento sob ações combinadas de tráfego e ambiente. Modelos presentemente utilizados são simplificações e somente representam o

comportamento dos materiais sob condições restritas. Em função da complexidade do processo de deterioração das rodovias, esta abordagem é, atualmente, inviável.

Os modelos determinísticos, segundo Frandolozo (2007) podem ser modelos de desempenho estrutural, modelos de desempenho funcional ou modelos de degradação.

Rodrigues (1997, apud FRANDOLOZO, 2007) explica a diferença entre os modelos. Os modelos de desempenho estrutural preveem o surgimento e a propagação de defeitos de natureza estrutural, que são produzidos pela repetição das cargas do tráfego. Modelos de desempenho funcional preveem a queda de um índice de serventia. Os modelos de degradação são derivados de um dos anteriores e utilizam uma função de degradação, que é um indicador normalizado de defeitos ou de queda e índice de serventia. A degradação, segundo o autor, começa em zero e chega a 1 quando é atingido um nível inaceitável de defeitos ou serventia.

Segundo Mandiartha et al. (2011), a maioria dos modelos de previsão de desempenho utilizam métodos determinísticos através de análises de regressão, estimação empírica e/ou combinada com métodos mecanístico-empíricos.

Apesar das limitações, modelos empíricos e mecanístico-empíricos são, segundo Prozzi e Madanat (2002), as abordagens mais populares atualmente. Modelos empíricos baseados em análises de regressão têm sido utilizados por muitos anos e constituem alguns dos mais utilizados modelos de deterioração. No entanto, nos últimos 20 anos, houve uma tendência, para as agências de rodovias, que direcionou seus esforços para os modelos mecanístico-empíricos por serem mais atrativos do ponto de vista da engenharia.

Segundo Tabatabae e Ziyadi (2013), a maior parte dos fatores que afetam o desempenho e a deterioração dos pavimentos se modificam com o tempo e são difíceis de prever e, além disso, as interações entre os fatores são desconhecidas e extremamente variáveis. Existe ainda, segundo estes autores, a incerteza causada por erros de mensuração das informações do pavimento e incertezas inerentes aos parâmetros do modelo de previsão de desempenho. Portanto, a deterioração do pavimento representa um processo estocástico (TABATABAEE e ZIYADI, 2013).

Tabatabae e Ziyadi (2013) consideram o uso de modelos probabilísticos a melhor opção para contabilizar a natureza estocástica da deterioração dos pavimentos. Ainda com base nestes autores, o modelo Markoviano tem sido amplamente utilizado em sistemas de gerenciamento de pavimentos como base para a previsão de desempenho.

Além da limitação dos modelos existentes a um projeto específico ou a um nível de projeto, outras limitações influenciam na precisão dos modelos de previsão. Segundo Mandiartha et al. (2011) esses fatores são a imprevisibilidade do volume e das cargas de tráfego, mudanças climáticas, a complexidade da deterioração de tipos específicos de pavimentos, a acurácia e a consistência dos parâmetros medidos e o tamanho dos registros históricos envolvendo o pavimento em questão.

Para Tabatabaee e Ziyadi (2013), a escolha do tipo de modelo é baseada na disponibilidade de dados, os pressupostos utilizados na criação do modelo de desempenho, facilidade de uso e objetivos do gerenciamento.

Haider et al. (2015) recomendam que os modelos que não foram desenvolvidos para o uso em um determinado local sejam calibrados para este fim, para aprimorar a capacidade de previsão refletindo as características únicas do local e das características construtivas do pavimento.

Para a calibração de modelos, segundo Haider et al. (2015), um processo de regressão não linear estima os coeficientes do modelo empírico que são avaliados de acordo com o quão bem se encaixam aos resultados. O sucesso da calibração, com base no estudo de Haider et al. (2015) depende dos dados utilizados e das técnicas estatísticas adotadas para aumentar a eficiência dos modelos.

Haider et al. (2015) explica que a calibração dos modelos é utilizada para confirmar que estes podem prever o desempenho do pavimento com o mínimo desvio e determinar o erro padrão associado às equações.

Para a análise comparativa dos modelos de previsão da irregularidade longitudinal existem diversos modelos de previsão de desempenho:

- a) Equação estabelecida por Paterson (1987) e apresentada por Soncim e Fernandes Jr.(2012):

$$QI_t = (QI_0 + 0,725(1 + SNC)^{-4,99} * NE_4) * e^{0,0153*t} \quad (4)$$

onde:

$QI_t$  = irregularidade longitudinal na idade t;

$QI_0$  = irregularidade longitudinal inicial;

SNC = número estrutural corrigido;

$NE_4$  = número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 80kN, em milhões por faixa;

t = idade do pavimento, desde a construção, reabilitação ou reconstrução, em anos.

$$R^2=0,75$$

b) Equação estabelecida por Marcon (1996):

$$QI = 18,348 + 1,1635xIDADE \quad (5)$$

Onde:

QI = quociente de irregularidade, em contagens/km;

IDADE = idade do pavimento desde a construção ou reabilitação, em anos.

$$R^2=0,29$$

c) Equação estabelecida por Yshiba (2003 apud SONCIM et al., 2013):

$$IRI = 2,8 + 0,38 * I + 0,31 * N - 0,16 + 0,09 * I * N - 0,08 * I * SNC \quad (6)$$

Onde:

I = idade do pavimento, desde a construção original ou desde o último recapeamento, em anos;

N = tráfego expresso pelo número de solicitações equivalentes do eixo padrão;

SNC = número estrutural corrigido do pavimento.

$$R^2=0,75$$

Os valores QI (contagens/km) são transformados em IRI (m/km) utilizando-se a relação apresentada na equação 01.

Para a análise comparativa dos modelos de previsão da deformação permanente podem ser utilizados os seguintes modelos de previsão de desempenho:

a) Equação estabelecida por Paterson (1987):

$$RDM = 1,0xAGE^{0,166}xSNC^{-0,502}xCOMP^{-2,30}xNE_4^{ERM} \quad (7)$$

Onde:

RDM = profundidade média das trilhas de roda, em mm;

AGE = idade do pavimento desde a construção, reabilitação ou reconstrução, em anos;

SNC = número estrutural corrigido;

COMP = índice de compactação, definido como a compactação relativa média ponderada pela estrutura da camada;

$NE_4$  = número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 80kN, em milhões por faixa;

b) Equação estabelecida por Marcon (1996):

$$TRI = 1,8228 + 0,2325xIDADE \quad (8)$$

Onde:

TRI = profundidade média das trilhas de roda, em mm;

IDADE = idade do pavimento desde a construção ou reabilitação, em anos.



### 3. METODOLOGIA

O foco desta pesquisa é o desenvolvimento de modelos empíricos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis. Tais modelos buscam descrever o desempenho a partir de variáveis que representam defeitos existentes no pavimento relacionadas a um fator que influencia no surgimento destes defeitos. O fator que foi relacionado com o surgimento dos defeitos foi o fator idade.

Foram desenvolvidos modelos estatísticos para a previsão da irregularidade longitudinal (IRI) e para afundamento nas trilhas de roda (ATR). Estes modelos foram baseados em séries históricas de dados.

#### 3.1. Contextualização do Local de Estudo

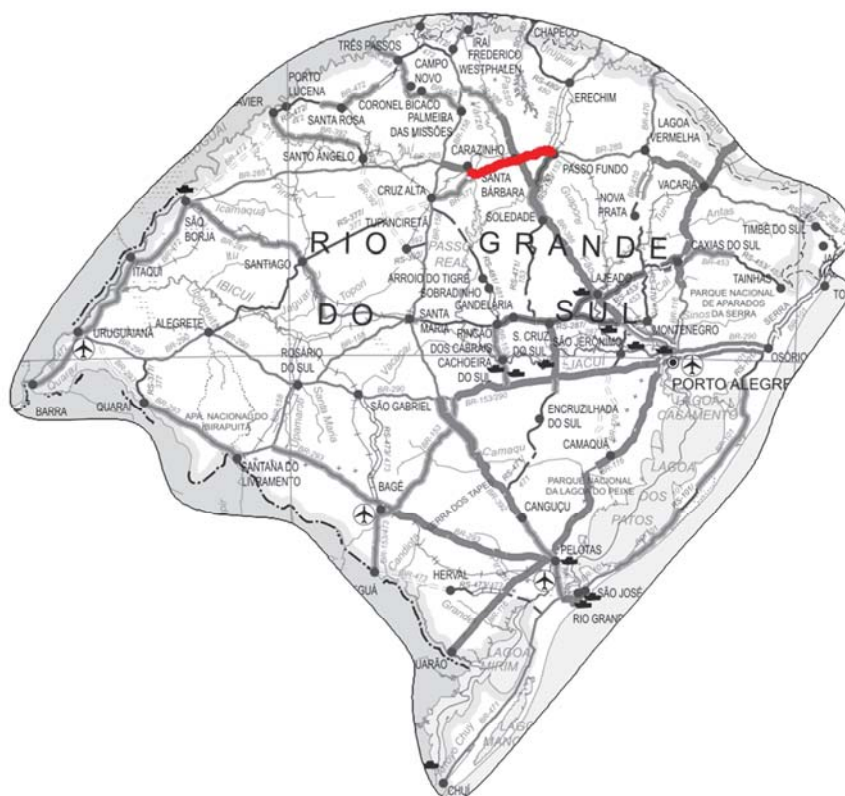
Os modelos foram desenvolvidos para um trecho da rodovia BR 285. O trecho analisado inicia no km291+600 e finaliza no km384+010, situado no norte do estado do Rio Grande do Sul. A Figura 12 situa o trecho dentro do território nacional e a Figura 13 no estado. A Figura 14 contém o mapa da região com o trecho em destaque.

Figura 12: Trecho de estudo situado no território nacional



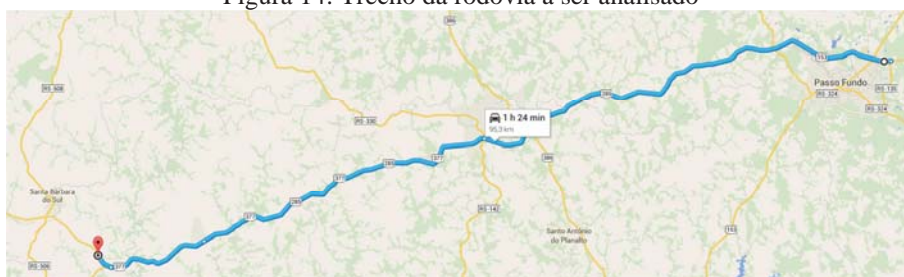
Fonte: Adaptado de DNIT (2013).

Figura13: Trecho de estudo situado no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de DNIT (2013).

Figura 14: Trecho da rodovia a ser analisado



Fonte: Google maps (2014).

Composto por 92,41km de pavimento flexível, o trecho inicia-se a uma distância aproximada de 0,25km do trevo de acesso principal a Universidade de Passo Fundo, a 600m do ponto apresentado na Figura 15 e termina distante 5,8km do trecho de acesso a cidade de Santa Bárbara do Sul, como apresentado na Figura 16.

Figura 15: Km291 da BR-285, a 600m do início do trecho ver Figura e texto da Figura



Fonte: O autor (2014).

Figura 16: Km384 da BR-285, a 10m do final do trecho



Fonte: O autor (2014).

### 3.2. Delimitação do Trecho

A definição do trecho a ser estudado se deu com base na disponibilidade de dados para análise para esta rodovia.

Primeiramente, se definiu como local de estudo a rodovia BR 285 e, em função dos dados provenientes do monitoramento de um trecho desta rodovia durante período em que esta foi gerenciada por uma empresa concessionária de pedágios, foi limitado o início e o fim do trecho coincidindo com o início e o fim do trecho monitorado. O

trecho foi gerenciado por empresa de pedágio e monitorado entre os anos de 2006 e 2014.

Para o desenvolvimento de modelos específicos para um determinado local, é importante a sua caracterização em relação às características que afetam o desempenho do pavimento.

Foi possível caracterizar o trecho, em termos de projeto da rodovia, materiais utilizados na construção e espessura das camadas do pavimento, utilizando o projeto do DNIT de restauração de trecho da BR 285, realizado no ano de 1989. Este trecho se inicia no km 337+200 e termina no km 403+698.

Este trecho se inicia no trevo de acesso à cidade de Carazinho (Figura 17) e finaliza no entroncamento da BR 285 com a BR 158 (Figura 18).

Figura 17: Km 337+200: início do trecho de projeto



Fonte: O autor (2016).

Figura 18: Km 403, a 698 metros do final do trecho de projeto

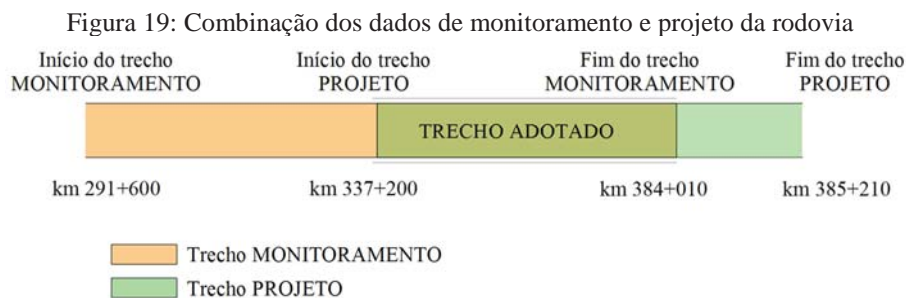


Fonte: O autor (2016).

Considerando que existem informações referentes aos materiais do trecho da rodovia entre o km337+200 e o km403+698, para a delimitação do trecho de rodovia a

ser utilizado no desenvolvimento dos modelos, foram mantidos apenas os quilômetros que estão descritos tanto nos dados de monitoramento como no projeto de restauração.

Desta forma, os valores foram combinados como mostra o esquema da Figura 19 e o trecho resultante para análise passa a ter início no km337+200 e fim no km384+010, com 46,81km de extensão.



Fonte: O autor (2016).

Tendo como princípio o objetivo de desenvolver modelos para pavimentos flexíveis para todo o trecho da rodovia, foram excluídos os quilômetros que tinham em sua descrição alguma característica que os diferenciasse dos demais. Todos os quilômetros analisados foram de rodovia com pavimento flexível, sobre camada de base, sub-base e subleito. Para homogeneizar o trecho, foram excluídos os dados referentes aos quilômetros que apresentaram obras de arte especiais, como pontes (por apresentarem características estruturais diferentes do pavimento em geral), pedágios (áreas com pavimento de concreto) e lombadas (características de deslocamento diferentes dos trechos em geral). O Quadro 6 apresenta os trechos excluídos e o motivo da sua exclusão. Foram excluídos, além destes, os trechos que os antecederam e sucederam, com o objetivo de evitar erros referentes a anotações erradas da quilometragem.



Quadro 6: Trechos excluídos e motivos das exclusões

TRECHOS EXCLUÍDOS								
Início	Fim	MOTIVO	Início	Fim	MOTIVO	Início	Fim	MOTIVO
293,40	293,60	PONTE	326,20	326,40	PEDÁGIO	341,00	341,20	PEDÁGIO
293,60	293,80	PONTE	326,40	326,60	PEDÁGIO	341,20	341,40	PEDÁGIO
295,00	295,20	PONTE	326,60	326,80	PONTE	341,40	341,60	PEDÁGIO
295,20	295,40	PONTE	326,80	327,00	PONTE	341,60	341,80	PEDÁGIO
297,80	298,00	LOMBADA	331,40	331,60	PONTE	344,20	344,40	PONTE
298,00	298,20	LOMBADA	331,60	331,80	PONTE	344,40	344,60	PONTE
310,40	310,60	PONTE	334,00	334,20	PONTE	354,80	355,00	PONTE
310,60	310,80	PONTE	338,20	338,40	LOMBADA	355,00	355,20	PONTE
323,40	323,60	PONTE	338,80	339,00	LOMBADA	366,80	367,00	PONTE
323,60	323,80	PONTE	339,00	339,20	LOMBADA	367,00	367,20	PONTE
325,80	326,00	PEDÁGIO	340,40	340,60	POSTO PRF	378,80	379,00	PONTE
326,00	326,20	PEDÁGIO	340,60	340,80	POSTO PRF	379,00	379,20	PONTE
						379,20	379,40	PONTE

Fonte: O autor (2016).

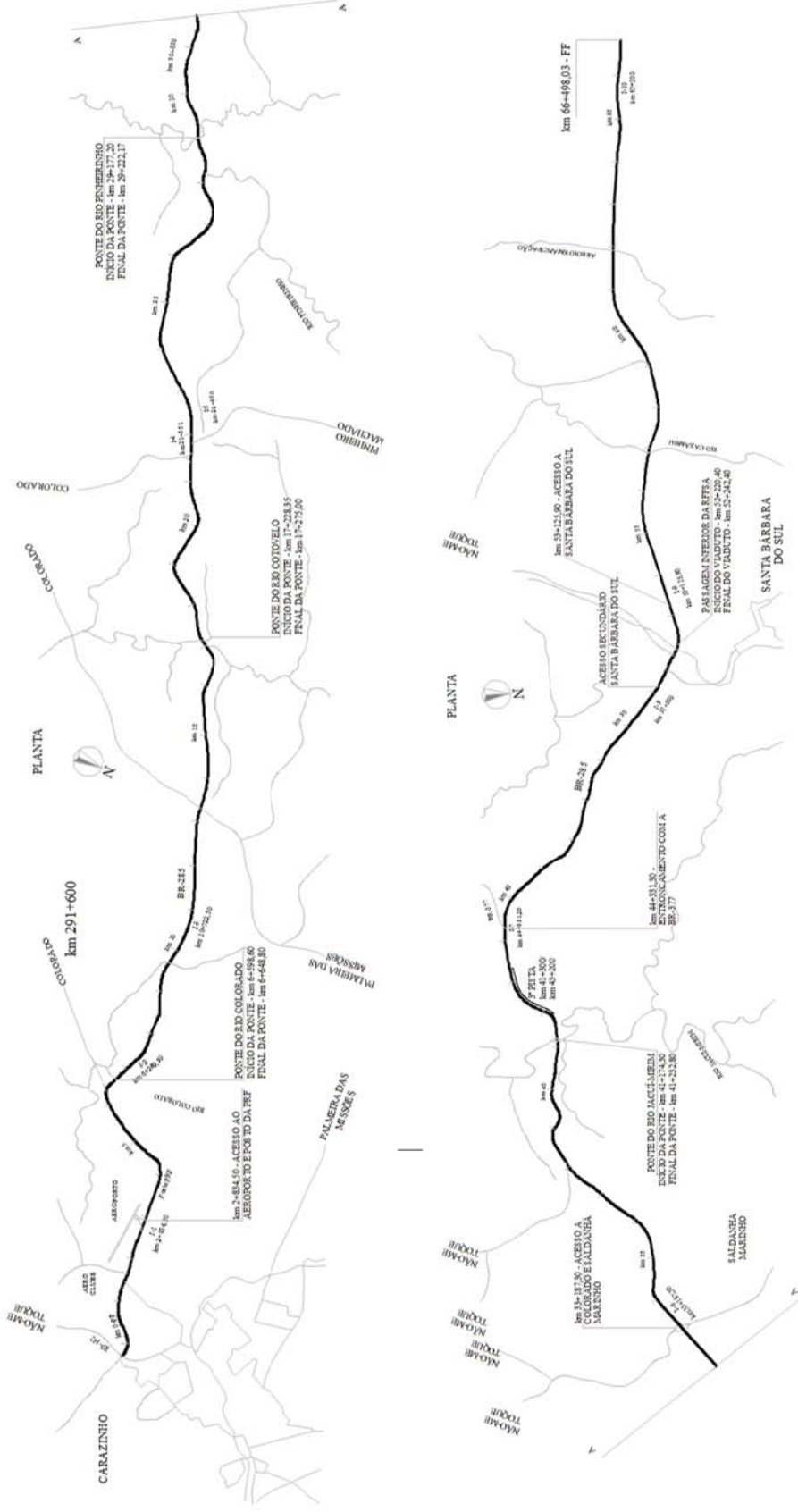
### 3.3. Caracterização do Trecho

A caracterização do trecho foi realizada em termos de materiais e sistemas construtivos, fatores ambientais e fatores de carregamento.

#### 3.3.1. Materiais e Sistemas Construtivos

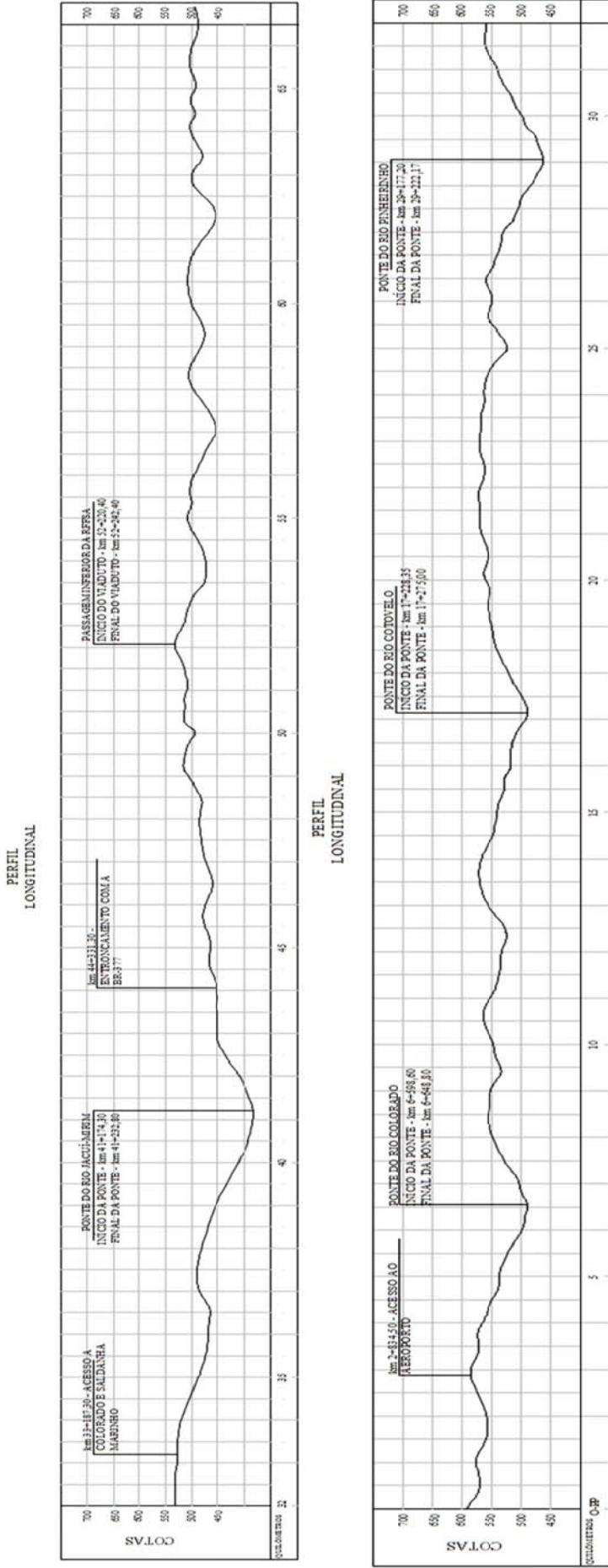
Em termos de projeto da rodovia, o trecho foi caracterizado com base no projeto de restauração do trecho. Pode ser analisada, na Figura 20, a planta do trecho da rodovia e, na Figura 21, o perfil topográfico do trecho. Além disso, o projeto de restauração contém um gráfico linear do pavimento, que apresenta a profundidade das camadas do pavimento.

Figura 20: Planta do trecho entre o km 337+200 e o km 403+698 da rodovia BR-285



Fonte: Adaptado de DNIT (1989)

Figura 21: Perfil longitudinal da rodovia BR-285 entre o km 337+200 e o km 403+698



Fonte: Adaptado de DNIT (1989)

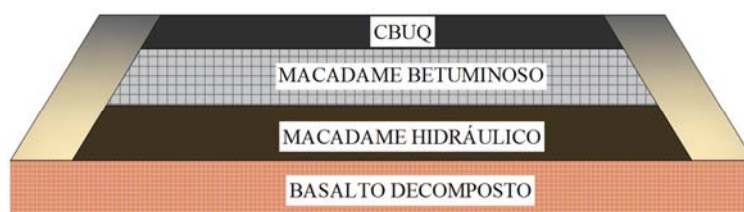


De acordo com o gráfico linear apresentado por DNER (1989) no projeto de restauração da rodovia, o pavimento em questão é composto por camadas de revestimento, base, sub-base e subleito, com as características:

- c) Revestimento: concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) em uma camada existente variando entre 4,3cm e 7,8cm. O projeto apresenta a previsão de 2cm de fresagem em toda a extensão do trecho e uma nova camada de CBUQ com 4cm de espessura em toda a extensão.
- d) Base: macadame betuminoso, em uma camada que varia de 8,2cm a 14,2cm.
- e) Sub-base: macadame hidráulico, com espessura variando entre 13cm e 36cm.
- f) Subleito: basalto decomposto. As profundidades de sondagem variam entre 8cm e 60cm.

A Figura 22 mostra um esquema com a configuração das camadas existentes no pavimento.

Figura 22: Camadas existentes no pavimento do trecho analisado.



Fonte: O autor (2016).

As informações acerca das características das camadas do pavimento retiradas do projeto de restauração da rodovia, que não informa em que data nem de que forma foram obtidas estas informações. Houve dificuldade em encontrar informações precisas e recentes sobre estes dados, assim como sobre a realização de atividades de manutenção ou restauração do pavimento.

### 3.3.2. Fatores Ambientais

De acordo com a classificação definida por Rossato (2011), a porção norte do estado do Rio Grande do Sul, onde se localiza o trecho estudado da rodovia BR-285, é caracterizado pelo tipo climático Subtropical II, medianamente úmido com variação

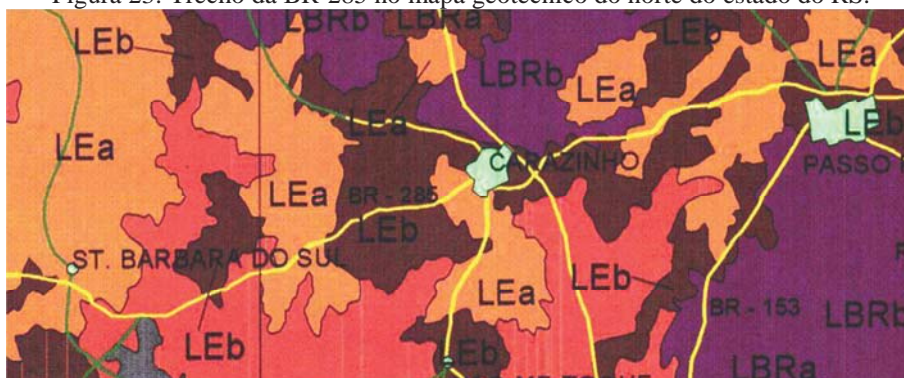
longitudinal das temperaturas médias. Este tipo climático apresenta entre 1500mm e 1700mm anuais de precipitação distribuídos em 90 a 110 dias, sendo que, mensalmente, a chuva cai de 6 a 9 dias (podendo aumentar para 9 a 12 dias), com volume médio de 115mm a 155mm na maior parte dos meses.

A temperatura média anual varia entre 17°C e 20°C. A temperatura média do mês mais frio oscila entre 11°C e 14°C, sendo que, no inverno, as temperaturas mínimas absolutas chegam a valores entre -4°C e -1°C. A temperatura média no mês mais quente varia entre 23°C e 26°C e, no verão, as máximas absolutas atingem valores entre 38°C e 41°C (ROSSATO, 2011).

### 3.3.3. Características do Solo da Região

Com base no mapa geotécnico do norte do estado do Rio Grande do Sul criado por Higashi (2002), o trecho da rodovia foi dividido conforme os tipos de solo existentes. O trecho da rodovia apresenta Latossolo Roxo (basalto), Latossolo Vermelho Escuro (basalto e arenito) e Latossolo Bruno intermediário para Roxo (basalto) em diversas ocorrências, como apresenta a Figura 23, com a parte do mapa geotécnico que contém o trecho analisado da rodovia BR-285.

Figura 23: Trecho da BR-285 no mapa geotécnico do norte do estado do RS.



Fonte: Adaptado de Higashi (2002).

Constatou-se que em todo o trecho analisado o solo foi classificado como latossolo, portanto, para o desenvolvimento dos modelos de previsão de desempenho, o solo do subleito foi considerado homogêneo para todo o trecho.

### 3.3.4. Fator Carregamento

Tendo como princípio que o carregamento dos veículos é um dos fatores que influenciam no desempenho de um pavimento, é importante conhecer as cargas aplicadas a este trecho, para que seja possível classifica-lo em termos de carregamento.

O número N, que, segundo DNIT (2006), é necessário para o dimensionamento do pavimento flexível de uma rodovia, é definido pelo número de repetições de um eixo-padrão de 8,2t (80kN) durante o período de vida útil do projeto, que teria o mesmo efeito que o tráfego previsto sobre a estrutura do pavimento.

O número N foi utilizado neste estudo para classificar a rodovia em função das suas características de tráfego, e, como a rodovia já está em operação, foi considerado que o tempo é o fator com maior influência do número N no desempenho do pavimento.

São considerados, na determinação do número N, fatores relacionados à composição do tráfego referentes a cada categoria de veículos, aos pesos das cargas transportadas e sua distribuição nos diversos tipos de eixos dos veículos (DNIT, 2006).

Segundo relatório elaborado em 2003, em uma parceria do DAER com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o número N do pavimento da BR-285, no trecho entre Carazinho e Passo Fundo, foi calculado para um período de dez anos e para duas hipóteses: com e sem fiscalização por pesagem. Foi considerada uma taxa de crescimento linear de 3% a.a., com uma hipótese de uma taxa de 10% a.a. para composições de veículos de carga (CVC) considerando a possibilidade de um grande crescimento. Os valores para o N estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7: Número N para dez anos

Anos	N Acumulado com pesagem		N acumulado sem pesagem	
	c/ CVC 10 e 3%	c/ CVC 3%	c/ CVC 10 e 3%	c/ CVC 3%
1	2,92E+06	2,93E+06	3,85E+06	3,76E+06
2	5,94E+06	5,94E+06	7,83E+06	7,83E+06
3	9,06E+06	9,04E+06	1,19E+07	1,19E+07
4	1,23E+07	1,22E+07	1,62E+07	1,61E+07
5	1,56E+07	1,55E+07	2,06E+07	2,04E+07
6	1,90E+07	1,89E+07	2,51E+07	2,49E+07
7	2,26E+07	2,23E+07	2,97E+07	2,94E+07
8	2,62E+07	2,58E+07	3,45E+07	3,41E+07
9	2,99E+07	2,95E+07	3,94E+07	3,88E+07
10	3,37E+07	3,32E+07	4,44E+07	4,37E+07

Fonte: Adaptado de DAER & UFRGS (2003).

A composição qualitativa para a frota de veículos comerciais para o trecho da BR-285, segundo o relatório de DAER & UFRGS (2003), é apresentada no Quadro 8.

Quadro 8: Composição da frota comercial para a BR-285

Tipo de veículo de carga	Composição % da frota comercial
Carga leve	13,53
Carga média	20,43
Carga pesada	23,71
Ultrapesada	39,8
CVC's	2,53

Fonte: Adaptado de DAER & UFRGS (2003).

### 3.4. Análise da Série Histórica de Dados

Os arquivos disponibilizados pela empresa responsável pelo pedágio na BR 285 são referentes ao levantamento das características do pavimento relacionadas ao seu desempenho.

Com base nas definições de Freund (2006) os dados podem ser classificados por sua natureza estatística como dados numéricos de razão. Eles estão organizados em planilhas em ordem cronológica.

Os dados utilizados neste estudo são referentes ao monitoramento da rodovia nos anos de 2006 a 2014. São resultados das seguintes análises: quociente de irregularidade (QI), afundamento em trilha de roda (ATR). Os dados de QI e ATR estão disponíveis para os anos de 2008, 2009, 2011, 2012 e 2013.

Planilhas do Levantamento Visual Contínuo (LVC) estavam disponíveis para os anos de 2013 e 2014, enquanto resultados de Avaliação Subjetiva (AS) estavam disponíveis para os anos de 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014. O Quadro 9 apresenta os tipos de dados disponíveis para cada ano.

Quadro 9: Disponibilidade de dados por ano

ANO \ LEVANTAMENTO	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
QI	ND	ND	D	D	ND	D	D	D	ND
ATR	ND	ND	D	D	ND	D	D	D	ND
AS	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	D	D
LVC	D	D	ND	D	D	D	D	D	D

D = Disponível ND = Não Disponível

Fonte: O autor (2016).

Esses dados foram analisados e tabelados, primeiramente, de forma geral, para organizar as informações e retirar as informações desnecessárias. As planilhas foram organizadas de forma a apresentar somente os dados para os quilômetros incluídos no trecho final de estudo.

Para o desenvolvimentos dos modelos foram utilizados os dados de 80% dos trechos, sendo o restante utilizado para verificação dos modelos.

### 3.5. Desenvolvimento de Modelos

A análise de regressão foi utilizada para estabelecer uma relação entre duas variáveis. Foi realizada a regressão entre a variável dependente, que neste caso foi um valor do índice de condição (IRI e ATR) e a variável independente, que, neste caso foi o tempo. O modelo é descrito como pela equação 9.

$$Y = b_3 + b_2 * \exp(b_1 * X) \quad (9)$$

Onde:

Y = variável dependente (índice de condição);

X = variável independente (tempo desde a última grande reabilitação);

$b_3, b_2$  e  $b_1$  = parâmetros de regressão;

Zeviani et al. (2013) explica que a regressão permite explicar o comportamento de y ( $IRI_n$ ), quantificar a influência das condicionantes relevantes e avaliar a incerteza associada a este processo.

A regressão realizada para encontrar os valores de  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  se deu através do método dos mínimos quadrados, que, segundo Freund (2006), tem como finalidade definir o melhor ajuste entre as variáveis. Segundo Zeviani et al. (2013), o objetivo do método dos mínimos quadrados é minimizar a soma do quadrado dos desvios entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo.

A regressão foi realizada utilizando o software RStudio®. O R é uma linguagem e um ambiente para computação estatística e criação de gráficos. O software disponibiliza uma vasta variedade de técnicas estatísticas e gráficas e está disponível como software livre e apresenta efetividade no manejo e armazenamento de dados, uma grande quantidade de ferramentas para análise de informações, uma linguagem de

programação simples e eficaz que inclui condicionais, *loops*, entre outras funções (©The R Foundation, 2016).

Com o objetivo de melhorar o resultado obtido para esta equação, foi utilizada a técnica estatística de *bootstrapping*. Chernick e LaBudde (2011) explicam que *Bootstrapping* é um método de reamostragem, onde amostras são retiradas da amostra original, fazendo substituições na amostra até se chegar às distribuições amostrais de interesse. Esse método tem o objetivo estimar um parâmetro relacionado aos dados, como o desvio padrão, até que esse apresente o melhor valor.

A confiabilidade dos modelos foi testada através do valor RMSE (residual mean square error), que é a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os valores previstos e os valores observados (WILKS, 2006).

A forma mais usual de medida da confiabilidade se dá através do coeficiente de determinação  $R^2$ . No contexto linear, essa medida é bastante intuitiva, com os valores entre 0 e 1 de rápida interpretação da explicação do ajuste da equação, no entanto, não é uma escolha adequada para equações não lineares (SPIESS e NEUMEYER, 2010).

Os modelos de regressão foram criados através do desenvolvimento de equações exponenciais e tem como resultado os modelos estatísticos que representam os efeitos do fator idade sobre o desempenho dos pavimentos quantificados em termos da irregularidade longitudinal e deformação permanente nas trilhas de roda.

Após o desenvolvimento dos modelos, estes foram comparados com outros modelos destinados a previsão dos mesmos defeitos nos pavimentos.

### **3.6. Comparação com Modelos Existentes**

Os modelos desenvolvidos foram comparados com outros modelos existentes. Foram escolhidas, para a análise comparativa dos modelos de previsão da irregularidade longitudinal, as equações estabelecidas por Marcon (1996) e Paterson (1987). A opção pelos modelos de Marcon se deu por eles utilizarem o fator idade como variável de entrada, assim como foi realizado com os modelos desenvolvidos neste trabalho. Nos modelos Paterson, mais variáveis eram utilizadas, além da idade.

Para utilizar os modelos de Paterson (1987) eram necessários os valores de SNC (número estrutural corrigido) e do número N (apresentado por UFRGS e DAER, 2003).

Segundo DNER (2000), o número estrutural corrigido (SNC) é uma importante medida de resistência para a avaliação estrutural dos pavimentos e para a utilização em modelos de previsão de desempenho.

Em modelos de previsão de desempenho, de acordo com DNIT (2006), é necessário utilizar medidas da resistência do pavimento que resumam as interações complexas entre os tipos de materiais, módulos de elasticidade, espessuras das camadas e condição da superfície. O número estrutural corrigido é uma dessas medidas e é definido como uma combinação linear de coeficientes estruturais e espessuras das camadas sobre o subleito e da contribuição do subleito.

Os valores de SNC foram calculados a partir dos valores de FWD, resultantes do ensaio FWD (Falling Weight Deflectometer) realizados pela concessionária de pedágio no trecho estudado. O número SNC foi calculado através da utilização da equação 10, de correlação com o FWD desenvolvida por Ramos et al. (2006). A equação apresenta  $R^2=0,8699$

$$SNC = 38,49 * D_{FWD}^{-0,616} \quad (10)$$

Para a análise comparativa do modelo criado para estimar o afundamento em trilhas de rodas foi utilizado somente o modelo de Marcon (1996), pois foi o único, entre os modelos estudados, para o qual todas as variáveis necessárias estavam disponíveis.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Quociente de Irregularidade (QI)

O quociente de irregularidade foi disponibilizado em planilhas eletrônicas formuladas no Software Excel®. As informações presentes no cabeçalho da planilha descrevem qual a empresa responsável pelo levantamento, a data de realização das medições, a empresa que contratou o levantamento, o equipamento que foi utilizado para as medições, que no caso foi um Perfilômetro Ciber Laser. As planilhas apresentam os valores de QI para a BR-285 para as duas faixas da rodovia e, também, para a faixa adicional presente em uma parte do trecho analisado. A faixa leste é a faixa com sentido Passo Fundo – Santa Bárbara do Sul e a faixa oeste é a que tem sentido Santa Bárbara do Sul – Passo Fundo. Para cada uma destas faixas a planilha possui três valores de QI, sendo um para a roda esquerda do veículo, um para a roda direita e um com a média entre as duas leituras. As planilhas possuem também, um campo para observações, onde é apontada a existência de pontes, lombadas, postos policiais e pedágios. As leituras do QI foram realizadas para cada trecho de duzentos metros, totalizando 408 leituras por ano.

A primeira análise dos dados consistiu na comparação entre os valores de QI para cada lado da pista, para cada trecho, ao longo dos anos. A comparação entre os valores de QI para a roda esquerda e para a roda direita mostrou que não existe uma uniformidade entre os valores. O valor de QI é maior para a roda direita em 44% dos trechos e, para a roda esquerda, em 56% dos trechos.

Perera et al. (1998) analisaram a evolução da irregularidade de um pavimento comparando os valores para a roda esquerda e a roda direita e afirmou que para ambas o valor da irregularidade pode aumentar com o tempo e que também é possível que o valor aumente para apenas uma das rodas. Além disso, nas diversas seções analisadas pelos autores, os valores de irregularidade maiores alternavam entre as rodas direita e esquerda.

Em uma pesquisa onde analisaram a evolução da irregularidade de pavimentos asfálticos, Mulandi et al. (2007) optaram pelo uso das leituras realizadas na roda direita quando havia a necessidade de optar entre uma das duas.

Considerando que há variação entre os valores maiores e menores para cada roda e que não há uma regra que defina que devem ser utilizados os valores referentes a roda



esquerda ou direita, optou-se por utilizar os valores da roda direita, seguindo o exemplo de Mulandi et al. (2007).

Os valores adotados para o QI por trecho, por ano, estão apresentados parcialmente (para os dez primeiros trechos) no Quadro 10.

Quadro 10: Apresentação parcial da planilha com os valores de QI por ano e por trecho

Início (km)	Fim(km)	QI RODA DIREITA				
		2008	2009	2011	2012	2013
337,20	337,40	60,80	56,39	57,20	57,90	58,50
337,40	337,60	85,80	48,80	52,81	48,10	51,60
337,60	337,80	39,40	32,99	35,20	47,20	65,30
337,80	338,00	13,30	22,91	34,91	35,30	20,90
339,40	339,60	12,81	16,30	19,90	32,10	22,50
339,60	339,80	14,50	16,30	18,10	21,70	13,40
339,80	340,00	12,70	13,90	15,00	17,20	15,70
340,00	340,20	10,00	12,70	19,10	17,71	16,30
342,00	342,20	37,30	59,10	69,60	83,40	30,71
342,20	342,40	21,80	21,20	24,90	24,51	23,89

Fonte: O autor (2016).

Os valores de QI foram convertidos em valores de IRI, que é o índice mais utilizado em termos de irregularidade longitudinal. O Quadro 11 mostra os valores das leituras dos dez primeiros trechos convertidos para IRI, através da equação 1.

Quadro 11: Apresentação parcial da planilha com valores de IRI por ano e por trecho

Início (km)	Fim(km)	IRI RODA DIREITA				
		2008	2009	2011	2012	2013
337,20	337,40	5,06	4,74	4,80	4,85	4,89
337,40	337,60	6,84	4,20	4,49	4,15	4,40
337,60	337,80	3,53	3,07	3,23	4,09	5,38
337,80	338,00	1,66	2,35	3,21	3,24	2,21
339,40	339,60	1,63	1,88	2,14	3,01	2,32
339,60	339,80	1,75	1,88	2,01	2,26	1,67
339,80	340,00	1,62	1,71	1,79	1,94	1,84
340,00	340,20	1,43	1,62	2,08	1,98	1,88
342,00	342,20	3,38	4,94	5,69	6,67	2,91
342,20	342,40	2,27	2,23	2,49	2,46	2,42

Fonte: O autor (2016).

O Quadro 12 faz uma relação de número de trechos por faixas de valores de IRI por ano. Percebeu-se na maioria dos anos a maior porcentagem de trechos se encontra com condições boas, com exceção de 2011, com predominância de trechos regulares.

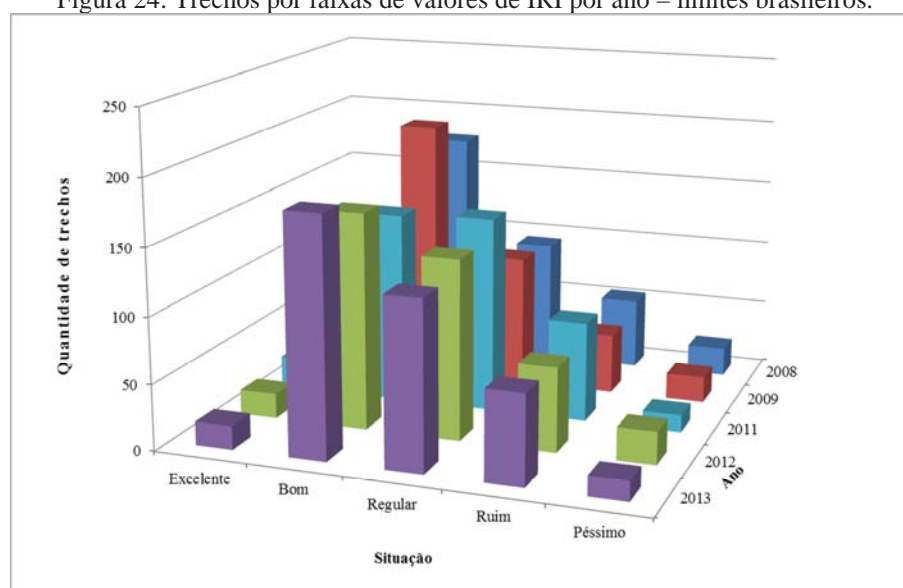
Pôde-se observar uma redução do número de trechos excelentes com o passar dos anos. O número de trechos bons aumentou em 2009 e diminuiu em seguida, voltando a aumentar em 2012 e 2013. Os trechos regulares tiveram sua quantidade aumentada nos primeiros anos e diminuídas a partir de 2012. Os trechos ruins variaram entre 46 e 68 e os péssimos foram minoria, com 25 trechos em 2012. Para melhor visualizar esta distribuição, o gráfico na Figura 24 apresenta barras para a quantidade de trechos para cada faixa de valores para cada ano.

Quadro 12: Número de trechos para as faixas de valores de IRI por ano considerando limites brasileiros.

IRI	NÚMERO DE TRECHOS POR ANO				
	2008	2009	2011	2012	2013
Entre 0 e 1,9 (Excelente)	61	41	24	19	18
Entre 1,9 e 2,7 (Bom)	177	201	146	164	180
Entre 2,7 e 3,5 (Regular)	94	100	149	136	127
Entre 3,5 e 4,6 (Ruim)	54	46	76	64	68
Maior do que 4,6 (Péssimo)	22	20	13	25	15

Fonte: O autor (2016).

Figura 24: Trechos por faixas de valores de IRI por ano – limites brasileiros.



Fonte: O autor (2016).

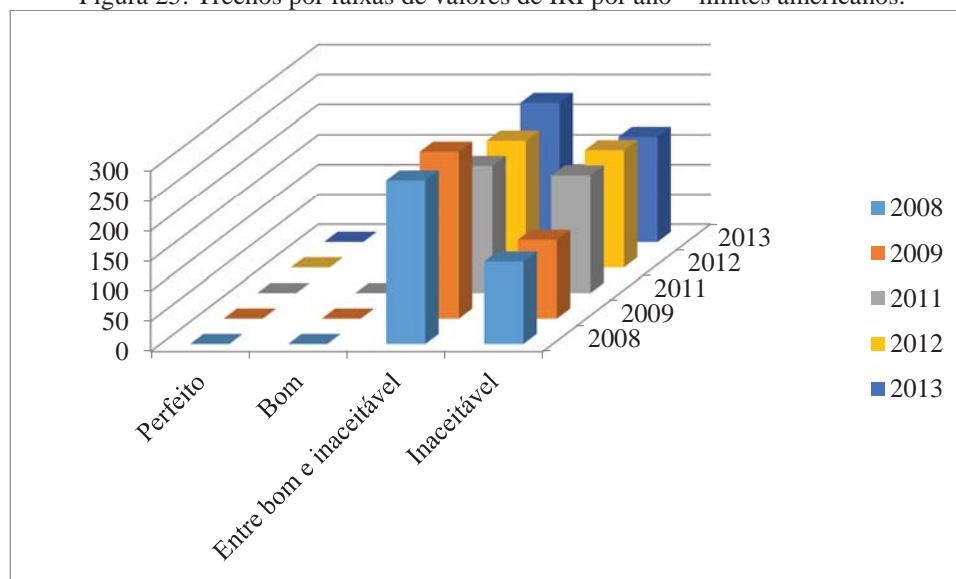
Realizando a análise dos valores de IRI utilizando limites americanos para o IRI percebe-se um gráfico diferente (Figura 25), sem trechos em condições perfeitas ou boas e muitos trechos em condição ruim e inaceitáveis. As quantidades de trechos por ano e por condição estão apresentadas no Quadro 13.

Quadro 13: Número de trechos para as faixas de valores de IRI por ano considerando limites americanos.

IRI	NÚMERO DE TRECHOS POR ANO				
	2008	2009	2011	2012	2013
Perfeito	0	0	0	0	0
Bom	0	0	0	0	0
Entre bom e inaceitável	272	278	212	212	232
Inaceitável	136	130	196	196	176

Fonte: O autor (2016).

Figura 25: Trechos por faixas de valores de IRI por ano – limites americanos.



Fonte: O autor (2016).

A etapa seguinte da análise consistiu em encontrar, para cada trecho analisado, o valor de IRI inicial entre os anos analisados para que, a partir deste valor inicial, fosse definida a evolução do IRI em função do tempo, e que estaria associado a uma possível intervenção na rodovia.

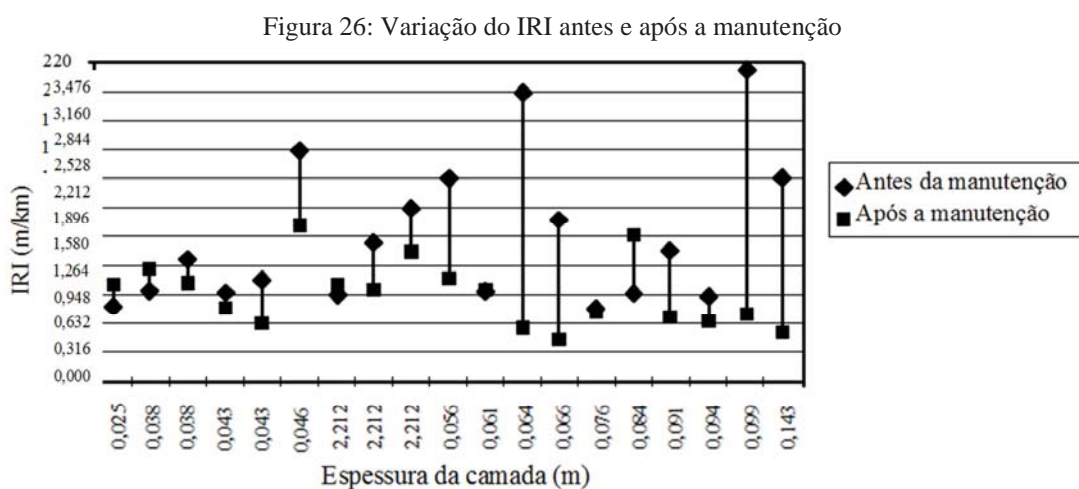
Em função de não haver disponibilidade de informações acerca das ações de manutenção realizadas surgiu a necessidade de se definir um critério para a determinação do momento da execução destas atividades. Perera et al. (1998) afirmam que o valor de IRI evolui de um ano para outro e resultados de medições que contrariem este princípio podem ser inconsistências que indicam atividades de manutenção no pavimento. Sabendo que, a partir de um valor inicial, o pavimento sofre deterioração e tem seu valor de IRI aumentado até que seja executada alguma atividade de manutenção e, conseqüentemente, permitindo que esse valor diminua, utilizou-se este princípio para definir quando aconteceu alguma atividade de manutenção, pois enquanto o valor de IRI aumenta de um ano para outro, pode-se concluir que não foi executada manutenção no

pavimento, no entanto, se de um ano para outro, o valor de IRI diminui, este é um indicador de manutenção do pavimento.

Apesar de esta lógica indicar o critério para a definição da manutenção, é necessário considerar a ocorrência de erros durante as medições dos defeitos nos pavimentos. Perera et al. (1998) explicam que são observadas inconsistências durante o levantamento dos valores de IRI, que podem ser causados pelos fatores: variações no caminho percorrido pelo perfilômetro, temperatura e efeitos sazonais e erros durante a coleta de dados.

Outra consideração que pode ser realizada a fim de diferenciar um erro de medição de uma atividade de manutenção é a efetividade de um serviço de manutenção sobre a correção de um defeito.

Nas análises realizadas por Perera et al. (1998) foram observados trechos de um pavimento onde foram executadas novas camadas de revestimento no pavimento. Comparando os valores de IRI antes e depois desta manutenção, foram observadas mudanças próximas de 0,158 m/km até próximas a 2,528 m/km, em trechos com diferentes espessuras de camadas, como pode ser analisado na Figura 26.



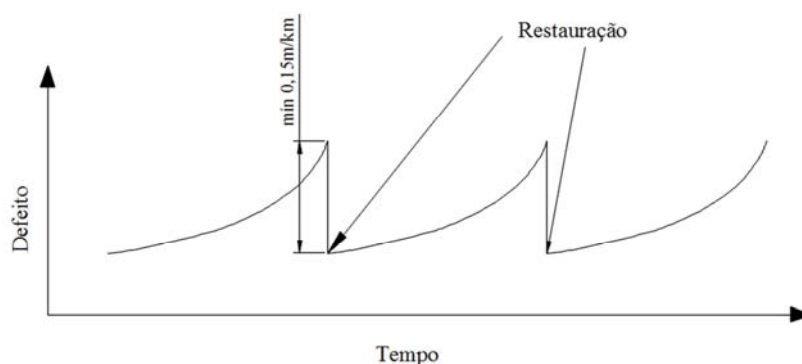
Fonte: Adaptado de Perera et al. (1998).

Labi, Lamptey e Kong (2007) dizem que o micro revestimento (um tratamento usualmente adotado na região deste estudo), quando utilizado nas ações de manutenção do pavimento analisado por eles, possibilitou uma redução no valor do IRI de 0,237m/km até 0,632m/km.

Foi decidido que, para que o valor do IRI fosse definido como IRI inicial e o ano da sua leitura fosse definido como o primeiro ano após a atividade de manutenção, o

valor do IRI do ano após a manutenção deveria ser 0,15m/km menor do que o valor do IRI do ano anterior. A Figura 27 apresenta um gráfico da expectativa da evolução do IRI em função do tempo e das atividades de restauração.

Figura 27: Comportamento esperado do IRI em função do tempo e da ocorrência de manutenções

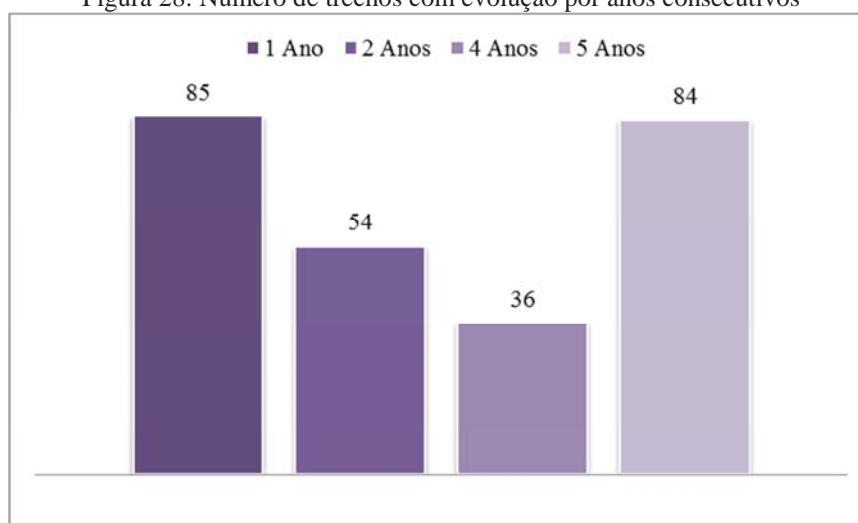


Fonte: O autor (2016).

Tendo definido o ano inicial de avaliação de cada trecho, foi possível estimar a idade do pavimento (tempo decorrido desde a última manutenção) e o valor para o incremento de IRI para o primeiro ano, para dois anos, para quatro anos e para cinco anos.

Como mostra a Figura 28, entre os 408 trechos analisados, 85 apresentaram evolução apenas por um ano, 54 por dois anos, 36 por quatro anos e 84 trechos apresentaram evolução por cinco anos consecutivos.

Figura 28: Número de trechos com evolução por anos consecutivos

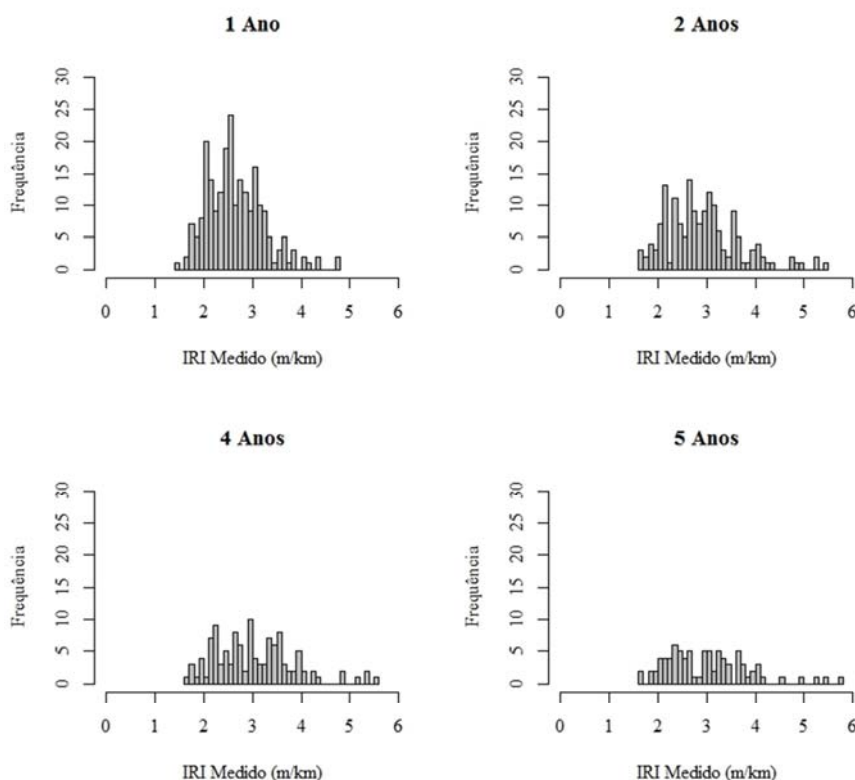


Fonte: O autor (2016).

Foi observado que em muitos trechos os valores da diminuição do IRI apresentavam o valor da evolução negativo e isto ocorreu em função do aumento do IRI ser menor do que 0,15m/km. Estes trechos foram eliminados da análise, para que todos os aumentos de IRI fossem positivos. Após a remoção destes pontos, o número de pontos com evolução contínua de 1 ano passou para 75. O número de pontos com 2 evoluções diminuiu de 54 para 52. Os números de pontos com 4 anos e 5 anos de evolução não sofreram alterações.

Os histogramas da Figura 29 mostram a frequência de ocorrência de valores de IRI para os trechos que apresentaram evolução por 1 ano, 2 anos, 4 anos e 5 anos. A maior frequência de ocorrência de valores de IRI, para trechos com 1 ano de evolução do IRI, esteve próximo de IRI=2,5m/km. Para os trechos com 2 anos de evolução a maior frequência esteve entre IRI=2,0m/km e IRI=3,5m/km. Para os trechos com 4 anos e 5 anos de evolução, a maior ocorrência foi de valores entre IRI=2,0m/km e IRI=3,5m/km.

Figura 29: Histogramas IRI por idade

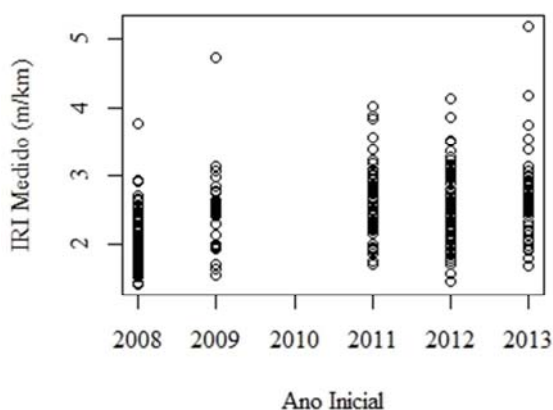


Fonte: O autor (2016).

Para demonstrar os variados valores de IRI inicial, foi realizada uma comparação entre os anos iniciais e os valores de IRI inicial, como pode ser visto na

Figura 30. Percebeu-se que, para os trechos que apresentaram 2008 como o ano inicial, o valor de IRI inicial variou de próximo de zero até próximo de 4m/km. Os trechos com início em 2009 tiveram valores de IRI inicial variando de próximos de 1m/km até próximos de 3m/km, com um trecho com valor maior de 4m/km. Nos trechos com início em 2011 e 2012, houve valores de IRI inicial entre 0,5 e 4m/km. Nos trechos que tiveram 2013 como ano inicial, os valores de IRI inicial variaram entre próximos a 1m/km e próximos a 5m/km.

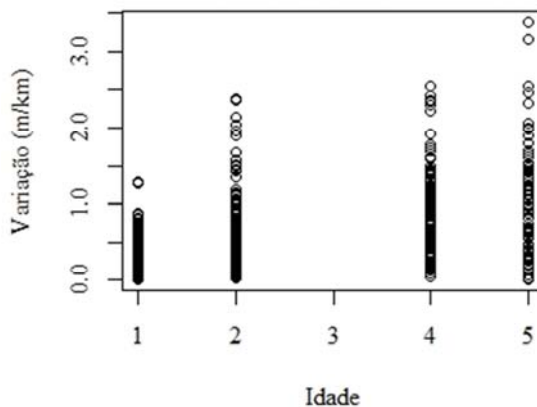
Figura 30: Valores de IRI inicial para os anos iniciais



Fonte: O autor (2016).

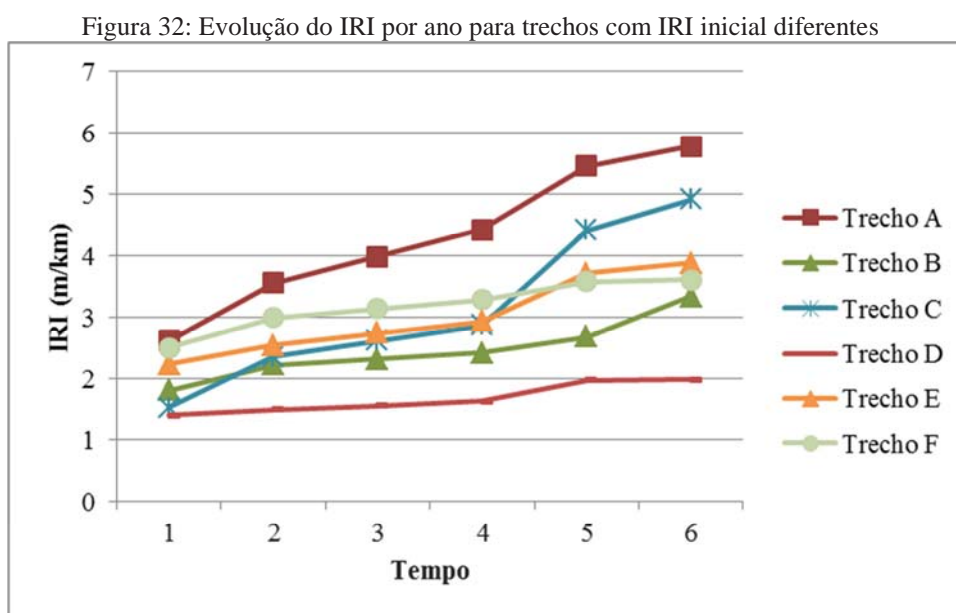
Após a definição dos anos iniciais, a idade do pavimento foi calculada como a diferença entre o ano final (2013) e o ano inicial. A variação do IRI foi calculada como a diferença entre o IRI medido em cada ano e o IRI inicial do trecho analisado. A Figura 31 mostra a variação do IRI (em m/km) para cada idade (em anos) do pavimento.

Figura 31: Relação da idade do pavimento com a variação do IRI



Fonte: O autor (2016).

Seguindo o critério proposto para estimar o momento em que ocorreu alguma atividade de conservação /manutenção da rodovia, a Figura 32 apresenta a evolução do IRI ao longo do tempo para alguns trechos analisados escolhidos aleatoriamente entre os trechos que apresentaram crescimento no valor por cinco anos consecutivos. Foram escolhidos trechos com valores de IRI inicial variados. Os valores apresentados para 2010 foram estimados.



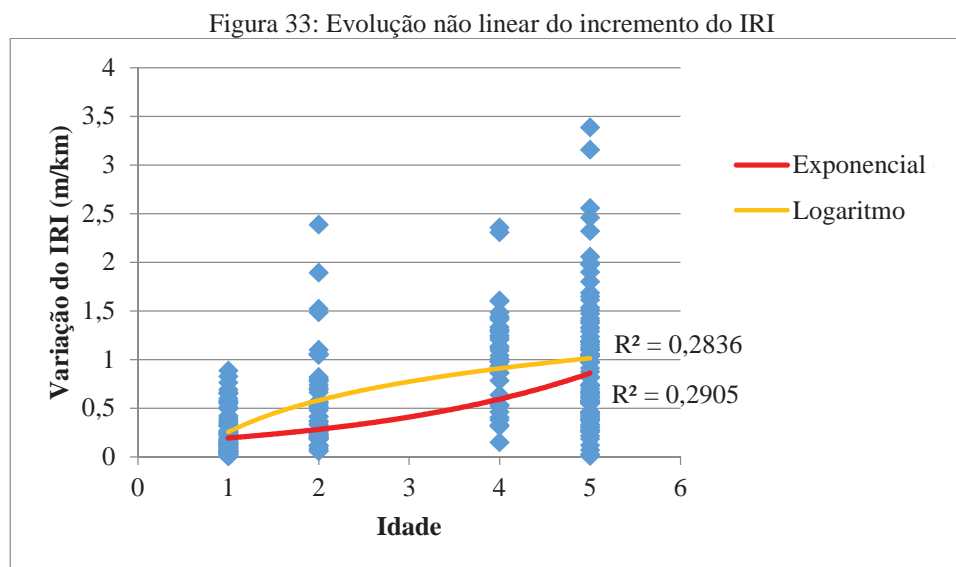
Fonte: O autor (2016).

Foi observado que a evolução do IRI em função do tempo ocorreu de forma não linear, como era previsto ao se analisar a Figura 8 e a Figura 27, que mostram gráficos de evolução.

Este modelo de evolução não linear foi confirmado ao serem criadas linhas de tendência relacionando a idade do trecho do pavimento com o seu incremento de IRI em relação ao IRI inicial, como pode ser verificado na Figura 33. As linhas que apresentaram maior adequação aos valores foram a exponencial e a logarítmica, sendo que essa se mostrou mais adequada. Para analisar a relação entre as duas variáveis analisadas (idade e variação do IRI) foi calculado o coeficiente de determinação  $r^2$ , que, segundo Larson e Farber (2010), é igual à relação da variação explicada com a variação total. Segundo este autor, a variação explicada é a soma dos quadrados das diferenças entre cada valor  $y$  e a média de  $y$  e a variação não explicada é a soma dos quadrados das diferenças entre o valor  $y$  de cada par e cada  $y$  previsto correspondente. A curva



logarítmica apresentou  $R^2=0,2836$ , o que significa que 28,36% da variação de  $y$  pode ser explicada pela relação entre  $x$  e  $y$ .



Fonte: O autor (2016).

O modelo de previsão do desempenho do IRI foi desenvolvido partindo do princípio que o IRI em uma idade 'n' será igual ao IRI na idade '0' (imediatamente após a construção ou restauração) somado ao crescimento do IRI em 'n' anos, como descreve a equação.

$$IRI_n = IRI_0 + f(idade) \quad (12)$$

O crescimento do IRI em função da idade foi definido como um valor que depende do IRI inicial e da variação do IRI no tempo decorrido. A variação do IRI em função do tempo foi definida como a diferença entre o valor de IRI no tempo 'n' e o valor de IRI no tempo '0' ( $IRI_n - IRI_0$ ) e a função que define o crescimento do IRI ao longo do tempo está explicada na equação 13.

$$\frac{IRI_n - IRI_0}{IRI_n - IRI_0} = f(idade) \quad (13)$$

Essa relação foi utilizada para estabelecer a relação entre o tempo decorrido desde a última manutenção e o aumento do IRI do ponto durante este período. Esta relação foi calculada utilizando os valores da base de dados:  $IRI_0$ ,  $n$ ,  $IRI_n$ .

Para descrever o comportamento de uma variável ( $y$  ou  $IRI_n$ ) como uma função de condicionantes ( $x$  ou  $n$ ), chamadas de variáveis explicativas, são usados os modelos de regressão (ZEVIANI et al., 2013).

Com o objetivo de verificar a correlação entre as variáveis analisadas, foi realizada uma regressão para a definição das constantes que farão parte da equação. Como explica Freund (2006), quando o padrão de um conjunto de dados se afasta consideravelmente de uma reta, precisamos considerar ajustar algum tipo de curva, como é o caso do modelo estudado, que se aproxima de uma curva logarítmica. Ainda segundo o autor, embora existam muitos problemas em que uma variável pode ser prevista com bastante precisão em termos de outra, é razoável esperar que as previsões melhorem levando em conta informações adicionais ou que se avaliem as influências das variáveis no resultado da regressão.

Esta regressão foi realizada utilizando a idade do pavimento (representada na equação como  $x$ ) e o logaritmo da relação entre o IRI inicial e a variação do IRI (representado na equação como  $y$ ). A regressão foi feita a partir da equação 14, para encontrar as constantes  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$ , utilizando a relação entre as variáveis conhecidas e as desconhecidas mostradas na equação 13.

$$y = b_3 + b_2 * \exp(b_1 * x) \quad (14)$$

A equação 15 apresenta a função utilizada.

$$\ln\left(\frac{IRI_0}{IRI_n - IRI_0}\right) = b_3 + b_2 * \exp(b_1 * x) \quad (15)$$

$$\frac{IRI_0}{IRI_n - IRI_0} = \exp(b_3 + b_2 * \exp(b_1 * x)) \quad (16)$$

Para a análise, foram definidos como parâmetros iniciais para as constantes  $b_1$  e  $b_3$  os valores -1 e 1, respectivamente. Foi fixado o parâmetro  $b_2=12$ . Como restrição para o modelo, foram definidos os limites inferiores  $b_1=-5$  e  $b_3=-25$ , assim como os limites superiores  $b_1=10$  e  $b_3=90$ . A regressão foi realizada através de 10.000 iterações.

As constantes resultantes da regressão não linear estão apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14: Constantes resultantes da regressão

Constantes resultantes da regressão	Teste t	Teste P
b1	-3,17602	2,16194
b2	12,00000	25,49520
b3	0,57762	18,7730000

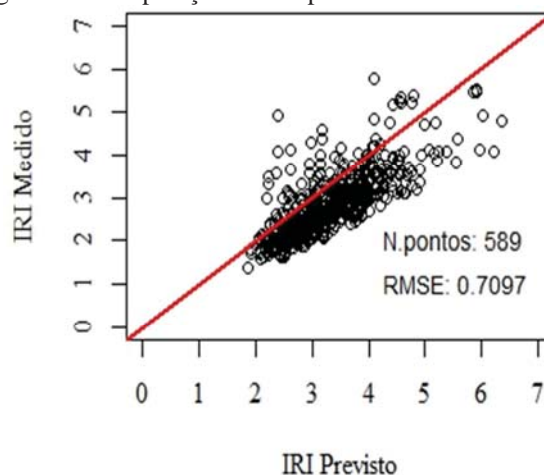
Fonte: O autor (2016).

Aplicando a equação 16 na equação 14, criou-se o modelo mostrado na equação 17 e, substituindo parte dessa equação pela relação com as constantes calculadas, foi definida a equação 18, que pretende calcular o valor futuro de IRI do pavimento tendo o conhecimento do seu IRI atual.

$$IRI_n = IRI_0 + (IRI_0 * \exp(-(b_3 + b_2 * \exp(b_1 * x)))) \quad (17)$$

Este modelo foi utilizado para calcular a previsão do IRI para cada idade. Para verificar a eficiência do modelo, foram calculados os IRI para todos os trechos considerando sua idade e IRI inicial. O resultado da previsão utilizando a equação criada foi comparado com o IRI medido e esta comparação está apresentada na Figura 34.

Figura 34: Comparação do IRI previsto com o IRI medido



Fonte: O autor (2016).

O desvio resultante entre os valores previstos e os valores medidos foi de 0,7097.

Com o objetivo de melhorar o resultado obtido para esta equação, foi utilizada a técnica estatística de *bootstrapping*, que gerou novas constantes para a equação. As

constantes b1, b2 e b3 resultantes do *bootstrapping* estão listadas no Quadro 15. Foram consideradas a estimativa do bootstrapping e a mediana dos valores para cada constante.

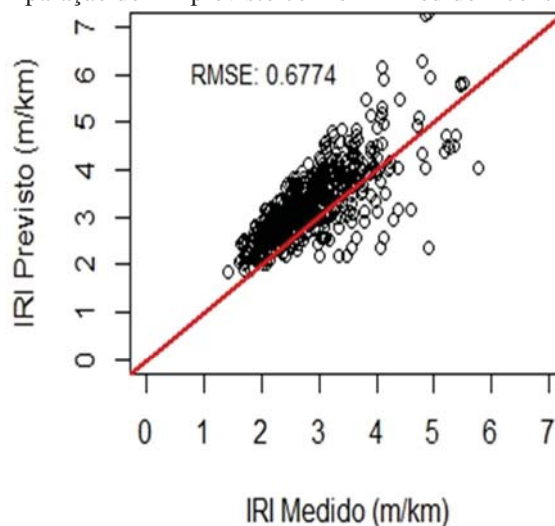
Quadro 15: Constantes resultantes do *bootstrapping*

	Constantes estimadas	Mediana do IC = 95%	2,50%	97,50%
b1	-3,1776142	-3,1754008	-3,3332593	-3,0360828
b2	12,0000000	12,0000000	12,0000000	12,0000000
b3	0,5775345	0,5774191	0,5321098	0,6239683

Fonte: O autor (2016).

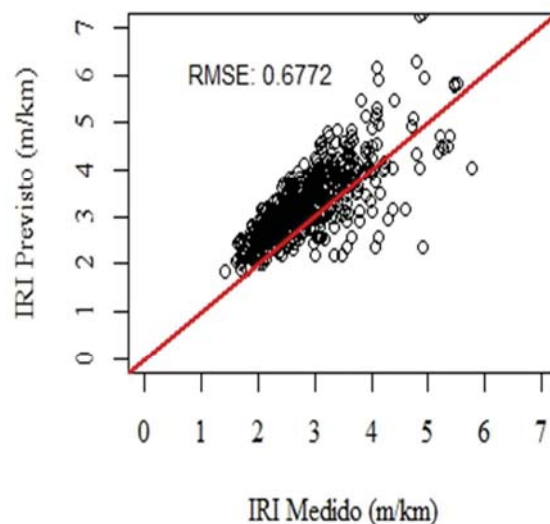
Com essas novas constantes (estimadas e medianas) o IRI previsto foi novamente calculado e comparado ao IRI medido através da Figura 35, que considera as constantes estimadas pelo *bootstrapping*, e pela Figura 36, que mostra a relação considerando as medianas do intervalo de confiança de 95%. Junto aos gráficos estão apresentados o número de pontos e o desvio entre os valores. A equação criada a partir dos coeficientes estimados pelo *bootstrapping* teve  $rmse=0,6774$ . A equação criada a partir dos coeficientes medianos do *bootstrapping* teve  $rmse=0,6772$ .

Figura 35: Comparação do IRI previsto com o IRI medido – constantes estimadas



Fonte: O autor (2016).

Figura 36: Comparação do IRI previsto com o IRI medido – mediana do IC

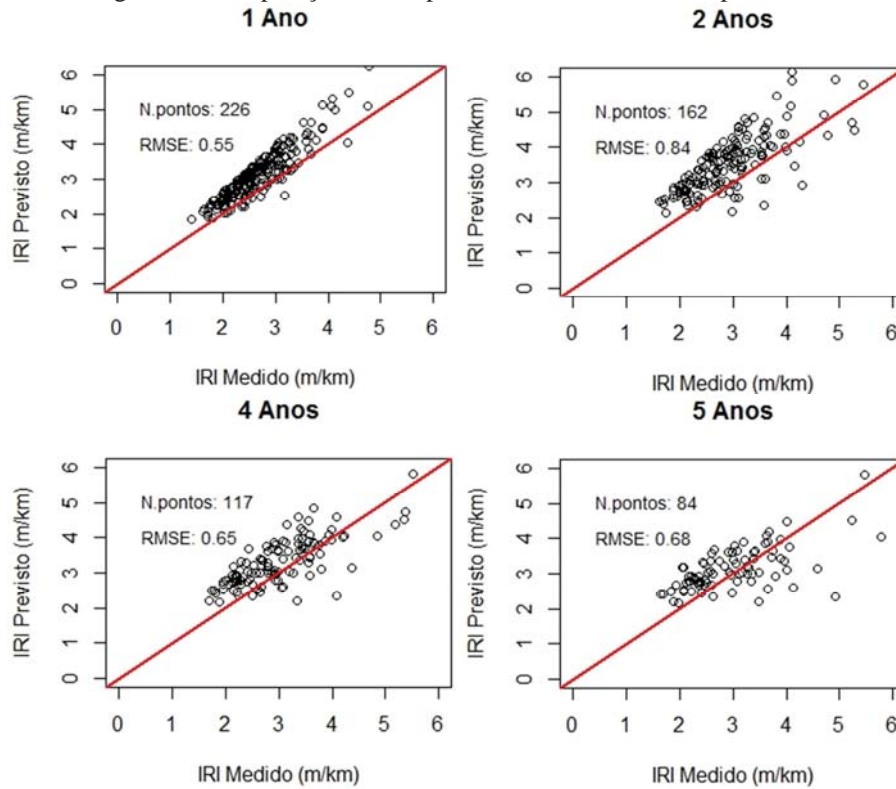


Fonte: O autor (2016).

Entre os três conjuntos de coeficientes analisados, o que apresentou o menor desvio entre os valores medidos e os valores calculados foi o conjunto das medianas dos coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$ , no intervalo de confiança de 95%.

Para estes coeficientes foi realizada uma análise comparando o IRI medido com o IRI calculado para cada idade do pavimento. A Figura 37 mostra estas relações. O primeiro ano foi o que se mostrou mais adaptado ao modelo, com menor desvio, e o quinto ano foi o com pior adaptação.

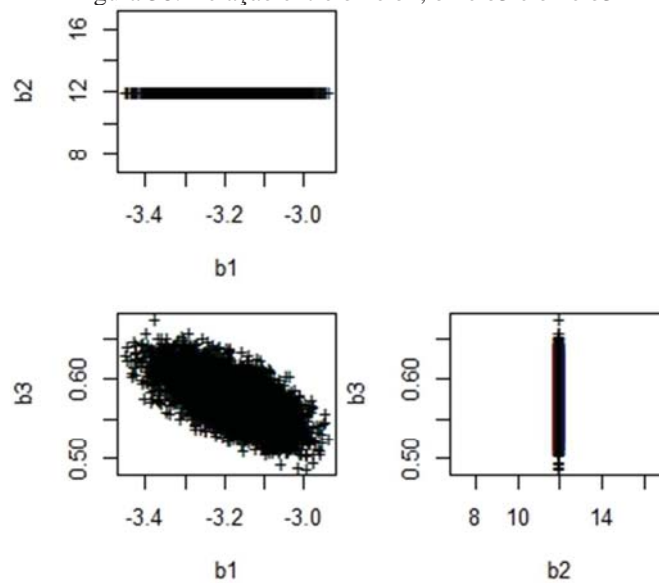
Figura 37: Comparação do IRI previsto com o IRI medido por idades



Fonte: O autor (2016).

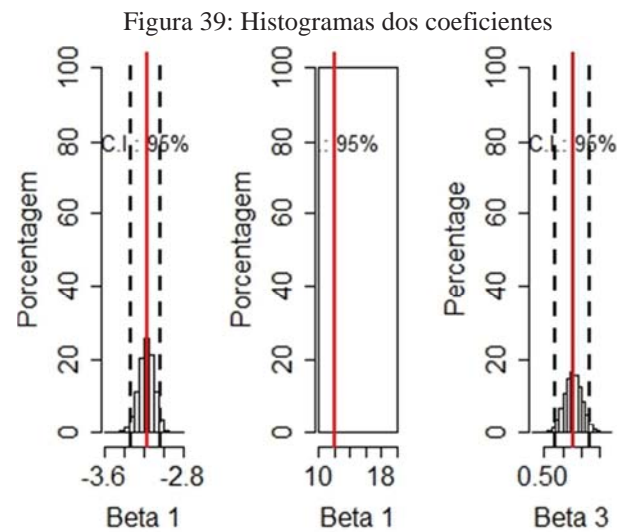
A Figura 38 relaciona os coeficientes entre si para que seja possível visualizar a influência que existe entre um coeficiente e outro. O coeficiente  $b_2$  não varia, já que seu valor foi definido como fixo. À medida que o coeficiente  $b_1$  tem seu valor aumentado, o coeficiente  $b_3$  diminui.

Figura 38: Relação entre  $b_1$  e  $b_2$ ,  $b_1$  e  $b_3$  e  $b_2$  e  $b_3$



Fonte: O autor (2016).

A Figura 39 apresenta os histogramas de ocorrência dos valores dos coeficientes b1, b2 e b3.



Fonte: O autor (2016).

Utilizando as constantes escolhidas, foi criada a equação que deve prever o IRI de um ponto no pavimento para determinada idade, tendo como dados de entrada o IRI inicial e a idade considerada.

$$y = IRI_0 * (1 + \exp(-(0,5774191 + 12 * \exp(-3,1754008 * x)))) \quad (18)$$

Onde:

y = IRI na idade determinada

IRI<sub>0</sub> = IRI inicial

x – idade

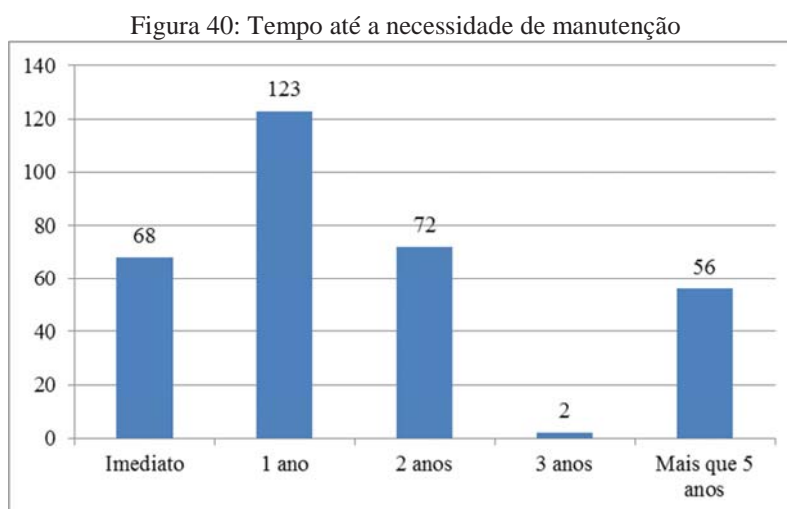
Utilizando a equação criada e tendo como valor limite para o IRI do pavimento IRI<sub>idade</sub> = 3,5m/km, foi possível determinar em qual idade cada trecho desta rodovia analisada teria a necessidade de receber ações de manutenção.

$$x = (\ln(\ln(\ln(\ln(IRI_n/IRI_0) - 1)0,5774191)/-12)/-3,1754008) \quad (19)$$

Foi utilizado o último ano de análise (2013) para calcular quando seria necessária a próxima atividade de manutenção. Considerando que havia quarenta e dois trechos com valores de IRI medidos acima do limite definido de IRI=3,5m/km, foi

definido que estes trechos deveriam receber ações de manutenção imediatamente. Para os demais trechos foi calculado o tempo até a próxima manutenção.

O modelo mostrou que, além dos 68 trechos que deveriam receber ações de manutenção imediatamente, 123 trechos precisariam de ações no ano seguinte, 72 trechos no segundo ano e 2 trechos três anos depois. Depois deste período de 3 anos, 56 trechos demorariam mais de cinco anos para necessitar alguma manutenção. A Figura 40 apresenta o gráfico com estas quantidades.



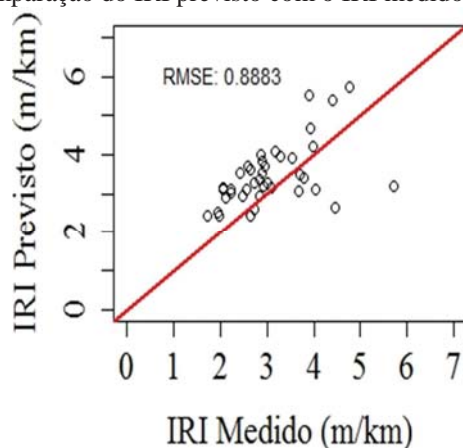
Fonte: O autor (2016).

Se fossem considerados os limites para um bom pavimento utilizados nos Estados Unidos,  $IRI=1,1m/km$ , no ano de 2013 todos os trechos observados precisariam de manutenção.

O modelo desenvolvido foi aplicado para verificação utilizando os 20% dos dados que não foram ocupados para o seu desenvolvimento. A figura 41 mostra a comparação entre os IRI medidos destes pontos e o IRI previsto pelo modelo criado. O RMSE calculado para essa relação foi de 0,8883.



Figura 41: Comparação do IRI previsto com o IRI medido – 20% dos dados



Fonte: O autor (2016).

#### 4.2. Afundamento em Trilhas de Rodas (ATR)

Os dados referentes ao levantamento de valores de afundamento em trilhas de roda são resultantes do monitoramento da BR 285 nos anos de 2008, 2009, 2011, 2012 e 2013.

No cabeçalho estão apresentadas informações referentes à realização do levantamento: empresa responsável pelo monitoramento da rodovia, data de realização do levantamento de dados, empresa contratada para o serviço, equipamento utilizado. Neste caso, o equipamento utilizado foi o Perfilômetro Ciber Laser.

As planilhas apresentam os valores de ATR para a BR 285 para as duas faixas da rodovia e, também, para a faixa adicional presente em um trecho. A faixa Leste é a faixa com sentido Santa Bárbara do Sul – Passo Fundo e a faixa Oeste é a com sentido Passo Fundo - Santa Bárbara do Sul. Para cada uma destas faixas, a planilha possui dois valores de ATR, sendo um para a roda esquerda e uma para a roda direita. As planilhas possuem, também, um campo para observações, onde é apontada a existência de pontes, lombadas, postos policiais e pedágios.

As leituras do ATR foram realizadas para cada trecho de dez metros, totalizando 9.097 (nove mil e noventa e sete) leituras por ano.

A análise dos dados iniciou com a comparação entre os valores de ATR para cada lado da pista, para cada trecho, ao longo dos anos.

A comparação entre os valores de ATR para a roda esquerda e para a roda direita mostrou que não existe uma uniformidade entre os valores. O valor de ATR é maior para a roda direita em 41% dos trechos e para a roda esquerda, em 59%. Optou-se, da

mesma forma como foi feito para a irregularidade longitudinal, por adotar como valor válido para o ATR o valor obtido na leitura da roda direita. Os valores adotados para o ATR por trecho, por ano, estão apresentados parcialmente (para os 10 primeiros trechos) no Quadro 16.

Quadro 16: Apresentação parcial da planilha com os valores de ATR (mm) por ano e por trecho

ATR - FAIXA 1 SENTIDO SANTA BARBARA						
Início (km)	Fim (km)	ATR DIREITO				
		2008	2009	2011	2012	2013
337,20	337,21	0,0	0,0	13,5	9,4	15,0
337,21	337,22	0,0	0,7	12,8	9,1	14,4
337,22	337,23	0,0	3,5	10,9	8,9	13,3
337,23	337,24	0,0	3,0	11,6	10,1	16,1
337,24	337,25	0,7	4,3	14,1	11,8	18,9
337,25	337,26	3,9	2,2	8,5	12,6	16,5
337,26	337,27	2,9	0,3	4,0	14,6	18,9
337,27	337,28	0,0	0,5	4,5	9,5	14,2
337,28	337,29	0,0	1,8	5,4	11,5	14,3
337,29	337,30	0,0	2,2	4,4	14,9	16,8

Fonte: O autor (2016).

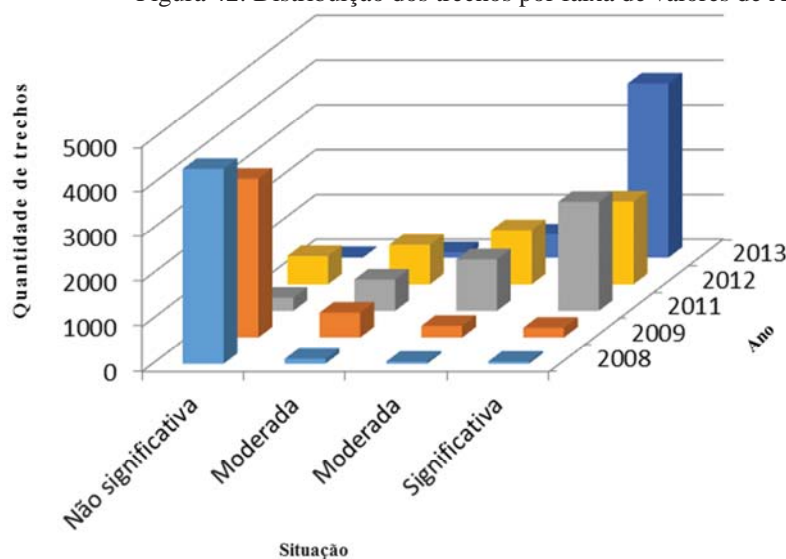
Os valores de ATR foram analisados em relação à classificação do DER/SP (2013), que classifica o pavimento em relação ao seu valor de ATR, como mostra o Quadro 17 e a Figura 42.

Quadro 17: Classificação dos trechos por faixa de valores de ATR

ATR / ANO	2008	2009	2011	2012	2013
Até 3mm	4336	3527	289	625	15
Entre 3mm e 5mm	110	549	693	872	119
Entre 5mm e 7mm	52	259	1139	1200	522
Maior que 7mm	52	215	2422	1843	3892

Fonte: O autor (2016)

Figura 42: Distribuição dos trechos por faixa de valores de ATR



Fonte: O autor (2016)

A primeira etapa da análise consistiu em encontrar, para cada trecho analisado, o valor de ATR inicial entre os anos analisados para que, a partir deste valor inicial, fosse definida a evolução do ATR em função do tempo.

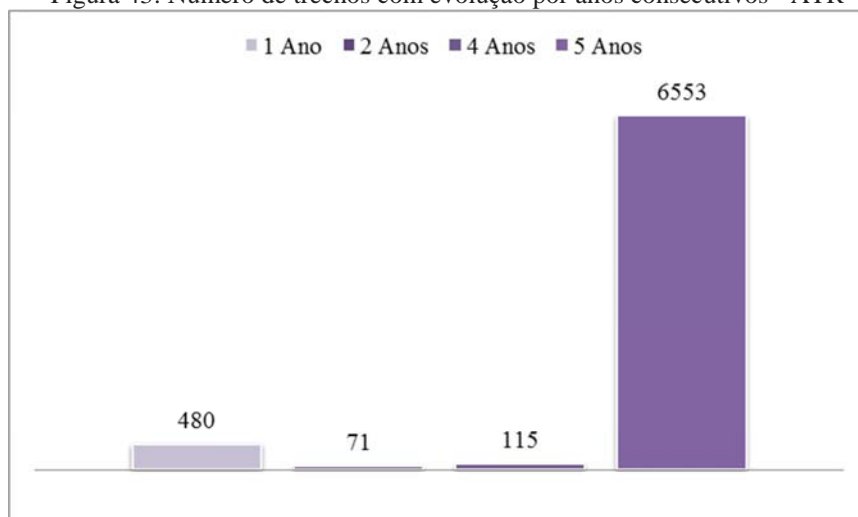
Tendo como princípios os mesmos considerados na análise do IRI, considerou-se que o ATR deve ter seu valor aumentado de um ano para o outro e que podem existir erros nas medições dos valores.

Labi, Lamptey e Kong (2007) dizem que o micro revestimento (um tratamento usualmente adotado na região deste estudo), quando utilizado nas ações de manutenção do pavimento analisado por eles, possibilitou uma redução de 5mm no valor do afundamento. O valor considerado como aumento mínimo de um ano para outro para definir a ocorrência de alguma ação de manutenção foi, então, de 5mm.

Tendo definido o ano inicial, foi possível definir a idade do pavimento (tempo decorrido desde a última manutenção) e o valor para o incremento de ATR para o primeiro ano, para dois anos, para quatro anos e para cinco anos.

Do total de 9027 trechos, 80% foram utilizados para o desenvolvimento do modelo e 20% para sua verificação. Como mostra a Figura 43, entre os trechos analisados, 480 apresentaram evolução apenas por um ano, 71 por dois anos, 115 por quatro anos e 553 trechos apresentaram evolução por cinco anos consecutivos.

Figura 43: Número de trechos com evolução por anos consecutivos - ATR

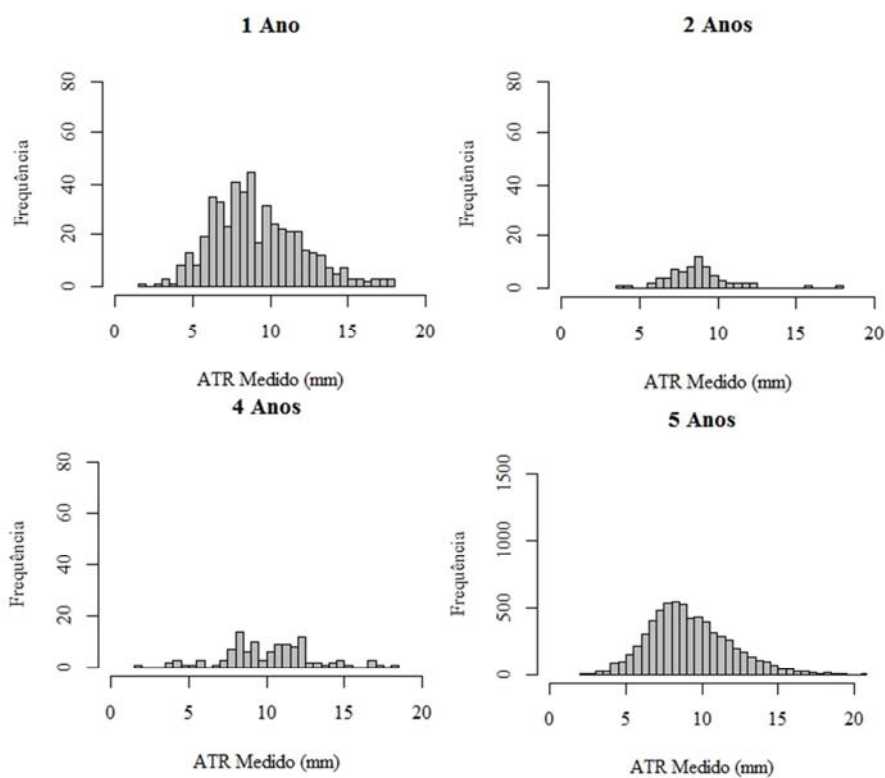


Fonte: O autor (2016).

O grande número de pontos com evolução constante por cinco anos seguidos se dá por influência do valor utilizado como aumento mínimo do ATR para configurar uma ação de manutenção. A variação entre os valores, em muitos trechos, era pequena, menor do que 5mm, não podendo definir a ocorrência da manutenção do pavimento.

Os histogramas da Figura 44 mostram a frequência de ocorrência de valores de ATR para os trechos que apresentaram evolução por 1 ano, 2 anos, 4 anos e 5 anos. A maior frequência de ocorrência de valores de ATR, para trechos com 1 ano de evolução do ATR, esteve com ATR próximo de 10mm. Para os trechos com 2 anos de evolução a maior frequência esteve entre ATR=5 mm e ATR=10mm. Para os trechos com 4 anos a maior frequência de ocorrência dos valores de ATR variou entre 7 mm e 13mm. Nos trechos com 5 anos de evolução (situação com maiores frequências), a maior ocorrência foi de valores entre ATR=6 mm e ATR=12mm.

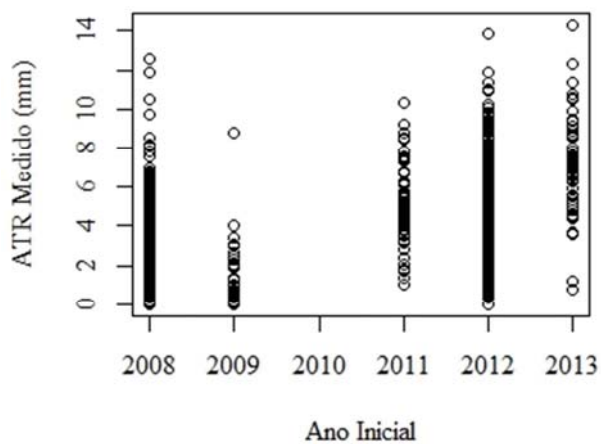
Figura 44: Histogramas ATR por idade



Fonte: O autor (2016).

Para verificar a ocorrência de trechos com variados valores de ATR inicial, foi realizada uma comparação entre os anos iniciais e os valores de ATR inicial, como pode ser visto na Figura 45.

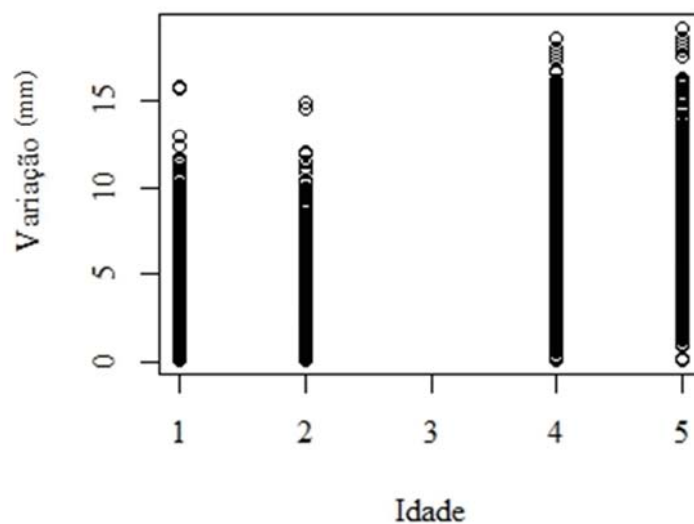
Figura 45: Valores de ATR medidos para os anos iniciais



Fonte: O autor (2016).

Após a definição dos anos iniciais, a idade do pavimento foi calculada como a diferença entre o ano final (2013) e o ano inicial. A Figura 46 mostra a variação do ATR para cada idade do pavimento.

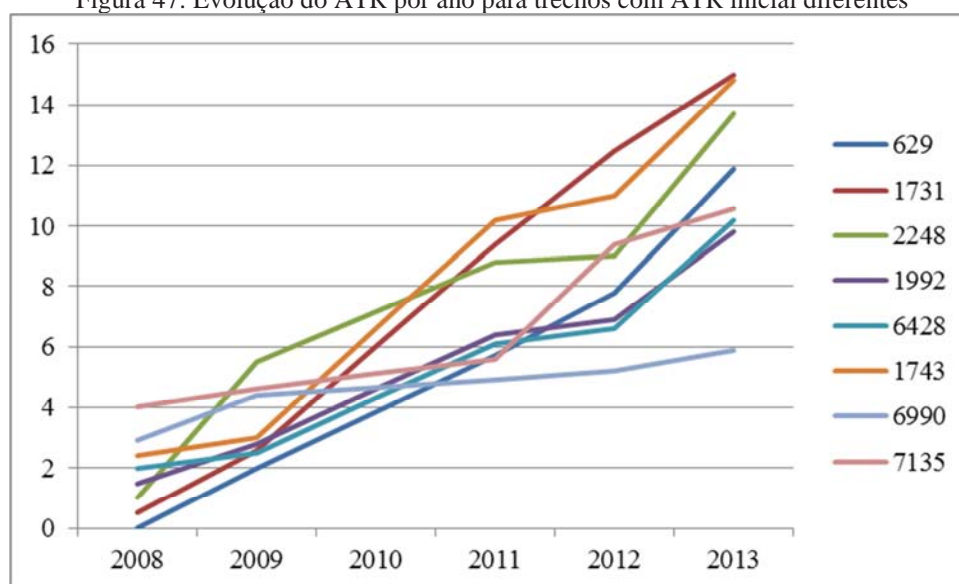
Figura 46: Relação da idade do pavimento com a variação do ATR



Fonte: O autor (2016).

A Figura 47 apresenta a evolução do ATR ao longo do tempo para alguns trechos analisados escolhidos aleatoriamente entre os trechos que apresentaram crescimento no valor por cinco anos consecutivos. Foram escolhidos trechos com valores de ATR inicial variados.

Figura 47: Evolução do ATR por ano para trechos com ATR inicial diferentes



Fonte: O autor (2016).

Para dar início à criação do modelo que descreve a evolução do ATR em função do tempo, definiu-se uma relação entre a variação do ATR por idade e o valor do ATR inicial, como mostra a equação.

$$\frac{ATR_0}{ATR_n - ATR_0} = f(idade) \quad (20)$$

Seguindo o mesmo princípio adotado em relação à equação para definição do IRI, foi definido para a criação deste modelo que a função utilizada seria do tipo logarítmica, que foi então calculada, para cada trecho.

$$\ln\left(\frac{ATR_0}{ATR_n - ATR_0}\right) = f(idade) \quad (21)$$

Definiu-se que para os modelos de desempenho, seriam utilizadas equações que terão como dado de saída o ATR para o pavimento em uma determinada idade e como dado de entrada o ATR inicial deste pavimento e sua idade. Assim como realizado na análise do IRI, para o ATR foi realizada uma regressão não linear para a definição de três constantes que farão parte da equação. Esta regressão foi realizada utilizando a idade do pavimento (representada na equação como x) e o logaritmo da relação entre o IRI inicial e a variação do ATR (representado na equação como y). A regressão foi feita a partir da equação 12, onde as constantes b1, b2 e b3 foram resultantes.

$$y = b3 + b2 * \exp(b1 * x) \quad (22)$$

A regressão foi realizada utilizando o software RStudio® e foram definidos como parâmetros iniciais para as constantes b1 e b3 os valores -1 e 0, respectivamente, sendo que os valores mais baixos definidos foram b1=-5 e b3=-25. Os valores mais altos definidos para as constantes foram b1=10 e b3=90. O parâmetro b2 foi ficado em 21mm. A regressão foi realizada através de 10.000 iterações.

As constantes resultantes da regressão não linear estão apresentadas no Quadro 18.

Quadro 18: Constantes resultantes da regressão

Constantes resultantes da regressão		Teste t	Teste P
b1	-4,23440	6,02000	-0,7030000
b2	21,00000	125,81150	0,1670000
b3	-0,52150	0,01560	-33,4000000

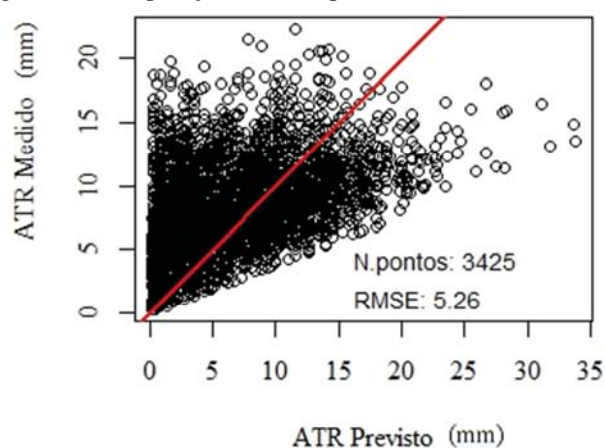
Fonte: O autor (2016).

A equação inicial analisada até este ponto prevê a evolução do ATR com o tempo. No entanto, com o objetivo de conhecer o valor do ATR resultante para certa idade do pavimento, é necessário considerar, também, o ATR inicial, que será aumentado com a variação do ATR com o tempo decorrido. A partir desta consideração, o modelo foi adaptado para a equação 23.

$$y = ATR_0 + (1 * \exp(-(b3 + b2 * \exp(b1 * x)))) \quad (23)$$

Este modelo foi utilizado para calcular a previsão do ATR para cada idade. Para verificar a eficiência do modelo, foram calculados os ATR para todos os trechos. O resultado da previsão utilizando a equação criada foi comparado com o ATR medido e esta comparação está apresentada na Figura 48.

Figura 48: Comparação do ATR previsto com o ATR medido



Fonte: O autor (2016).

O desvio rmse resultante entre os valores previstos e os valores medidos foi de 5,26.

Com o objetivo de melhorar o resultado obtido para esta equação, foi utilizada a técnica estatística de *bootstrapping*, que gerou novas constantes para a equação. As



constantes b1, b2 e b3 resultantes do *bootstrapping* estão listadas no Quadro 19. Foram consideradas a estimativa do bootstrapping e a mediana dos valores para cada constante.

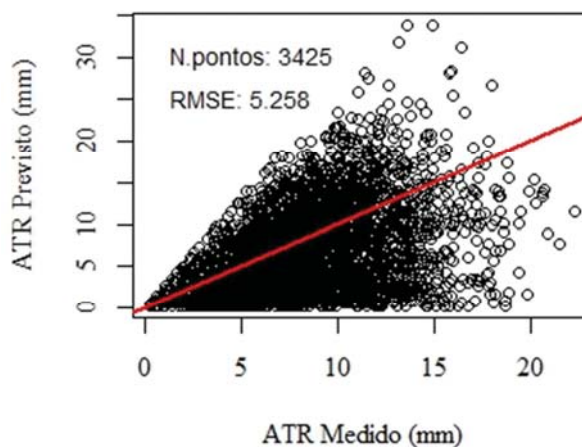
Quadro 19: Constantes resultantes do *bootstrapping*

	Constantes estimadas	Mediana do IC = 95%	2,50%	97,50%
b1	-4,2357323	-4,2342677	-4,3799460	-4,1057268
b2	21,0000000	21,0000000	21,0000000	21,0000000
b3	-0,5214519	-0,5214727	-0,5459880	-0,4969364

Fonte: O autor (2016).

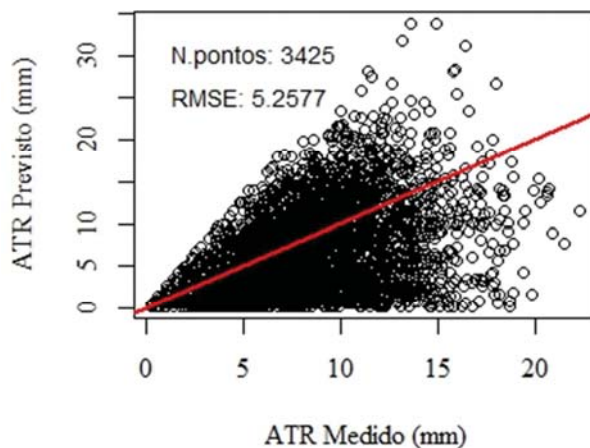
Com estas novas constantes (estimadas e medianas) o ATR previsto foi novamente calculado e comparado ao ATR medido através da Figura 49, que considera as constantes estimadas pelo *bootstrapping*, e pela Figura 50, que mostra a relação considerando as medianas do intervalo de confiança (IC) de 95%. Junto aos gráficos estão apresentados o número de pontos e o desvio entre os valores. A equação criada a partir dos coeficientes estimados pelo *bootstrapping* teve  $rmse=5,2537$ . A equação criada a partir dos coeficientes medianos do *bootstrapping* teve  $rmse=5,0882$ .

Figura 49: Comparação do ATR previsto com o ATR medido - constantes estimadas



Fonte: O autor (2016).

Figura 50: Comparação do ATR previsto com o ATR medido – medianas do IC

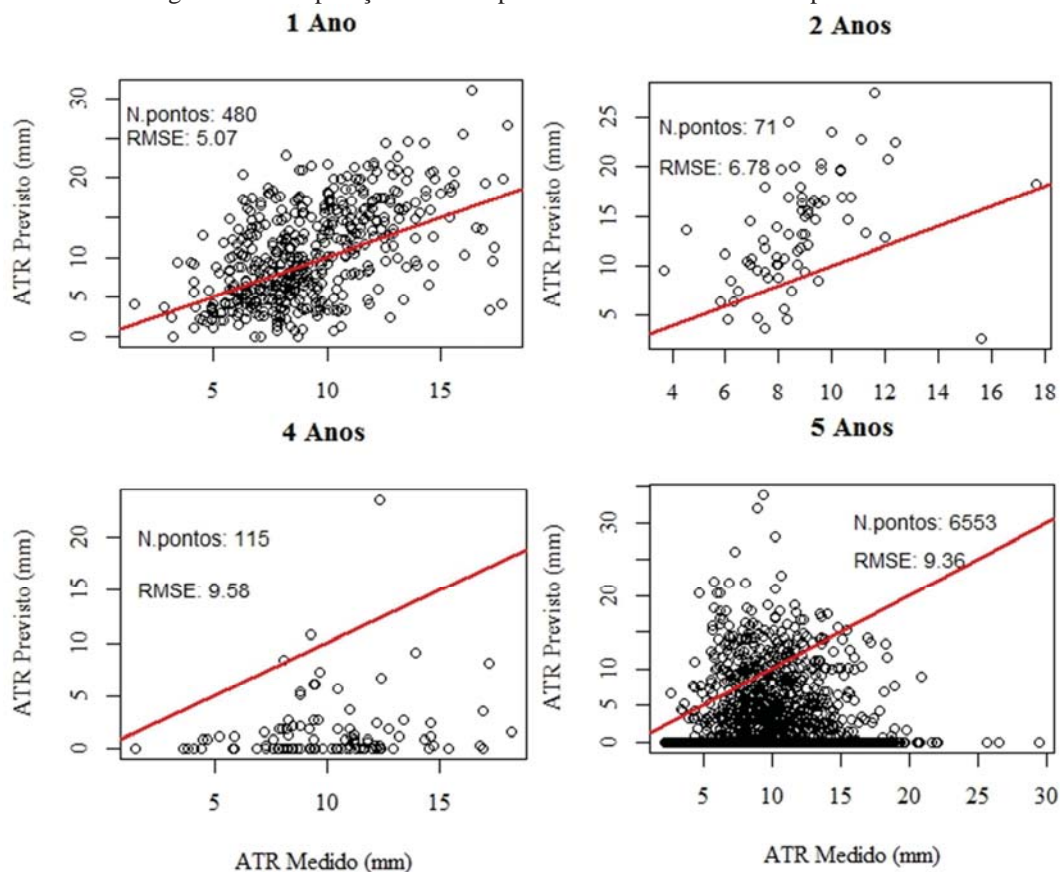


Fonte: O autor (2016).

Entre os três conjuntos de coeficientes analisados, o que apresentou o menor desvio entre os valores medidos e os valores calculados foi o conjunto das medianas dos coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$ , resultante dos coeficientes do intervalo de confiança de 95% definido pelo *bootstrapping*.

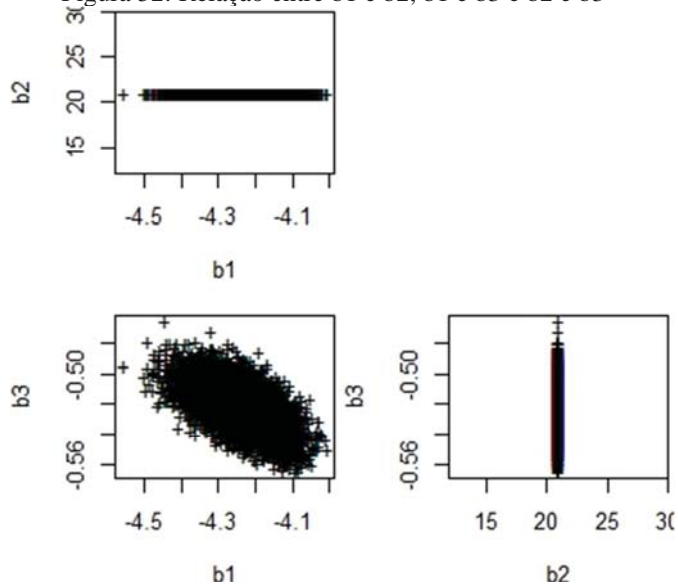
Para estes coeficientes foi realizada uma análise comparando o ATR medido com o ATR calculado para cada idade do pavimento. A Figura 51 mostra estas relações. O primeiro ano foi o que se mostrou mais adaptado ao modelo, com menor desvio, e o quinto ano foi o com pior adaptação.

Figura 51: Comparação do ATR previsto com o ATR medido por idades



Fonte: O autor (2016).

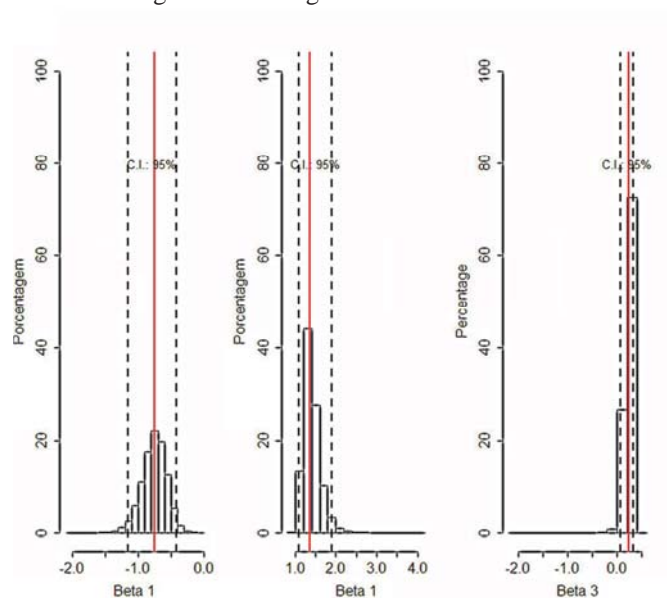
A Figura 52 relaciona os coeficientes entre si para que seja possível visualizar a influência que existe entre um coeficiente e outro. O coeficiente  $b_2$  foi fixado. À medida que o coeficiente  $b_1$  tem seu valor aumentado, o coeficiente  $b_3$  diminui.

Figura 52: Relação entre  $b_1$  e  $b_2$ ,  $b_1$  e  $b_3$  e  $b_2$  e  $b_3$ 

Fonte: O autor (2016).

A Figura 53 apresenta os histogramas de ocorrência dos valores dos coeficientes b1, b2 e b3.

Figura 53: Histogramas dos coeficientes



Fonte: O autor (2016).

Utilizando as constantes escolhidas, foi criada a equação 24, que deve prever o ATR de um ponto no pavimento para determinada idade, tendo como dados de entrada o ATR inicial e a idade considerada.

$$y = ATR_0 * (1 + \exp(-(-0,5214727 + 21 * \exp(-4,2342677 * x)))) \quad (24)$$

Onde:

y = IRI na idade determinada

ATR<sub>0</sub> = ATR inicial

x – idade

Utilizando a equação criada e tendo como valor limite para o ATR do pavimento ATR<sub>idade</sub> = 7mm, foi possível determinar em qual idade cada trecho desta rodovia analisada teria a necessidade de receber ações de manutenção.

$$x = \ln((\ln(ATR_n/ATR_0) - 1) - 0,5214727) / -21 / -4,2342677 \quad (25)$$

Onde:

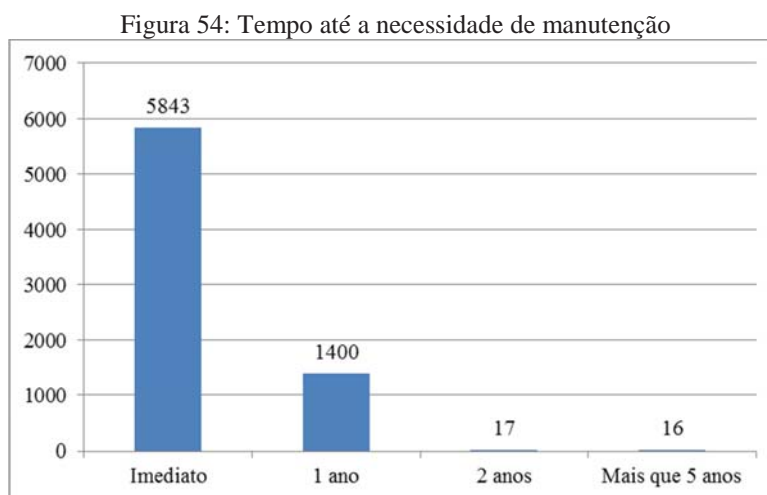
$y = \text{ATR determinado}$

$\text{ATR}_0 = \text{ATR inicial}$

$x = \text{idade}$

Foi utilizado o último ano de análise (2013) para calcular quando seria necessária a próxima atividade de manutenção. Deveriam receber manutenção imediata 5843 trechos, que apresentaram ATR maior do que o limite estabelecido.

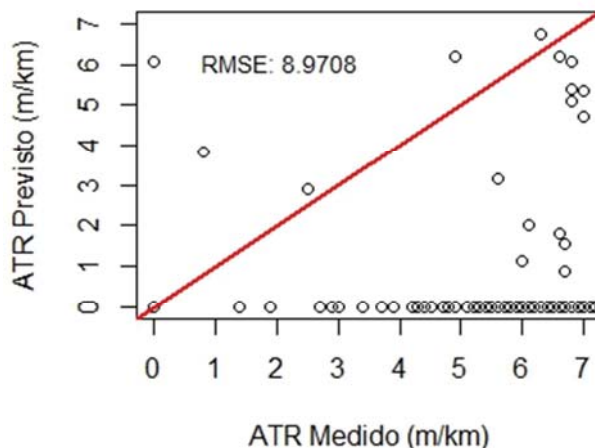
O modelo mostrou que 1400 trechos precisariam de ações no ano seguinte, 17 trechos depois de 2 anos e os outros 16 trechos não precisariam de manutenção nos próximos 5 anos. A Figura 54 apresenta o gráfico com as quantidades por ano.



Fonte: O autor (2016).

O modelo desenvolvido foi aplicado para verificação utilizando os 20% dos dados que não foram ocupados para o seu desenvolvimento. A figura 55 mostra a comparação entre os ATR medidos destes pontos e o ATR previsto pelo modelo criado. O RMSE calculado para essa relação foi de 8,9708.

Figura 55: Comparação do ATR previsto com o ATR medido – 20% dos dados

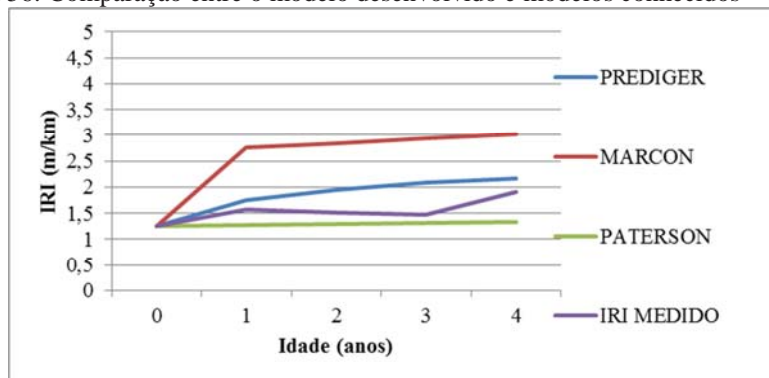


Fonte: O autor (2016).

### 4.3. Comparação com modelos existentes

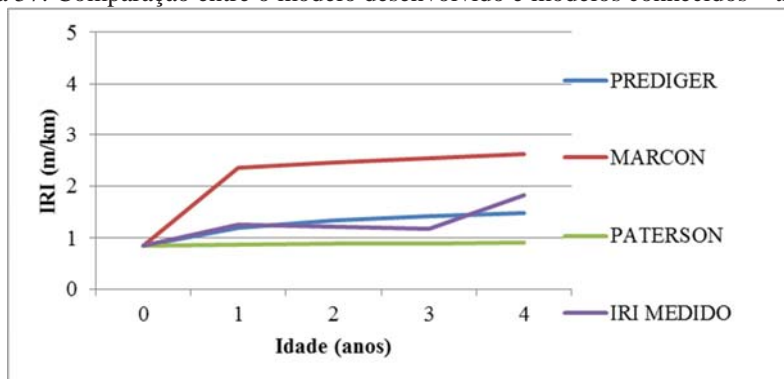
A comparação foi realizada utilizando os dois modelos escolhidos para IRI e foi feita nos trechos para os quais havia o conhecimento do valor do FWD e que apresentaram evolução por cinco anos consecutivos. As Figuras 56, 57 e 58 apresentam, para trechos analisados, os valores de IRI medidos, os valores de IRI calculados pelo modelo desenvolvido neste estudo e os valores de IRI calculados pelos modelos de Marcon e Paterson.

Figura 56: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho A



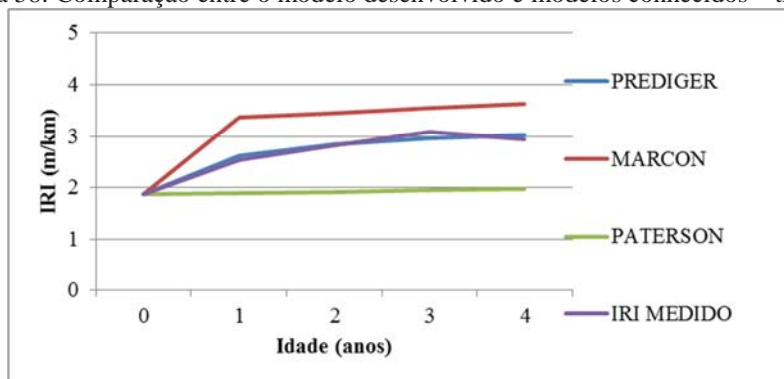
Fonte: O autor (2016).

Figura 57: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho B



Fonte: O autor (2016).

Figura 58: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho C



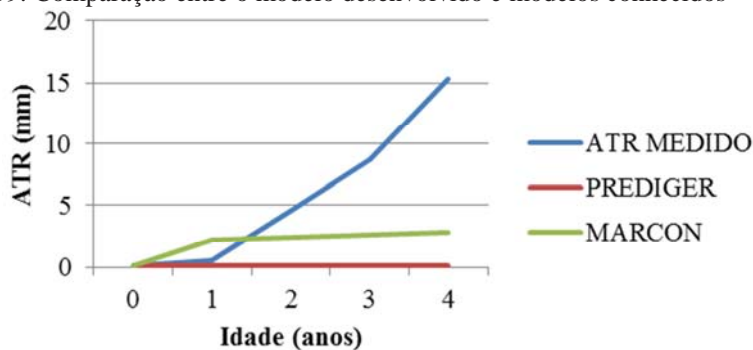
Fonte: O autor (2016).

Em todos os trechos para os quais foi realizada a análise comparativa, o modelo que apresentou mais proximidade com os valores de IRI medidos foi o desenvolvido neste estudo. O modelo de Marcon apresentou o valor para o primeiro ano um acréscimo significativamente maior e uma evolução semelhante nos anos seguintes. O modelo de Paterson apresentou variação muito pequena do valor de IRI de um ano para o outro.

A comparação com o modelo escolhido para o ATR foi feita em todos os trechos analisados comparando os valores de ATR, em mm, calculados pelo modelo desenvolvido nesta pesquisa e os valores calculados pelo modelo de Marcon.

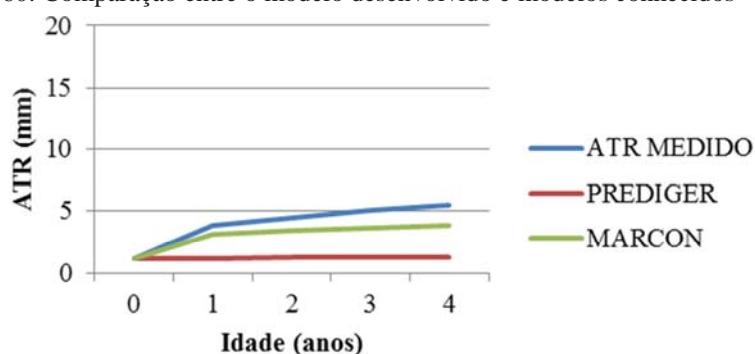
As Figuras 59, 60 e 61 mostram a análise comparativa de três trechos.

Figura 59: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho A



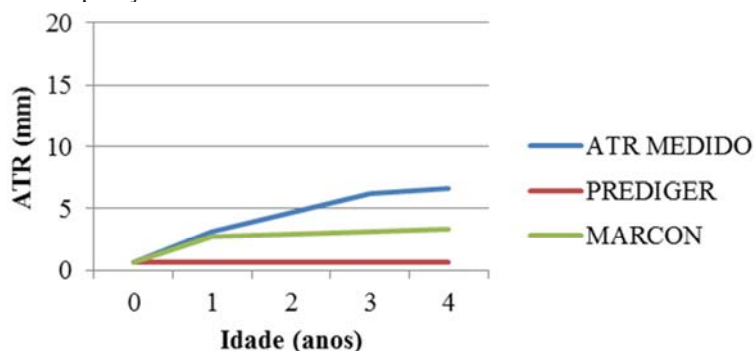
Fonte: O autor (2016).

Figura 60: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho B



Fonte: O autor (2016).

Figura 61: Comparação entre o modelo desenvolvido e modelos conhecidos – trecho C



Fonte: O autor (2016).

Pode-se observar, em todos os trechos, a marcante diferença entre a evolução do ATR conforme foi previsto pelo modelo desenvolvido por essa pesquisa e o ATR real medido. O modelo desenvolvido por Marcon apresentou a curva mais próxima dos valores reais, mas inadequada para descrever o desempenho deste pavimento.

Hamdi et al. (2012) desenvolveram modelos empíricos, através de análises de regressão, considerando diferentes seções filtradas de acordo com o tipo de pavimento, espessura total, tipo de solo, características climáticas e de carregamentos. Estes modelos, que foram desenvolvidos levando estes vários fatores em consideração,



utilizaram uma base de dados com vinte anos de monitoramento e apresentaram bons resultados, com  $R^2$  entre 0,50 e 0,81.

Ao examinar várias seções de um pavimento, Mills et al. (2012) perceberam que a deterioração variou de pavimento para pavimento e concluíram que a melhor estratégia seria desenvolver modelos agrupando as seções que mostrassem características similares de deterioração.

Para que os modelos desenvolvidos nesta pesquisa apresentassem melhores resultados, uma alternativa seria analisar outros parâmetros além dos que foram analisados.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo realizado visou estabelecer relações entre o fator idade e a irregularidade longitudinal de um pavimento medida através do IRI e entre o fator idade e o ATR do pavimento, criando modelos descritivos destas relações.

A dificuldade em se conseguir informações acerca dos materiais e sistemas construtivos do pavimento acarretou na necessidade de se considerar o pavimento homogêneo. Se houvesse essas informações, o pavimento poderia ser dividido para a análise dos dados e poderiam ter sido obtidos modelos mais adequados para cada trecho do pavimento.

A inexistência de informações a respeito da execução de serviços de manutenção ou reabilitação do pavimento fez com que as datas desses serviços fossem estimadas. Os modelos poderiam ter sido mais adequados tendo acesso às informações.

Constatou-se que tanto os valores de IRI quanto os de ATR não mostram uma evolução constante em todos os trechos do pavimento. Ocorreram aumentos significativos tanto no primeiro ano quanto no quinto ano, assim como houve aumentos mínimos do primeiro ao quinto ano.

Foi possível estabelecer um modelo para relacionar irregularidade longitudinal com o tempo, definido por:

$$y = IRI_0 * (1 + \exp(-(0,5774191 + 12 * \exp(-3,1754008 * x)))) \quad (18)$$

Esse modelo apresentou desvio resultante entre valores previstos e valores medidos de 0,6772.

A análise comparativa entre esse e outros modelos referentes à irregularidade longitudinal mostrou que o modelo simples, criado a partir de regressão e relacionando apenas o fator idade com a evolução do IRI, porém utilizando valores analisados no próprio local, se mostrou mais eficiente do que os modelos estabelecidos por outros autores. Desta forma, se concluiu que um modelo criado para outro local não pode ser utilizado para prever o comportamento de um pavimento.

Foi possível estabelecer um modelo para relacionar afundamento em trilhas de roda com o tempo, definido por:

$$y = ATR_0 * (1 + \exp(-(-0,5214727 + 21 * \exp(-4,2342677 * x)))) \quad (24)$$

Esse modelo apresentou desvio resultante entre valores previstos e valores medidos de 5,2577. Este valor mostrou que o modelo não é adequado para representar o comportamento do pavimento em relação ao valor de ATR. Constatou-se que é necessário criar modelo para definir a relação entre a idade do pavimento e o afundamento em trilhas de roda. A análise comparativa com outro modelo mostrou que o modelo desenvolvido com os dados analisados no local de estudo teve menor eficiência do que o modelo desenvolvido para outro local.

Ficou claro que um modelo que considera apenas o tempo para prever a evolução de um defeito não representa essa evolução com precisão. O modelo, para ter acurácia, necessita que se considerem os fatores carregamento, condições ambientais e características construtivas do pavimento no seu desenvolvimento. É, portanto, necessário que se considere que o pavimento apresenta características distintas para partes do trecho e que se façam análises separadamente para cada trecho distinto.

Foi possível determinar, para cada ano, quais trechos do pavimento necessitariam serviços de manutenção, podendo assim prever os gastos e determinar os pontos críticos que deveriam ter prioridade.

O modelo desenvolvido pode contribuir para melhorar o gerenciamento da rodovia em questão, estimando a deterioração do pavimento, em termos de IRI, em função do tempo. Com este modelo os serviços de manutenção necessários para a rodovia serão previstos com antecedência, possibilitando que a gerência defina quais locais serão prioridade para alocar os recursos disponíveis.

O modelo desenvolvido para prever o ATR precisa ser analisado a partir de outros fatores, para que represente melhor o local analisado e para que, então, contribua também com o gerenciamento desta rodovia.

### **5.1. Recomendações para trabalhos futuros**

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se:

1. Realizar ensaios para o reconhecimento das camadas existentes no pavimento, para que se possam separar os trechos distintos;
2. Realizar a contagem de tráfego em diversos pontos do pavimento, para identificar trechos com N distintos;

3. Elaborar um modelo de previsão de IRI em função do tempo, do número N e das características construtivas do pavimento;
4. Propor um novo modelo, que descreva de forma mais eficaz a relação do ATR com o tempo, mantendo o modelo simples.
5. Criar um modelo de previsão de ATR em função do tempo, do número N e das características construtivas do pavimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**A influência do tráfego de composições de veículos de carga – CVC's sobre os pavimentos das rodovias do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: DOC – DAER/LASTRAN - UFRGS, 2003. Relatório.

ABAZA, K. A.; ASHUR, S. A.; AL-KHATIB, I. A. Integrated pavement management system with a Markovian prediction model. **Journal of Transportation Engineering**, v. 130, p. 24-33, 2004.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. **Guide for design of pavement structures.** Washington, D. C., 1993.

ARHIN, S. A.; NOEL, E. C.; RIBBISO, A., Acceptable international roughness index thresholds based on present serviceability rating. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 5, p. 90-96, 2015.

BALBO, J. T. Pavimentação Asfáltica, São Paulo. Oficina de Textos, 2007.

BECKER, V. E. G. **Aplicação do modelo de Tavakoli para gerência de manutenção de pavimentos em cidade de médio porte.** 2012. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Engenharia de Transportes), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. Mapa multimodal do Brasil. [Brasil]. 2013. 1 mapa: 97x90 cm. Escala 1:5.000.000.

CAMPOS, A. C. R.. **Métodos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal para pavimentos asfálticos: aplicação e proposição de critérios de ajuste.** 2004. 154f. Dissertação (Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.

CHEN, D.; HILDRETH, J.; OGUNRO, V. O.; LAVILLE, C., **Development of IRI limites and targets for network management and constuction approval purposes. Final Report. FHWA.** North Carolina, 2014.

CHERNICK, M. R., LABUDDE, R. A. An introduction to bootstrap methods with applications to R, New Jersey. John Wiley & Sons, 2011.

CUELHO, E.; MOKWA, R.; AKIN, M., **Preventive maintainance treatments of flexible pavements: a synthesis of highway practice. Final Report - MDT.** Montana. 2006.

DER – Departamento de Estradas de Rodagem. **Diretrizes e procedimentos para serviços de conservação especial incluindo a identificação de defeitos e definições de soluções para restauração de pavimentos rodoviários e da sinalização horizontal. Documento técnico.** São Paulo, 2013.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos.** Rio de Janeiro, 2000.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **O sistema gerencial de pavimentos do DNER.** Rio de Janeiro, 1998.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Projeto executivo de engenharia para restauração – mapa de situação. [Brasil]. 1989. 1 mapa: 29.7x42 cm. Escala 1:10.000.000.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Projeto executivo de engenharia para restauração – mapa geral. [Brasil]. 1989. 1 mapa: 29.7x42 cm. Escala 1:5.000 e 1:50.000.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Projeto executivo de engenharia para restauração – projeto de restauração. [Brasil]. 1989. 1 mapa: 29.7x42 cm. Escala 1:10 e 1:50.000.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 008/2003: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos: Procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de gerência de pavimentos.** Rio de Janeiro, 2011.

DNIT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** Rio de Janeiro, 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de estudos de tráfego.** Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 005: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Terminologia. Rio de Janeiro, 2003. 12 p.

FARIAS, M. M.; SOUZA, R. O., Correlations and analyses of roughness indices. **Road Materials and Pavement Design**, v. 10, p. 399 – 415, 2009.

FRANDOLOZO, G. **Evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos restaurados.** 2010. 177f. Dissertação (Mestrado – Faculdade de Engenharia e Arquitetura). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

FREUND, J. E., Estatística aplicada: economia, administração e contabilidade. 11 ed., Porto Alegre, Editora Bookman, 2006, 536f.

GREENE, S.; AKBARIAN, M.; ULM, F. J.; GREGORY, J., **Pavement roughness and fuel consumption. Report CSHub**. Massachusetts. 2013.

HAIDER, S. W., BRINK, W. C., BUCH, N., Local calibration of the pavement – ME flexible pavement performance models in Michigan. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 95., 2015, Washington.

HAMDI, A. S.; ALYAMI, Z.; ZHOU, T.; TIGHE, S. L., Improving Ontario pavement management through long term monitoring. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 91., 2012, Washington.

HIGASHI, R. R.. **Utilização de um SIG no desenvolvimento de um banco de dados geotécnicos do norte do estado do Rio Grande do Sul**. 2002. 155f. Dissertação (Mestrado – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

ISLAM, S.; BUTTLAR, W. G. Effect of pavement roughness on user costs. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2285, p. 45-55, 2012.

KARGAH-OSTADI, N., STOFFELS, S. M., TABATABAEE, N., Network-level pavement roughness prediction model for rehabilitation recommendations. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2155, p. 124-133, 2010.

LABI, S.; LAMPTEY, G.; KONG, S. H. Effectiveness of microsurfacing treatments. **Journal of Transportation Engineering**, v. 133, p. 298-307, 2007.

LARSON, R.; FARBER, B., Estatística aplicada. 4 ed., São Paulo, Editora Pearson Prentice Hall, 2010, 638 f.

LYTTON, R. L., Concepts of pavement performance prediction and modeling. Second North American Conference in Managing Pavements. **Proceedings**. v. 2. Toronto, 1987.

MANDAPAKA, V., BASHEER, I. SAHASI, K., ULIDTZ, P., HARVEY, J., SIVANESWARAN, N., Application of mechanistic-empirical and life-cycle cost analysis for optimizing flexible pavement maintenance and rehabilitation. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 90., 2011, Washington.

MANDIARTHA, I., DUFFIELD, C., THOMPSON, R., WIGAN, M., Developing a transition probability matrix as a measure of road network pavement maintenance effectiveness. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 90., 2011, Washington.

MARCON, A. F. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 1996. 398f. Tese (Doutorado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 1996.

MILLS, L.; ATTOH-OKINE, N. O.; MCNEIL, S., Developing pavement performance models for Delaware. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 91., 2012, Washington.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** 2010. 299f. Tese (Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MULANDI, J., SIDDIQUE, Z., HOSSAIN, M., NELSON, P., **Roughness progression on KDOT asphalt pavements. Final Report. K-TRAN.** Kansas, 2007.

NASCIMENTO, D. M. **Análise comparativa de modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis.** 2005. 154f. Dissertação (Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PATERSON, W. D. O., International roughness index: relationship to other measures of roughness and riding quality. **Transportation Research Board**, v. 1084, p. 49-59, 1986.

PATERSON, W. D. O., Road deterioration and maintenance effects - models for planning and management. The World Bank. Baltimore. The Johns Hopkins University Press. 1987.

PERERA, R. W.; BYRUM, C.; KOHN, S. D. **Investigation of development of pavement roughness. Report FHWA-RD-97-147.** Michigan. 1998.

**Pesquisa CNT de Rodovias 2014.** Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2014. Relatório Gerencial.

**Pesquisa CNT de Rodovias 2015.** Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2015. Relatório Gerencial.

PROZZI, J. A. **Modeling pavement performance by combining field and experimental data.** 2001. 139f. Dissertação (Doutorado – Engenharia Civil e Ambiental). Universidade da Califórnia, Berkeley, 2001.

PROZZI, J. A.; MADANAT, S. M. A nonlinear model for predicting pavement serviceability. **Applications of Advanced Technologies in Transportation.** p.481-488. 2002.

RAMOS, D.; SESTINI, V. M.; ARAÚJO, M. R.; PRIETO, V.; SUZUKI, C. Y.; PREUSSLER, E. S.; VALE, A. F.; PEREIRA, A. R. O.; SANTOS, C. R. G. Proposta para utilização de levantamentos deflectométricos na obtenção do número estrutural corrigido do pavimento (SNC). **V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias. ANDIT.** Recife, Pernambuco, Brasil, 2006.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia.** 2011. 240f. Tese (Doutorado – Instituto de Geociências). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.



SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; PATERSON, W. D. O. **Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements**. World Bank Technical Paper Number 46. WTP-46. Washington, 1986.

SERAFINI, L., GONÇALVES, F. G. Critérios para priorização de intervenções de manutenção em redes pavimentadas. XXXV Reunião annual de pavimentação. Rio de Janeiro, 2004.

SHAHIN, M. Y. Pavement Management for airports, roads and parking lots. 2<sup>a</sup> ed. Chapman & Hall, New York. 2005. 572 p.

SIMS, T. B.; ZHANG, Z. Texas pavement performance and maintenance management system. In: First International Conference on Pavement Preservation, 01, 2010, **Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation**, p. 149-160, 2010.

SONCIM, S. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia**. 2011. 241f. Tese (Doutorado – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes: Infraestrutura de Transportes), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SONCIM, S. P.; FERNANDES Jr., J. L. Desenvolvimento de um modelo de desempenho de irregularidade longitudinal para a rede de rodovias em tratamento superficial duplo do estado da Bahia. **Revista Transportes**, v. 20, pg 13-21, 2012.

SONCIM, S. P.; FERNANDES Jr., J. L. Modelo de previsão do índice de condição dos pavimentos flexíveis. **The Journal of Transport Literature**, v. 9, pg 25-29, 2015.

SPIESS, A. N.; NEUMEYER, N. Na evaluation of R<sup>2</sup> as na inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach. **BMC Pharmacology**, v.10, p. 1-11, 2010.

STEYN, W., BEAN, W., KING, D., KOMBA, J., Evaluating selected effects of pavement riding quality on logistic costs in South Africa. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 90., 2011, Washington.

TABATABAEE, N.; ZIYADI, M. Bayesian approach to updating Markov-based models for predicting pavement performance. **Journal of Transportation Research Board**, n. 2366, p. 34-42, 2013.

Trecho da BR 285 entre o km291+600 e o km384+010. (2014). **Google Maps. Google**. [Consultado em 28 de novembro de 2014] em [www.google.com.br/maps](http://www.google.com.br/maps)

UMTRI – University of Michigan Transportation Research Institute. **Guidelines for longitudinal pavement profile measurement**. Michigan, 1999.

VILLIBOR, Douglas Fadul; NOGAMI, Job Shuji. Pavimentos Econômicos: Tecnologia do uso de Solos Finos Lateríticos. São Paulo. Editora Arte & Ciência, 2009. 292 p.

What is R?, © The R Foundation. Disponível em: <<https://www.r-project.org>>, Acesso em: 19 de setembro de 2016.

WILKS, D. S., Statistical methods in the atmospheric sciences. 2 ed., Londres, Editora Elsevier, 2006, 649f.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W., Principles of pavement design. 2<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons. New York. 1975. 711f.

YSHIBA, J. K.; FERNANDES Jr., J. L. Modelos estatísticos para previsão de desempenho de pavimentos. **Acta Sci. Technol.**, v.27, n.2, p. 175-181, 2005.

ZAABAR, I., CHATTI, K., A new mechanistic-empirical approach for estimating effects of roughness on vehicle durability. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 90., 2011, Washington.

ZEVIANI, W. M.; RIBEIRO JR., P. J.; BONAT, W. H. Modelos de regressão não linear. Em: < <http://www.leg.ufpr.br/~walmes/cursoR/mrnl2013/master.pdf>>. Acesso em: 29 agosto 2016.