

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

CELSO LUIZ DOS SANTOS ROMEIRO JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL DE
UMA VIA DO RIO DE JANEIRO – CONTRIBUIÇÃO A UM SISTEMA
DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS**

Rio de Janeiro

2014

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

CELSO LUIZ DOS SANTOS ROMEIRO JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL DE
UMA VIA DO RIO DE JANEIRO – CONTRIBUIÇÃO A UM SISTEMA
DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador:
Prof. Ben-Hur de Albuquerque e Silva – D.Sc.

Rio de Janeiro

2014

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha.
Rio de Janeiro – RJ CEP: 22.290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

629.05 Romeiro Júnior, Celso Luiz dos Santos
B238a Avaliação do Pavimento Flexível de uma Via do Rio de Janeiro –
Contribuição a um Sistema de Gerência de Pavimentos / Celso Luiz dos
Santos Romeiro Júnior; orientado por Ben-Hur de Albuquerque e Silva–
Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014.

119 p.: il.

Dissertação (mestrado). – Instituto Militar de Engenharia, Rio de
Janeiro, 2014.

1. Engenharia de transportes – teses e dissertações. 2. Gerência de
Pavimentos. I. Silva, Ben-Hur de Albuquerque. II. Título. III Instituto
Militar de Engenharia.

CDD 629.04

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CELSO LUIZ DOS SANTOS ROMEIRO JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL DE UMA VIA DO RIO
DE JANEIRO – CONTRIBUIÇÃO A UM SISTEMA DE GERÊNCIA DE
PAVIMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Ben-Hur de Albuquerque e Silva, D.Sc.

Aprovada em 13 de Junho de 2014 pela seguinte Banca Examinadora:

Maj Ben-Hur de Albuquerque e Silva – D.Sc., IME - Presidente

Maj Marcelino Aurélio Vieira da Silva – D.Sc., IME

Prof. Laura Maria Goretti da Motta – D.Sc., COPPE/UFRJ

Prepredigna Delmiro Elga Almeida da Silva – D.Sc., IPR/DNIT

Rio de Janeiro

2014

Esse trabalho é dedicado aos meus pais, meus maiores exemplos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão pelo amor, carinho e incentivo. Não só esse trabalho, mas tudo o que já conquistei até hoje são frutos da educação e de todas as lições de caráter que me passaram.

A minha Avó Zailde e ao meu Avô Adelmo por terem sido sempre tão presentes na minha vida. Muito obrigado por sempre terem me apoiado e se mostrado como grandes exemplos a serem seguidos.

Às minhas Tias Bia, Dena e Rita e às minhas primas Bia e meu pequeno xodó Laís pelo grande incentivo e lição de amor mesmo à distância.

A todos os outros membros da minha família pelas mensagens de apoio.

A Aline pelo amor incondicional, paciência e companheirismo de todos esses anos.

Ao Prof. Ben-Hur pelas orientações, incentivo e por sempre ter acreditado na concretização do trabalho mesmo nos momentos de dificuldades e ausência.

A amiga Aline pelo companheirismo desses anos de mestrado. A sua contribuição foi fundamental para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos Aline, Gabi, Hélivio, Manuella e Pedro Lucas por todos os momentos de felicidade e incentivo que vivemos no nosso tempo de Rio de Janeiro. Aos amigos Artur, Bruno, Daniele (Pari), Elisa, Ingrid, e Pedro César pelo incentivo e lição de amizade mesmo à distância.

Aos colegas de mestrado Aline, Bernardo, Café, Fernando, Katty e Cap. Alexandre Paiva pelos momentos vividos durante o curso, tornando as dificuldades mais fáceis de serem vencidas.

Ao Clube - Andressa, Karol, Laís, Lucas, Rafael, Renato e Ricardo - a maior demonstração que as verdadeiras amizades são para sempre e independem das distâncias.

A todos os Professores da PG Transportes do IME por todas as lições ensinadas e o grande desenvolvimento profissional que me proporcionaram, em especial ao Prof. Marcelino Aurélio pelas contribuições para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço também ao Sgt. Oazem por sempre estar disposto a nos ajudar.

A Márcia Fragoso por sempre ter atuado como uma verdadeira tutora e pelo grande incentivo para a concretização desse trabalho.

A INVEPAR, em especial ao pessoal da LAMSA, por ter sempre apoiado meu desenvolvimento profissional e incentivado o desenvolvimento do trabalho.

Aos Professores Roberaldo Carvalho de Souza, Karoline Alves de Melo Moraes e a todos os professores da UFAL pela grande contribuição dada à minha formação. Sempre serei grato pelas lições aprendidas durante a minha graduação.

Ao Eng, Sebastião Mota e a todos do DER/AL, por terem me aberto as portas dessa nobre área e sempre ter acreditado no meu potencial.

Aos membros da Banca por terem aceitado o convite, engrandecendo o trabalho.

“Aponta pra fé...e rema!”
Marcelo Camelo.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	12
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	14
1INTRODUÇÃO.....	16
1.1CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2OBJETIVO.....	17
1.3ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1CONCEITOS E OBJETIVOS DE UM SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS	18
2.2NÍVEIS DE GESTÃO DE UM SGP.....	19
2.2.1NÍVEL DE REDE.....	19
2.2.2NÍVEL DE PROJETO.....	20
2.3BANCO DE DADOS DE UM SGP.....	20
2.4DESEMPENHO DO PAVIMENTO.....	22
2.4.1AVALIAÇÃO FUNCIONAL.....	22
2.4.2AVALIAÇÃO ESTRUTURAL.....	25
2.4.3MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO PAVIMENTO.....	28
2.5MODELOS DE DESEMPENHO.....	29
2.5.1MODELOS DESENVOLVIDOS.....	29
3ESTUDO DE CASO.....	33
3.1CENÁRIO DE ESTUDO.....	33
3.2CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO.....	33
3.3INFORMAÇÕES SOBRE O PAVIMENTO.....	35
3.4INTERVENÇÕES REALIZADAS.....	36

4MÉTODO.....	37
4.1AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL.....	37
4.1.1DIVISÃO EM TRECHOS HOMOGÊNEOS.....	37
4.1.2CÁLCULO DAS DEFLEXÕES CARACTERÍSTICAS.....	37
4.1.3DETERMINAÇÃO DAS DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS.....	38
4.1.4CONSTRUÇÃO DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS.....	39
4.2MODELO DE DESEMPENHO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL.....	39
4.2.1REGRESSÃO LINEAR COM MÚLTIPLAS VARIÁVEIS.....	39
4.2.2PREMISSAS PARA A MONTAGEM DOS MODELOS.....	41
4.2.3REGRESSÃO 01 – SEM CRITÉRIO EXPURGATÓRIO	42
4.2.4REGRESSÃO 02 – COM CRITÉRIO EXPURGATÓRIO.....	42
5RESULTADOS.....	44
5.1AVALIAÇÃO ESTRUTURAL.....	44
5.1.1CÁLCULO DO NÚMERO N.....	44
5.1.2LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO E DIVISÃO DO TRECHO EM SEGMENTOS HOMOGÊNEOS.....	56
5.2MODELO DE DESEMPENHO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL.....	58
5.2.1REGRESSÃO 01 – SEM CRITÉRIO EXPURGATÓRIO.....	59
5.2.2REGRESSÃO 02 – COM CRITÉRIO EXPURGATÓRIO.....	60
6CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS.....	64
6.1CONCLUSÕES.....	64
6.2Sugestões de trabalhos futuros.....	64
7REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
8ANEXOS.....	69

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

As agências administradoras de rodovias, sejam públicas ou privadas, têm o grande desafio de manter a malha rodoviária sob sua responsabilidade em boas condições de tráfego e segurança, com a otimização de custos de manutenção e recuperação do pavimento. Desse modo, os Sistemas de Gerência de Pavimento (SGP) surgem como uma técnica gerencial que dispõem de ferramentas técnicas de apoio à decisão para uma melhor administração da malha. Para o desenvolvimento de um SGP é necessário a prévia montagem de um banco de dados confiável, pois todas as análises serão feitas baseadas nesse arquivo. O desenvolvimento de um Modelo de Previsão de Desempenho é uma das análises realizadas baseadas naquele banco de dados e procura prever, através de modelos matemáticos, a evolução de alguns parâmetros do pavimento. Esses modelos têm grande interferência das variáveis que atuam no pavimento, logo eles necessitam de uma calibração para cada estrutura estudada. O presente estudo teve como objetivo auxiliar na estruturação de um Sistema de Gerência de Pavimentos através da consolidação de dados disponibilizados por uma Concessionária administradora de uma rodovia concessionada no município do Rio de Janeiro e da realização de análises da condição estrutural do pavimento e elaboração de uma linha de tendência de comportamento do parâmetro Irregularidade Longitudinal (IRI). Através dessas análises foi possível observar os trechos mais deteriorados estruturalmente da rodovia e pôde-se chegar em equações de previsão desempenho de IRI bastante satisfatórias considerando parâmetros de aceitação estatísticos. Esses resultados podem auxiliar o tomador de decisão a melhor escolher as soluções de manutenção e reabilitação do pavimento tendo em vista os critérios que forem mais significativos para sua política.

ABSTRACT

The agencies that manage highways, public or private, have the responsibility of maintaining the road network under their responsibility in good traffic conditions and safety with cost optimization of pavement maintenance. So that, the Pavement Management Systems (PMS) arise as a management technique that have technical decision support tools for better management of the highways extensions. For the development of an SGP the prior assembly of a reliable database is needed because all analyzes are made based on this file. Developing a Model for Performance Prediction is one of the analyzes based on that database and seeks to provide, through mathematical models, the evolution of some parameters of the pavement. These models have great interference of variables acting on the pavement, so they need a calibration for each structure studied. The present study aimed to assist in the structuring of a Pavement Management System by consolidating data provided by a manager of a highway concession in the municipality of Rio de Janeiro and conducting analyzes of the structural condition of the pavement and elaboration of a trend behavior of the parameter Longitudinal Irregularity (IRI). Through these analyzes we observed stretches more structurally damaged the highway and it was possible to get performance prediction equations IRI quite satisfactory considering parameters of statistical acceptance. These results can help the decision maker to choose the best solutions for maintenance and pavement rehabilitation in view of the criteria that are most important to your policy.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Brasil passa hoje por uma mudança de cultura em relação ao setor rodoviário. Em meados do século XX, quando houve grandes investimentos na expansão da malha rodoviária do país, o foco era buscar a melhor técnica que resultasse no melhor retorno financeiro em relação aos projetos e execução das obras.

Hoje, com a malha rodoviária já um pouco consolidada em relação à sua extensão, o foco mudou para manter esses patrimônios milionários.

Manter uma rodovia em condições favoráveis não significa apenas preservar os grandes investimentos feitos na época de sua concepção, mas também garantir a questão econômica e de segurança do usuário que por lá trafega, seja veículo de passeio ou frotas comerciais.

Dessa maneira, vem crescendo no Brasil o desenvolvimento da cultura dos Sistemas de Gerência de Pavimento, uma técnica gerencial surgida nos EUA em meados do século XX que tem o foco de, como o próprio nome diz, gerenciar fatores ligados ao pavimento visando obter o melhor retorno técnico/financeiro através do conceito simples do custo/benefício.

Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é alimentado por uma série de dados históricos da rodovia que auxiliam no entendimento da condição atual da estrutura e podem servir como base (*input*) para uma técnica de auxílio à decisão no Sistema, chamada de Modelo de Previsão de Desempenho. Essa técnica consiste em desenvolvimento de modelos matemáticos construídos a partir do banco de dados do próprio Sistema que visa obter a predição de certos parâmetros julgados como importantes dentro de um SGP.

O conhecimento da condição atual do pavimento e a previsão de seu desempenho são os fatores técnicos mais importantes dentro de um SGP, uma vez que são os resultados dessas análises que vão dar subsídios aos tomadores de decisão.

Essas análises não podem ser feitas de uma maneira generalista, pois cada estrutura de pavimento tem uma realidade de projeto, de materiais de construção, de atuação de tráfego, de condições climáticas de serviço e de outros fatores que influem diretamente no seu desempenho. Ou seja, para a geração desses resultados, é necessária uma análise cuidadosa e particular para cada caso estudado.

1.2 OBJETIVO

Foram coletados dados de uma Concessionária administradora de uma rodovia municipal e, com base nesses dados, buscou-se atingir os seguintes objetivos:

Objetivo Geral: Auxiliar na criação de um Sistema de Gerência de Pavimentos através da elaboração de alguns de seus subsistemas: banco de dados, análise da condição atual e modelo de previsão de desempenho.

Dentro disso, foram buscados os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer um banco de dados confiável e organizado, visando obter análises significantes para o Sistema;

- Analisar o comportamento estrutural do pavimento através de metodologias consagradas na literatura e nas normas brasileiras, atribuindo conceitos sobre sua condição atual;
- Estabelecer linhas de tendência do desempenho funcional do pavimento a partir do banco de dados montado, visando à predição do parâmetro funcional Irregularidade Longitudinal (IRI).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir o objetivo mencionado, este trabalho foi desenvolvido em seis capítulos, conforme se descreve a seguir.

No Capítulo 1, a Introdução, são apresentadas as considerações iniciais sobre o tema proposto, o objetivo, a justificativa e a relevância, assim como a composição da dissertação.

No Capítulo 2, a Revisão Bibliográfica, é apresentada a revisão bibliográfica sobre Sistemas de Gerência de Pavimentos e Desempenho de Pavimentos, mostrando os principais conceitos e histórico de estudos relacionados aos temas.

No Capítulo 3, Cenário de Estudo, é descrita a origem dos dados que alimentaram a elaboração do estudo e viabilizaram a montagem do banco de dados;

No Capítulo 4, o Método, são descritos todos os métodos de análise estrutural do pavimento que foram empregados e as ferramentas estatísticas utilizadas na elaboração dos modelos de previsão de IRI.

No Capítulo 5, Resultados, são expostos todos os resultados obtidos após a análise de condição do pavimento e a montagem dos modelos de previsão de IRI.

No Capítulo 6, Conclusões, são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para a elaboração de trabalhos futuros.

No Capítulo 7, Referências Bibliográficas, é apresentada a referência bibliográfica que serviu de base para esse trabalho.

No Capítulo 8, Apêndices, são apresentadas várias planilhas de cálculo usadas para a obtenção dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estima-se que os primeiros estudos sobre a conservação de vias surgiram em 1750, quando Pierre Marie Jerome Tresaguet inovou ao adotar menores espessuras de revestimentos e executou bases bem compactadas e drenadas com a função de suportar as cargas solicitadas. Além disso, Tresaguet iniciou as ideias sobre a necessidade de uma manutenção de forma contínua nas vias, de modo a se obter maior vida útil (Haas et al, 1994 *apud* Nascimento, 2005).

A criação do *Highway Research Board* (HRB) em 1920 foi um grande marco nos estudos sobre pavimentação. O foco era o aperfeiçoamento nas técnicas de projetos e construção de vias pavimentadas. Porém, os estudos acerca do desenvolvimento de Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) só vieram a se iniciar de fato em meados da década de 1960, impulsionados principalmente pelo desenvolvimento da pista de testes da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) nos Estados Unidos e o surgimento de novos conceitos relacionados ao desempenho funcional do pavimento, como a serventia e a modelagem de irregularidade longitudinal (Benevides, 2006).

De acordo com Albuquerque (2008), o primeiro Sistema de Gerência de Pavimentos desenvolvido aconteceu em meados de 1970 nos EUA. Desde então, o país norte-americano adotou uma estratégia de estímulo à elaboração de SGP's por todo o seu território, o que pode ser evidenciado através de algumas publicações, como o primeiro guia de gerência de pavimentos da AASHTO em 1985, e pela exigência da *Federal Highway Administration* (FHWA) de conceder investimentos rodoviários somente às agências estaduais que tivessem SGP's já implantados.

Com o sucesso nos EUA, outras nações viram a necessidade de se enquadrar nessa nova realidade, uma vez que elas já se encontravam com milhares de quilômetros de vias pavimentadas construídas, e a cultura do “projetar e construir” já não atendia suas expectativas. A administração precisava, então, dominar a cultura do “reparar e conservar” (Kulkarni e Miller, 2003).

Outro fator que propiciou o desenvolvimento de SGP's pelo mundo foi o programa *Highway Development Management* (HDM) do Banco Mundial. Esse programa propunha

uma metodologia a ser seguida pelas nações em desenvolvimento que pleiteassem investimentos do Banco em infraestrutura rodoviária (Albuquerque, 2008).

No Brasil, os primeiros estudos relacionados ao tema foram desenvolvidos pelo Grupo do HDM (GHDM), pertencente à Divisão de Planos e Programas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Entre 1975 e 1984, a Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT) participou da Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários (PICR) onde pôde contribuir ao desenvolvimento de equações de modelos de desempenho de pavimentos e de custos operacionais de veículos que foram incorporadas ao HDM-III (DNIT, 2011).

Ainda segundo o Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (DNIT, 2011), a implantação de um Sistema de Gerência de Pavimentos na rede rodoviária nacional se deu de fato no ano de 1982, quando foi criada a Comissão Permanente de Gerência de Pavimentos (CPGP) por iniciativa do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR).

Ao longo do tempo, o Sistema de Gerência de Pavimentos desenvolvido pelo DNER passou por diversas mudanças, inclusive normativas, e se consolidou nos moldes do HDM-III entre 1985 e 1986. Hoje ele já utiliza a versão mais recente do *software* do Banco Mundial, o HDM-IV.

Há de se destacar o desenvolvimento de alguns estudos que foram de fundamental importância para se chegar ao nível de conhecimento acerca do assunto nos dias de hoje.

Marcon (1996) elaborou modelos de previsão de desempenho de pavimentos da região de Santa Catarina através de análises em relação às deflexões dos trechos, irregularidade longitudinal (IRI), afundamento de trilha de roda (ATR) e índice de gravidade global (IGG).

Já Yshiba (2003) deu grande contribuição ao assunto através do desenvolvimento de modelos estatísticos de previsão de desempenho de pavimentos com os dados de rodovias do estado do Paraná.

Mais recentemente, outros estudos foram desenvolvidos trazendo grandes contribuições ao tema. Um exemplo é o trabalho de Albuquerque (2008), quando foi buscado o desenvolvimento de um SGP para a malha rodoviária nordestina. Benevides (2006) também desenvolveu um trabalho relevante sobre o assunto, procurando viabilizar modelos de previsão de desempenho para rodovias estaduais do Ceará.

Vitorello (2008) analisou o desempenho da estrutura do pavimento de um trecho da rodovia BR-290 no Rio Grande do Sul, criando modelos de desempenho do pavimento e

assim, contribuindo no desenvolvimento de ferramentas que auxiliam o Sistema de Gerência de Pavimentos.

A aplicabilidade de Sistemas de Gerência de Pavimentos em vias urbanas foi objeto de estudo de Hansen (2008), quando o foco foi a malha viária urbana de Maringá (PR). Danieleski (2004) também abordou esse tema, estudando em específico o caso da cidade de Porto Alegre (RS). Já Lima (2007) procurou criar um modelo de priorização de atividades de Manutenção e Reabilitação (M&R) para trechos na cidade de São Carlos (SP).

Consolidado o tema no meio acadêmico e nas agências administradoras de rodovias pavimentadas, hoje os estudos envolvendo os Sistemas de Gerência de Pavimentos envolvem cada vez mais o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem a tomada de decisão. Kulkarni e Miller (2003), por exemplo, já faziam essa predição sobre as pesquisas acerca do tema. Desenvolvimento de modelos de desempenho cada vez mais fiéis à realidade, o uso de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) acoplados ao SGP e uma automação cada vez maior de processos do Sistema (ex.: banco de dados, análise de sensibilidade...) foram abordados pelos autores como prioridades a serem desenvolvidos nos estudos sobre SGP.

2.1 CONCEITOS E OBJETIVOS DE UM SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

Haas e Hudson (1978) definem um Sistema de Gerência de Pavimentos como um conjunto de atividades relacionadas ao planejamento, projeto, construção, manutenção, avaliação e pesquisa de pavimentos.

Já a AASHTO (1990) define um SGP como um conjunto de ferramentas que auxiliam os tomadores de decisão para avaliar e manter o pavimento em uma condição aceitável durante um período.

O surgimento dos Sistemas de Gerência de Pavimentos se deu principalmente ao fato da manutenção de uma via não estar somente relacionada aos seus fatores técnicos, como qualidade do pavimento e tráfego. O Manual de Gerência de Pavimentos (IPR, 2011) cita como principais fatores externos relacionados a um SGP os recursos orçamentários, os dados necessários para compor o Sistema e as diretrizes políticas e administrativas. A Figura - Estruturação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (IPR, 2011) mostra como se estrutura

um Sistema de Gerência de Pavimentos, auxiliando o entendimento de como esses fatores interagem com o Sistema.

Ainda s
implantação
para os recu
econômico.

Benevid
critérios de
manutenção
investidos.

Lima et
“O que”
“Quando

serviço do

pavimento?

“Onde” se localizam os projetos prioritários?

“Como” devem ser executadas as atividades de manutenção e reabilitação dos pavimentos?

De um modo geral, praticamente todos os conceitos listados acima apontam que um SGP é uma ferramenta de gestão capaz de auxiliar na tomada de decisão relacionada à administração de uma via pavimentada.

Cunha (2008) aponta para alguns princípios básicos nos quais a concepção, desenvolvimento e manutenção de um SGP devem ser baseados:

Tabela - Princípios básicos de um SGP (Cunha, 2008)



objetivo da
lo possível
npatível e
rmações e
onstrução,
s recursos
questões:
a vida em

Alta tecnologia em informática e transmissão de dados

Banco de dados corporativo

Integração com as demais ferramentas e sistema da instituição

Desenvolvido para as condições e necessidades da instituição

Amigável e transparente, podendo ser aplicado de forma ágil e eficiente

Flexibilidade nas ações ligadas à coleta de dados e correlações entre medidas objetivas

Métodos e procedimentos públicos com transferência total da tecnologia

Manutenção, atualização e pesquisas constantes

Devidamente documentado

Apoio do corpo diretivo

Segundo Cunha (2008), os planejadores de redes rodoviárias devem seguir os princípios listados acima a fim de se obter um SGP totalmente otimizado.

O Sistema de Gerência de Pavimentos possui uma característica de ser uma ferramenta multiusuária, pois diferentes níveis de da administração da rodovia em questão podem ter acesso às importantes questões relacionadas à manutenção e às condições da via, além de poder realizar previsões de suas condições futuras (Fontanele et al, 2008).

Marcon (1996) atenta para o fato que é fundamental que o Sistema seja compreensível às pessoas envolvidas, além de ser apropriado à estrutura de gestão do órgão que o utiliza.

É o órgão administrador que deve estabelecer previamente os objetivos da implantação de um SGP, alinhando-o às condições técnicas e recursos financeiros disponíveis, de forma que as reais necessidades sejam atendidas (Marcon, 1996)

2.2 NÍVEIS DE GESTÃO DE UM SGP

Albuquerque (2008) aponta que os Sistemas de Gerência de Pavimentos podem ter três níveis de gestão visando a tomada de decisão: Nível Administrativo, Nível de Rede e Nível de Projeto. A Figura - Hierarquia de um SGP (adaptado de Albuquerque, 2008). ilustra essa hierarquia:

Figura - Hierarquia de um SGP (adaptado de Albuquerque, 2008).

O Nível Administrativo está relacionado com a tomada de decisão que envolve a alocação dos recursos entre diferentes categorias das obras de infraestrutura de transportes: sinalização viária, pavimentação, obras de arte...

O Nível de Rede visa uma abordagem de um grande trecho, propondo-se a obter uma programação a médio e longo prazo sem grandes detalhamentos técnicos, além da elaboração de um Programa Plurianual de Investimentos.

Já o Nível de Projeto busca analisar um determinado projeto mais detalhadamente, com o objetivo de interferir diretamente em questões relacionadas ao projeto e sua execução. Seu foco é a elaboração de orçamentos e cronograma em curto prazo.

De acordo com a AASHTO (2001), os Níveis de Rede e de Projeto são considerados de atuação da engenharia rodoviária e podem ser diferenciados em relação a alguns aspectos: objetivos da decisão a ser tomada, grau de detalhes dos dados e informações que suportam a tomada de decisão, entre outros.

Por terem uma abordagem mais técnica e serem de fundamental importância para a otimização de um SGP, será dado um enfoque maior nas explanações acerca dos Níveis de Rede e de Projeto.

2.2.1 NÍVEL DE REDE

Segundo DNIT (2011), o Nível de Rede caracteriza-se por abordar uma grande área com a possibilidade de se ter várias rodovias no trecho. Sua principal atividade é a coleta de dados,

uma vez que é necessário estar bastante embasado para que as prioridades de intervenção e de alocação dos recursos sejam decididas.

Benevides (2006) também destaca a importância da coleta de dados nesse Nível de decisão de um SGP. O autor destaca que, para muitos administradores, a coleta de dados deve ser o componente de maior custo unitário de um SGP. Dessa forma, é necessário o uso cada vez mais frequente de inovações tecnológicas para que os dados sejam coletados com uma maior automação e, conseqüentemente, maiores volumes e velocidades na aquisição dessas informações.

Ainda segundo Benevides (2006), os dados mais comumente coletados nesse nível são: irregularidade, afundamento de trilha de roda e rugosidade.

De acordo com Albuquerque (2008), um SGP em Nível de Rede deve conter as respostas para os seguintes tópicos: determinação de um programa de conservação de pavimentos, identificação de prioridades, estimativa das necessidades de investimentos e alocação de capitais para manutenção, restauração e reconstrução.

É o Nível de Rede de um SGP que fornece as respostas para as perguntas elencadas por Lima *et al* (2008) em relação ao pavimento: o que precisa ser realizado, quando será realizado, onde será realizado e como será realizado.

2.2.2 NÍVEL DE PROJETO

Complementarmente ao Nível de Rede, o Nível de Projeto visa obter análises mais profundas no trecho estudado. Nesse nível de decisão, dados referentes à estrutura da camada do projeto são de fundamental importância para serem processadas as análises referentes às causas dos defeitos, bem como as estratégias de intervenção (DNIT, 2011).

Uma vez priorizados os trechos através das análises em Nível de Rede, fica nas competências do Nível de Projeto a elaboração de estudos mais específicos nesses segmentos selecionados (Benevides, 2006).

Segundo Marcon (1996), um SGP em Nível de Projeto se propõe à:

- Coletar dados de forma mais intensa e detalhada, permitindo uma melhor análise do pavimento avaliado;

- Selecionar um tipo de intervenção mais adequada tecnicamente ao pavimento do trecho, tendo como fator de restrição os recursos financeiros alocados na fase de análise em Nível de Rede.

De acordo com DNIT (2011), além da realização de estudos técnicos mais detalhados, como a realização de ensaios específicos, um SGP em Nível de Projeto busca determinar as quantidades de serviços e os custos das diferentes alternativas de intervenção.

Hansen (2008) comenta que no caso de Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos é correto ocorrer uma maior integração entre os Níveis de Rede e de Projeto por conta do dinamismo do processo decisório e pela combinação de mais fatores no modelo de priorização.

Sintetizando a questão dos níveis de tomada de decisão em um SGP, pode-se dizer que o Nível de Rede é responsável pela identificação e levantamento dos dados acerca das condições do pavimento para que seja tomada a decisão de quais trechos serem priorizados. A análise em Nível de Rede ainda permite a escolha das alternativas das estratégias de M&R. Em seguida, é efetuada uma análise em Nível de Projeto para a definição das atividades de manutenção ou, se for o caso, de dimensionamento de reforços ou de restauração. A partir destas definições, são efetuadas as análises econômicas e estabelecidas as prioridades (DNIT, 2011).

A Figura - Fluxograma de um SGP com alternativa das estratégias de M&R (DNIT, 2011) ilustra o fluxograma de um SGP com os Níveis de Rede e de Projeto já integrados.



Figura - Fluxograma de um SGP com alternativa das estratégias de M&R (DNIT, 2011)

2.3 BANCO DE DADOS DE UM SGP

Segundo Lopes *et al* (2008), um Sistema de Gerência de Pavimentos se inicia com a coleta e análise de dados e encerra com a seleção das estratégias de manutenção e reabilitação e a previsão orçamentária para o período de análise.

Entre outros fatores, a implementação de um SGP depende diretamente da aquisição de dados confiáveis. Além disso, esse banco de dados deve interagir com as demais partes integrantes de um SGP (Albuquerque, 2008; Fernandes Jr., 1997).

Seja em Nível de Rede ou Nível de Projeto, as classes de dados fundamentais para alimentar um banco de dados de um SGP são basicamente as mesmas. O que varia de um Nível para o outros é a profundidade e o grau de detalhamento dos dados (Haas *et al*, 1994; Shahin, 1994 e Fernandes, 1996; *apud* Oliveira, 2007):

Tabela - Classes de dados necessárias para um SGP (adaptado de Haas et al (1994); Shahin (1994) e Fernandes (1996); apud Oliveira (2007))

CLASSE	DADOS
Inventário	Nome da rodovia
	Tipo de Pavimento
	Espessuras dos materiais componentes das camadas
	Dados históricos referentes à construção, manutenção e restauração
	Meio ambiente (temperatura, pluviometria)
Condições do pavimento	Irregularidade Longitudinal
	Degradação física
	Segurança
	Capacidade estrutural
Tráfego	Contagem de veículos
	Pesagem de veículos de carga
Custos	Construção
	Manutenção
	Reabilitação
	Operação dos veículos

Os dados referentes às condições do pavimento são quantificados através de ensaios que determinam a deflexão em pavimentos, afundamento de trilha de rodas, irregularidade de pavimentos, entre outros fatores que possam ser relevantes para o levantamento, conforme aponta Albuquerque (2008). Esse tópico, que está relacionado com a avaliação estrutural e funcional do pavimento, será melhor abordado mais adiante.

Em relação ao tráfego, Benevides (2006) aponta a necessidade de estabelecimento de critérios claros para que haja uma previsão de demanda e crescimento de tráfego confiáveis. Essa previsão será de fundamental importância para alimentar os modelos de previsão de desempenho do pavimento.

Haas *et al* (1994) também fizeram uma divisão dos dados necessários quanto ao seu uso em análises de reabilitação (R) ou manutenção (M) dos pavimentos, conforme ilustra a

Tabela - Dados necessários para um SGP (Haas et al (1994) adaptado por Albuquerque (2008)).

Tabela - Dados necessários para um SGP (Haas et al (1994) adaptado por Albuquerque (2008)).

DADOS RELACIONADOS AO DESEMPENHO	UTILIZAÇÃO	DADOS RELACIONADOS À GEOMETRIA	UTILIZAÇÃO
Irregularidade	R	Dimensões de seções	R
Desgaste de superfície	R + M	Curvatura Vertical	R
Deflexão	R + M	Curvatura Longitudinal	R
Atrito	R	Espessura da camada	R
Propriedades da Camada	R	Greide	R

DADOS RELACIONADOS AO HISTÓRICO	UTILIZAÇÃO	DADOS RELACIONADOS AOS CUSTOS	UTILIZAÇÃO
Manutenção	R + M	Construção	R
Construção	R + M	Manutenção	R + M
Tráfego	R + M	Reabilitação	R
Acidentes	R + M	Custos ao usuário	R

DADOS RELACIONADOS À POLÍTICA	UTILIZAÇÃO	DADOS RELACIONADOS AO MEIO AMBIENTE	UTILIZAÇÃO
Orçamentos	R + M	Drenagem	R + M
Disponibilidade e alternativas	R + M	Clima	R

R -- Reabilitação
M -- Manutenção

2.4 DESEMPENHO DO PAVIMENTO

Do ponto de vista da Gerência de Pavimentos, o entendimento de como funcionam os mecanismos de degradação da estrutura e como isso pode ser mensurado é de grande importância na previsão de seu desempenho, contribuindo para se chegar num SGP otimizado.

Segundo Balbo (2007), os custos com manutenção do pavimento crescem exponencialmente com a evolução da degradação do pavimento. Tendo isso em vista, Shahin *et al* (1994) comentam que antes de serem definidas as estratégias de Manutenção e

Reabilitação, os administradores do pavimento devem primeiramente avaliar as atuais e futuras condições da estrutura.

Os estudos acerca do desempenho dos pavimentos sempre foram um desafio aos engenheiros rodoviários. Pesquisas sobre como o clima, o tráfego e as características do material interferem no desempenho da estrutura vêm sendo realizadas desde o começo do século XX. Mas foi entre 1958 e 1960 que foram obtidos os maiores avanços nessa área de estudo através das pesquisas desenvolvidas na AASHO Road Test. O grande ganho desse estudo foi o estabelecimento de relações entre carga de tráfego e o desempenho do pavimento, além da definição do conceito de serventia (Byrd, 1985).

Lytton (1987) define desempenho do pavimento como sendo um termo que expressa como um pavimento atende sua função ao longo de seu tempo de uso.

De acordo com Hajek et al (1985), a abordagem acerca do desempenho de pavimentos é definida pelos objetivos contidos no Sistema de Gerência de Pavimentos, tendo essa abordagem dois tipos:

- Abordagem ao usuário (serventia) – Essa abordagem mensura o desempenho do pavimento de acordo com o quão bem ele vem servindo ao usuário ao longo do tempo. Dessa forma, o SGP buscará programar a manutenção e reabilitação do pavimento de acordo com a necessidade do usuário. O desempenho do pavimento, nesse caso, é mensurado basicamente pela irregularidade, parâmetro esse que, em alguns casos, não é suficiente para ditar a programação das ações relativas à manutenção de um pavimento.
- Abordagem ao administrador (preservação) – Nessa abordagem, é tomado como premissa o fato que a serventia ao usuário está diretamente ligada ao desempenho do pavimento como estrutura, pois um pavimento já degradado terá uma perda de serventia acelerada. Nesse caso, o objetivo de se mensurar o desempenho do pavimento não é apenas definir quando o usuário será afetado pela sua condição, mas também determinar qual o modo mais apropriado de se tratar a questão da preservação do pavimento e qual o período em que deve ser colocada em prática a estratégia.

Apesar dos dois conceitos apresentados acima parecerem conflitantes, eles só mostram a necessidade de serem consideradas todas as características relacionadas ao desempenho do pavimento (Hajek et al, 1985).

Segundo Bernucci *et al* (2006), o desempenho satisfatório da estrutura do pavimento está relacionado à sua capacidade de suporte, durabilidade de acordo com o tipo de obra e projeto, tipo e nível de tráfego, conforto ao rolamento e segurança dos usuários.

Rodrigues (1991) *apud* Nakahara (2005) comenta que o desempenho do pavimento depende de uma série de fatores e a interação entre seus efeitos, sendo eles :

- A repetição de cargas de tráfego, o que contribui para o surgimento de defeitos de caráter estrutural, como trincamentos e deformações plásticas;
- A passagem das rodas dos veículos, o que causa abrasão da superfície do pavimento;
- A oxidação do ligante asfáltico, o que pode ser atenuado pelas condições climáticas, o que causa o envelhecimento das camadas asfálticas;
- A propriedade dos materiais usados na construção;
- As condições de drenagem;
- A frequência e as práticas de manutenção;
- A própria estrutura existente.

Segundo a AASHTO (1993) *apud* Balbo (2007), as patologias em um pavimento podem ser classificadas como patologias físicas (relacionadas ao desempenho estrutural do pavimento) ou patologias funcionais (relacionada à qualidade de rolamento desempenhada pelo pavimento). Dessa forma, o desempenho do pavimento pode ser abordado segundo uma avaliação funcional e uma avaliação estrutural da estrutura.

2.4.1 AVALIAÇÃO FUNCIONAL

O objetivo principal da pavimentação é garantir boas condições de conforto e segurança ao usuário, independentemente das condições climáticas e suas variações ao longo do ano. Dessa forma, do ponto de vista do usuário, as condições de superfície do pavimento é o mais importante, uma vez que isso interfere diretamente no seu conforto e segurança ao trafegar pela via (Bernucci *et al*, 2006).

É importante frisar a relação entre o desempenho funcional do pavimento e os custos de transportes, uma vez que um pavimento deteriorado implica em maiores custos na de

manutenção dos veículos, tempo de viagem e consumo de combustível e dos pneus. Essa relação pode ser encontrada em alguns modelos que foram desenvolvidos e hoje já são incorporados ao HDM-4.

Alguns parâmetros foram criados visando uma melhor avaliação funcional do pavimento, seguindo critérios subjetivos e objetivos. Os principais parâmetros serão abordados a seguir.

2.4.1.1 VALOR DE SERVIENTIA ATUAL (VSA)

Carey e Irick (1960) estabeleceram o primeiro critério de avaliação funcional de um pavimento, como sendo uma avaliação numérica numa escala de 0 a 5 (Tabela - Níveis de Servientia (DNIT, 2003)) relacionadas às notas dadas por avaliadores segundo o conforto ao rolamento proporcionado pelo trecho em questão. Desse modo, chega-se ao *Present Serviceability Ratio (PSR)*, que no Brasil equivale ao Valor de Servientia Atual (VSA), preconizado pela DNIT 009/2003-PRO (DNIT, 2003).

Tabela - Níveis de Servientia (DNIT, 2003)	
Conforto ao rolamento	Avaliação
Excelente	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

O VSA tende a diminuir com o tempo por conta da solicitação do tráfego atuante e das intempéries às quais o pavimento está sujeito. A Figura - Variação da servientia ao longo do tempo/evolução do tráfego (DNIT, 2011) ilustra a variação da servientia de acordo com o tráfego/tempo. Atualmente, o LVC (Levantamento Visual Contínuo da Superfície do Pavimento Flexível e Semi Rígido), preconizado pela norma DNIT 006/2003-PRO tem sido executado em substituição ao VSA por fornecer os parâmetros necessários para determinação

do IGG (Índice de Gravidade Global) e por fornecer informações necessárias para os modelos de previsão de desempenho do HDM-4 (DNIT, 2011).

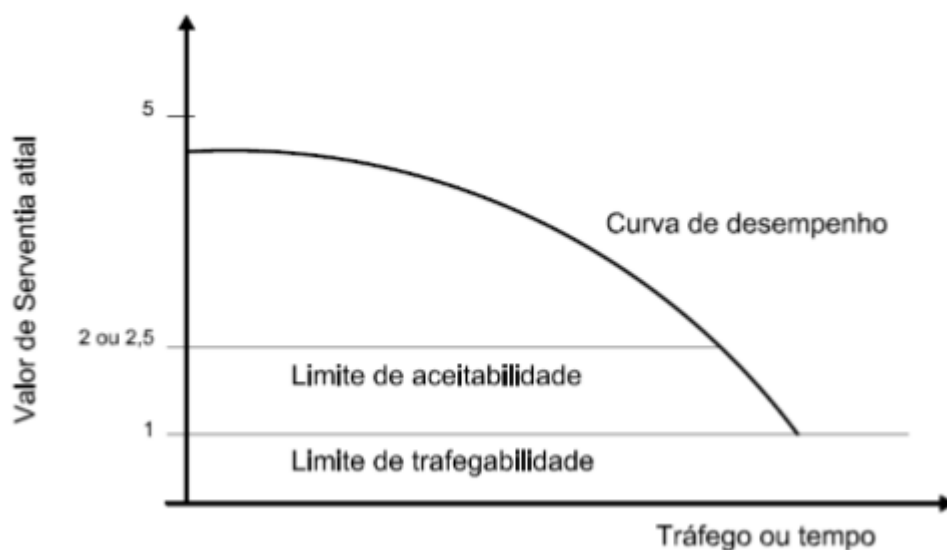


Figura - Variação da serventia ao longo do tempo/evolução do tráfego (DNIT, 2011)

2.4.1.2 AVALIAÇÃO OBJETIVA DO PAVIMENTO – DETERMINAÇÃO DO IGG

Preconizado pela norma DNIT 006/2003-PRO (DNIT, 2003), a avaliação objetiva do pavimento se dá através de um LVC (Levantamento Visual Contínuo) buscando se identificar defeitos no pavimento. Os defeitos são elencados segundo a terminologia determinada pela norma DNIT 005/2003-TER (2003). Além da inspeção visual feita em campo, é usada uma treliça metálica para a medição das trilhas de roda, conforme ilustrado na Figura - Treliça metálica para medição dos afundamentos de trilha de roda (DNIT, 2003).

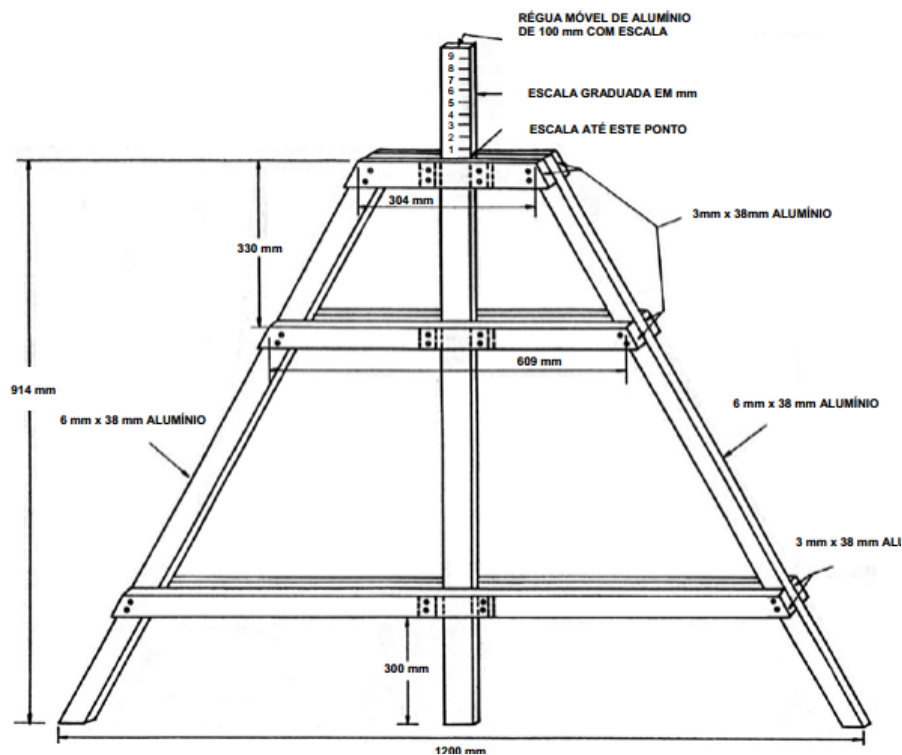


Figura - Treliça metálica para medição dos afundamentos de trilha de roda (DNIT, 2003)

Através dos dados colhidos pelo LVC é possível se determinar o IGG (Índice de Gravidade Global), que é um parâmetro numérico calculado a partir da incidência de alguns defeitos e da profundidade das trilhas de roda.

Para o cálculo do IGG, o DNIT preconiza a anotação das trilhas externas e internas e a divisão dos defeitos em oito categorias:

- Fissuras e trincas;
- Trincas de bloco ou tipo couro de jacaré sem erosão;
- Trincas de bloco ou tipo couro de jacaré com erosão;
- Afundamentos localizados ou trilhas;
- Corrugação e panelas (além das ondulações);
- Exsudação;
- Desgaste;
- Remendos.

O trecho é dividido utilizando-se como critério a presença das mesmas características de defeitos. Dessa forma, é realizado o cálculo de uma frequência absoluta (fa) que leva em consideração a frequência de ocorrência de cada um dos oito tipos de defeitos elencados acima. Também é calculada a frequência relativa (fr), que é dada pelo percentual das estações com ocorrência de determinada patologia em relação ao número total de seções avaliadas. A

norma também estabelece os fatores de ponderação (fp), conferindo a gravidade de cada defeito em relação aos demais elencados.

O restante do procedimento se dá pela determinação do Índice de Gravidade Individual (IGI), calculado pela multiplicação da frequência relativa (fr) pelos fatores de ponderação de cada defeito.

O cálculo do IGI no caso dos afundamentos de trilhas de roda levantados através da treliça metálica é determinado pela média dos valores de trilhas de roda internas e externas e pelo uso de um fator de ponderação estabelecido por norma.

O IGG é determinado, portanto, pelo somatório dos IGI. Dessa forma, é possível se classificar o desempenho funcional do pavimento por meio dos conceitos sugeridos pela norma DNIT 06/2003 (DNIT, 2003), conforme a Tabela - Conceitos do IGG (DNIT, 2003):

Tabela - Conceitos do IGG (DNIT, 2003)	
CONCEITO	LIMITES
Ótimo	$0 < IGG < 20$
Bom	$20 < IGG < 40$
Regular	$40 < IGG < 80$
Ruim	$80 < IGG < 160$
Péssimo	$IGG > 160$

Segundo Bernucci *et al* (2006), no diagnóstico de pavimentos, deve-se ter cuidado com o uso do IGG, uma vez que para defeitos iguais, podem ser gerados valores de IGG diferentes. Dessa forma, o valor do IGG seria um critério complementar ao diagnóstico funcional do pavimento.

2.4.1.3 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Segundo Echeverria (2011), a Irregularidade Longitudinal é uma das características mais importantes do pavimento, pois ela relaciona vários elementos que conferem a boa funcionalidade da estrutura, e consegue estimar a percepção do usuário com a qualidade da rodovia, servindo de elo entre os usuários e os gestores da via, o que o torna um parâmetro bastante interessante do ponto de vista da Gerência de Pavimentos.

Sua importância na área de Gerência de Pavimentos ainda pode ser constatada pela variedade de estudos relativos ao assunto. Visser *et al* (1998) num estudo que aborda o

histórico das medições de Irregularidade Longitudinal na África do Sul, comentam que, para os especialistas do país, o parâmetro é sinônimo de qualidade de rolamento.

Lee e Chatti (2001) procuraram estabelecer relações entre os tipos de defeitos superficiais de um pavimento e a evolução da sua Irregularidade Longitudinal, visando um melhor planejamento de intervenções do seu SGP, na cidade de Michigan, Estados Unidos.

Bunker e Hunt (2004) procuraram estabelecer modelos de previsão de Irregularidade Longitudinal para a região de Queensland, na Austrália.

No Brasil, Barella (2008) contribuiu com estudos envolvendo a instrumentação de avaliação da Irregularidade.

Bernucci *et al* (2006) lembra que a irregularidade longitudinal é definida como um somatório dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano ideal de referência, influenciando na dinâmica do veículo, e, conseqüentemente, no conforto do usuário.

A definição de Barella (2008) para Irregularidade Longitudinal completa a colocada pelos autores acima no sentido de focar que, quanto maior a Irregularidade, maior é a velocidade de degradação do pavimento.

Foi nos relatórios de Sayers et al (1986) que surgiu o principal parâmetro para a medição objetiva da Irregularidade, o IRI (*International Roughness Index*), um índice estatístico, expresso em m/km, que quantifica os desvios da superfície em relação ao plano ideal.

A medição da Irregularidade pode ser realizada por dois tipos de avaliações:

- Avaliação direta: nesse caso, podem ser realizados levantamentos topográficos (nível e mira) e equipamentos como perfilômetros com sensores a laser, entre outros;



Figura - Carro dotado com sensores laser para medição do IRI

- Avaliação indireta: são usados equipamentos tipo-resposta, como o Merlin, ilustrado na Figura - Merlin.



Figura - Merlin

No Brasil, foi desenvolvido um equipamento na década de 1980 do tipo-resposta que fornece um valor de QI (quociente de irregularidade), expresso em contagens/km, que pode ser relacionado ao IRI pela seguinte equação :

$$QI = 13 \times IRI$$

Onde:

QI – Quociente de Irregularidade;

IRI – Índice de Irregularidade Longitudinal.

As normas DNER 164/94-PRO, DNER 182/94-PRO e DNER 229/94-PRO preconizam as calibrações de manutenção de alguns equipamentos de medição de irregularidade.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) classifica as condições de superfície do pavimento em relação à Irregularidade segundo a Tabela - Conceitos segundo o IRI (DNIT, 2006).

Tabela - Conceitos segundo o IRI (DNIT, 2006)

Conceito	Irregularidade	
	QI (cont./km)	IRI (m/km)
Excelente	13-25	1-1,9
Bom	25-35	1,9 - 2,7
Regular	35-45	2,7 - 3,5
Ruim	45-60	3,5 - 4,6
Péssimo	> 60	> 4,6

Barella (2008) elenca como os principais custos relativos à Irregularidade Longitudinal os custos operacionais dos veículos e os custos com a infraestrutura (vida útil do pavimento). Em síntese feita pelo próprio autor, os estudos do HDM realizados nas décadas de 70 e 80 em vários países chegaram a alguns resultados, como:

- Para uma variação de Irregularidade de 25 cont/km para 125 cont/km, um caminhão grande com meia carga reduz sua velocidade média de 70 km/h para 50 km/h;

- Para o mesmo caso anterior, o aumento do consumo dos pneus chega próximo de 15% por conta do aumento da Irregularidade.

Em relação à vida útil, Barella (2008) alerta para o fato que evolução do IRI é diretamente proporcional a sua condição inicial. Ou seja, um pavimento com IRI elevado, tem uma maior variação da sua condição funcional ao longo do tempo/tráfego do que um pavimento com um IRI mais baixo.

Entende-se, portanto, que o conhecimento do comportamento desse parâmetro ao longo dos anos é fundamental para um gestor de pavimentos visando uma programação das atividades de manutenção e reabilitação otimizada.

2.4.2 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

Balbo (2007) define avaliação estrutural de um pavimento como sendo a caracterização completa de seus elementos estruturais e variáveis que interferem no comportamento da estrutura em relação às cargas de tráfego e fatores climáticos atuantes.

O desempenho estrutural do pavimento está diretamente ligado ao seu projeto e dimensionamento. Os defeitos estruturais são consequências da repetição das cargas e vinculam-se às deformações elásticas ou recuperáveis, e plásticas ou permanentes (Bernucci et al, 2006).

Uma condição estrutural incompatível com o nível de tráfego atuante acelera o desenvolvimento de defeitos de superfície, causando a queda da serventia. Concomitantemente, o surgimento de trincas proporciona a infiltração de água na estrutura, acelerando a degradação estrutural, e, por sua vez, as condições de serventia (funcional) do pavimento (Gonçalves, 1997).

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) aponta que se deve associar o desempenho estrutural à preservação dos investimentos, definindo o melhor momento para uma intervenção aquele em que há um menor custo do ciclo de vida da estrutura.

Os procedimentos para análise estrutural do pavimento podem ser feitos por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos. Os ensaios destrutivos são realizados em alguns pontos considerados representativos do trecho e permite a investigação das camadas por meio de

sondagens e prospecções, viabilizando a retirada de amostras de todas as camadas da estrutura e a realização de ensaios de capacidade de carga, como o Índice de Suporte Califórnia.

Atualmente, o principal parâmetro para avaliação estrutural do pavimento é a deflexão, que é a deformação vertical total (deslocamento vertical) sofrida devido a um carregamento imposto à estrutura. Esse parâmetro é medido através de ensaios não destrutivos, sendo os mais usuais a viga Benkelman e o deflectômetro de impacto FWD (*Falling Weight Deflectometer*) (Bernucci et al, 2006; Balbo, 2007).

A partir desses ensaios, são determinados, além da deflexão máxima, outros parâmetros que auxiliam na análise estrutural do pavimento:

- Raio de curvatura: círculo ou arco de parábola que passa por dois pontos da bacia deflectométrica: ponto sob a carga (d_0) e a 25 cm do centro da mesma (d_{25});
- Bacia deflectométrica ou linha de influência longitudinal da carga: valores das deflexões elásticas em vários pontos a partir do centro do carregamento.

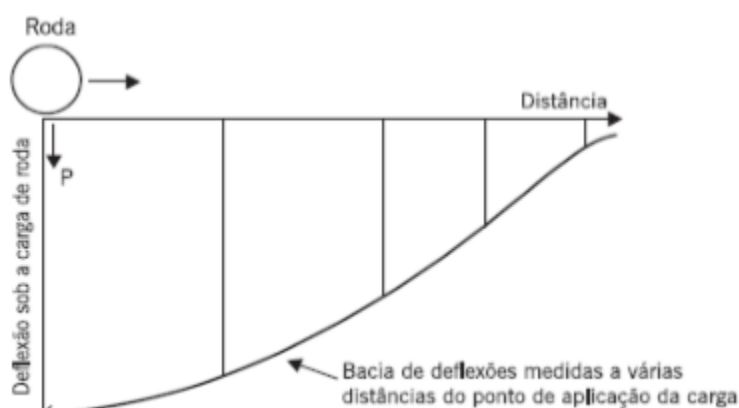


Figura - Obtenção da bacia deflectométrica por meio das leituras da Viga Benkelman (Bernucci et al, 2006)

2.4.2.1 DETERMINAÇÃO DAS DEFLEXÕES POR VIGA BENKELMAN

A viga Benkelman foi desenvolvida pelo *Bureau of Public Roads* dos EUA na década de 50 e é o equipamento de medida de deflexões mais difundido no Brasil (Balbo, 2007).

Consiste numa haste rígida dotada de um extensômetro e colocada entre um par de rodas do eixo traseiro de um caminhão carregado com a carga-padrão de 8,2 t e 100 psi de pressão nos pneus.

Para realização dos ensaios deve-se fazer uma leitura inicial do extensômetro (L_i) e, após o caminhão percorrer 10 metros de distância da ponta de prova, ou até não haver mais variação de leitura do extensômetro, realizar outra leitura (L_f). Desse modo, é possível se calcular a deflexão causada pela carga do eixo padrão do caminhão pela seguinte equação:

$$d_0 = (L_i - L_f) \times K$$

Onde:

d_0 – Deflexão no ponto de aplicação da carga;

L_i – Leitura inicial;

L_f – Leitura final;

K – Constante da viga (relação entre o braço maior e braço menor).

A Figura 8 representa um croquis da viga Benkelman e a Figura 9 um esquema do sistema da viga e caminhão.

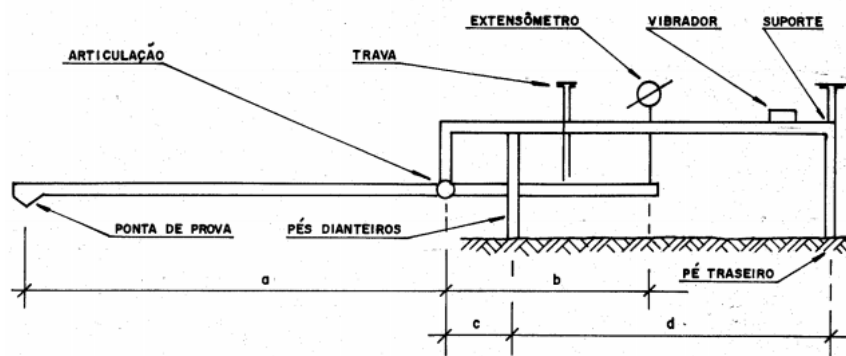


Figura - Croquis da Viga Benkelman (DNER, 1994)

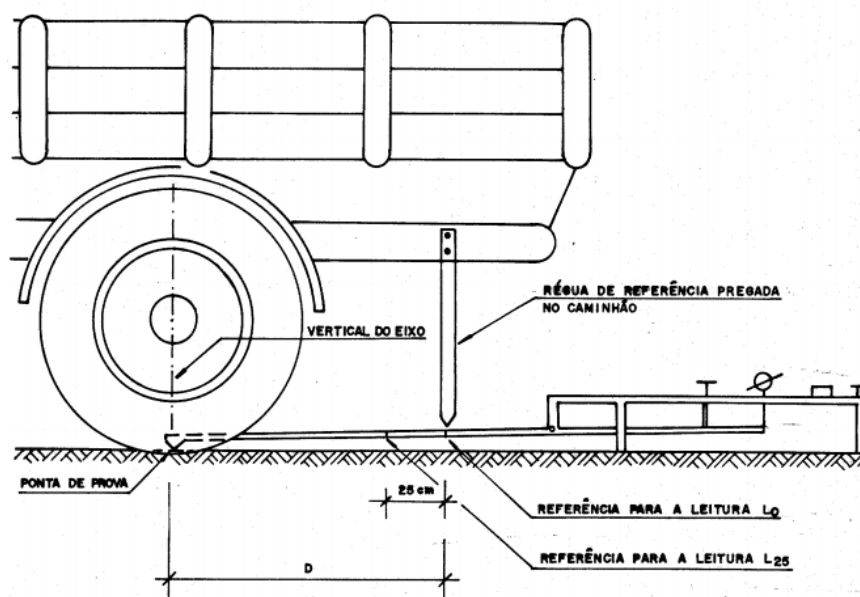


Figura - Sistema Viga Benkelman / Caminhão dotado com o eixo padrão (DNER, 1994)

Para o cálculo do Raio de Curvatura da Bacia Deflectométrica, é necessário a medição da deflexão num ponto a 25 cm de distância (d_{25}) do ponto medido inicialmente (d_0). Dessa maneira, chega-se ao valor do Raio pela seguinte equação:

$$R = \frac{6250}{2 * (d_0 - d_{25})}$$

Onde:

R – Raio de Curvatura;

d_0 – Deflexão no ponto de aplicação da carga;

d_{25} – Deflexão no ponto a 25 cm de distância do ponto de aplicação da carga;

No Brasil, o procedimento de ensaio da viga Benkelman é preconizado pela norma DNER-ME 24/94 (DNER, 1994), bem como todas as equações e procedimentos de cálculo para obtenção dos parâmetros desejados.

Segundo Balbo (2007), existem alguns limitantes que devem ser conhecidos na obtenção das deflexões por meio da Viga Benkelman, dentre eles, destacam-se:

- A precisão do extensômetro não é a ideal para o levantamento (centésimo de milímetros);
- Baixa produção;
- A repetibilidade das leituras pode gerar erros humanos e operacionais.

2.4.2.2 DETERMINAÇÃO DAS DEFLEXÕES POR ENSAIOS COM O FWD

Segundo Bernucci *et al* (2006), os equipamentos mais atuais para medições de deflexões são os de impacto por queda de um peso suspenso a certa altura. O FWD (Falling Weight Deflectometer) parte desse princípio. É um ensaio que avalia a deflexão a partir da aplicação de uma carga dinâmica que busca simular a carga de um par de rodas de caminhão.

No equipamento, existem sensores em vários pontos que permitem avaliar as deflexões não só no ponto de aplicação da carga. Isso facilita a construção da Bacia Deflectométrica.

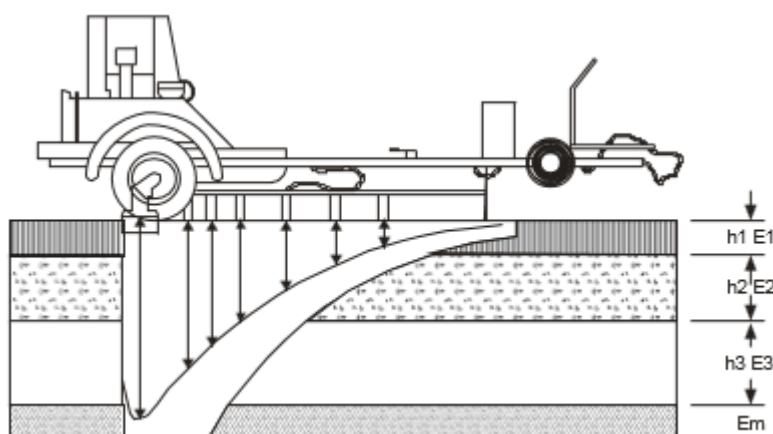


Figura - Figura esquemática do ensaio de FWD (DNIT, 2006)

Bernucci *et al* (2006) elencam algumas vantagens e desvantagens do FWD em relação à Viga Benkelman para determinação das deflexões, conforme Tabela - Vantagens e desvantagens do FWD em relação à Viga Benkelman (Bernucci *et al*, 2006):

Tabela - Vantagens e desvantagens do FWD em relação à Viga Benkelman (Bernucci *et al*, 2006)

Vantagens	Desvantagens
Acurácia nas medições	Custo do equipamento
Possibilidade de aplicação de vários níveis de carga	Necessidade de calibrações mais complexas
Maior produtividade	Diferença de resultados dependendo da marca do equipamento
Ensaio não influenciado pelo operador	
Registro automático de temperatura e de distância dos pontos de ensaios	

O ensaio de FWD, no Brasil, é preconizado pela norma DNER PRO 273/96 (DNER, 1996).

2.4.2.3 CORRELAÇÃO DOS VALORES DE VIGA BENKELMAN E FWD

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), não existem correlações entre os valores de deflexão obtidos pela Viga Benkelman e FWD generalizadas. O ideal é que cada caso seja estudado especificamente.

Porém, com a popularização do FWD no mercado e a necessidade do uso de valores obtidos pela Viga Benkelman para fins de projetos de restauração (as normas de procedimento de restauração do DNIT usam os valores de Viga Benkelman como premissas de projeto), foram realizados alguns estudos no meio acadêmico avaliando essa correlação.

Nesse sentido, Rocha Filho (1996) chegou à seguinte formulação em seus estudos:

$$\frac{d_{fwd}}{d_{vb}} = \frac{1}{6,136 \times 10^{-3} \times h_{rev}^{1,756} + 1}$$

Onde:

Dfwd – Deflexão obtida pelo fwd;

Dvb – Deflexão obtida pela Viga Benkelman;

Hrev – Espessura do revestimento asfáltico em centímetros.

Já Pinto (1991) chegou à seguinte correlação em seus estudos:

$$d_{vb} = -5,73 + 1,396 d_{fwd}$$

Onde:

Dfwd – Deflexão obtida pelo fwd;

Dvb – Deflexão obtida pela Viga Benkelman;

Destacam-se também os trabalhos de Borges (2001) e Fabrício *et al* (1994) nesse sentido.

2.4.3 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO PAVIMENTO

Os materiais de construção apresentam processos de deterioração ao longo do tempo que implicam na alteração de suas propriedades. Sendo assim, os materiais de pavimentação sofrem esse processo e, sua degradação, é acelerada por cargas de veículos, produtos químicos e ações ambientais (Balbo 2007).

O autor ainda trata da deterioração do pavimento sob dois aspectos: a ruptura da estrutura por resistência e por fadiga:

- O mecanismo de ruptura por resistência é relacionado à existência de esforços solicitantes superiores à resistência do material para a solicitação em questão.

- Já a ruptura da estrutura por fadiga está relacionada à modificação da estrutura interna dos materiais constituintes da camada por conta de sucessivas solicitações de tensões inferiores às de ruptura por tração. Com isso, a estrutura inicia um processo de microfissuramento, que, ao evoluir, pode causar a ruptura do material.

Seja qual for a abordagem, a deterioração do pavimento está diretamente ligada a dois fatores externos: tráfego e clima. Para se conhecer mais profundamente como essas ações intervêm na degradação do pavimento, Gonçalves (1997) aponta como fundamental o conhecimento das:

- Propriedades dos materiais das camadas;
- Condições de drenagem;
- Estrutura do pavimento existente.

Para a Gerência de Pavimentos, é de fundamental importância se conhecer como a deterioração do pavimento está evoluindo ao longo do tempo/tráfego. Dessa maneira, uma ferramenta que auxilia a tomada de decisão nesse caso são os Modelos de Previsão de Desempenho, que serão abordados a seguir.

2.5 MODELOS DE DESEMPENHO

Um modelo de previsão de desempenho procura estimar a evolução da condição do pavimento ao longo do tempo levando em consideração variáveis como o tempo, idade da estrutura, composição da estrutura e tráfego. Devido a cada região ter suas particularidades em relação a esses fatores, é necessário se analisar minuciosamente qual o modelo a ser usado para cada caso, pois a escolha de um modelo que não represente a região analisada pode comprometer toda a gerência destes pavimentos. Dessa forma, a decisão sobre qual modelo usar pode definir o sucesso do Sistema de Gerência de Pavimentos (Nascimento, 2005).

Um Sistema de Gerência de Pavimentos procura alocar os recursos disponíveis para a manutenção e reabilitação da via de uma maneira ótima. Dessa maneira, um modelo de desempenho é um componente essencial no SGP, pois ao prever o desempenho do pavimento ao longo do tempo, é possível também prever as datas das atividades de manutenção e quantificar seus custos para que os mesmos sejam otimizados (Fontanele *et al*, 2008).

Haas *et al* (1994) *apud* Soncim (2011) agrupam os modelos de previsão de desempenho em quatro tipos:

- Modelos mecanísticos: modelos que não possuem nenhuma característica empírica. Todas as suas respostas são baseadas em princípios mecanísticos, que têm como dados de saída valores de tensão, deformações e deflexões. Pela grande complexidade de se modelar o comportamento da deterioração da estrutura do pavimento, esse tipo de modelo ainda não vem sendo muito usado nos estudos sobre a área;

- Modelos empírico-mecanísticos: são modelos que partem dos princípios mecanísticos, porém tem correlação com dados empíricos através da realização de análises estatísticas, principalmente de regressão. Como exemplo desse tipo pode-se citar os modelos desenvolvidos por Queiroz (1984) e incorporados ao HDM;

- Modelos empíricos: são modelos que correlacionam parâmetros do pavimento (QI, deflexão...) com variáveis independentes, como solicitação de tráfego, tempo, clima, entre outras, através de análises puramente estatísticas;

- Modelos subjetivos: são modelos construídos a partir de dados colhidos em entrevistas e até vindos da própria experiência dos engenheiros. Uma das técnicas utilizadas na elaboração desses modelos é a técnica de Markov, onde é montada uma matriz de probabilidade procura prever a condição futura do pavimento a partir apenas da sua condição inicial.

2.5.1 MODELOS DESENVOLVIDOS

Alguns dos grandes estudos em nível mundial relacionados ao desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimento foram desenvolvidos no Brasil. A seguir, serão expostos alguns resultados desses estudos:

- **Modelos de Queiroz**

Queiroz (1981) gerou três modelos de previsão de desempenho do Quociente de Irregularidade (QI) a partir de dados obtidos em Goiás, São Paulo e Distrito Federal:

$$\log(QI) = 1,478 - 0,138 \cdot ER + 0,000795 \cdot 0,0224 \cdot \left(\frac{\log(N_{acum})}{SNC} \right)^2$$

$$R^2 = 0,26 \text{ e Erro Padrão} = 0,13$$

$$QI = 21,8 - 7,2 \cdot ER + 5,16 \cdot TR + 0,515 \cdot A + 7,22 \cdot 10^{-5} \cdot (D_{VB} \cdot \log(N_{acum}))$$

$$R^2 = 0,48 \text{ e Erro Padrão} = 10,58$$

$$\log(QI) = 1,391 - 0,1315 \cdot ER + 0,0414 \cdot P + 0,00751 \cdot A + 0,0248 \cdot D_D \cdot \log(N_{acum})$$

$$R^2 = 0,32 \text{ e Erro Padrão} = 0,13$$

$$QI = 12,63 - 5,16 \cdot ER + 3,31 \cdot TR + 0,393 \cdot A + 8,66 \cdot \left(\frac{\log(N_{acum})}{SNC} \right) + 7,17 \cdot 10^{-5} \cdot (D_{VB} \cdot \log(N_{acum}))^2$$

$$R^2 = 0,52 \text{ e Erro Padrão} = 10,22$$

$$\log(QI) = 1,299 - 0,1072 \cdot ER + 0,0415 \cdot P + 0,0623 \cdot A + 0,0856 \cdot \left(\frac{\log(N_{acum})}{SNC} \right) + 0,023 \cdot D_D + \log(N_{acum})$$

$$R^2 = 0,36 \text{ e Erro Padrão} = 0,13$$

Onde:

QI = irregularidade longitudinal dos pavimentos (contagem / km);

ER = variável que indica se o pavimento é restaurado ou não (ER = 0, original; ER = 1, restaurado);

A = idade do pavimento desde a construção ou reabilitação (anos);

Nacum = número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO;

SNC = número estrutural corrigido;

TR = variável indicadora do tipo de revestimento (TR = 0, mistura asfáltica; TR = 1, tratamento superficial);

DVB = deflexão com Viga Benkelman (10-2 mm);

P = porcentagem do pavimento que recebeu reparos de remendos profundos; e

DD = deflexão com Dynaflect (0,001 polegadas = 0,0254mm).

- Modelos de Paterson:

Paterson (1987) elaborou, a partir de regressões estatísticas com dados obtidos no Brasil, equações de previsão de evolução das deformações permanentes em trilhas de roda e irregularidade longitudinal:

$$IRI = [IRI_0 + 725 \cdot (1 + SNC)^{-4,99} \cdot NE_4] \cdot e^{0,0153 \cdot AGE}$$

$$R^2 = 0,75$$

Onde:

IRI = irregularidade longitudinal dos pavimentos (m / km);

IRI0 = irregularidade longitudinal inicial (m / km);

SNC = número estrutural corrigido;

NE4 = representa o número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado com fator de carga da AASHTO (milhões por faixa); e

AGE = idade do pavimento desde a construção, restauração ou reconstrução (anos).

- Modelos de Marcon:

Marcon (1996) elaborou equações de previsão de irregularidade longitudinal, IGG, deflexões e profundidade das trilhas de roda para 2500 km da malha rodoviária do estado de Santa Catarina:

$$QI = 18,348 + 1,1635 \cdot IDADE$$

$$R^2 = 0,29$$

$$QI = 25,783 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot NA - 5 \cdot 10^{-14} \cdot NA^2$$

$$R^2 = 0,32$$

- Modelos de Yshiba:

Yshiba (2003) criou equações que preveem a evolução da irregularidade longitudinal e das deflexões pela Viga Benkelman para a malha viária do estado do Paraná:

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

$$R^2 = 0,75$$

Onde:

IRI = irregularidade longitudinal do pavimento (m / km);

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

$$P(N) = \frac{N - 5 \cdot 10^4}{10^5}, \text{ sendo N o número de solicitações de tráfego; e}$$

$$P(S) = \frac{S - 5,5}{2}, \text{ sendo S o número estrutural corrigido.}$$

Para pavimentos restaurados, por sua vez, foi desenvolvido o modelo apresentado abaixo:

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

$$R^2 = 0,81$$

Onde:

IRI = irregularidade longitudinal do pavimento (m / km);

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

$$P(N) = \frac{N - 5 \cdot 10^4}{10^5}, \text{ sendo N o número de solicitações de tráfego; e}$$

$$P(S) = \frac{S - 5,5}{2}, \text{ sendo S o número estrutural corrigido.}$$

- Modelo de Benevides:

Benevides (2006) elaborou modelos de previsão da evolução do IRI para a malha viária da região metropolitana de Fortaleza/CE.

$$IRI = -0,141 \cdot PCI - 0,0211 \cdot \overset{\text{def}}{DEF} - 0,00641 \cdot TF + 15,636$$

$$R^2 = 0,86$$

$$IRI = -8,303 \cdot PCI - 0,812 \cdot NEC - 0,0050 \cdot TF + 101,844$$

$$R^2 = 0,93$$

Onde:

IRI = irregularidade longitudinal do pavimento (m/km);

PCI = Índice de Condição do Pavimento (%);

DEF = deflexão determinada com FWD (10-2 mm);

NEC = número estrutural corrigido obtido por correlação com a deflexão determinada com FWD; e

TF = porcentagem padrão do defeito Trinca por Fadiga (%).

- Modelo de Vitorello

Vitorello (2008) propôs uma equação de previsão de Irregularidade Longitudinal para uma rodovia do Rio Grande do Sul. O autor chegou na seguinte equação:

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

$$R^2 = 0,51$$

Onde:

QI = quociente de irregularidade (cont. / km);

Nacum = parâmetro representativo do número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO.

i = fator de realização de intervenção ($i=1$, se ocorreu intervenção estrutural; $i=0$, se não ocorreu intervenção)

3 ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo é descrito o cenário de estudo do presente trabalho, bem como a forma de obtenção dos dados usados para as análises e resultados finais. Também são expostas as restrições e premissas adotadas.

3.1 CENÁRIO DE ESTUDO

A estrutura do pavimento analisada corresponde a uma via expressa urbana da cidade do Rio de Janeiro/RJ. Sua construção data de 1998, ano em que a mesma foi liberada ao tráfego.

Atualmente, a rodovia é a principal alça de interligação entre as Zonas Norte e Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro e possui interseções com avenidas também muito importantes para o fluxo da cidade, como a Avenida Brasil, a Linha Vermelha e a Avenida Ayrton Senna, causando um impacto considerável na vida dos moradores do município, além de contribuir significativamente para o tráfego comercial da região.

A rodovia tem 17,4 km de extensão e possui 3 faixas de tráfego por sentido, em praticamente toda sua totalidade, conforme ilustrado na figura Figura - Ilustração das faixas de tráfego da rodovia analisada.

FAIXA 03	PISTA 01
FAIXA 02	
FAIXA 01	
FAIXA 01	PISTA 02
FAIXA 02	
FAIXA 03	

Figura - Ilustração das faixas de tráfego da rodovia analisada

As faixas 01 e 02 correspondem ao tráfego rápido, ou leve, predominantemente, na teoria, trafegada por carros de passeio. Sua velocidade limite é de 100 km/h.

Já as faixas 03 correspondem ao tráfego pesado, com velocidade limite de 80 km/h. Ela é trafegada, em sua maioria, por veículos considerados pesados, como caminhões e ônibus.

A rodovia possui um Posto de Pedágio onde a tarifa é cobrada nos dois sentidos e é proporcional à quantidade de eixos do automóvel passante. Os dados de tráfego da rodovia foram obtidos a partir dos levantamentos diários do tráfego passante nessa Praça de Pedágio.

A Concessionária que administra a rodovia, por força de contrato com o poder concedente, deve apresentar bianualmente relatórios com os levantamentos de Irregularidade Longitudinal (IRI) e levantamentos deflectométricos por FWD, de onde foram obtidos os dados para o presente estudo.

Por conta da não existência de um projeto “*as built*” da rodovia e da não realização de sondagens após a construção da mesma, não foi possível se confirmar qual a espessura da estrutura do pavimento construída, mas sabe-se que o pavimento é flexível, com base e sub-base de brita graduada, com exceção do pavimento existente nas Obras de Arte Especiais.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO

A Concessionária administradora da rodovia forneceu os dados de tráfego diário coletados no Posto de Pedágio referentes aos anos de 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013.

Esses dados foram obtidos a partir de contagens automáticas por sensores instalados juntos às cabines do Posto de Pedágio. Esses sensores viabilizam tanto a contagem volumétrica do tráfego passante, quanto sua caracterização por eixo, o que é fundamental para fins de análise de pavimento.

Os veículos são classificados de acordo com o indicado pelo Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2010), e ilustrado na

Tabela - Correspondência entre categorias de cobrança de pedágio e tipos de veículos (DNIT, 2010)..

Tabela - Correspondência entre categorias de cobrança de pedágio e tipos de veículos (DNIT, 2010).

Categoria	Tipo de veículos	N.º de eixos	Rodagem
1	Automóvel, caminhoneta e furgão	2	simples
2	Caminhão leve, ônibus, Caminhão- trator e furgão	2	dupla
3	Automóvel com semi-reboque e caminhoneta com semi-reboque	3	simples
4	Caminhão, caminhão-trator, Caminhão-trator com semi-reboque e ônibus	3	dupla
5	Automóvel com reboque e Caminhoneta com reboque	4	simples
6	Caminhão com reboque e Caminhão-trator com semi-reboque	4	dupla
7	Caminhão com reboque e Caminhão-trator com semi-reboque	5	dupla
8	Caminhão com reboque e Caminhão-trator com semi-reboque	6	dupla
9	Motocicletas, motonetas e Bicicletas a motor	2	simples

Na análise das solicitações de tráfego para fins de estudos de pavimentos rodoviários, é necessário se realizar uma conversão de cargas de eixos em um número equivalente ao de repetições de um eixo padrão. Para isso, existem dois fatores de conversão comumente usados: fator de equivalência de cargas da AASHTO e fator de equivalências de cargas da USACE.

Balbo (1997) lembra que Fator de Equivalência de Carga (FEC) é uma constante numérica que quantifica o dano causado no pavimento pela passagem de determinado veículo em relação ao dano causado por um veículo padrão adotado em projeto.

Vitorello (2008) comenta que as equações do fator de carga da AASHTO foram desenvolvidas com foco na serventia do pavimento enquanto que o fator da USACE leva em consideração as deformações permanentes às quais a estrutura do pavimento está sujeita.

As equações usadas para a determinação desses fatores estão expostas abaixo:

Tipo de Eixo	Método (P é a carga do eixo em tf)	
	DNER/AASHTO	DNER/USACE
Simplex de roda simples	$\left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$	$2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
Simplex de roda dupla	$\left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$	$1,832 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Duplo Tandem roda dupla	$\left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$	$1,528 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$ (para $P < 11$ tf)
		$1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$ (para $P \geq 11$ tf)
Tandem triplo roda dupla	$\left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$	$8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$ (para $P < 18$ tf)
		$1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$ (para $P \geq 18$ tf)

Figura - Fatores de equivalência de cargas da AASHTO e USACE (Vitarello, 2008)

O número N, definido como a contagem do número de repetições equivalentes do eixo padrão, é definido pela seguinte formulação:

$$N = 365 \times VDM \times FV \times Ff \times Fs \times Fd$$

Onde:

VDM – Volume Diário Médio;

Fv – Fator de Veículo;

Ff – Fator de frota comercial (representa porcentagem de veículos comerciais existentes em relação ao universo da frota);

Fs – Fator de sentido;

Fd – Fator de distribuição de frota por faixa.

O VDM foi obtido através dos dados volumétricos de tráfego disponibilizados pela Concessionária da rodovia.

O Fator de Veículo (FV) é obtido através da seguinte formulação:



$$FV = \frac{\sum (P_i^4 \cdot V_i)}{\sum (P_i^4 \cdot V_i) + \sum (P_j^4 \cdot V_j)}$$

Onde: FV – Fator de veículo;
 P_i – Carga nominal do eixo (em toneladas) em relação ao eixo padrão de 8,17 toneladas;
 V_i – Volume de veículos de carga de eixo P_i em relação ao eixo padrão de 8,17 toneladas.

O Fator de Sentido (F_s) varia em função da quantidade de sentidos da rodovia e de como foi realizada essa contagem: somente em um sentido ou nos dois sentidos. Para uma contagem realizada nos dois sentidos, tem-se $F_s = 0,5$.

O Fator de Distribuição de Frota por Faixa representa a porcentagem de tráfego na faixa de projeto. A tabela abaixo mostra os valores adotados pelo Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2011) para esse parâmetro.

Tabela - Fator de Distribuição de Frota (DNIT, 2011)

Número de faixas de Tráfego da rodovia	Porcentagem de veículos comerciais na faixa de projeto
2 (uma simples)	40 %
3 (uma dupla)	35 a 40 %
4 ou mais (uma dupla)	25 a 30 %

Dessa forma, são listadas abaixo todas as premissas adotadas para a caracterização do tráfego e obtenção do número N para a realização do estudo:

- O VDM foi obtido através das contagens volumétricas disponibilizadas pela Concessionária;
- Para o cálculo das equivalências de carga e, consequentemente, do Fator de Veículo, foram consideradas as cargas legais dos veículos (100% carregados) e as equações da USACE (prepare-se para explicar à banca porque tanta agressividade considerando 100% da carga legal);
- O Fator de Frota Comercial (F_f) foi adotado como 1,0, pois o tráfego caracterizado já é o comercial;
- Como as contagens realizadas foram nos dois sentidos, foi adotado um Fator de Sentido de 0,5;
- Considerou-se que 80% do tráfego transita pela faixa externa (direita) da rodovia, adotando-se, então, um Fator de Distribuição de Frota (F_d) de 0,8.

3.3 INFORMAÇÕES SOBRE O PAVIMENTO

Para a realização do estudo, a Concessionária disponibilizou os levantamentos deflectométricos do ano de 2011 e de Irregularidade Longitudinal de 2009, 2011 e 2013.

O levantamento deflectométrico foi realizado por uso de equipamentos do tipo FWD, de 100 m em 100 m. As medições da deflexão foram realizadas nos pontos de aplicação da carga e a 20 mm, 30 mm, 45 mm, 65 mm, 90 mm e 120 mm. A Tabela - Parte do relatório gerado referente ao levantamento deflectométrico por meio do FWD ilustra o relatório gerado pelo ensaio.

Tabela - Parte do relatório gerado referente ao levantamento deflectométrico por meio do FWD

Ponto km	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora	
		Df1 0	Df2 20	Df3 30	Df4 45	Df5 65	Df6 90	Df7 120	Ar	Pav.		
17,050	3.760	61,4	47,1	35,0	28,1	16,3	12,1	7,2	17	20	21/07/12	1:23 AM
16,950	3.803	65,7	44,7	29,5	17,4	7,2	5,3	3,2	17	20	21/07/12	1:22 AM
16,850	3.824	46,9	29,1	20,4	13,0	6,2	2,4	1,4	17	20	21/07/12	1:21 AM
16,750	3.817	51,9	34,9	26,5	18,2	10,1	6,1	4,0	17	20	21/07/12	1:21 AM
16,650	3.824	34,0	23,6	17,1	13,3	7,1	5,3	3,3	17	20	21/07/12	1:20 AM
16,550	3.831	34,4	25,4	18,3	13,8	7,2	4,9	4,3	17	20	21/07/12	1:19 AM
16,450	3.831	61,2	42,9	30,0	21,8	13,4	8,3	4,2	17	20	21/07/12	1:18 AM
16,350	3.831	73,9	49,3	34,5	17,7	7,4	1,9	0,2	17	20	21/07/12	1:18 AM

Os levantamentos da Irregularidade Longitudinal foram realizados por meio de um perfilômetro a laser, obtendo-se, assim, os valores de IRI médio das trilhas de roda interna e externa, conforme ilustrado na Tabela - Parte do relatório do levantamento de IRI gerado em 2013.

Tabela - Parte do relatório do levantamento de IRI gerado em 2013

KmInicial	KmFinal	Extensão (m)	IRI (m/ Km)	
			TRI	TRE
00+000	00+200	200	4,0	4,5
00+200	00+400	200	2,5	3,0
00+400	00+600	200	2,3	3,4
00+600	00+800	200	2,4	2,3
00+800	01+000	200	1,8	2,0
01+000	01+200	200	1,6	2,3
01+200	01+400	200	2,4	2,6
01+400	01+600	200	1,8	2,1
01+600	01+800	200	2,0	2,5

3.4 INTERVENÇÕES REALIZADAS

A Concessionária disponibilizou o histórico de intervenções realizados no período entre 2009 e 2013. Essas intervenções são padronizadas sempre com a mesma solução, a saber,

A Figura - Trecho do diagrama unifilar de intervenções de 2012/2013 ilustra uma parte do diagrama unifilar montado para auxiliar no referenciamento dos trechos que sofreram intervenção.



Para as análises, foram usados os dados relativos à faixa externa (direita) do sentido Norte da rodovia.

4 MÉTODO

Com os dados em mão, partiu-se para a realização das análises: avaliar a condição estrutural do pavimento e montagem de uma equação de desempenho funcional do pavimento, a qual leva em consideração fatores estruturais do pavimento.

4.1 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL

Para a realização da avaliação estrutural do pavimento, foram tomadas como base as deflexões obtidas no levantamento de 2012. Como o levantamento foi realizado pelo equipamento FWD com leituras das deflexões em vários pontos, e não só no ponto de aplicação da carga, montaram-se as bacias deflectométricas e seus respectivos raios de curvatura.

As medidas de deflexão e os parâmetros obtidos através das análises das bacias deflectométricas permitem uma melhor análise das condições estruturais do pavimento.

4.1.1 DIVISÃO EM TRECHOS HOMOGÊNEOS

Primeiramente, buscou-se dividir o trecho em segmentos homogêneos, ou seja, trechos que apresentem similaridade no seu comportamento funcional, estrutural e de tráfego (Balbo, 2007).

Um método objetivo para se realizar a divisão do trecho em trechos homogêneos é o método da AASHTO (1993) realizado por meio do acúmulo das diferenças acumuladas.

Esse método consiste em dividir os trechos em função de suas características deflectométricas, e, segundo Bernucci *et al* (2006), tem quatro etapas:

- Cálculo do valor médio da deflexão entre dois pontos;
- Cálculo da diferença entre cada valor individual e a média calculada;
- Cálculo dos valores acumulados das diferenças;

- Traçado do gráfico Valores acumulados das diferenças x Distância.

A Figura - Exemplo da delimitação de trechos homogêneos pelo método da AASHTO (Bernucci et al, 2006) aponta um exemplo do uso dessa técnica para delimitação dos subtrechos homogêneos. Os segmentos são definidos sempre que há uma mudança no comportamento do coeficiente angular da curva.

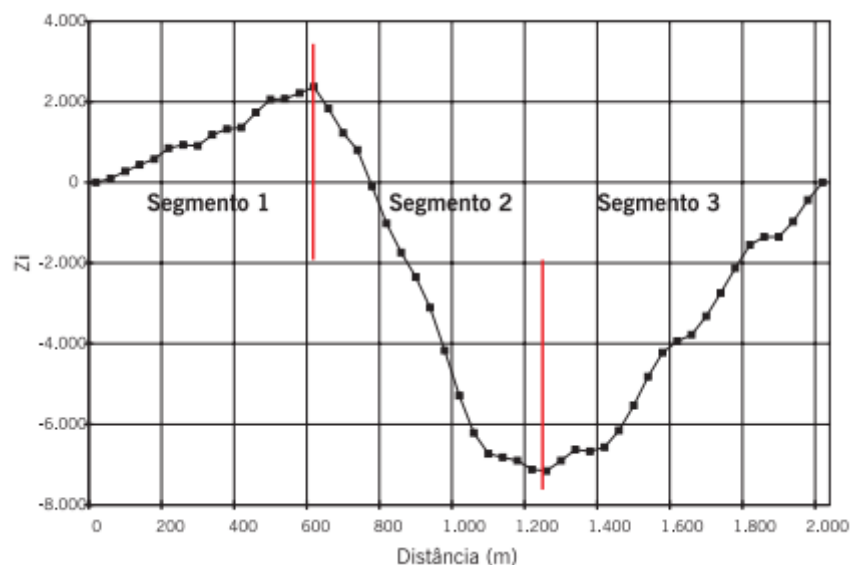


Figura - Exemplo da delimitação de trechos homogêneos pelo método da AASHTO (Bernucci et al, 2006)

4.1.2 CÁLCULO DAS DEFLEXÕES CARACTERÍSTICAS

Com a determinação dos trechos homogêneos pelo Método da AASHTO, ou seja, trechos que possuem características deflectométricas semelhantes, buscou-se definir o valor das deflexões características de cada trecho.

Para isso, foi empregado o procedimento estatístico previsto na DNIT PRO 11/79 e DNIT PRO 269/94. No procedimento constam as seguintes etapas:

- Calcula-se a média aritmética dos valores deflectométricos individuais;
- Determina-se o desvio-padrão da amostra;
- Estabelecem-se os limites superior e inferior através da seguinte formulação:

$$Limites = D \pm z\sigma$$

Onde:

D – Deflexão média;

σ – Desvio-padrão da amostra;

z – É um valor estimado em função do número de amostras, segundo a

Tabela - Valor de z em função do número de indivíduos da amostra (DNIT, 1979)..

Tabela - Valor de z em função do número de indivíduos da amostra (DNIT, 1979).

Número de componentes da amostra	Valor de z
3	1
4	1,5
5-6	2
7-19	2,5
> 20	3

- Caso algum dos valores individuais fique fora do intervalo delimitado pelos limites definidos anteriormente, ele deve ser eliminado da amostra e o cálculo dos limites é refeito. Esse procedimento é repetido até que todos os valores individuais restantes estejam dentro do intervalo;

- Encerrado todos os passos acima, o valor da Deflexão Característica (D_c) do trecho homogêneo é dada por:

$$D_c = D + \sigma$$

4.1.3 DETERMINAÇÃO DAS DEFLEXÕES ADMISSÍVEIS

Uma das formas que foi buscada de se avaliar estruturalmente as condições do pavimento foi através da comparação entre deflexões admissíveis e deflexões características dos trechos homogêneos.

As formulações de deflexões admissíveis usadas foram obtidas nas normas DNER PRO 11/79 (DNER, 1979) e do DNER PRO 269/94 (DNER, 1994), e estão mostradas na Tabela 9:

Tabela - Equações para obtenção das Deflexões Admissíveis
DNER PRO 11/79 **DNER PRO 269/94**

$3,01 - 0,176 \times \log_{10} N$	$3,148 - 0,188 \times \log_{10} N$
$D_{adm} = 10^{\dots}$	$D_{adm} = 10^{\dots}$

Onde: N é o número de solicitações do eixo padrão do tempo de projeto.

As duas formulações para obtenção das Deflexões Admissíveis partem da premissa que esse valor de deflexão máxima permissível é em função apenas do número de solicitações do

eixo padrão acumulado ao longo do tempo. Essa analogia tenta relacionar essas duas variáveis (D_{adm} e N) tendo em vista um limite de ruptura por perda de serventia (Balbo, 2007).

Para realizar o cálculo das deflexões admissíveis, se fez necessário a obtenção do número N acumulado, ou seja, relacionado ao tempo de abertura de tráfego da rodovia: de 1998 a 2012.

Como os dados de tráfego disponibilizados pela Concessionária abrangem apenas o período entre 2009 e 2013, foi-se necessário fazer uma estimativa estatística do tráfego entre 1998 e 2009. Essa estimativa foi realizada através de uma análise do crescimento ano a ano dos dados entre 2009 e 2013. Com isso, foi possível chegar num fator de decréscimo de tráfego, estimando assim, o tráfego dos anos anteriores a 2009 e, consequentemente, o número N acumulado.

4.1.4 CONSTRUÇÃO DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS

A construção das bacias deflectométricas com os dados médios para cada trecho homogêneo também é outra importante forma de análise estrutural do pavimento.

A construção das bacias de cada trecho se fez pelo uso das deflexões médias de cada ponto obtido pelo ensaio FWD: no ponto de aplicação de carga, e a 20 mm, 30 mm, 45 mm, 65 mm, 90 mm e 120 mm de distância do ponto de aplicação.

Para o cálculo do raio de curvatura da bacia, foi usada a seguinte equação:

$$R = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})}$$

Onde:

R – Raio de Curvatura;

D_0 – Deflexão no ponto de aplicação da carga;

D_{25} – Deflexão medida a 25 mm do ponto de aplicação da carga, obtida através de interpolação.

4.2 MODELO DE DESEMPENHO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Com os dados de tráfego (número N), de irregularidade longitudinal e das intervenções de 2009, 2011 e 2013, e com os resultados da avaliação estrutural realizada, foi-se em busca da construção de um modelo de previsão de desempenho funcional do pavimento em questão.

O objetivo era avaliar quais parâmetros tinham correlação com a evolução da Irregularidade Longitudinal e, assim, montar um modelo que representasse essa evolução.

Para isso, foi necessário recorrer a algumas técnicas estatísticas para montagem e validação dos modelos.

4.2.1 REGRESSÃO LINEAR COM MÚLTIPLAS VARIÁVEIS

A regressão linear com múltiplas variáveis consiste numa abordagem empregada quando o ajuste por uma reta não descreve bem o comportamento de um conjunto de dados, sendo necessário levar em considerações outras variáveis no modelo.

A objetivo da regressão é obter uma relação entre a variável estudada (dependente) e as variáveis que se pretende chegar numa relação com a variável dependente, chamadas de variáveis independentes.

O modelo a ser obtido é denotado por:

$$y = X\beta + e$$

Onde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ \vdots & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}; \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}; \quad e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}$$

Onde:

- y é o vetor das observações (variável dependente);
- X é a matriz das variáveis independentes;

- β é a matriz dos coeficientes;
- e é um vetor dos erros aleatórios.

Esse problema pode ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados, onde se chega na seguinte solução para a matriz β :

$$\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t y$$

Dessa forma, na abordagem matricial do problema da regressão linear com múltiplas variáveis, o modelo ajustado é representado por:

$$\hat{y} = X \hat{\beta}$$

A diferença entre a observação y_i e o valor ajustado \hat{y}_i é um erro residual:

$$e = y - \hat{y}$$

- Coeficiente de Correlação de Pearson (R^2)

Um dos parâmetros que foram usados para analisar a relação linear entre as variáveis estudadas foi o coeficiente de correlação de Pearson (R^2), dado pela seguinte equação:

$$R^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}$$

Onde:

- y é o valor observado;
- \hat{y} é o valor ajustado.
- \bar{y} é o valor médio das observações.

Quanto mais o valor do coeficiente de Pearson se aproximar da unidade, maior será a validade da regressão.

- Intervalo de Confiança para Regressão

Nos modelos de regressão múltipla, é frequentemente útil construir estimativas de intervalo de confiança para a resposta média em determinado ponto, como forma de avaliação da aceitação da regressão. O desenvolvimento de um procedimento para obter esses intervalos de confiança requer que os erros e_i sejam normal e independentemente distribuídos com média zero e variância σ^2 , dada por:

$$\sigma^2 = \frac{y^t y - \hat{\beta}^t X^t y}{n - p}$$

Onde $n-p$ representa o grau de liberdade, ou seja, a diferença entre n (número de observações das variáveis independentes) e p (número de variáveis independentes).

Seja o ponto $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}$, definido pelo vetor:

$$x_0 = \begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ \vdots \\ x_{0k} \end{bmatrix}$$

A resposta média do valor ajustado nesse ponto é:

$$\hat{y}_o = x_0^t \hat{\beta}$$

Um intervalo de confiança de $(100 - \alpha) \%$ para essa futura observação é dado por:

$$y_o = \hat{y}_o \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-p} \sqrt{\sigma^2 (1 + x_0^t (X^t X)^{-1} x_0)}$$

Onde t representa a distribuição de Student para o grau de liberdade $n-p$.

4.2.2 PREMISSAS PARA A MONTAGEM DOS MODELOS

A montagem do modelo foi realizada usando dados de apenas uma faixa de tráfego da rodovia, sendo ela uma das faixas externas, justamente a que recebe maior solicitação do tráfego.

Os dados usados para a elaboração dos parâmetros do modelo foram:

- Dados de tráfego de 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013;
- Avaliação estrutural realizada baseada nos resultados de ensaios FWD de 2012;
- Levantamento do IRI de 2009, 2011 e 2013.
- Intervenções realizadas em entre 2009 e 2013 no pavimento da faixa mencionada.

Com isso, buscou-se viabilizar a montagem de um modelo de previsão de Irregularidade Longitudinal com as seguintes variáveis mostradas na Tabela 10:

Tabela - Variáveis usadas na montagem do modelo

VARIÁVEL DEPENDENTE	IRI Final
VARIÁVEIS INDEPENDENTES	IRI Inicial
	Intervenção
	Número N
	Deflexão Característica
	Raio Médio

- O IRI Final corresponde ao IRI do ano de análise;
- O IRI Inicial corresponde ao levantamento anterior de IRI em relação ao ano de análise;
- A Intervenção representa se houve intervenção, ou não, no período entre o ano do levantamento do IRI Inicial e do IRI Final. Para isso, foi usada uma variável do tipo *dummy*:
 - 0 □ Não houve intervenção no período;
 - 1 □ Houve intervenção no período.
- O número N usado foi o calculado para o ano do IRI Final;
- Deflexão característica foi aquela calculada nos levantamentos defletoométricos do ano de 2012 para cada trecho homogêneo;
- O Raio Médio foi calculado a partir das médias dos raios de curvaturas das bacias defletoométricas obtidas para cada trecho homogêneo determinado pelos levantamentos defletoométricos de 2012.

4.2.3 REGRESSÃO 01 – SEM CRITÉRIO EXPURGATÓRIO

Primeiramente, para se avaliar o grau de correlação entre a variável dependente e as variáveis independentes, foi realizada uma regressão linear com múltiplas variáveis onde foi possível obter o valor-p de cada variável. Variáveis com valor-p acima de 5% foram expurgadas do modelo, pois foi admitido que a partir desse valor, a variável não tem influência na regressão.

Após essa análise, era realizada outra regressão, onde o grau de aceitação da regressão passava pelos seguintes critérios estatísticos:

Tabela - Critérios de aceitação para a regressão

Estatísticas da Regressão	
Parâmetro	Critério
R-quadrado ajustado	>50
Valor-F	F > 5xFtabelado
Valor-F tabelado	
Pontos dentro do intervalo de confiança	>80%

4.2.4 REGRESSÃO 02 – COM CRITÉRIO EXPURGATÓRIO

Foi realizado um tratamento estatístico nas variáveis independentes com o intuito de avaliar o ganho na qualidade da regressão: em cada trecho homogêneo, foram expurgados os valores de irregularidades observados fora do seguinte intervalo:

$$IRI_{med} - \delta < IRI < IRI_{med} + \delta$$

Onde:

IRI_{med} é o IRI médio de cada trecho homogêneo;

δ é o desvio padrão das amostras de IRI de cada trecho homogêneo;

IRI é o Índice de Irregularidade observado no ponto em análise.

Com esse tratamento estatístico, foi possível tornar os valores de IRI mais uniformes de acordo com a divisão dos trechos homogêneos, tendo em vista que a divisão desses trechos leva em conta um desempenho bastante do pavimento em sua extensão.

Após esse tratamento, todos os procedimentos de análises realizados para a Regressão 01 foram empregados na Regressão 02, com os mesmos critérios de aceitação elencados na Tabela - Critérios de aceitação para a regressão.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo, serão expostos todos os resultados obtidos a partir dos procedimentos de análise empregados no estudo.

5.1 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

Dentro desse tópico, estão inseridos os cálculos do número N e a determinação dos trechos homogêneos, bem como de seus parâmetros (deflexão característica, admissível e bacia deflectométrica). Além disso, é discutida a condição estrutural do pavimento baseado nas análises deflectométricas, comparação com deflexões admissíveis preconizadas pelo DNIT e nas bacias de deflexão.

5.1.1 CÁLCULO DO NÚMERO N

O cálculo do número N se deu em razão de dois motivos:

- Para cálculo das Deflexões Admissíveis, uma vez que as equações desses parâmetros levam em conta o número N acumulado do período em análise. Nesse caso, foi determinado o número N acumulado entre 1998 (liberação ao tráfego) até 2013.
- Para uso como variável independente do modelo de previsão de desempenho da Irregularidade Longitudinal, tentando-se achar uma correlação entre as duas variáveis. Nesse caso, foi determinado o número N dos anos em análise.

Os dados de tráfego disponibilizados pela Concessionária entre 2009 e 2013 permitiram a obtenção da média de tráfego diário por categoria de veículo e, consequentemente, o cálculo do VDM para cada ano, conforme observado na Tabela - Tráfego diário por categoria e o VDM.

Tabela - Tráfego diário por categoria e o VDM

	CATEGORIAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	VDM
2009	104.724	5.801	724	110	156	46	37	3	3.727	115.327
2010	110.365	6.073	860	106	193	58	41	2	4.317	122.015
2011	116.622	6.186	901	108	237	65	44	2	5.123	129.288
2012	121.934	5.982	862	102	248	82	40	3	5.889	135.142
2013	126.332	6.278	948	103	276	108	47	2	6.599	140.694

Conforme observado na Tabela - Tráfego diário por categoria e o VDM e ilustrado na Figura - VDM ano a ano (2009 - 2013), observa-se que o tráfego diário vem aumentando ano a ano na rodovia.

Figura - VDM ano a ano (2009 - 2013)

A média de crescimento desse tráfego foi calculada baseada na variação do VDM ano a ano, conforme exposto na

Tabela - Variação do VDM ano a ano e ilustrado na Figura - Variação do VDM ano a ano e sua média.

Tabela - Variação do VDM ano a ano

VARIAÇÃO VDM	
2009-2010	5,80%
2010-2011	5,96%
2011-2012	4,53%
2012-2013	4,11%
Média	5,10%

Figura - Variação do VDM ano a ano e sua média

Dessa maneira, o valor da média da variação, 5,10%, foi usado para se estimar o VDM dos anos anteriores. Dessa maneira, chegou-se nos seguintes valores expostos Tabela - VDM dos anos anteriores a 2009.

Tabela - VDM dos anos anteriores a 2009

ANO	VDM
1998	64.850
1999	68.334
2000	72.005
2001	75.874
2002	79.951
2003	84.247
2004	88.773
2005	93.543
2006	98.569
	103.86
2007	5
	109.44
2008	6

A Figura - VDM ano a ano (1998 a 2013) ilustra os valores de VDM que foram obtidos após o uso da média de 5,10 % de variação de tráfego para os anos entre 1998 e 2008, e os dados de VDM que a Concessionária disponibilizou relativos ao período entre 2009 e 2013.

Figura - VDM ano a ano (1998 a 2013)

Para o cálculo do número N, além de se fazer necessário o VDM, também deve ser conhecida a distribuição de tráfego em relação às categorias de número de eixos dos veículos. Para isso, foi considerada a distribuição do ano de 2009 (exposta na Tabela - Distribuição do tráfego diário em relação às categorias de veículos (2009 - 2013).), por ser o ano com dados reais disponibilizados pela Concessionária mais próximo dos anos da estimativa (1998-2008).

Tabela - Distribuição do tráfego diário em relação às categorias de veículos (2009 - 2013).

	CATEGORIA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	TOTAL
2009	104.724	5.801	724	110	156	46	37	3	3.727	115.327
	90,8%	5,0%	0,6%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	3,2%	100%
2010	110.365	6.073	860	106	193	58	41	2	4.317	122.015
	90,5%	5,0%	0,7%	0,1%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	3,5%	100%
2011	116.622	6.186	901	108	237	65	44	2	5.123	129.288
	90,2%	4,8%	0,7%	0,1%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	4,0%	100%

			%	%	%	%	%	%		
2012	121.934	5.982	862	102	248	82	40	3	5.889	135.142
	90,2%	4,4%	0,6%	0,1%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	4,4%	100%
2013	126.332	6.278	948	103	276	108	47	2	6.599	140.694
	89,8%	4,5%	0,7%	0,1%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	4,7%	100%

Feitas todas essas considerações, a caracterização do tráfego entre 1998 e 2013 ficou conforme exposta na Tabela - Caracterização do tráfego diário (1998-2013).

Tabela - Caracterização do tráfego diário (1998-2013)

	CATEGORIA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	TOTAL
1998	58.888	3.262	407	62	87	26	21	1	2.096	64.850
1999	62.052	3.437	429	65	92	27	22	2	2.208	68.334
2000	65.386	3.622	452	69	97	29	23	2	2.327	72.005
2001	68.899	3.817	476	72	102	30	24	2	2.452	75.874
2002	72.601	4.022	502	76	108	32	26	2	2.584	79.951
2003	76.502	4.238	529	80	114	33	27	2	2.722	84.247
2004	80.612	4.466	557	85	120	35	28	2	2.869	88.773
2005	84.943	4.706	587	89	126	37	30	2	3.023	93.543
2006	89.507	4.958	619	94	133	39	32	2	3.185	98.569
2007	94.317	5.225	652	99	140	41	33	2	3.356	103.865
2008	99.384	5.506	687	104	148	43	35	2	3.537	109.446
2009	104.724	5.801	724	110	156	46	37	3	3.727	115.327
2010	110.365	6.073	860	106	193	58	41	2	4.317	122.015
2011	116.622	6.186	901	108	237	65	44	2	5.123	129.288
2012	121.934	5.982	862	102	248	82	40	3	5.889	135.142
2013	126.332	6.278	948	103	276	108	47	2	6.599	140.694

A obtenção do número N foi realizada considerando os Fatores de Veículo determinados na Tabela - Fatores de Veículo.

Tabela - Fatores de Veículo CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS						
FV USACE	2C	3C	2S1	2S2	2S3	3S3
	3,57	8,83	6,86	12,12	12,87	18,13

Dessa maneira, foram obtidos os seguintes resultados para o número N:

Ano	N no ano	N Acumulado
1998	2,37,E+06	2,37,E+06
1999	2,50,E+06	4,87,E+06
2000	2,64,E+06	7,51,E+06
2001	2,78,E+06	1,03,E+07
2002	2,93,E+06	1,32,E+07
2003	3,08,E+06	1,63,E+07
2004	3,25,E+06	1,95,E+07
2005	3,42,E+06	2,30,E+07
2006	3,61,E+06	2,66,E+07
2007	3,80,E+06	3,04,E+07
2008	4,01,E+06	3,44,E+07
2009	4,22,E+06	3,86,E+07
2010	4,56,E+06	4,32,E+07
2011	4,69,E+06	4,79,E+07
2012	4,56,E+06	5,24,E+07
2013	4,88,E+06	5,73,E+07

5.1.2 LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO E DIVISÃO DO TRECHO EM SEGMENTOS HOMOGÊNEOS

O levantamento deflectométrico disponibilizado pela Concessionária refere-se ao ano de 2012. Os ensaios FWD foram realizados em toda a extensão da faixa de tráfego estudada, com exceção nas Obras de Arte Especiais. A Figura - Deflexões ao longo do trecho ilustra as deflexões obtidas para o trecho.

Figura - Deflexões ao longo do trecho

Observam-se grandes variações nos valores de deflexão, com as mais altas em torno de $90 \times 0,01$ mm e as mais baixas por volta de $5 \times 0,01$ mm. Essas grandes variações podem acontecer por conta principalmente da variação da estrutura do pavimento e das condições das camadas. Uma vez que trecho estudado é curto, com apenas 17,2 km, não é provável que essas variações de deflexão se deem por conta de variações no nível de solicitações de tráfego, tampouco por questões de variações climáticas ao longo da extensão, já que todo o trecho está dentro de uma mesma realidade climática.

Buscou-se, então, dividir o trecho em seguimentos homogêneos baseados em seu comportamento deflectométrico, justamente para identificar os trechos que se comportam de maneira similar. Para isso, foi aplicado o Método preconizado pela

AASTHO (1993), que é baseado no Método das Diferenças Acumuladas, para divisão do trecho em subtrechos homogêneos, gerando-se o gráfico ilustrado na Figura - Gráfico resultante do método da AASTHO para divisão do trecho em subtrechos homogêneos (ou 22?).

Figura - Gráfico resultante do método da AASTHO para divisão do trecho em subtrechos homogêneos

O Método da AASTHO indica que sempre que houver uma mudança no comportamento do coeficiente angular da curva, os segmentos devem ser delimitados, pois há uma mudança no comportamento deflectométrico do pavimento.

As retas paralelas ao eixo das ordenadas no gráfico ilustrado na Figura - Gráfico resultante do método da AASTHO para divisão do trecho em subtrechos homogêneos indicam a delimitação dos trechos homogêneos. Dessa forma, foram definidos quatro trechos homogêneos dentro da extensão estudada, aqui chamados de: Subtrecho 01, Subtrecho 02, Subtrecho 03 e Subtrecho 04.

A Tabela - Extensões dos subtrechos homogêneos expõe as extensões de cada Subtrecho:

Tabela - Extensões dos subtrechos homogêneos

Subtrecho	Extensão (m)
Subtrecho 01	4.400
Subtrecho 02	2.100
Subtrecho 03	4.600
Subtrecho 04	5.600

5.1.2.1 DETERMINAÇÃO DAS DEFLEXÕES CARACTERÍSTICAS E BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS DO SUBTRECHOS

Primeiramente, foram realizados os cálculos das deflexões admissíveis para o ano de 2012, baseados em procedimentos do DNIT, para comparação com os valores das deflexões características.

Ano	N Acumulado	Dadm (PRO-11)	Dadm (PRO-269)
2012	5,24,E+07	44,81	49,74

Para a determinação das deflexões características e raios de curvatura de cada subtrecho homogêneo, foi usado o procedimento preconizado pelas normas do DNER PRO-11/79 (DNER, 1979) e DNER PRO-269/94 (DNER, 1994).

Os critérios usados nas análises foram os preconizados pela PRO-11 (DNER, 1979) e expostos na Tabela - Critérios de avaliação estrutural da PRO-11 (DNER, 1979)..

Tabela - Critérios de avaliação estrutural da PRO-11 (DNER, 1979).

Hipótese	Critérios	Qualidade Estrutural	Necessidade de estudos complementares	Mediadas corretivas
1	$D_p \leq D_{adm}$	BOA	NÃO	Apenas correção de superfície
	$R \geq 100$			
2	$D_p > D_{adm}$	Se $D_c \leq 3D_{adm}$ Regular	NÃO	Reforço
	$R \geq 100$	Se $D_c > 3D_{adm}$ Má	SIM	Reforço ou reconstrução
3	$D_p \leq D_{adm}$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Reforço ou reconstrução
	$R < 100$			
4	$D_p > D_{adm}$	MÁ	SIM	Reforço ou reconstrução
	$R < 100$			

Esses critérios estabelecidos pela PRO-11 consideram que as avaliações dos valores de deflexão individuais não caracterizam bem sua condição estrutural. O conceito de raio entra como forma de se avaliar melhor a distribuição dos esforços nas camadas.

Tem-se que, para deflexões individuais baixas a raios altos (hipótese 01), há uma qualidade estrutural boa do pavimento, pois além dos valores de deflexão estarem com sua

magnitude baixa, os valores altos dos raios representam uma boa distribuição dos esforços nas camadas.

Quando as deflexões são mais altas e os raios também (hipótese 02), há uma indicação da boa distribuição dos esforços nas camadas, por conta dos valores dos raios, mas, por algum motivo, houve um pico na deflexão. Provavelmente, nesse caso há algum problema relacionado ao subleito por conta da associação dos valores altos de deflexão com uma boa distribuição dos esforços nas camadas de base e sub-base.

No caso de deflexões baixas e raios baixos (hipótese 03), se requer um maior estudo sobre o caso, pois as deflexões baixas indicam que não há grandes problemas nas camadas inferiores, porém, os valores de raio mostram uma provável deficiência na camada do revestimento da estrutura.

No caso de deflexões altas e raios baixos (hipótese 04), o pavimento encontra-se completamente colapsado, com os esforços não se distribuindo da maneira adequada e problemas, provavelmente, em todas as camadas do pavimento.

Dessa forma, os parâmetros dos subtrechos foram calculados e as análises forneceram os resultados expostos na Tabela - Resumo dos resultados de cada subtrecho.

Tabela - Resumo dos resultados de cada subtrecho

	Subtrecho 01	Subtrecho 02	Subtrecho 03	Subtrecho 04
Extensão (m)	4.400	2.100	4.600	5.600
Dc (0,01 mm)	46,6	12,7	67,5	42,1
Raio Médio (m)	277,9	1729,6	172,7	366,6
Dc/Dadm (PRO-11)	1,04	0,28	1,51	0,94
Dc/Dadm (PRO-269)	0,94	0,26	1,36	0,85

Ao se analisar os valores obtidos para cada subtrecho, foi possível enquadrá-los em cada hipótese dos critérios de avaliação da PRO-11, conforme Tabela - Classificação dos subtrechos quanto ao desempenho estrutural (PRO-11)..

Tabela - Classificação dos subtrechos quanto ao desempenho estrutural (PRO-11).

	Hipótese PRO-11	Qualidade estrutural	Medidas corretivas
Subtrecho 01	2	Regular	Reforço
Subtrecho	1	Boa	Apenas correções de superfície

02			
Subtrecho 03	2	Regular	Reforço
Subtrecho 04	1	Boa	Apenas correções de superfície

Para os subtrechos 02 e 04, a qualidade estrutural do pavimento é boa e a norma recomenda apenas correções de superfície, visando manter uma boa condição funcional da estrutura.

Já para os subtrechos 01 e 03, a qualidade do pavimento já é classificada como regular, tendo em vista seus valores de deflexão mais altos, podendo estar indicando algum problema no subleito, mas que, de acordo com a norma, não necessita de uma intervenção mais profunda. A norma sugere a aplicação de um reforço, fazendo com que os esforços atuantes no subleito sejam reduzidos, e, conseqüentemente, sejam diminuídas as magnitudes das deflexões.

O subtrecho 03 merece um ponto de atenção, pois a magnitude das deflexões foram 51% maiores que as deflexões admissíveis pela PRO-11 e 36% maiores que a da PRO-269. Além disso, seu raio de curvatura foi o que apresentou valor médio menor quando comparado com os outros subtrechos. Sendo assim, esse subtrecho foi classificado como o pior em relação ao desempenho estrutural no trecho estudado.

O subtrecho 02 apresentou deflexões baixíssimas quando comparados aos outros subtrechos, ficando com a relação Deflexão Característica / Def. Admissível menor que 0,3, tanto para a PRO-11 quanto para PRO-269. Ao investigar o fato, foi descoberto que a construção original desse subtrecho se deu com pavimento rígido, e, anos após sua construção, foi realizado um recapeamento com revestimento asfáltico sobre essa estrutura. Sendo assim, sua estrutura hoje é um pavimento semi-rígido, o que justifica valores de deflexões tão baixos em sua extensão.

As bacias deflectométricas de cada subtrecho também foram construídas, baseadas nas deflexões médias dos pontos de leitura dos geofones do ensaio de FWD (Figura – Bacias de deflexão de cada subtrecho homogêneo).

Figura – Bacias de deflexão de cada subtrecho homogêneo

Os desenhos gráficos das bacias deflectométricas auxiliam na análise da distribuição dos esforços na estrutura do pavimento. Em geral, bacias com reduções suaves das deflexões sobre as camadas inferiores, e, conseqüentemente com raios de curvaturas maiores, representam uma boa distribuição dos esforços. Já o caso contrário, quando há uma diferença brusca entre as deflexões de camadas adjacentes com raios de curvatura de magnitude mais baixa, merecem um ponto de atenção quanto à condição estrutural do pavimento, pois os esforços não estão se distribuindo de uma maneira uniforme.

Observa-se na Figura – Bacias de deflexão de cada subtrecho homogêneo como o segmento 03 tem uma distribuição de esforços em suas camadas muito menos atenuada que os outros segmentos, além de obter a maior deflexão característica, confirmando assim as análises feitas previamente ao desenho gráfico de que esse é o subtrecho com o pior desempenho estrutural.

5.2 MODELO DE DESEMPENHO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Para os modelos de desempenho, além dos dados de tráfego e deflexões, já abordados anteriormente, foi necessária a utilização dos dados de Irregularidade Longitudinal levantados por ensaios com perfilômetros a laser em 2009, 2011 e 2013 e o histórico de intervenções realizados entre 2009 e 2013.

Buscou-se encontrar uma relação entre o IRI Final (variável dependente) com: o IRI Inicial, Intervenção no período, número N, deflexão característica e raio (variáveis independentes).

Como foi identificado que o subtrecho 02 possui uma estrutura de pavimento semi-rígido, diferente do restante do trecho com estrutura de pavimento flexível convencional (com base e sub-base granulares e revestimento asfáltico), ele foi expurgado das análises. Dessa maneira, a montagem dos modelos se deu apenas nas extensões dos subtrechos 01, 02 e 03.

5.2.1 REGRESSÃO 01 – SEM CRITÉRIO EXPURGATÓRIO

A regressão sem critério expurgatório foi desenvolvida para todos os dados dos subtrechos 01, 03 e 04, sem expurgar nenhum de seus dados.

Primeiramente foi feita uma regressão com todas as variáveis disponíveis para se avaliar o nível de significância de cada uma, para em seguida ser realizada uma regressão final somente com as variáveis significativas. Dessa maneira, foram gerados os parâmetros expostos na Tabela - Coeficiente e valor-P obtidos com todas as variáveis disponíveis – Regressão 01.

Tabela - Coeficiente e valor-P obtidos com todas as variáveis disponíveis – Regressão 01

	Coeficientes	valor-P
Interseção	2,11E-01	0,948385
IRI INICIAL	8,61E-01	1,49E-10
Intervenção	-9,75E-01	1,11E-09
N	7,23E-07	0,2298613
Raio Médio	-4,02E-03	0,0872616
Dc	-3,33E-02	0,0522119

Como o valor-P das variáveis N, Raio Médio e Deflexão Característica (Dc) foram superiores a 0,05 (5%), foi interpretado que elas não possuem significância para a regressão, logo, elas foram excluídas da regressão final.

Foi realizada então outra regressão, só com as variáveis IRI Inicial e Intervenção, resultando nos seguintes resultados:

Variável	Coeficientes	valor-P
Interseção	7,51E-01	0,010598
IRI INICIAL	9,02E-01	2,54E-11
Intervenção	-1,02E+00	2,09E-

		10
--	--	----

Estatísticas da Regressão - 53 observações			
Parâmetro	Valor	Critério	Status
R-quadrado ajustado	0,63	>0,50	Aceito
Valor-F	46,06	F > 5xFtabelado	Aceito
Valor-F tabelado	1,57		
Pontos dentro do intervalo de confiança	100%	>80%	Aceito

Como pode ser observado na tabela acima, a regressão foi aceita para todos os critérios: coeficiente de determinação, teste de significância (valor-F) e porcentagem dos pontos dentro do intervalo de confiança para a resposta média.

Observa-se que todos os pontos resultaram dentro do intervalo de confiança, o que é um aspecto muito positivo para a significância da regressão. A interpretação do intervalo de confiança no caso de uma regressão de previsão de Irregularidade Longitudinal é que dentro desse intervalo, as variações são praticamente imperceptíveis ao usuário quanto ao conforto ao rolamento.

Abaixo, na Tabela - Alguns pontos usados na Regressão 01, seguem alguns pontos usados na regressão 01 e os intervalos de confiança calculados para a resposta média, para ilustração desse tratamento estatístico.

Tabela - Alguns pontos usados na Regressão 01

Intervalo Inferior	Intervalo Superior	Previsão Regressão 01
2,31	2,82	2,57
1,47	2,12	1,79
1,83	2,39	2,11
2,63	3,05	2,84
1,92	2,47	2,19
2,38	2,85	2,61
1,15	1,90	1,52

Dessa maneira, a equação resultante da regressão final 01 foi:

$$IRI = 7,51 \times 10^{-1} + 9,02 \times 10^{-1} \times IRI_0 - 1,02 \times I$$

Onde:

– IRI_0 é o IRI Inicial (levantamento anterior ao ano estudado);

- I é a variável dummy que representa se houve, ou não, intervenção no pavimento no período (0 se não houve, 1 se houve).

Figura - Gráfico ilustrando IRI Previsto x IRI Real

5.2.2 REGRESSÃO 02 – COM CRITÉRIO EXPURGATÓRIO

Nessa regressão, foi adotado que os subtrechos homogêneos têm comportamentos semelhantes, inclusive em relação às suas características funcionais. Dessa maneira, dentro de cada subtrecho homogêneo, foram expurgados valores de IRI fora do intervalo da média do IRI no subtrecho \pm o desvio-padrão:

$$IRI_{med} - \delta < IRI < IRI_{med} + \delta$$

Onde:

- δ : Desvio padrão do subtrecho;
- IRI_{med} : Irregularidade Longitudinal média do subtrecho, em m/km.

Essa consideração foi usada visando obter uma regressão com parâmetros mais relevantes, inclusive aumentando as variáveis de entrada significantes.

Com isso, das 54 observações que haviam sido consideradas na Regressão 01, restaram 33 observações na Regressão 02, uma diminuição de cerca de 39%.

Após esse tratamento estatístico, foi usado o mesmo procedimento da Regressão 01, quando foi realizada uma regressão preliminar para avaliar a significância das variáveis dependentes estudadas na regressão. Dessa maneira, foi obtido como resultado o exposto na

Tabela - Coeficiente e valor-P obtidos com todas as variáveis disponíveis – Regressão 02

.

Tabela - Coeficiente e valor-P obtidos com todas as variáveis disponíveis – Regressão 02

Variável	Coeficientes	valor-P
Interseção	-4,54E+00	0,08073
IRI INICIAL	8,72E-01	6,76E-05
Intervenção	-7,61E-01	5,72E-

		06
N	1,64E-06	0,000804
Dc	-2,96E-02	0,046171
Raio Médio	-4,11E-03	0,056367

Como pode ser observado na

Tabela - Coeficiente e valor-P obtidos com todas as variáveis disponíveis – Regressão 02, após o tratamento estatístico dado em relação à Irregularidade dos subtrechos, as variáveis Deflexão Característica e Número N, junto com IRI Inicial e Intervenção, apresentaram valor-P menor que 5% (0,05), mostrando que são significantes para essa regressão. Já a variável Raio Médio continua com significância baixa para a Regressão, logo ela foi excluída.

Porém, em relação à variável Deflexão Característica, observa-se que seu coeficiente na regressão apresentou-se negativo, $-2,96 \times 10^{-2}$. Ou seja, a tendência do IRI Final seria diminuir com o aumento da Deflexão, quando o esperado é justamente o contrário.

Espera-se que os parâmetros funcionais acompanhem a deterioração estrutural do pavimento, ou seja, quanto maior a Deflexão Característica, mais rápida será a evolução da Irregularidade Longitudinal.

O valor negativo no coeficiente da Deflexão mostra uma inconsistência física, que pode ter sido gerada por alguma incerteza dentro do modelo, tais como: erro no levantamento físico dos dados, o método de divisão dos subtrechos pode não ter caracterizado bem o trecho, e outras incertezas inerentes ao modelo.

Outra possível explicação para essa questão é o fato de na análise da condição estrutural do pavimento, ter havido um decréscimo nas deflexões por conta das intervenções. Como não existem levantamentos deflectométricos posteriores às intervenções, não foi possível se considerar essa variação de deflexão.

Dessa maneira, mesmo com o valor-P sendo menor que 5%, a variável Deflexão Característica foi retirada da Regressão final 02, restando as seguintes variáveis: IRI Inicial, Intervenção, Número N.

Dessa maneira, foi gerada a seguinte regressão final 02:

Variável	Coeficientes	valor -P
	-	0,00207759
Interseção	7,38E+00	
IRI INICIAL	1,07E+00	1,263

		26E-07
Intervenção	-8,72E-01	4,49135E-08
N	1,58E-06	0,001478739

Estatísticas da Regressão			
Parâmetro	Valor Obtido	Critério	Status
R-quadrado ajustado	0,69	>50	Aceito
Valor-F	25,12	F > 5xFtabelado	Aceito
Valor-F tabelado	1,79		
Pontos dentro do intervalo de confiança	100%	>80%	Aceito

Como pode ser observado na tabela acima, a regressão foi aceita para todos os critérios: coeficiente de determinação, teste de significância (valor-F) e porcentagem dos pontos dentro do intervalo de confiança para a resposta média. Comparando-se essa equação com a regressão 01, observa-se um melhor ajuste em relação ao R^2 , o que já era esperado em função do tratamento estatístico de expurgação que foi realizado, pois os dados muito discrepantes dos subtrechos foram excluídos das análises.

Mais uma vez, como aconteceu na Regressão 01, todos os pontos de previsão se encaixaram nos intervalos de confiança calculados. Segue na parte do trecho da Regressão 02 e seu intervalo de confiança (Tabela - Alguns pontos usados na Regressão 01)

Tabela - Alguns pontos usados na Regressão 01		
Alguns pontos usados na Regressão 01	Intervalo Superior	PREVISÃO REGRESSÃO 02
Intervalo Inferior		
2,56	3,07	2,82
1,58	2,21	1,90
2,04	2,50	2,27
2,59	3,01	2,80
2,16	2,59	2,37

A ressalva em relação à Regressão 02 é o fato de se terem sido excluídos 39% dos dados, o que a tornou menos representativa do que a Regressão 01.

$$IRI = -7,38 + 1,07 \times IRI_0 - 8,72 \times 10^{-1} \times I + 1,58 \times 10^{-6} \times N$$

Onde:

- IRI_0 é o IRI Inicial (levantamento anterior ao ano estudado);

- I é a variável dummy que representa se houve, ou não, intervenção no pavimento no período (0 se não houve, 1 se houve).
- N é o número N pela USACE no ano que está sendo analisado.

Figura - Gráfico da Regressão 02 ilustrando o IRI Previsto x IRI Real

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

Analizados os dados, foram tiradas as conclusões finais do estudo realizado, bem como foram propostas algumas sugestões para a continuidade dos trabalhos nesta área e nesta rodovia.

6.1 CONCLUSÕES

- O primeiro aspecto relevante do estudo foi a reunião dos dados para realização da análise. A montagem do banco de dados é uma das principais etapas da implantação de um Sistema de Gerência de Pavimentos, e, em relação a esse aspecto, o estudo atendeu às expectativas pois conseguiu compilar os levantamentos de pavimento da referida Concessionária para utilização em uma análise técnica e gerencial;
- Esse banco de dados necessita sempre ser atualizado e validado para que o Sistema de Gerência de Pavimentos possa funcionar de maneira otimizada e fiel à realidade da rodovia;
- Foi realizada uma análise estrutural do pavimento com os dados disponibilizados pela Concessionária, baseado em normas do DNIT. Essa análise mostrou que dois subtrechos da rodovia estão em boas condições, necessitando apenas de intervenções superficiais visando manter suas condições funcionais;
- Outros dois subtrechos da rodovia apresentaram uma condição não tão boa em relação ao seu desempenho estrutural. Cabe a realização de estudos mais detalhados, como deflexões com espaçamentos de 40 m em 40 m e sondagens para conhecimento da estrutura, para elaboração de solução para o trecho visando aumentar sua vida útil, sempre pensando na relação custo/benefício;
- Os modelos de previsão de desempenho da Irregularidade Longitudinal foram desenvolvidos visando auxílio na tomada de decisão. Essa ferramenta é uma das mais importantes dentro de uma Gerência de Pavimentos;

- Não foi possível achar uma boa correlação entre a Irregularidade Longitudinal e os parâmetros estruturais do pavimento (deflexão e raio de curvatura) na montagem dos modelos por conta de não se encaixarem nos valores máximos do parâmetro estatístico valor-P;
- Foram realizadas duas regressões, uma sem nenhum tratamento estatístico e outra com critério expurgatório de dados em função do comportamento característico de cada subtrecho, onde foram expurgados 39% dos dados. Os critérios estatísticos de aceitação avaliaram o coeficiente de determinação (R^2), valor-F (teste de significância), e pontos dentro do intervalo de confiança para a resposta média;
- As variáveis dependentes que se mostraram significantes na regressão sem o critério de expurgação de dados foram: IRI Inicial e Intervenção (variável *dummy*) no período de projeto;
- Na segunda regressão, expurgando-se os dados dentro do limite estabelecido, as variáveis que se mostraram significantes para a regressão foram: IRI Inicial, Intervenção no período, e número N no ano analisado;
- As duas regressões foram aceitas em todos os critérios estatísticos, porém a regressão 02, com o critério de expurgo de dados apresentou R^2 maior, mostrando um melhor ajuste. Vale à pena ressaltar que 39% dos dados foram expurgados na regressão 02, logo, a regressão 01 mostra uma maior significância para a amostra;
- Tanto a análise estrutural realizada, quanto, principalmente, o modelo de desempenho desenvolvido podem auxiliar na tomada de decisão dentro de um Sistema de Gerência de Pavimentos, contribuindo, assim, para se conseguir soluções que otimizem a questão do custo benefício;
- Para que o modelo de desempenho seja cada vez mais representativo, deve-se incrementar ao banco de dados novos levantamentos e novos parâmetros, a fim de se buscar um melhor ajuste na curva de regressão.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

- O estudo foi realizado em apenas uma faixa de tráfego da rodovia. Sugere-se replicar a metodologia em todas as faixas de tráfego da rodovia;
- Com a atualização do banco de dados, deve-se montar novos modelos, inclusive de parâmetros aqui não analisados, como modelos de deflexão, afundamento de trilha de roda, resistência à derrapagem, etc.;
- Buscar o desenvolvimento de regressões não-lineares, buscando melhores ajustes nas curvas de desempenho.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO **Guide for Design of Pavement Structures**, Washington, DC, 1986.

_____. **Guidelines for Pavement Management Systems**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, 1990.

_____. **Guide for Design of Pavement Structures**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, 1993.

_____. **Pavement Management Guide**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, 2001.

ASCE Task Group, **Operations Manual for ASCE/FHWA National Contest on LTPP Data Analysis**. Preliminary Draft by Pavements Committee, december 15, 1997.

ALBUQUERQUE, F. S. **Sistema de Gerência de Pavimentos para Departamentos de Estradas do Nordeste Brasileiro**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, 2007.

BALBO, J. T. , **Pavimentos Asfálticos – Patologias e Manutenção**. Editora Plêiade, São Paulo, 103 p.

BENEVIDES, S. A. S. E. **Modelos de Desempenho de Pavimentos Asfálticos para um Sistema de Gestão de Rodovias Estaduais do Ceará**. 2006. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ.

BERNUCCI, B.L; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. 2006. Petrobras e Abeda. Rio de Janeiro, 504 p.

BYRD, L.G. **Pavement Performance – A Key Element in Element in the Strategic Highway Research Program**. 1985. 1st North American Pavement Management Conference – Estados Unidos.

CARDOSO, S. H., 1992, “**Avaliação não Destrutiva de Pavimentos de Aeroportos – A Experiência Brasileira**”. *Seminário de Manutenção de Aeroportos*, OACI/DIRENG/INFRAERO.

CARDOSO, A. P.; DUARTE, I. M.; CASAN, Y.; MILFORT, A. C.; RS: **O Sistema de Gerência da Malha Rodoviária do Estado do Rio Grande do Sul**. In: 33ª Reunião Anual de Pavimentação, 33ªRAPv, 5, Anais. Associação Brasileira de Pavimentação, Florianópolis – SC, 2000.

CUNHA, C. B. **Estado da Arte e Perspectivas de Pesquisa em Sistemas de Gerência de Pavimentos e Modelos de Simulação do Transporte em Rodovias**. Publicação IPT 1790, São Paulo - SP, 1989

DANIELESKI, M. L. **Proposta de Metodologia para Avaliação Superficial de Pavimentos Urbanos: Aplicação à Rede Viária de Porto Alegre**, 2004. p . Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2ª. Ed. Rio de Janeiro. 2006. 310 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Estudos de Tráfego**. 1ª. Ed. Rio de Janeiro. 2006. 384 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Gerência de Pavimentos**. 1ª. Ed. Rio de Janeiro. 2006. 384 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER PRO-10/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Volume I**. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER PRO-11/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Volume II**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER PRO-007/94 – Avaliação Subjetiva da Superfície do Pavimento**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER PRO-269/94 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV**. Rio de Janeiro, 1994.

DOMINGUES, F. A. A. MID - **Manual de Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos**. São Paulo - SP, 96 p, 1993.

FERNANDES, Jr. J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. 1994. 293 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo.

_____. **Considerações sobre a Importância de Treinamento e Pesquisa para Implantação de Sistemas de Gerência de Pavimentos**, 30º Reunião Anual de Pavimentação, Volume 4, p. 2115-2125, Salvador - BA, 1996.

_____. **Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos para Cidades de Médio Porte**. São Carlos/SP: Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 2001.

GEIPOT - EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. **Pesquisa sobre o inter-relacionamento dos custos de construção, conservação e utilização de rodovias**. Brasília – DF, Ministério dos Transportes, 12 v., 1981.

GONÇALVES, F. P., **O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis**, Novembro de 1999 – apostila

HAAS, R.; HUDSON, W. R. ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida/USA, 1994. 581p.

HAJEK, J.J; PHANG, W.A.; PRAKASH, A.; WRONG, G.A.; **Performance Prediction for a Pavement Management**. 1985. 1st North American Pavement Management Conference – Estados Unidos.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and desing**. New Jersey: University of Hentucky, 1993

IPR-720. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. MT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília – DF, 2006.

LERCH, R. L. **Previsão de Irregularidade Pós-recape em Rodovias do RS: Ajuste do Modelo HDM-4**. 2003. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LYTTON, R. L. **Concepts of Pavement Performance Prediction and Modeling**. 1987. 2nd North American Pavement Management Conference – Estados Unidos.

MARCON, A. F. **Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina**. 1996. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil.

NAKAHARA, S. M. **Estudo de Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Vias Sujeita a Tráfego Comercial Pesado**. Tese de doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2005. 312 p.

NUÑEZ, M. M. SHAHIN, M. Y. **Pavement Condition Data Analysis and Modeling**. Transportation Research Record 1070, Transportation Research Board, p. 125-132, Washington-DC, USA, 1986.

PATERSON, W. D. O. **Road Deterioration and Maintenance Effects**. World Bank Publications, Washington-DC, USA, 1987.

QUEIROZ, C. A. V. **Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil**. Dissertation for the Degree of Philosophy Doctor, University of Texas, Austin – Texas, USA. 317 p. 1981.

QUEIROZ, C. A. V. **Modelos de Previsão do Desempenho de Pavimento: Desenvolvimento e Aplicação**. Publicação 692/50, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 66 p. 1982.

_____. **Modelos de Previsão do Desempenho para a Gerência de Pavimentos no Brasil**. Ministério dos Transportes – Empresa Brasileira de planejamento de Transportes (GEIPOT), Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), Brasília - DF, 1984.

QUEIROZ, C. A. V., HUDSON, W. R., HAAS, R. **A Standardization of Pavement Management Systems in Brazil and other Developing Countries**. Transportation Research Record 1344, Transportation Research Board, p. 31-37, Washington-DC/USA, 1992.

RAUHUT, J. B.; GENDELL, D. S. **Proposed Development of Pavement Performance Prediction Models from SHTP/LTTP Data**. Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Canadá, 1987.

ROCHA, N. R., RODRIGUES, R. M. (1998a) - “**Estudo de Correlação entre as Medidas com a Viga Benkelman e com o Falling Weight Deflectometer**”. Anais da 31 Reunião Anual de Pavimentação, Volume 2, p. 741-750, São Paulo-SP.

_____. (1998b) - “**Levantamentos Deflectométricos: Fatores que Influenciam na Previsão do Desempenho dos Pavimentos**”. Anais da 31 Reunião Anual de Pavimentação, Volume 2, p. 751-767, São PauloSP.

RODRIGUES, R. M. **Gerência de Pavimentos**. Apostilas da Disciplina de Gerência de Pavimentos. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. São Carlos – SP, 2003.

SHAHIN, M. Y. **Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots**. New York, USA, Ed. Chapman & Hall, 223 p., 1994.

SONCIM, S.P. **Desenvolvimento de Modelos de Pavimentos Asfálticos com Base da Rede de Rodovias do Estado da Bahia**. 2011. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte – Infraestrutura de Transporte). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo

VISCONTI, T. S. **O Sistema Gerencial de Pavimentos do DNER**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Divisão de Apoio Tecnológico, Brasil, 84 p, 2000.

VITORELLO, T. **Análise de Desempenho de Estrutura de Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS no Trecho Osório - Porto Alegre**. 2008. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre.

YSHIBA, J. K. **Modelo de Desempenho de Pavimentos: Estudo de Rodovias do Estado do Paraná**. 2003. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - SP

8 ANEXOS

Dados da Regressão 01:

km	Pista	Faixa	Ano Final	Ano Inicial	IRI FINAL	Variável 1	IRI INICIAL	Intervenção
0	2	Direita	2013	2011	2,8	1,0	3,1	1
0,6	2	Direita	2013	2011	2,1	1,0	2,3	1
1,2	2	Direita	2013	2011	2,2	1,0	2,6	1
1,8	2	Direita	2013	2011	2,5	1,0	2,3	0
2,4	2	Direita	2013	2011	2,1	1,0	2,7	1
3	2	Direita	2013	2011	2,1	1,0	2,1	0
3,6	2	Direita	2013	2011	1,7	1,0	2,0	1
4,2	2	Direita	2013	2011	2,5	1,0	3,0	1
4,8	2	Direita	2013	2011	4,1	1,0	3,3	0
5,4	2	Direita	2013	2011	4,1	1,0	3,8	0
6	2	Direita	2013	2011	2,9	1,0	3,2	1
6,6	2	Direita	2013	2011	3,1	1,0	2,5	0
7,2	2	Direita	2013	2011	2,4	1,0	3,7	1
7,8	2	Direita	2013	2011	3,0	1,0	2,4	0
8,4	2	Direita	2013	2011	2,4	1,0	2,4	0
9	2	Direita	2013	2011	3,2	1,0	2,9	0
9,6	2	Direita	2013	2011	2,6	1,0	2,5	0
10,2	2	Direita	2013	2011	2,6	1,0	2,5	0
12,6	2	Direita	2013	2011	2,5	1,0	2,9	1
13,2	2	Direita	2013	2011	3,0	1,0	2,3	0
13,8	2	Direita	2013	2011	2,8	1,0	2,2	0
14,4	2	Direita	2013	2011	3,2	1,0	2,8	0
15	2	Direita	2013	2011	3,3	1,0	2,5	0
15,6	2	Direita	2013	2011	3,6	1,0	3,0	0
16,2	2	Direita	2013	2011	4,5	1,0	2,7	0
16,8	2	Direita	2013	2011	5,0	1,0	4,1	0
17,4	2	Direita	2013	2011	3,9	1,0	2,7	0
0	2	Direita	2011	2009	3,1	1,0	2,9	0
0,6	2	Direita	2011	2009	2,3	1,0	2,2	0
1,2	2	Direita	2011	2009	2,6	1,0	2,6	0
1,8	2	Direita	2011	2009	2,3	1,0	2,0	0
2,4	2	Direita	2011	2009	2,7	1,0	2,3	0
3	2	Direita	2011	2009	2,1	1,0	2,7	1
3,6	2	Direita	2011	2009	2,0	1,0	2,2	1
4,2	2	Direita	2011	2009	3,0	1,0	2,1	0
4,8	2	Direita	2011	2009	3,3	1,0	4,2	1
5,4	2	Direita	2011	2009	3,8	1,0	4,3	1
6	2	Direita	2011	2009	3,2	1,0	3,6	1
6,6	2	Direita	2011	2009	2,5	1,0	3,2	1
7,2	2	Direita	2011	2009	3,7	1,0	2,2	0
7,8	2	Direita	2011	2009	2,4	1,0	2,3	0
8,4	2	Direita	2011	2009	2,4	1,0	2,2	0
9	2	Direita	2011	2009	2,9	1,0	3,1	1
9,6	2	Direita	2011	2009	2,5	1,0	2,3	0
10,2	2	Direita	2011	2009	2,5	1,0	2,5	0
12,6	2	Direita	2011	2009	2,9	1,0	2,4	0
13,2	2	Direita	2011	2009	2,3	1,0	2,9	1
13,8	2	Direita	2011	2009	2,2	1,0	2,8	1
14,4	2	Direita	2011	2009	2,8	1,0	2,5	0
15	2	Direita	2011	2009	2,5	1,0	3,2	1
15,6	2	Direita	2011	2009	3,0	1,0	3,6	1
16,2	2	Direita	2011	2009	2,7	1,0	3,3	1
16,8	2	Direita	2011	2009	4,1	1,0	2,9	0
17,4	2	Direita	2011	2009	2,7	1,0	4,2	1

Previsão 2013 pela Regressão	95%de nível de confiância	Previsão 2013 pela Regressão - Intervalo de confiança para resposta média	
$\hat{y} x_0 = \bar{y}_0$	$t(\alpha/2; n-p)$	Intervalo Inferior	Intervalo Superior
2,57	2,31	2,31	2,82
1,79		1,47	2,12
2,11		1,83	2,39
2,84		2,63	3,05
2,19		1,92	2,47
2,61		2,38	2,85
1,52		1,15	1,90
2,41		2,16	2,67
3,75		3,47	4,02
4,16		3,80	4,51
2,64		2,38	2,89
2,97		2,77	3,17
3,11		2,81	3,40
2,91		2,71	3,12
2,90		2,70	3,11
3,40		3,18	3,62
2,96		2,76	3,16
3,01		2,81	3,21
2,39		2,13	2,65
2,84		2,63	3,05
2,75		2,53	2,97
3,29		3,08	3,49
2,99		2,79	3,19
3,44		3,21	3,66
3,19		2,99	3,39
4,46		4,04	4,89
3,19		2,98	3,39
3,35		3,11	3,58
2,73		2,49	2,97
3,09		2,87	3,31
2,54		2,28	2,81
2,87		2,64	3,09
2,21		1,97	2,46
1,70		1,37	2,02
2,69		2,44	2,93
3,54		3,19	3,89
3,57		3,22	3,93
3,01		2,76	3,27
2,62		2,39	2,85

Dados da regressão 02:

km	Pista	Faixa	Ano Final	Ano Inicial	IRI FINAL	VARIÁVEL 1	IRI INICIAL	Intervenção	N
0	2	Direita	2013	2011	2,8	1,0	3,1	1	4,88E+06
0,6	2	Direita	2013	2011	2,1	1,0	2,3	1	4,88E+06
1,2	2	Direita	2013	2011	2,2	1,0	2,6	1	4,88E+06
1,8	2	Direita	2013	2011	2,5	1,0	2,3	0	4,88E+06
2,4	2	Direita	2013	2011	2,1	1,0	2,7	1	4,88E+06
4,2	2	Direita	2013	2011	2,5	1,0	3,0	1	4,88E+06
6	2	Direita	2013	2011	2,9	1,0	3,2	1	4,88E+06
6,6	2	Direita	2013	2011	3,1	1,0	2,5	0	4,88E+06
7,8	2	Direita	2013	2011	3,0	1,0	2,4	0	4,88E+06
9,6	2	Direita	2013	2011	2,6	1,0	2,5	0	4,88E+06
10,2	2	Direita	2013	2011	2,6	1,0	2,5	0	4,88E+06
13,2	2	Direita	2013	2011	3,0	1,0	2,3	0	4,88E+06
14,4	2	Direita	2013	2011	3,2	1,0	2,8	0	4,88E+06
15	2	Direita	2013	2011	3,3	1,0	2,5	0	4,88E+06
15,6	2	Direita	2013	2011	3,6	1,0	3,0	0	4,88E+06
17,4	2	Direita	2013	2011	3,9	1,0	2,7	0	4,88E+06
0,6	2	Direita	2011	2009	2,3	1,0	2,2	0	4,69E+06
1,2	2	Direita	2011	2009	2,6	1,0	2,6	0	4,69E+06
1,8	2	Direita	2011	2009	2,3	1,0	2,0	0	4,69E+06
2,4	2	Direita	2011	2009	2,7	1,0	2,3	0	4,69E+06
3	2	Direita	2011	2009	2,1	1,0	2,7	1	4,69E+06
6,6	2	Direita	2011	2009	2,5	1,0	3,2	1	4,69E+06
7,8	2	Direita	2011	2009	2,4	1,0	2,3	0	4,69E+06
8,4	2	Direita	2011	2009	2,4	1,0	2,2	0	4,69E+06
9	2	Direita	2011	2009	2,9	1,0	3,1	1	4,69E+06
9,6	2	Direita	2011	2009	2,5	1,0	2,3	0	4,69E+06
10,2	2	Direita	2011	2009	2,5	1,0	2,5	0	4,69E+06
13,2	2	Direita	2011	2009	2,3	1,0	2,9	1	4,69E+06
13,8	2	Direita	2011	2009	2,2	1,0	2,8	1	4,69E+06
14,4	2	Direita	2011	2009	2,8	1,0	2,5	0	4,69E+06
15	2	Direita	2011	2009	2,5	1,0	3,2	1	4,69E+06
15,6	2	Direita	2011	2009	3,0	1,0	3,6	1	4,69E+06
16,2	2	Direita	2011	2009	2,7	1,0	3,3	1	4,69E+06

Previsão 2013 pela Regressão	95% de nível de confiança	Previsão 2013 pela Regressão - Intervalo de confiança para resposta média	
$\hat{y}_0 x_0 = \bar{x}_0$	$t(\alpha/2); n-p$	Intervalo Inferior	Intervalo Superior
2,82	2,36	2,56	3,07
1,90		1,58	2,21
2,27		2,04	2,50
2,80		2,59	3,01
2,37		2,16	2,59
2,64		2,41	2,86
2,90		2,64	3,16
2,96		2,76	3,16
2,89		2,69	3,09
2,95		2,75	3,15
3,01		2,81	3,21
2,80		2,55	3,05
3,34		3,11	3,56
2,98		2,77	3,20
3,52		3,26	3,78
3,22		3,01	3,43
2,38		2,15	2,60
2,81		2,52	3,09
2,16		1,91	2,41
2,54		2,31	2,78
2,10		1,89	2,31
2,59		2,35	2,83
2,52		2,31	2,72
2,40		2,18	2,62
2,45		2,22	2,68
2,51		2,31	2,72
2,71		2,51	2,91
2,22		1,97	2,47
2,19		1,93	2,45
2,76		2,55	2,97
2,60		2,39	2,81
3,01		2,73	3,29
2,71		2,49	2,93