



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente**

Glauber Frandolozo

Evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos flexíveis restaurados

**Passo Fundo
2010**

Glauber Frandolozo

Evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos flexíveis restaurados

Orientador: Prof. Fernando José Pugliero Gonçalves, Dr.Eng.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia na área de concentração em Meio Ambiente e Infraestrutura para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Universidade de Passo Fundo.

Passo Fundo
2010

Glauber Frandolozo

Evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos flexíveis restaurados

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

Data de aprovação: Passo Fundo, 14 de novembro de 2008.

Os membros componentes da Banca Examinadora abaixo aprovam a Dissertação.

Prof. Fernando José Pugliero Gonçalves, Dr. Eng.
Universidade de Passo Fundo

Prof. Gilberto Fernandes, Dr. Eng.
Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP

Prof. Aislan Buhler, Dr. Eng.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

Prof. Juan Mascaró, Dr. Eng.
Universidade de Passo Fundo-UPF

Passo Fundo
2010

Dedico esse trabalho ao meu irmão que hoje abençoa todos nós ao lado do Senhor.

Agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, ajudaram a realização desse trabalho, em especial minha família.

Resumo

O presente trabalho investiga a evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos flexíveis restaurados em diferentes situações de uso e revestimentos em rodovias que integram a malha sob concessão do consórcio Univias. Os dados analisados são resultados de campanhas periódicas de monitoramento e estão armazenados no banco de dados do Sistema de Gerência de Pavimentos - SGP, do consórcio, no período de 2003 a 2005. Foram selecionados seis trechos com extensão cinco quilômetros cada para a análise da evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo em escala real. Na sequência, tal evolução, foi interpretada de modo comparativo com o acréscimo da irregularidade derivada da aplicação de modelos de previsão de desempenho desenvolvido por Paterson e Queiroz. Também, foi realizada uma investigação acerca do efeito de diferentes medidas de restauração na evolução da irregularidade longitudinal.

Palavras-chaves: Irregularidade. Modelos de desempenho. Pavimentos.

Abstract

The present work investigates the longitudinal irregularity evolution in restored flexible pavements in different situations of usage and coverings in highways that integrate the network under the concession of Univas consortium. The data analyzed are the results of periodical monitoring campaigns and are stored in the SGP (Pavements Management System) data base of the consortium, in the period of 2003 to 2005. Six sections were selected, measuring 5 kilometers each, in order to analyze the longitudinal irregularity evolution in a real-time scale. Subsequently, this evolution was interpreted in a comparative way with the irregularity decrease derived from the application of performance prediction models developed by Paterson and Queiroz. An investigation regarding the effects of different pavement restoration measures was also performed.

Key-words: Irregularity. Models of performance. Pavements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhe sensor.....	49
Figura 2 - Desenho esquemático do medidor a laser	50
Figura 3 - Perfilômetro Laser	51
Figura 4 - Estrutura esquemática da Metodologia aplicada.....	59
Figura 5 – Malha sob concessão do Consórcio Univias.....	62
Figura 6 – Localização das Rodovias em estudo no Rio Grande do Sul.....	63
Figura 7 – Localização trechos 01/02/03/04 no polo Metropolitano.....	65
Figura 8 – Localização trechos 05 e 06 no polo Sulvias.....	66
Figura 9 – Tela SGP Univias, parâmetros de entrada.....	67
Figura 10 – Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 01	72
Figura 11 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 02.....	72
Figura 12 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 03.....	73
Figura 13 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 04.....	73
Figura 14 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 05.....	73
Figura 15 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 06.....	74
Figura 16 - FWD KUAB.....	75
Figura 17 - Barra laser	76
Figura 18 – Representação esquemática da divisão dos segmentos.....	77
Figura 19 – Médias de QI entre as faixas de rolagem.....	77
Figura 20 – Média de QI por km e trecho	78
Figura 21 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 01.....	84
Figura 22 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 02.....	85
Figura 23 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 03.....	85
Figura 24 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 04.....	85
Figura 25 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 05.....	86
Figura 26 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 06.....	86
Figura 27 – Evolução Irregularidade longitudinal (Paterson, 1987) – Trecho 01	89
Figura 28 – Evolução da Irregularidade longitudinal “Queiroz A”– Trecho 01.....	91
Figura 29 – Evolução da Irregularidade longitudinal “Queiroz B”– Trecho 01.....	92
Figura 30 – Evolução da Irregularidade longitudinal “Queiroz C”– Trecho 01.....	92
Figura 31 – QI após intervenção, trecho 01.....	93
Figura 32 – Evolução do QI, para diferentes medidas de restauração.....	100
Figura 33 –QI versus percentual de redução.....	101
Figura 34 – Evolução do QI com Tratamento Superficial Duplo, Trecho 01.....	102
Figura 35 – Evolução da Lama Asfáltica, Trecho 01.....	102
Figura 36 – Evolução do Micro Concreto Asfáltico, Trecho 02.....	103
Figura 37– Evolução das intervenções de Micro Concreto Asfáltico, Trecho 03.....	103
Figura 38 – Evolução do Micro Concreto Asfáltico, Trecho 05.....	104
Figura 39 – Evolução de Micro Concreto Asfáltico, Trecho 06.....	105

Figura 40 – Evolução Irregularidade a campo em pavimentos sem intervenções.	107
Figura 41 – Evolução irregularidade, escala real e Paterson, 1987 – Trecho 02.	108
Figura 42 – Evolução irregularidade, escala real e Paterson, 1987 – Trecho 04.	108
Figura 43 – Evolução irregularidade, escala real e Paterson, 1987 – Trecho 06.	108
Figura 44 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 01	111
Figura 45 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 02	111
Figura 46 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 03	112
Figura 47 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 04	112
Figura 47 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 05	113
Figura 49 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 05	113
Figura 50– QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio no trecho 03	114
Figura 51 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio no trecho 05	115
Figura 52 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio no trecho 01	115
Figura 53 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio no trecho 02	116
Figura 54 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio no trecho 04	116
Figura 55– QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio no trecho 06	116
Figura 01– Evolução IRI, trecho 01	152
Figura 02 – Evolução IRI, trecho 02	153
Figura 03 – Evolução IRI, trecho 03	154
Figura 04 – Evolução IRI, trecho 04	155
Figura 05 – Evolução IRI, trecho 05	156
Figura 06 – Evolução IRI, trecho 06	157
Figura 07 – Evolução QI, “Queiroz A” trecho 01	158
Figura 08 – Evolução QI, “Queiroz B” trecho 01	159
Figura 09 – Evolução QI, “Queiroz C” trecho 01	159
Figura 10 – Evolução QI, “Queiroz A” trecho 02	160
Figura 11 – Evolução QI, “Queiroz B” trecho 02	161
Figura 12 – Evolução QI, “Queiroz C” trecho 02	161
Figura 13 – Evolução QI, “Queiroz A” trecho 03	162
Figura 14 – Evolução QI, “Queiroz B” trecho 03	163
Figura 15 – Evolução QI, “Queiroz C” trecho 03	163
Figura 16 – Evolução QI, “Queiroz A” trecho 04	164
Figura 17 – Evolução QI, “Queiroz B” trecho 04	165
Figura 18 – Evolução QI, “Queiroz C” trecho 04	165
Figura 19 – Evolução QI, “Queiroz A” trecho 05	166
Figura 20 – Evolução QI, “Queiroz B” trecho 05	167
Figura 21 – Evolução QI, “Queiroz C” trecho 05	167
Figura 22 – Evolução QI, “Queiroz A” trecho 06	168
Figura 23 – Evolução QI, “Queiroz B” trecho 06	169
Figura 24 Evolução QI, “Queiroz C” trecho 06	169
Figura 25 – QI após intervenção, trecho 01	170
Figura 26 – QI após intervenção, trecho 02	171
Figura 27 – QI após intervenção, trecho 03	171
Figura 28 – QI após intervenção, trecho 04	172
Figura 29 – QI após intervenção, trecho 05	172
Figura 30 – QI após intervenção, trecho 06	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Vetor de estado quanto ao índice de serventia.....	25
Tabela 2 –	Classificação de métodos	48
Tabela 3 –	Comparativo dos limites de avaliação pela irregularidade	54
Tabela 4 –	Parâmetros da qualidade de rolamento nos pavimentos	54
Tabela 5 –	Estrutura dos pavimentos	68
Tabela 6 –	Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 01	72
Tabela 7 –	Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 02	72
Tabela 8 –	Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 03	73
Tabela 9 –	Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 04	73
Tabela 10 –	Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 05	74
Tabela 11 –	Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 05	74
Tabela 12 –	Planilha da leitura a campo gerada pelo equipamento barra laser	76
Tabela 13 –	Média por km/faixa ao longo do tempo media a campo – Trecho 01	78
Tabela 14 –	Detalhamento das Categorias de veículos	79
Tabela 15 –	Composição dos eixos por categorias	79
Tabela 16 –	Fatores de veículos.....	80
Tabela 17 –	Tráfego por praça de pedágio e Trechos	80
Tabela 18 –	Tráfego acumulado por praça de pedágio e Trechos	80
Tabela 19 –	Resumo dos parâmetros – Trecho 01	81
Tabela 20 –	Resumo dos parâmetros – Trecho 02	82
Tabela 21 –	Resumo dos parâmetros – Trecho 03	82
Tabela 22 –	Resumo dos parâmetros – Trecho 04	83
Tabela 23 –	Resumo dos parâmetros – Trecho 05	83
Tabela 24 –	Resumo dos parâmetros – Trecho 06	84
Tabela 25 –	Intervenções analisadas na pesquisa	86
Tabela 26 –	Número estrutural corrigido, Trecho 01	88
Tabela 27 –	IRI Previsto Paterson (1987).	89
Tabela 28 –	QI calculado, “Queiroz A” – Trecho 01	91
Tabela 29 –	QI calculado, “Queiroz B” – Trecho 01	91
Tabela 30 –	QI calculado, “Queiroz C” – Trecho 01	91
Tabela 31 –	Resultado QI para o modelo.	93
Tabela 32 –	Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 01.....	95
Tabela 33 –	Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 02.....	96
Tabela 34 –	Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 03.....	97
Tabela 35 –	Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 04.....	98
Tabela 36 –	Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 05.....	98
Tabela 37 –	Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 06.....	99
Tabela 38 –	Comparativo entre QIcampo e QIcalculado, nos trechos da pesquisa.	114
Tabela 39 –	Relação entre QI campo dividido por QI calculado - Paterson	117

Tabela 40 –	Relação entre QI campo dividido por QI calculado – Queiroz “A”	117
Tabela 41 –	Relação entre QI campo dividido por QI calculado – Queiroz “B”	118
Tabela 42 –	Relação entre QI campo dividido por QI calculado – Queiroz “C”	118
Tabela 43 –	Cálculo SNC, trecho 01.....	152
Tabela 44 –	Cálculo IRI, conforme Paterson (1987).	152
Tabela 45 –	Cálculo SNC, trecho 02.....	153
Tabela 46 –	Cálculo IRI, conforme Paterson (1987).	153
Tabela 47 –	Cálculo SNC, trecho 03.....	154
Tabela 48 –	Cálculo IRI, conforme Paterson (1987).	154
Tabela 49 –	Cálculo SNC, trecho 04.....	155
Tabela 50 –	Cálculo IRI, conforme Paterson (1987).	155
Tabela 51 –	Cálculo SNC, trecho 05.....	156
Tabela 52 –	Cálculo IRI, conforme Paterson (1987).	156
Tabela 53 –	Cálculo SNC, trecho 06.....	157
Tabela 54 –	Cálculo IRI, conforme Paterson (1987).	157
Tabela 55 –	Resultado QI para o modelo.	158
Tabela 56 –	Resultado QI para o modelo.	158
Tabela 57 –	Resultado QI para o modelo.	159
Tabela 58 –	Resultado QI para o modelo.	160
Tabela 59 –	Resultado QI para o modelo.	160
Tabela 60 –	Resultado QI para o modelo.	161
Tabela 61 –	Resultado QI para o modelo.	162
Tabela 62 –	Resultado QI para o modelo.	162
Tabela 63 –	Resultado QI para o modelo.	163
Tabela 64 –	Resultado QI para o modelo.	164
Tabela 65 –	Resultado QI para o modelo.	164
Tabela 66 –	Resultado QI para o modelo.	165
Tabela 67 –	Resultado QI para o modelo.	166
Tabela 68 –	Resultado QI para o modelo.	166
Tabela 69 –	Resultado QI para o modelo.	167
Tabela 70 –	Resultado QI para o modelo.	168
Tabela 71 –	Resultado QI para o modelo.	168
Tabela 72 –	Resultado QI para o modelo.	169
Tabela 73 –	Resultado QI para o modelo.	170
Tabela 74 –	Resultado QI para o modelo.	170
Tabela 75 –	Resultado QI para o modelo.	171
Tabela 76 –	Resultado QI para o modelo.	172
Tabela 77 –	Resultado QI para o modelo.	172
Tabela 78 –	Resultado QI para o modelo.	173

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Valores de IGG.....	42
Quadro 02 – Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 01.	95
Quadro 03 – Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 02.	96
Quadro 04– Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 03.	97
Quadro 05– Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 04.	97
Quadro 06– Calendário das intervenções e monitoramento no trecho 05.	98
Quadro 07– Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 06.	99
Quadro 08 – Comparativo entre as equações de evolução do QI.....	105
Quadro 09 – Parâmetros para análise da evolução da irregularidade.....	106
Quadro 10 - Evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos sem intervenções.....	107
Quadro 11 – Irregularidade (QI), ao longo do tempo previsto e no campo.	110

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2. 1 Desempenho de Pavimentos	18
2.2 Gerência de Pavimentos	18
2.3 Sistemas de Gerência de Pavimentos	20
2.4 Modelos de previsão de desempenho	20
2.4.1 Tipos de modelos	20
2.4.1.1 Modelos determinísticos	22
2.4.1.1.1 Modelos de desempenho estrutural	22
2.4.1.1.2 Modelos de desempenho funcional	22
2.4.1.1.3 Modelos de degradação.....	23
2.4.1.2 Modelos probabilísticos	24
2.4.1.2.1 Curvas de sobrevivência	24
2.4.1.2.2 Modelos markovianos.....	24
2.4.1.2.3 Modelos Semi-Markovianos	25
2.4.1.2.4 Modelos empíricos	25
2.4.1.2.5 Modelos mecanístico-empírico	26
2.4.2 Modelos de evolução de irregularidade.....	27
2.4.2.1 Yschiba (2003)	27
2.4.2.2 Queiroz (1981)	28
2.4.2.3 Modelo empírico	29
2.4.2.4 Modelo empírico-mecanístico.....	31
2.4.3 Marcon (1996).....	33
2.4.4 DNER-PRO 159/85 (DNER, 1985)	35
2.4.5 Paterson (1987)	36
2.4.6 Avaliação / monitoramento de pavimentos	40
2.4.6.1 Avaliação do pavimento	40
2.4.6.2 Condição Funcional	40
2.4.6.3 Condição da Superfície.....	40
2.4.6.3.1 Índice de condição de superfície	41

2.4.6.3.2 Índice de gravidade global (IGG).....	41
2.4.6.4 Deterioração da superfície	42
2.4.6.5 Condição estrutural.....	42
2.6.7 Índice de qualidade dos pavimentos asfálticos	43
2.6.7.1 Valor da Serventia Atual (VSA)	43
2.6.7.2 Índice Internacional de Irregularidade	43
2.6.7.2.1 Medidores de irregularidade	47
2.6.7.2.2 Bump integrator.....	48
2.6.7.2.3 Perfilômetro a laser (barra laser)	50
2.6.8 Índice de irregularidade internacional – IRI	51
2.6.8.1 Relação entre Irregularidade	54
2.6.9 Processo de degradação dos pavimentos	55
2.6.10 Fatores que influenciam o desempenho dos pavimentos.....	56
2.6.10.1 Fatores climáticos.....	56
2.6.10.2 Carregamento	57
3 METODOLOGIA.....	59
4. EVOLUÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM ESCALA REAL E APLICAÇÃO DE MODELOS DE DESEMPENHO.....	62
4.1 Seleção dos trechos	63
4.2 Localização dos trechos.....	64
4.3 Levantamentos dos parâmetros.....	66
4.3.1 Estrutura dos pavimentos.....	67
4.3.2 Histórico de Manutenção dos Pavimentos.....	68
4.3.2.1 Tratamento Superficial	68
4.3.2.2 Lama Asfáltica	69
4.3.2.3 Microrrevestimento Asfáltico	70
4.3.2.4 Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).....	70
4.3.3 Deflexões	74
4.4 Tratamento dos dados.....	75
4.4.1 Tratamento dos dados de irregularidade.....	76
4.4.2 Tratamento dos dados de Tráfego	78
4.5 Resumo dos parâmetros.....	81
4.6 Seleção dos modelos	87
4.7 Aplicação dos modelos.....	87

4.7.1 Paterson (1987)	88
4.7.2 Queiroz (1981)	89
4.7.3 DNER – PRO 159/85 (DNER,1985).....	92
5 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL.....	94
5.1 Evolução da Irregularidade logo após a intervenção (campo).....	94
5.2 Evolução da Irregularidade ao longo do tempo (campo)	101
5.3 Evolução Irregularidade sem intervenção	105
5.4 Comparativo entre os modelos de previsão de irregularidade longitudinal com os dados coletados no campo.....	109
5.4.1 Evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo.....	109
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	119
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXO I.....	124
ANEXO II.....	131
ANEXO III	151
ANEXO VI.....	174

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, torna-se cada vez mais importante a análise funcional e estrutural dos pavimentos. Em nosso meio, em vista das restrições orçamentárias presentes, torna-se indispensável a utilização de ferramentas que auxiliam no processo decisório relativo ao tipo de medida de restauração a ser adotada num dado momento na vida de serviço dos pavimentos. Nesse contexto, cada vez mais pesquisas têm sido propostas no sentido de contribuição ao entendimento acerca do desempenho a ser oferecido por diferentes soluções em projetos de restauração de pavimentos. No presente estudo, foi investigada a evolução da irregularidade longitudinal em trechos com revestimentos, estruturas e tráfego distintos.

O conhecimento da irregularidade de um pavimento qualquer a ser restaurado é um dos fatores determinantes à alternativa de projeto mais adequada para a recuperação dos quesitos de conforto e da estrutura. Neste processo, aplicando-se modelos de previsão de evolução da irregularidade longitudinal do pavimento em uma determinada data, pode-se estimar a qualidade de rolamento deste pavimento no futuro e novas necessidades de restauração (BOTTURA, 1998).

A irregularidade de um pavimento é de certa maneira um conceito familiar a todos os seus usuários, tanto que a suavidade no rolamento já há muito tempo é considerado um critério importante na aceitação de um pavimento. Segundo Haas e Hudson (1978), referem-se à irregularidade como “a distorção da superfície do pavimento o qual contribui para um rolamento indesejável ou desconfortável”.

A irregularidade afeta a dinâmica dos veículos e por isso tem um impacto importante em seu custo operacional, na segurança, no conforto e na velocidade do deslocamento. Além disso, a irregularidade também aumenta as cargas dinâmicas aplicadas pelos veículos no pavimento, acelerando sua deterioração estrutural e, por fim, pode ainda prejudicar a drenagem superficial o que tende a aumentar ainda mais seus impactos negativos, segundo Paterson (1987).

Aplicar modelos de desempenho, que relatam as condições de degradação observadas a campo em termos da evolução de parâmetros fundamentais, tais como: queda da serventia, evolução do trincamento, evolução da ocorrência de afundamentos em trilhas de roda e principalmente a irregularidade do pavimento são fundamentais para o comparativo entre o campo e os modelos.

Quanto aos modelos de previsão de desempenho, inicialmente, foram propostos equações desenvolvidas a partir de ensaio laboratoriais e investigados fatores para adaptação às condições reais a campo. Tais procedimentos mostraram-se que não são inaplicáveis, uma vez que apresentaram grande dispersão e resultados completamente inconfiáveis. Numa segunda etapa do desenvolvimento e aplicações, com base na observação do comportamento do pavimento em serviço, foram sugeridos os modelos do tipo mecânico empíricos.

Os modelos de desempenho propostos, na sua maioria, não refletem o comportamento dos pavimentos em campo. Pois, o desempenho de um pavimento é influenciado por diversos fatores, que variam conforme as condições de uso do pavimento, relatado por Gonçalves (1998), são eles:

- ✓ O número e a magnitude das cargas do tráfego;
- ✓ As propriedades dos materiais e componentes das camadas e a sua heterogeneidade ao longo do tempo, a natureza do solo de subleito;
- ✓ A frequência e as práticas de manutenção aplicadas ao longo do tempo;
- ✓ Condições de drenagem e aspectos ambientais.

Apesar da grande quantidade de modelos de previsão disponíveis, alguns são de aplicabilidade limitada e sofrem de erros estatísticos ou foram estimados por métodos inadequados (PROZZI, 2001).

Utilizar dados experimentais confiáveis para a calibração de previsões teóricas de modelos de previsão de desempenho e modelar adequadamente a influência das variáveis na degradação de um pavimento, para conseguir descrever com maior perfeição o desempenho de um pavimento ao longo de sua vida de serviço é, sem dúvidas, um dos maiores “gargalos” tecnológicos atuais, conforme Esse (2003).

A partir da década de 50, a preocupação com a otimização da manutenção dos pavimentos já construídos motivou a elaboração de estudos, principalmente nos países mais desenvolvidos, voltados à gerência de pavimentos, que de forma simples, pode ser entendida como um sistema de auxílio à tomada de decisão que contempla um conjunto de modelos de desempenho que, aplicados sobre determinados dados característicos dos pavimentos, otimiza os investimentos de manutenção. Em se tratando de gerência de pavimentos, é importante ressaltar que normalmente a variável mais importante neste tipo de sistema é justamente a medida da irregularidade longitudinal, segundo Barella (1997).

Neste contexto, o objetivo geral do presente trabalho é identificar a Evolução da Irregularidade Longitudinal em pavimentos flexível restaurados. Os objetivos específicos são:

- ✓ Selecionar os modelos de desempenho a serem aplicados em situação reais (com

base em estudos anteriores);

- ✓ Definir os trechos a serem analisados;
- ✓ Coletar e analisar os dados (monitoramento) disponíveis nos últimos anos;
- ✓ Aplicar os modelos de desempenho em trechos de rodovias brasileiras;
- ✓ Identificar o modelo que mais se aproximou da realidade a campo;
- ✓ Equacionar a evolução da irregularidade ao longo do tempo.

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

No Capítulo I, apresenta-se a justificativa da pesquisa, bem como o problema da pesquisa além dos objetivos de forma geral e específica.

O Capítulo II apresenta a revisão bibliográfica que serviu de base para o desenvolvimento do trabalho. Destacam-se os seguintes assuntos: Desempenho de pavimentos, Gerência de Pavimentos, Sistema de Gerência de Pavimentos, Modelos de previsão de desempenho, Avaliação e Monitoramento de Pavimentos, Parâmetros (Irregularidade, Afundamento trilha de Roda, Deflexão, Serventia).

No Capítulo III, apresenta-se a metodologia desenvolvida para a busca dos objetivos propostos. Faz-se o detalhamento de trechos selecionados no campo e da escolha dos modelos de desempenho.

No Capítulo IV, são apresentados os resultados das investigações realizadas, a seleção dos modelos, identificação dos trechos, aplicação dos modelos e equações da evolução da irregularidade no campo.

No Capítulo V, faz-se a análise dos resultados principais, tais como: a evolução da irregularidade ao longo do tempo, evolução da Irregularidade após intervenções de restauração e Equações da evolução da irregularidade ao longo do tempo sem intervenção.

No Capítulo VI, são discutidos as conclusões e apresentadas recomendações para pesquisa futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desempenho de pavimentos

Desempenho é um termo genérico que é utilizado para designar como os pavimentos mudam de condição ou perdem sua função com o uso e o decorrer do tempo. A sua definição exata varia com o nível de gerência em que é utilizado (rede ou projeto). A importância de se prever, da forma mais exata possível, a degradação futura de um pavimento é essencialmente econômica (RODRIGUES, 1997).

Segundo Gonçalves (1998), entende-se por desempenho de um pavimento o grau com que o mesmo atende as funções que lhe são impostas ao longo de sua vida de serviço.

De acordo Rodrigues (1997), desempenho de um pavimento apresenta diferenças quando analisado em nível de rede ou em nível de projeto. Também é preciso levar em conta a esfera em que a malha viária está envolvida, ou seja, municipal, estadual ou federal. Na fase de projeto, o desempenho é definido pelas condições oferecidas pelo pavimento em termos da presença e da severidade de mecanismos de deterioração eleitos a priori (ex.: trincamento por fadiga, deformações plásticas, serventia do pavimento e condições de atrito).

2.2 Gerência de pavimentos

A gerência de pavimentos constitui atualmente em importante ferramenta do administrador para traçar a forma mais eficaz da aplicação dos recursos públicos disponíveis nas vias que necessitam de recuperação em diversos níveis de intervenção, de forma a responder às necessidades dos usuários dentro de um plano estratégico que garanta o alcance de um maior número de vias recuperadas.

Engloba todo o planejamento, como construção, conservação, reconstrução e operação de uma via, tendo como suporte informações e dados coletados durante o desenvolvimento dessas etapas e avaliações do pavimento. Segundo Marcon (2003), os principais objetivos de uma gerência são:

- ✓ Organizar um banco de dados para armazenar informações sobre os

pavimentos;

- ✓ Avaliar os dados existentes, visando determinar o desempenho dos pavimentos construídos;
- ✓ Programar as atividades de conservação e restauração, otimizando a aplicação dos recursos disponíveis;
- ✓ Estabelecer atividades de pesquisa para aperfeiçoar as técnicas empregadas ou a utilização de novos materiais.

Segundo Junior et al. (1996), para a implantação de um sistema de gerenciamento de pavimentos são necessários três fatores principais:

- ✓ Dados confiáveis, modelos realísticos para o processamento de dados;
- ✓ Programas amigáveis para a organização de dados;
- ✓ Apresentação dos resultados.

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

Fernandes Jr. et al. (2001) cita que a gerência de pavimentos em nível de rede trabalha com informações resumidas, relacionadas a toda malha viária, utilizadas para a tomada de decisões essencialmente administrativas (planejamento, programação e orçamento). Já a gerência de pavimentos em nível de projeto envolve dimensionamento, construção, manutenção e reabilitação, utilizando informações técnicas detalhadas, relacionadas às seções específicas dos pavimentos.

Para se gerenciar um pavimento é preciso conhecer a seu respeito, além é claro, de estruturar um sistema organizacional e decisório eficaz. Conhecer a respeito do pavimento de determinada rodovia significa formar um banco de dados com aquelas informações que sintetizem da melhor maneira possível todas as suas características importantes, tanto no âmbito estrutural, quanto no âmbito funcional (SEVERO, 2004).

2.3 Sistemas de gerência de pavimentos

Um Sistema de Gerência de Pavimentos deve fornecer um método sistemático e consistente para selecionar necessidades e prioridades de manutenção e reabilitação e determinar o tempo ótimo de intervenção através da previsão da condição futura do pavimento. Os modelos de previsão de desempenho dos pavimentos são essenciais para um completo SGP (SHAHIN, 1994).

2.4 Modelos de previsão de desempenho

Um pavimento tem como finalidade proporcionar aos usuários uma condição de superfície (rolamento) que permita com diferentes tráfegos, a segurança e conforto, durante todo o período de projeto. Os pavimentos mudam de condições com o decorrer do tempo e do uso, assim o termo genérico desempenho é utilizado para designar a condição que o pavimento se encontra ao longo de sua vida de serviço. Segundo ASSHTO (1990), o desempenho de um pavimento é a capacidade deste de atender seus objetivos ao longo do tempo.

Para Gonçalves (1998), modelos de previsão de desempenho são funções que relacionam as características do pavimento e suas condições atuais (estruturais, funcionais e de degradação superficial) à evolução com o tempo dos defeitos de superfície ou do nível de serventia, sob dadas condições climáticas e de tráfego a que o pavimento está submetido.

2.4.1 Tipos de modelos

Segundo Gonçalves (1998), os modelos de previsão de desempenho podem ser de dois tipos: determinísticos e probabilísticos. Modelos determinísticos prevêm um único número para a vida de serviço do pavimento ou para o grau de deterioração. Já os modelos probabilísticos incluem análise de distribuição de probabilidade. São utilizados preferencialmente em nível de rede, devido às maiores incertezas associadas a esse nível.

De acordo com o mesmo autor, os modelos estabelecidos a partir de respostas fundamentais fornecidas pelo pavimento permitem a previsão das principais respostas a serem oferecidas pelo pavimento quando da sua solicitação pelas cargas do tráfego e pelas condições climáticas, tais como: deflexões, tensões, deformações, tensões térmicas, teor de umidade e temperatura. Esses modelos podem ser do tipo empírico, mecanístico ou mecanístico-empírico (modelos calibrados com dados observados no campo).

Conforme Rodrigues (1997), os modelos de previsão hoje disponíveis refletem as limitações na compreensão do modo como os pavimentos se comportam em relação às características que controlam seu desempenho. Estas mesmas limitações têm um forte impacto na qualidade dos métodos de projeto disponíveis, na medida em que qualquer método de projeto depende implicitamente dos modelos para o pavimento que foram utilizados para o seu desenvolvimento. Uma grande massa de informações relativas a materiais, projeto, construção, efeitos do tráfego, efeitos climáticos e ambientais, e mesmo modelos de previsão de desempenho foi gerada nas últimas décadas.

Os modelos de desempenho podem ser agrupados em quatro classes, conforme a classificação proposta por Haas et al. (1994).

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

Muitas técnicas são utilizadas para o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho, entre elas pode-se citar extrapolação em linha reta, regressão

(empírico), empírico-mecanístico, polinômio com mínimos quadrados, distribuição de probabilidade e Markoviana.

Shahin (1994) afirma que o grau de acurado necessário para um modelo de previsão de desempenho depende da função na qual ele será empregado. Por exemplo, modelos de desempenho utilizados em análises em nível de projeto necessitam maior acurada do que aqueles que serão empregados em análises em nível de rede.

2.4.1.1 Modelos determinísticos

Os modelos determinísticos podem ser dos seguintes tipos: modelos de desempenho estrutural, modelos de desempenho funcional e modelos de degradação.

2.4.1.1.1 Modelos de desempenho estrutural

Prevêm o surgimento e a propagação de defeitos de natureza estrutural, ou seja, defeitos que são produzidos pela repetição das cargas do tráfego. Alguns modelos prevêm defeitos individuais, enquanto outros prevêm índices compostos, como o *Structural Condition Index* (SCI), uma derivação do PCI do sistema PAVER que considera apenas os defeitos de natureza estrutural (RODRIGUES, 1997).

2.4.1.1.2 Modelos de desempenho funcional

Prevêm a queda de um índice de serventia (como o PSI) ou do coeficiente de atrito da superfície com o tempo, ou seja, envolvem parâmetros indicadores do nível de serviço ou da função dos pavimentos (conforto ao rolamento, segurança) (RODRIGUES, 1997).

2.4.1.1.3 Modelos de degradação

Tais modelos, segundo Rodrigues (1997), são derivados de um dos dois tipos anteriores (estruturais ou funcionais) e utilizam uma Função de Degradação (g), que é um indicador normalizado de defeitos ou de queda de índice de serventia. A degradação começa em zero e se torna igual a 1,0 quando um nível inaceitável de defeitos ou de serventia é atingido. Como exemplo, tem-se a equação de degradação desenvolvida na AASHO *Road Test*:

$$g = \frac{PSI_0 - PSI}{PSI_0 - PSI_t} = \left[\frac{W}{\rho} \right]^\beta \quad (1)$$

Onde:

W = número acumulado de passagens de uma carga de eixo;

ρ, β = constantes, que dependem da estrutura do pavimento, da rigidez do subleito, da magnitude da carga de eixo atuante e do clima;

PSI_0 = índice de serventia inicial (pavimento novo);

PSI_t = índice de serventia final (pavimento que deve ser restaurado).

Outros tipos de função de degradação podem ser definidos, utilizando-se a área (a) ou a severidade (s) de um certo tipo de defeito, dividindo-os pelo número máximo aceitável para esses parâmetros:

$$g = \frac{a}{a_t} \qquad g = \frac{S}{S_t} \quad (2)$$

A grande aplicação dos modelos de degradação se dá na derivação de fatores de equivalência de cargas, os quais afetam a alocação de custos e de tarifas entre os diferentes setores envolvidos no transporte rodoviário.

2.4.1.2 Modelos probabilísticos

2.4.1.2.1 Curvas de sobrevivência

Segundo Rodrigues (1997), as curvas de sobrevivência são utilizadas para a alocação de recursos em nível de rede, podendo ser desenvolvidas a partir do histórico de manutenção dos pavimentos da rede. Uma curva de sobrevivência é um gráfico de probabilidade versus tempo e representa a porcentagem de pavimentos que permanecem em serviço após um certo número de anos (ou de passagens de um eixo padrão) sem requererem um grande investimento em conservação ou sem necessitarem ser restaurados.

2.4.1.2.2 Modelos markovianos

Os modelos markovianos utilizam a chamada “matriz de transição”, que expressa a probabilidade de que um grupo de pavimentos com idades semelhantes e sujeitos aos mesmos níveis de tráfego passe de um estado de degradação ou índice de serventia para outro, dentro de um período de tempo especificado. Admite-se ser este um processo estacionário, ou seja, um processo onde a probabilidade de mudança de um estado a outro seja independente do tempo. Dentro de um horizonte de tempo para um planejamento orçamentário em nível de rede esta hipótese não é, contudo, válida para a maioria dos pavimentos. Uma “condição” para o pavimento, em qualquer instante de tempo, é descrita pelas probabilidades de que o pavimento se encontre em cada um dos estados, em número finito, que forem definidos, como exemplificado na Tabela 1. Este tipo de processo pode ser capaz de simular confiavelmente o desempenho global de uma rede de pavimentos de tipos similares em condições semelhantes de clima e de tráfego (RODRIGUES, 1997).

Tabela 1 - Vetor de estado quanto ao índice de serventia

Estado	PSI	Probabilidades
1	5,0 - 4,5	0
2	4,4 - 4,0	0
3	3,9 - 3,5	0,05
4	3,4 - 3,0	0,10
5	2,9 - 2,5	0,20
6	2,4 - 2,0	0,20
7	1,9 - 1,5	0,15
8	1,4 - 1,0	0,15
9	0,9 - 0,5	0,10
10	0,4 - 0,0	0,05
Soma =		1,00

2.4.1.2.3 Modelos semimarkovianos

Os modelos semimarkovianos são idênticos aos modelos markovianos, com a diferença de que se considera que o processo seja estacionário apenas durante incrementos de tempo. A simulação se torna, assim, mais realística, uma vez que se reconhece que a condição do pavimento e as condições mutáveis de clima e de tráfego causam uma alteração no processo de transição (RODRIGUES, 1997).

2.4.1.2.4 Modelos empíricos

Resultam da observação do desempenho de rodovias em serviço, e são funções de alguns poucos parâmetros ou índices que procuram caracterizar a estrutura do pavimento, o tráfego e o clima. Uma abordagem puramente empírica para previsão do desempenho de pavimentos é baseada em observações de desempenho sem considerar (satisfazer), teoricamente, as contribuições dos vários fatores. Por outro lado, uma abordagem puramente mecanística define matematicamente os fatores individuais específicos concluindo acerca do momento preciso e o modo principal de deterioração. Abordagens empíricas estão restritas às condições para as quais foram desenvolvidas e qualquer extrapolação desses limites podem resultar em interpretações grosseiras. Modelos analíticos e numéricos são usualmente confinados a problemas específicos,

como as respostas das cargas ou temperatura, e combinações desses modelos para explicar completamente o comportamento de um pavimento tornam-se impossibilitadas. Uma forma para resolver essas diferenças é a realização de experimentos em escala real, onde seções de pavimentos são devidamente instrumentadas com o propósito de se obter parâmetros e respostas em pontos críticos da estrutura. Portanto, a finalidade principal da instrumentação de seções de pavimentos *in situ* é a de se buscar condições que possibilitem explicar racionalmente o desempenho dos mesmos (GONÇALVES, 1998).

De acordo com o mesmo autor, embora os modelos empíricos sejam de utilização bem mais simples que os mecanístico-empíricos, estes últimos tendem a ser mais confiáveis, especialmente quando se trata de aplicá-los a condições de clima, tráfego e materiais de construção diferentes ou fora das faixas referentes aos trechos experimentais em que foram calibrados. Além disso, os modelos empíricos nada informam sobre a evolução dos defeitos no pavimento ao longo do tempo e, na maioria dos casos, não indicam quais será a condição do pavimento ao final do período de projeto. Estas deficiências não existem, de modo geral, nos modelos mecanístico-empíricos.

Os modelos de previsão empíricos sempre tiveram um papel predominante nas aplicações práticas, uma vez que o comportamento em longo prazo dos materiais tratados e naturais em uma rodovia sujeita à ação do tráfego e do clima é influenciado por um grande número de fatores, que agem e interagem entre si de forma complexa e altamente variável. Além disso, os critérios para se definir o que é um desempenho aceitável envolvem limites determinados subjetivamente sobre a qualidade do conforto ao rolamento e sobre outros modos de degradação (RODRIGUES, 1997).

2.4.1.2.5 Modelos mecanístico-empírico

Segundo Gonçalves (1998), os modelos mecanísticos-empíricos são constituídos por um modelo teórico que procura explicar ou prever a deterioração da estrutura sob a repetição das cargas do tráfego. Modelo este baseado no comportamento mecânico dos materiais das camadas e da própria estrutura sob a ação das cargas dinâmicas dos veículos em movimento, e por Funções de Transferência, que calibram o modelo teórico de modo a que este reproduza o desempenho real de pavimentos em serviço. A calibração é responsável por incluir no modelo final fatores que não puderam ser

considerados pelo modelo mecanístico. É comum, no entanto, na grande maioria dos modelos mecanístico-empíricos existentes, que a teoria de degradação adotada seja precária ou muito inconsistente, o que tem levado a dificuldades na calibração experimental, quando se obtém fatores de calibração exageradamente variados.

Rodrigues (1997) observa que os modelos mecanístico-empíricos surgiram para se aumentar a eficiência estrutural dos pavimentos e para se extrapolar o projeto a magnitudes de carregamento e para tipos de materiais que estão fora do escopo dos dados de campo disponíveis acerca do desempenho de pavimentos rodoviários em serviço. Esses modelos requerem, contudo, um embasamento teórico e experimental consistente, além de uma calibração empírica para as condições reais de campo. Eles encontram, além disso, dificuldades na previsão da irregularidade longitudinal e da desintegração superficial, aspectos estes determinantes das necessidades de manutenção.

2.4.2 Modelos de evolução de irregularidade

Na sequência estão apresentados alguns modelos derivados de pesquisa realizada no sentido de estimar o desempenho dos pavimentos em termos da condição de conforto ao rolamento.

2.4.2.1 Yschiba (2003)

Desenvolveu modelos estatísticos que representam os efeitos dos fatores idade, tráfego e número estrutural sobre o desempenho de pavimentos, quantificados tanto em termos de irregularidade longitudinal (IRI, em m/Km), como em termos estruturais (deflexão determinada com a viga Benkelman). Para o desenvolvimento dos modelos foram utilizados dados históricos de avaliações da condição da malha rodoviária do estado do Paraná, realizadas em 1995 e 1998. As seções inventariadas foram agrupadas em uma matriz fatorial, com o objetivo de identificar os fatores e interações que possuam efeito significativo sobre os parâmetros de desempenho dos pavimentos. O estabelecimento das equações de regressão se deu através da análise de variância (ANOVA).

1. Irregularidade longitudinal de pavimentos não reabilitados e avaliados em 1995

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

$$R^2 = 0,75$$

2. Deflexão máxima recuperável de pavimentos não reabilitados e avaliados em 1995

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

$$R^2 = 0,62$$

3. Irregularidade longitudinal de pavimentos reabilitados e avaliados em 1995

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

$$R^2 = 0,81$$

4. Deflexão máxima recuperável de pavimentos reabilitados e avaliados em 1995

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

$$R^2 = 0,83$$

$$P(I) = \frac{I - 13}{8} \quad P(N) = \frac{N - 5 \times 10^4}{10^5} \quad P(S) = \frac{S - 5,5}{2} \quad (3)$$

Onde:

I = idade em anos;

N = o número de solicitações do tráfego;

S = número estrutural corrigido.

2.4.2.2 Queiroz (1981)

Desenvolveu modelos de previsão de desempenho a partir da base de dados levantada para a P1CR, iniciada em 1975 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 1981). Os dados de campo utilizados provêm de trechos de pavimentos localizados na rede rodoviária existente nos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Distrito Federal, Queiroz (1984).

Foram desenvolvidos modelos, tanto empíricos quanto mecânicos, de previsão de desempenho de pavimentos no Brasil. As variáveis dependentes consideradas no estudo foram: irregularidade longitudinal, trincamento e pequenos remendos, bem como profundidade das trilhas de roda. Os afundamentos das trilhas de roda observados foram, no entanto, muito pequenos, razão pela qual não foram desenvolvidas equações para previsão da profundidade das trilhas de roda nos pavimentos (QUEIROZ, 1984).

2.4.2.3 Modelo empírico

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

Os modelos de previsão da irregularidade longitudinal para pavimentos flexíveis foram desenvolvidos em função da idade do pavimento e do número equivalente de solicitações do eixo padrão, bem como de uma ou duas das seguintes variáveis estruturais: número estrutural corrigido e deflexão pela viga Benkelman.

1. Equação que inclui o número estrutural

$$\log \text{QI} = 1,478 - 0,138\text{ER} + 0,000795 \text{ A} + 0,0224 \left(\frac{\log N}{\text{SNC}} \right)^2 \quad (4)$$

R2: 0,26

Onde:

QI = quociente de irregularidade, em contagens/Km;

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

SNC = número estrutural corrigido para a resistência do subleito.

ER = variável indicadora do estado de reabilitação

ER = 0, como construído;

ER = 1, reabilitado;

N = número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 80 kN, calculado pelo método da AASHTO;

2. Equação incluindo deflexão pela viga Benkelman

$$\begin{aligned}
 \text{QI} &= 21,8 - 7,52 \text{ ER} + 5,16 \text{ TR} + 0,515 \text{ A} + 7,22 \times 10^{-5} (\text{B} \times \log \text{N})^2 \\
 \text{R}^2 &: 0,48
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Onde:

TR = variável indicadora do tipo de revestimento

TR = 0, concreto asfáltico;

TR = 1, tratamento superficial;

B = deflexão pela viga Benkelman (0,01 mm);

3. Equação incluindo número estrutural e deflexão pela viga Benkelman

$$\begin{aligned}
 \text{QI} &= 12,63 - 5,16 \text{ ER} + 3,31 \text{ TR} + 0,393 \text{ A} + 8,66 \left(\frac{\log N}{\text{SNC}} \right) + 7,17 \times 10^{-5} (\text{B} \times \\
 &\log N)^2 \\
 \text{R}^2 &: 0,52
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

4. Estimativa do N até o surgimento da primeira trinca

$$\begin{aligned}
 \log N &= 1,205 + 5,96 \log \text{SNC} \\
 \text{R}^2 &: 0,52
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

5. Evolução do trincamento, equação incluindo deflexão pela viga Benkelman

$$\begin{aligned}
 \text{CR} &= -18,53 + 0,0456 \times \text{B} \times \log N + 0,00501 \times \text{B} \times \text{A} \times \log N \\
 \text{R}^2 &: 0,64
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Onde:

CR = percentagem de área trincada do pavimento;

6. Evolução do trincamento, equação que inclui o número estrutural corrigido.

$$CR = -57,7 + 53,5 \left(\frac{\log N}{SNC} \right) + 0,313 \times A \times \log N \quad (9)$$

R²: 0,345

Para a previsão das trincas nos pavimentos de concreto asfáltico, foram desenvolvidos dois tipos de modelos: de previsão do número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 kN até o surgimento da primeira trinca; de previsão da progressão do trincamento. Nesses dois tipos de modelos, considera-se que o pavimento não sofreu nenhum tipo de manutenção.

O modelo para prever o surgimento de trincas no pavimento foi desenvolvido em termos do número estrutural corrigido. Para prever a percentagem de área trincada, são apresentadas equações, que, além da idade e do tráfego, incluem as variáveis independentes, como deflexão pela viga Benkelman e o número estrutural corrigido. Dessa forma, a seleção da equação poderá ser feita de acordo com as variáveis disponíveis.

2.4.2.4 Modelo empírico-mecanístico

Os modelos empírico-mecanísticos desenvolvidos por Queiroz (1981) para a previsão da irregularidade longitudinal e do trincamento correlacionam efeitos estruturais (tensão, deformação específica e deslocamento) com as observações de campo. Para a obtenção desses modelos, três etapas principais foram seguidas, conforme apresentado por Queiroz (1984).

1. Caracterização das propriedades dos materiais do pavimento: suposição de um comportamento elástico linear, ou seja, as deflexões são linearmente proporcionais às cargas aplicadas;

2. Análises de estruturas de pavimento: podem ser realizadas através de programas computacionais referentes a camadas elásticas, para o cálculo de tensões, deformações específicas e deflexões em estruturas de pavimento. Sendo necessário o conhecimento de duas propriedades dos materiais, para cada camada, o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade;

3. Comparação das respostas empírico-mecanísticas com as observações de campo: a hipótese empregada para desenvolver modelos de desempenho supõe que o fenômeno físico observável (isto é, irregularidade longitudinal e trincas) seja função da interação do tráfego com situações de tensões, deformações e deslocamentos, induzidas pela carga de eixo padrão, à estrutura do pavimento.

Para a irregularidade do pavimento, foram derivados dois modelos de previsão, cujas variáveis independentes comuns são idade e tráfego:

$$\text{Log QI} = 1426 + 0,01117 A - 0,1505 ER + 0,001671 \times \text{VSN} \times 3 \times \log N \quad (10)$$

$R^2: 0,248$

$$\text{Log QI} = 1,297 + 09,22 \times 10^{-3} A - 9,08 \times 10^{-2} TR \times 7,02 \times 10^{-2} ER + 5,57 \times 10^{-4} \quad (11)$$

(SEN 1 x log N)

$R^2: 0,510$

Onde:

VSN 3 = deformação específica de compressão vertical no topo do subleito

SEN 1 = energia de deformação na face inferior do revestimento (104 kgf. cm).

Dois tipos de equação de previsão de trincas foram desenvolvidos para pavimentos de concreto asfáltico. O primeiro prevê o número equivalente de solicitações do eixo padrão suportado pelo pavimento até o surgimento da primeira trinca, em função da deformação específica de compressão vertical na face inferior do revestimento e o segundo tipo prevê a percentagem de área trincada em função do tráfego e da tensão de tração horizontal na base do revestimento.

$$\log N = 6,87 - 1,970 \log \text{VSN} \quad (12)$$

$R^2: 0,31$

$$\text{CR} = -8,70 + 0,258 \text{HST}1 \times \log N + 1,006 \times 10^{-7} \text{HST}1 \times N \quad (13)$$

$R^2: 0,50$

Onde:

VSN1 = deformação específica de compressão vertical na face inferior do revestimento;

HST1 = tensão de tração horizontal na face inferior do revestimento (kgf/cm²).

2.4.3 Marcon (1996)

Estabeleceu modelos de previsão com base nos dados da rede rodoviária do estado de Santa Catarina (extensão 2,500 km) levantados em 1990, A análise das tendências de desempenho e as comparações com modelos existentes foram efetuadas através de gráficos, relacionando a idade ou o número equivalente de operações do eixo padrão de 80 kN, calculado pelo método da AASHTO, as variáveis quociente de irregularidade, deflexões máximas médias, índice de gravidade global, trincamento total e profundidade média das trilhas de roda. Para alguns parâmetros onde existem equações de desempenho desenvolvidas em outras pesquisas, foi traçada a curva de desempenho juntamente com os dados, permitindo a comparação desta com a linha de tendência determinada através dos valores levantados dos parâmetros. Os modelos utilizados neste trabalho foram desenvolvidos para a região 2 do estado de Santa Catarina, conforme apresentado em Marcon (1996).

1. Quociente de irregularidade

$$QI = 18,348 + 1,1635 \times IDADE \quad (14)$$

$$R^2 = 0,29$$

$$QI = 25,783 + 4 \times 10^{-6} \times NA - 5 \times 10^{-14} \times NA^2 \quad (15)$$

$$R^2 = 0,32$$

2. Deflexões máximas médias

$$DEFM = 24,288 + 3,5458 \times IDADE \quad (16)$$

$$R^2 = 0,37$$

$$\text{DEFM} = 44,928 + 1,0 \times 10^{-5} \times \text{NA} \quad (17)$$

$$R^2 = 0,50$$

3. Índice de gravidade global

$$\text{IGG} = -20,91 + 5,01 \times \text{IDADE} \quad (18)$$

$$R^2 = 0,52$$

$$\text{IGG} = 8,7647 + 2,0 \times 10^{-5} \times \text{NA} - 1,0 \times 10^{-12} \times \text{NA} \quad (19)$$

$$R^2 = 0,61$$

4. Trincamento total

$$\text{ATR} = 1,5124 \times \text{IDADE} - 6,8923 \quad (20)$$

$$R^2 = 0,32$$

$$\text{ATR} = 1,4532 + 4 \times 10^{-6} \times \text{NA} \quad (21)$$

$$R^2 = 0,55$$

5. Profundidade média das trilhas de roda

$$\text{TRI} = 1,8228 + 0,2325 \times \text{IDADE} \quad (22)$$

$$R^2 = 0,28$$

$$\text{TRI} = 3,3051 + 5 \times 10^{-7} \times \text{NA} \quad (23)$$

$$R^2 = 0,26$$

Onde:

QI = quociente de irregularidade, em contagens/km;

- IDADE = idade do pavimento desde a construção ou reabilitação, em anos;
- NA = número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 ton, calculado pelo método da AASHTO;
- DEFM = deflexão máxima média, em 0,01 mm;
- IGG = índice de Gravidade Global;
- ATR = percentual de área do pavimento com trincamento total;
- TRI = profundidade média das trilhas de roda, em mm.

2.4.4 DNER-PRO 159/85 (DNER, 1985)

Através do DNER-PRO 159/85 (DNER, 1985), pode-se obter a previsão de irregularidade imediatamente após restauração em concreto asfáltico. Esta equação é descrita a seguir:

$$QI_{previsto} = 19 + \frac{QI_{antes} - 19}{0,602H + 1} \quad (24)$$

Onde:

QI_{previsto}= irregularidade do pavimento prevista, após a aplicação do concreto asfáltico;

QI_{antes}= irregularidade do pavimento antes da aplicação do concreto asfáltico;

H= espessura da camada de restauração, em cm.

A correlação entre a irregularidade e a espessura da camada de reforço foi desenvolvida em um estudo realizado por Coelho e Queiroz (1985 apud RODRIGUES, 2002).

2.4.5 Paterson (1987)

Modelo base do estudo que será voltado para a previsão do PSI ao longo do tempo, escolhido como parâmetro central controlador do processo decisório, tendo em vista que o principal componente do Índice de Serventia é a irregularidade longitudinal.

$$IRI(t) = \left[IRI_0 + 725(1 + SNC)^{-4,99} NE_4(t) \right] e^{0,0153t} \quad (25)$$

Onde:

NE4 = tráfego acumulado do eixo padrão 8,2 tf, em milhões por faixa;

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

A análise de dados da pesquisa LTPP, realizada por Rodrigues (confirma a validade do modelo:

$$IRI(t) = IRI_0 e^{\alpha_t t} \quad (26)$$

Como válido para descrever a forma da evolução da irregularidade, ao menos para as seções onde os dados abrangeram $IRI > 1$ m/km. O próprio modelo do HDM-III utiliza uma forma semelhante. Escrevendo esta equação em termos de tráfego acumulado (N), resulta:

$$IRI(N) = IRI_0 e^{\alpha N} \quad (27)$$

Onde:

$$IRI(N) = IRI_0 e^{\alpha \frac{N}{Nano}} \quad (28)$$

E,

$$\alpha = \frac{\alpha_t}{Nano} \quad (29)$$

Do pavimento através do parâmetro SN e MrsI, no caso dos pavimentos flexíveis, e a espessura da placa de concreto de cimento Portland e módulo de reação do subleito, para o caso dos pavimentos rígidos.

O modelo da AASHTO (1986), contudo, não é muito adequado para descrever a curva PSI tempo, sendo possivelmente adequado para descrever o tráfego acumulado requerido para produzir uma queda global de serventia desde a condição de pavimento novo até aquela em que precisa ser restaurado ($PSI = PSI_0 - PSI_t$). Sendo assim, pode-se cogitar de utilizar a equação acima como modelo de previsão de desempenho, deixando a definição do parâmetro α para as equações da AASHTO (1986). Quaisquer ajustes adicionais poderiam ser feitos através de um fator de calibração F_c da seguinte forma:

$$\alpha = F_c \alpha_A \quad (30)$$

Onde:

α_A é o valor de α requerido pela fórmula geral do modelo quando aplicada ao modelo da AASHTO. Neste caso:

$$\alpha_A = \frac{1}{W_{18}} \ln \left[\frac{\ln \left(\frac{PSI_0}{5} \right)}{\ln \left(\frac{2,5}{5} \right)} \right] \quad (31)$$

Onde:

W_{18} é o tráfego acumulado requerido pelo modelo da AASHTO para $PSI = PSI_0 - PSI_t$, com $PSI_t = 2,5$. O valor de W_{18} é dado, de acordo com o Guia da AASHTO e no caso de pavimentos asfálticos, pela fórmula:

$$W_{18} = 10^{-6} \left[\left(\frac{SN+1}{1,05} \right) \right]^{9,36} \left[\frac{PSI_0 - 2,5}{2,7} \right]^{\frac{1}{\beta}} \left[\frac{M_R}{3000 \text{ psi}} \right]^{2,32} \quad (32)$$

$$\beta = 0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}} \quad (33)$$

No caso de pavimentos que já receberam algum recapeamento em CBUQ, o modelo é utilizado de forma diferente. Nesta situação, o maior interesse é o de determinar a expectativa de vida de serviço da camada de recapeamento que foi aplicada. O desempenho da estrutura global será condicionado pela natureza e espessura

da camada de recapeamento, na medida em que um pavimento já restaurado tende a ter sido consolidado obtido derivando a função correspondente. Nesta fórmula, PSI representa a condição atual, que será alterada para: $PSI^* = PSI + \delta PSI$ após um ano. Isto significa que o tráfego responsável pela variação de PSI para PSI^* é o tráfego atuante durante um ano, ou seja, que:

$$\delta N = N_{ano} \quad (34)$$

No caso de camadas de desgaste convencionais (Lama Asfáltica, Tratamentos Superficiais) ou especiais (como o mico-concreto asfáltico com polímero), o usuário deverá fornecer, em tela apropriada do Banco de Dados, os parâmetros que definem o modelo de previsão de desempenho a ser adotado, parâmetros estes que devem ter sido originados da observação do desempenho de trechos experimentais. Os modelos são sempre da forma:

$$PSI(N) = PSI_0 - \alpha N \quad (35)$$

Onde o parâmetro α foi determinado, para as camadas de desgaste convencionais, através dos modelos empíricos do HDM-III.

No caso de pavimentos que já receberam algum recapeamento em CBUQ, o modelo é utilizado de forma diferenciada. Nesta situação, o maior interesse é o de determinar a expectativa de vida de serviço da camada de recapeamento que foi aplicada. O desempenho da estrutura global será condicionado pela natureza e espessura da camada de recapeamento, na medida em que um pavimento já restaurado tende a ter sido consolidado de forma significativa pelo tráfego que passou antes da restauração. O modelo é utilizado fazendo com que o número estrutural a ser considerado na fórmula seja definido pela espessura da própria camada de recapeamento que foi aplicada, ou seja:

$$SN = 0,44 \frac{H_R}{2,54} \quad (36)$$

A obtenção do módulo de elasticidade equivalente da estrutura de pavimento subjacente à camada de recapeamento é feita aplicando a fórmula, temperatura média de referência para o cálculo de E2 a partir da deflexão. Para misturas de CBUQ convencionais, adota-se $E_{30C} = 25.000 \text{ kgf/cm}^2$.

Quando o sistema aplica uma camada asfáltica de recapeamento ao pavimento existente, a utilização do modelo para previsão do desempenho do pavimento restaurado requer a determinação do módulo de elasticidade efetivo equivalente (E) do pavimento subjacente à camada de recapeamento. Neste caso, como se dispõe da deflexão do pavimento existente DC (antes do recapeamento), aplica-se a fórmula da teoria da elasticidade:

$$E = 2(1 - \nu^2) \frac{pa}{Dc} \quad (37)$$

Onde é utilizado o valor $\nu = 0,33$ para o coeficiente de Poisson médio do pavimento.

No caso de pavimentos rígidos, o modelo para dimensionamento da AASHTO é dado por:

$$\log_{10} W18 = Z_r * S_0 + 7,35 * \log_{10}(D + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{10 + \frac{1,624^{*7}}{(D + 1)^{58,45}}} \quad (38)$$

$$\left[\frac{S_c * C_d [D^{0,75} - 1,32]}{215,63 * J \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c / k)^{0,25}} \right]} \right] \quad (39)$$

Onde:

W18 = número acumulado de repetições do eixo padrão de 80 kN;

D = espessura da placa de CCP em polegadas;

PSI = queda da serventia no período de projeto;

k = coeficiente de recalque (pci);

E_c = módulo de elasticidade do concreto (psi);

ZR = parâmetro associado nível de confiabilidade de projeto NC.

2.4.6 Avaliação / monitoramento de pavimentos

2.4.6.1 Avaliação do pavimento

Segundo Gonçalves (1999), este tipo de avaliação, da condição do pavimento, é feito de acordo com a visão do usuário, detectando-se, assim, as deficiências merecedoras de maior atenção. Compreende os aspectos que afetam mais diretamente o usuário da via, tais como:

- ✓ Conforto ao rolamento: o principal parâmetro é a irregularidade longitudinal causada por afundamento plástico, ocasionado por acúmulos de deformações permanentes devido a ação de cargas repetidas nas camadas do pavimento;
- ✓ Tempo de viagem: está relacionada ao custo operacional dos veículos, ou seja, defeitos nos veículos gerados pela má conservação da superfície do pavimento e conseqüentemente, gerando maior consumo de tempo de deslocamento;
- ✓ Segurança: o principal fator avaliado é o atrito da pista molhada, que é função da microtextura e macrotextura superficial, ambas afetadas pelo desgaste produzido pela passagem do tráfego. Outros fatores, como a irregularidade transversal, que aumenta a probabilidade de ocorrer hidroplanagem e a refletividade da pista, também são importantes.

2.4.6.2 Condição funcional

2.4.6.3 Condição da superfície

A avaliação de superfície de pavimentos é uma atividade que permite inferir as condições funcionais e estruturais dos pavimentos.

Os principais dados obtidos no processamento dos dados de levantamento de defeitos de superfície são:

- ✓ O percentual da área total atingida por determinado tipo de efeito e a profundidade média da trilha de roda;
- ✓ O Método DNER-PRO 08/94 estabelece o cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG).

2.4.6.3.1 Índice de condição de superfície

Método aplicado para o inventário dos defeitos nos pavimentos tanto em nível de projeto quanto ao emprego na gerência de pavimentos.

Este método consiste na classificação do defeito do pavimento e a quantificação de sua área, o que é realizado em campo através da demarcação e medição de dimensões.

2.4.6.3.2 Índice de gravidade global (IGG)

O IGG preconizado pelo DNER é o método mais conhecido e utilizado para a determinação de índices de qualidade para pavimentos. É aplicável a pavimentos com revestimento asfáltico. É um valor numérico obtido através da distribuição de escala de valores e fatores e da ponderação para cada tipo de defeito avaliado como: fissuras, ondulações, panelas, exudação, afundamento de trilha de roda e outros. Os defeitos são agrupados em 8 grupos a fim da ponderação do IGG. O inventário é feito a cada 20 metros de pavimento, no caso de pista simples, alternando-se a faixa de rolamento, ou na faixa mais solicitada no caso de pista dupla, permitindo inferir o estado de degradação do pavimento.

O cálculo do IGG é realizado conforme o procedimento descrito na norma do DNER, conforme Quadro 01.

Quadro 01 – Valores de IGG

Faixa de IGG	Conceito
0 - 20	Bom
20 – 80	Regular
80 – 150	Mau
150 - 500	Péssimo

Fonte – DNER-PRO 08/94.

2.4.6.4 Deterioração da superfície

A avaliação compreende os defeitos existentes na superfície do mesmo. Estes defeitos devem ser descritos quanto aos seguintes parâmetros:

- ✓ Tipo de defeito;
- ✓ Intensidade;
- ✓ Gravidade;
- ✓ Frequência.

A avaliação é feita visualmente, porém, já existem mecanismos automatizados capazes de fazê-la através de leituras por meios de sensores e a laser.

2.4.6.5 Condição estrutural

Segundo Marcon (2003), a avaliação estrutural de pavimento é definida como a verificação da capacidade da estrutura de uma via suportar as cargas dos veículos que sobre ela transmitam. Para termos uma avaliação completa, deve ter os seguintes elementos:

- ✓ Parâmetros que descrevam a deformabilidade elástica ou visco elástico dos materiais;
- ✓ Parâmetros que descrevam a resistência dos materiais ao acúmulo de deformações plásticas sobre cargas repetitivas;
- ✓ Irregularidade das camadas asfálticas e cimentadas.

O principal parâmetro, medido através de ensaio para fins de avaliação, é a deflexão do pavimento sobre carregamento. No Brasil, os equipamentos para medir as deflexões são *Viga Benkelman* e o *Falling Weight Deflectometer* - FWD.

Os parâmetros obtidos das avaliações de deflexão são a deformação sob o ponto central de aplicação da carga, denominada D_0 , o raio de curvatura e a bacia de deflexões. A bacia de deflexão permite que, através de programas de retroanálise, sejam determinados os módulos das camadas do pavimento.

2.6.7 Índice de qualidade dos pavimentos asfálticos

Segundo Balbo (1997), dentre os métodos existentes podemos notar aqueles mais associados à quantificação de defeitos, procuram associar pesos na ponderação de um índice de qualidade para pavimento; dentre os mesmos, existem critérios de definição de pesos determinísticos e outros abertos, em função dos próprios parâmetros em análises.

2.6.7.1 Valor da serventia atual (VSA)

Serventia é definida como sendo o grau com que o pavimento atende aos requisitos de conforto ao rolamento e segurança, nas velocidades operacionais da via em um determinado momento de sua vida de serviço, segundo Gonçalves (1999).

Este parâmetro tem seu valor como índice de qualidade, pois reflete a opinião do usuário quanto ao estado do pavimento. Além de refletir o conforto do usuário também realiza uma ponte de relações existentes do estado do pavimento e os custos operacionais: os veículos.

2.6.7.2 Índice internacional de irregularidade

O conhecimento da irregularidade de um pavimento qualquer a ser restaurado é um dos fatores determinantes da alternativa de projeto mais adequada para este pavimento. Aplicando-se um modelo de previsão de evolução da irregularidade longitudinal do pavimento em uma determinada data, pode-se estimar a qualidade de rolamento deste pavimento no futuro e novas necessidades de restauração (BOTTURA, 1998).

Assim, é fundamental discernir o conceito de irregularidade longitudinal. Haas e Hudson (1978) referem-se a irregularidade como “a distorção da superfície do pavimento o qual contribui para um rolamento indesejável ou desconfortável”. O aumento da irregularidade com o tempo depende da qualidade da estrutura (espessuras das camadas e materiais utilizados), das solicitações do tráfego (deformações plásticas) e dos fatores ambientais (chuvas e temperaturas).

Hudson (1979) dividiu a irregularidade em três componentes do perfil: a variação transversal, a variação longitudinal e a variação horizontal do alinhamento do pavimento; ou seja, parâmetros 13 funcionais que concedem mudanças na aceleração de um veículo. Das variáveis consideradas indesejáveis e que causam desconforto aos usuários, a irregularidade longitudinal é considerada a pior, sendo seguida pela irregularidade transversal. A curvatura horizontal, que fornece forças de mudança de direção ao veículo, é considerada a menos ofensiva e pode ser controlada no próprio projeto planimétrico.

Outros autores, tais como Darlington (1973 apud HAAS; HUDSON, 1979), também reconheceram que o perfil superficial é a melhor maneira de caracterizar a irregularidade. Neste contexto, a definição de perfil superficial não inclui a altimetria da rodovia, mas somente ondulações presentes na superfície do pavimento com comprimentos de onda inferiores a 152,4 m.

Wambold et al. (1980 apud WOODSTROM, 1990) apresentaram ações fundamentais relacionadas às medidas do perfil superficial ou da irregularidade:

- ✓ Manter o controle da qualidade de construção;
- ✓ Localizar as mudanças anormais na rodovia, como problemas de drenagem e deficiências construtivas;
- ✓ Estabelecer um banco de dados atualizado para alocação de recursos de manutenção;
- ✓ Identificar a história de serventia-desempenho do pavimento;
- ✓ Especificar os limites do perfil superficial e a qualidade de rolamento de novas construções;
- ✓ Avaliar os custos para o melhoramento da rodovia;
- ✓ Prever a perda da qualidade de rolamento nas rodovias existentes;
- ✓ Correlacionar com a resposta de vibração e fadiga nos veículos;
- ✓ Desenvolver critérios de conforto do usuário;
- ✓ Avaliar os efeitos da irregularidade no volante e nos freios do veículo.

Paterson (1987b), por meio da especificação E867/82 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), define irregularidade como “desvios de uma superfície de pavimento, em relação a uma superfície plana, com dimensões características que afetam a dinâmica do veículo, a qualidade de rolamento, a dinâmica das cargas e a drenagem”. Ela pode ser causada por qualquer um dos seguintes fatores:

- ✓ Técnicas construtivas, as quais incorrem em algumas variações do perfil da rodovia;
- ✓ Repetições de carga, principalmente em condição de fluxo canalizado, que causam distorções por deformação plástica em uma ou mais camadas do pavimento;
- ✓ Expansão por congelamento e variações volumétricas devido às contrações ou expansões do subleito;
- ✓ Compactação inicial não uniforme.

Paterson (1987b) verificou ainda que a irregularidade é a variação na declividade de uma superfície de rodovia que apresenta um perfil complexo abrangendo uma ampla faixa de frequência de diferentes amplitudes e comprimentos de onda. Esta faixa tende a variar com o tipo de superfície. As medidas de irregularidade incidem em três categorias:

- 1) Um perfil numérico definido diretamente por funções matemáticas elaboradas a partir de um perfil absoluto de elevações superficiais feito sobre as trilhas de rodas;
- 2) Sínteses numéricas medidas diretamente por sistemas medidores de irregularidade tipo resposta calibrados para um perfil ou por outras correlações numéricas;
- 3) Avaliações subjetivas da qualidade de rolamento ou da serventia, geralmente elaboradas por avaliadores sobre uma escala definida por descrições subjetivas.

Para o mesmo autor, as diferenças que surgem entre as medidas de irregularidade são devidas às diferentes formas de respostas dos instrumentos medidores do perfil e da maneira como os dados são processados.

Segundo Woodstrom (1990), um perfil longitudinal pode ser um registro detalhado das características da superfície e da irregularidade do pavimento representado através de um número-resumo. Tradicionalmente, existem duas maneiras de determinar este número: pela integração numérica e pela análise matemática. A

primeira é feita através de um equipamento medidor e a segunda envolve registros e análises matemáticas do perfil através de um procedimento padrão.

De acordo com Haas et al. (1994), as distorções da superfície do pavimento provocam acelerações verticais e laterais no veículo. A aceleração vertical, que surge da distorção longitudinal do perfil do pavimento, interfere no conforto do ocupante do veículo. A aceleração lateral é resultado do movimento de rotação e mudança de direção do veículo. Segundo os autores, a avaliação da irregularidade requer medidas do perfil longitudinal na trilha de roda do pavimento, que devem ser analisadas através de um modelo matemático para gerar uma estatística-resumo para toda extensão do trecho avaliado. Existe uma variedade de estatísticas-resumo, desde uma função potência espectral até tipos de índice de irregularidade.

Janoff et al. (1985) constataram que as características de irregularidade de qualquer rodovia também podem ser estudadas pelo exame das propriedades espectrais do perfil longitudinal. A contribuição de cada faixa de onda na irregularidade pode ser determinada pela inspeção visual da função *Power Spectral Density* (PSD) da declividade. Este método de análise foi muito usado no estudo dos efeitos dos diferentes tipos de solos do subleito nas características de irregularidade, sob diferentes condições climáticas. No entanto, Bruscella et al. (1999) mostraram que o estudo do espectro da declividade de uma rodovia apresentou falhas, e propuseram uma análise da irregularidade baseada na aceleração espacial. Rouillard et al. (2000), através do perfil superficial da aceleração espacial procedente dos dados de declividade da rodovia, apresentaram uma análise e uma metodologia de classificação da irregularidade. A classificação introduzida pelos autores teve duas aplicações – a caracterização e classificação das superfícies de pavimentos com propósitos de manutenção e transporte, e a simulação dinâmica dos veículos.

Sun et al. (2001) apresentam uma investigação teórica com o uso das funções PSD sobre a descrição do perfil da rodovia. Através do perfil longitudinal, do modelo quarto-de-carro e das características da resposta dos veículos, os autores conseguiram estabelecer uma relação entre o Índice de Irregularidade Internacional, ou conhecido internacionalmente por *International Roughness Index* (IRI).

Assim, desde 1962 com os estudos da *AASHO Road Test*, existe uma conscientização da importância de quantificar a irregularidade superficial dos pavimentos. Houve um avanço no estudo da gênese do defeito, das suas características e prováveis causas, e de como ela interfere nos custos aos usuários. O controle da

irregularidade longitudinal deve ser monitorado desde as primeiras etapas da construção dos pavimentos, e o desempenho destes pavimentos pode ser quantificado através do seu monitoramento e estudo.

2.6.7.2.1 Medidores de irregularidade

Existem na literatura vários equipamentos e métodos para medir a irregularidade longitudinal. Gillespie (1992) elaborou um estudo completo sobre o histórico dos principais tipos existentes.

Os medidores de perfis são equipamentos ou métodos usados para reproduzir uma sequência de números relacionados a um “perfil verdadeiro” de uma linha imaginária sobre a rodovia. Os números obtidos não são necessariamente iguais à elevação verdadeira, pois um medidor nem sempre mede exatamente o verdadeiro perfil, e sim componentes deste perfil verdadeiro. A relação entre o perfil verdadeiro e os números produzidos pelo medidor deve encontrar uma especificação.

Sayers e Karamihas (1998) mostraram que um medidor de irregularidade emprega uma combinação de três variáveis: (1) a elevação de referência; (2) a altura relativa de referência; (3) a distância horizontal. Estas três variáveis são combinadas de maneiras diferentes, dependendo do tipo de medidor.

O grande interesse nos equipamentos medidores de irregularidade pode ser visto pela extensa literatura existente sobre o assunto. Os encontros entre especialistas e representantes interessados no tema foram mantidos por muito tempo para determinar e comparar algumas características de desempenho dos equipamentos de uso corrente. Alguns destes encontros foram muito importantes, como os exemplificados abaixo (WOODSTROM, 1990):

- ✓ *International Road Roughness Experiment (IRRE)* em 1982, no Brasil, em que foram comparados vários equipamentos, em 49 seções de rodovias não pavimentadas, rodovias pavimentadas com concreto betuminoso e com tratamento superficial;
- ✓ *Ann Arbor Road Profilometer Meeting*, relatado por Sayers e Gillespie (1986), em que foram operados doze tipos diferentes de perfilômetros em 27 seções testes. O método nível e mira também foi usado em 10 localizações;

✓ *Fort Collins Pavement Profile Measurement Seminar*, mencionado por Donnelly e Kiljan (1988), em que foram testados 20 tipos diferentes de medidores e apresentados novos equipamentos.

Vários órgãos e empresas privadas vêm desenvolvendo e testando equipamentos capazes de medir irregularidades e defeitos de pavimentos, e Bottura (1998) apresenta uma revisão sobre as tendências atuais.

Sayers et al. (1986) agrupou os métodos de medidas de irregularidade existentes em quatro classes (denominados por Classe 1, 2, 3 e 4) baseando-se em como suas medidas dizem respeito ao índice IRI. Os métodos foram classificados de acordo com o tipo de tecnologia e acurácia com que se podia medir a irregularidade a partir de uma referência pré-estabelecida.

Já Paterson (1987) classifica os métodos e equipamentos em quatro categorias, como mostra a Tabela 1. Segundo Prozzi (2001), as categorias I, II e VI são classificadas como medidores do perfil, enquanto que a categoria III, como medidor da resposta.

Tabela 1 - Classificação de métodos

	Categoria	Método e exemplos
I	Perfil absoluto	Mede a elevação do perfil relativo a um nível horizontal de referência.
II	Instrumentos com referência móvel	Mede os desvios em relação a uma referência móvel.
III	Instrumentos com o veículo em movimento	Mede: a) o deslocamento relativo entre o eixo e a carroceria do automóvel. b) a aceleração do eixo ou da carroceria pelos acelerômetros.
IV	Instrumentos de perfil dinâmico	Mede as elevações do perfil eletronicamente em relação a uma referência "horizontal" artificial, fornecendo dados de elevação-distância.

Fonte: Nakahara (2005).

2.6.7.2.2 “Bump integrator”

Utiliza o sistema de aquisição dos dados de irregularidade denominado Road Measurement Data Acquisition System (ROMDAS) desenvolvido pela *Highway and Traffic Consultant Ltd* (HTC). O ROMDAS converte os dados brutos de irregularidade. Coletados em campo em dados calibrados através de equações de calibração.

O sistema utiliza uma instalação simples do BI (Figura 1) conectado no meio do eixo do veículo, fornecendo um índice de irregularidade calculado através do modelo metade-de-carro, já que o registro corresponde a resposta simultânea das duas rodas.

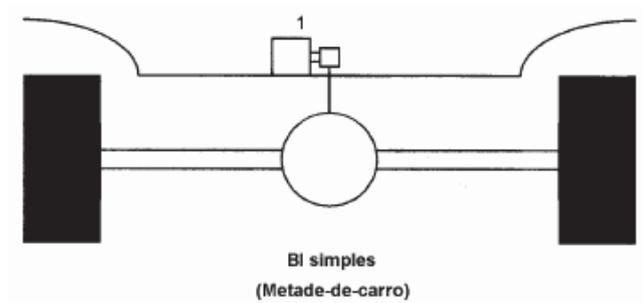


Figura 1 – Detalhe sensor

Fonte: Nakahara (2005).

No veículo são calibrados o odômetro (sensor distância/velocidade) e o medidor de irregularidade.

A calibração do sensor distância/velocidade é feita com os pneus balanceados e na pressão padrão do tipo de veículo para percorrer uma distância mínima de 100 metros. Os pontos inicial e final da seção devem ser marcados no pavimento. O veículo percorre a seção e registra a distância percorrida. O ROMDAS usa esta distância em conjunto com registro do número de pulsos no sensor para a determinação da constante de calibração, ou seja, do número de pulsos por quilômetro. Esta constante é, portanto, usada para converter os pulsos distância/velocidade em distância atual percorrida pelo veículo. Os valores típicos são de 2.500/km em sensores padrões e maiores que 100.000/km em sensores de alta resolução. A operação deve ser repetida várias vezes para assegurar um fator de calibração confiável.

A calibração do medidor de irregularidade é usada para converter os dados não processados (dados brutos) coletados nos levantamentos em dados ou irregularidades calibradas. A calibração requer que o veículo percorra a seção, entre o ponto inicial e o ponto final, e seja registrado o número de contagens não processadas e a velocidade média usada neste intervalo. A execução é similar a um levantamento de irregularidade comum, porém, neste caso, é necessário que o comprimento da seção seja indicado para que o registro inicie no ponto inicial marcado no pavimento e termine automaticamente quando a distância mínima seja alcançada.

O ROMDAS utiliza a média das velocidades registradas sobre o intervalo de amostra, em conjunto com a equação de calibração apropriada para a velocidade, para calcular a irregularidade. Como a irregularidade é baseada no número de contagens por

quilômetro, a conversão da equação de calibração deve também ser baseada em medidas por quilômetro para que os resultados sejam válidos.

Uma das vantagens deste equipamento é que ele pode ser conduzido em altas velocidades sem a necessidade de expor os trabalhadores diretamente ao tráfego.

2.6.7.2.3 Perfilômetro a laser (barra laser)

Desenvolvido e montado no Brasil com o uso de componentes importados, o Perfilômetro Laser é o resultado de um longo trabalho conjunto realizado por experientes profissionais dos ramos da engenharia rodoviária e de microeletrônica e de software.

Trata-se de um sistema de medição do perfil longitudinal de um pavimento rodoviário realizado com o auxílio de medidores de distância sem contato (a laser), medidores de aceleração vertical do veículo (acelerômetros), de um sistema preciso de medição de deslocamento/velocidade, tudo gerenciado por um sistema microprocessado, que coordena a aquisição dos dados e os envia a um computador portátil, em tempo real, através de uma porta do tipo USB.

O sistema é capaz de realizar as medições no período diurno e noturno à frequência de aproximadamente 2100 medidas por segundo, em cada um dos sensores. A velocidade de deslocamento do veículo pode variar durante as medições e não tem um limite superior, o que permite – de acordo com as condições de segurança – que o levantamento seja realizado à 120 km/h, por exemplo. Recomenda-se, entretanto, que os levantamentos sejam realizados a velocidades superiores a 30 km/h.

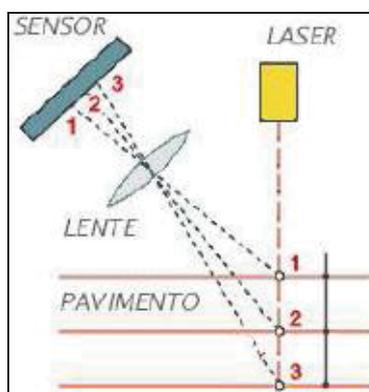


Figura 2 - Desenho esquemático do medidor a laser

O Perfilômetro Laser foi desenvolvido para poder ser instalado em diferentes tipos de veículos (Figura 03), podendo ser transportado sem maiores dificuldades e montado no local da execução dos trabalhos, utilizando como pontos de fixação na parte traseira do veículo, os locais onde normalmente são aparafusados os engates para reboque ou mediante adaptação na parte dianteira.



Figura 3 - Perfilômetro Laser

Fonte Barella (2004).

2.6.8 Índice de irregularidade internacional – IRI

Conforme, Nakahara (2005), o Índice de Irregularidade Internacional ou Índice de Rugosidade Internacional (IRI) resume matematicamente o perfil longitudinal de uma rodovia sobre uma trilha de roda, representando a vibração induzida por um veículo que trafega sobre uma superfície irregular. O IRI é um padrão de medida relacionado àqueles fornecidos pelos medidores tipo resposta, sendo definido como a razão entre o total dos deslocamentos ocorridos na suspensão de um veículo dividido e a distância percorrida.

Os detalhes de cálculo do IRI e as normas de procedimento de aplicação do índice na calibração dos equipamentos são discutidas em Sayers et al. (1986). O método de calibração adotado foi o mesmo definido nos estudos brasileiros (GEIPOT, 1982) e proposto por Hudson (1975).

- 1) Simulação quarto-de-carro em perfilômetros de alta velocidade: Nos anos 60, a General Motors (SPANGLER, KELLY, 1964 apud SAYERS, 1995) desenvolveu um medidor de alta velocidade que poderia medir o “perfil verdadeiro” de uma rodovia na faixa de comprimentos de onda que afeta as

vibrações do veículo. Uma das primeiras aplicações deste tipo de sistema combinou medidas de perfil com um modelo matemático quarto-de-carro;

2) A pesquisa da National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) e Golden Car : No final dos anos 70, a NCHRP incentivou um estudo sobre os sistemas medidores tipo resposta. O objetivo era desenvolver métodos de calibração para estes sistemas. Concluíram que o único método válido foi a “calibração por correlação” com um índice pré-definido. Foram testados e simulados vários índices e a melhor correlação foi obtida usando uma simulação de veículo com um conjunto de parâmetros chamado de Golden Car (o nome foi baseado no conceito de um instrumento de ouro que servia de referência, mantido em uma câmara e usado para calibrar outros instrumentos). Alguns pesquisadores acreditam que os parâmetros Golden Car descrevem um carro médio americano de 1978. As constantes das molas foram selecionadas para igualar as duas maiores frequências ressonantes (choque entre carroceria e eixo), mas o amortecedor com os parâmetros Golden Car apresentou um valor bem maior do que de muitos veículos. O alto valor do amortecedor foi escolhido por apresentar a melhor correlação entre a variedade de sistemas tipo-resposta;

3) Desenvolvimento do IRI pelo Banco Mundial: Quase todos os equipamentos medidores de irregularidade são capazes de produzir medidas em uma única escala, desde que esta escala seja adequadamente selecionada. O IRI deveria ser relevante, transportável e estável com o tempo. Para assegurar a transportabilidade, o índice deve ser mensurável por vários tipos de equipamentos, incluindo os sistemas tipo resposta.

Para ser estável com o tempo, o IRI deve ser descrito por uma transformação matemática do perfil medido. As melhores correlações entre o índice do perfil e os sistemas tipo-resposta foram encontradas em duas simulações de veículos utilizando os parâmetros Golden Car a análise quarto-de-carro e a análise metade-de-carro. A análise quarto-de-carro foi selecionada, pois pode ser usada por todos os métodos medidores disponíveis na época. A velocidade de 80 km/h foi escolhida como padrão, pois nesta velocidade o IRI foi sensível aos mesmos comprimentos de onda que causavam vibrações no veículo. Em 1990, a *Federal Highway Administration* (FHWA) começou a exigir o IRI como índice padrão para os relatórios de irregularidade da *Highway Performance Monitoring System* (HPMS).

Desta forma, após esta última etapa, o IRI foi selecionado como a escala universal de irregularidade longitudinal. A medida é classificada tanto pelo seu nome técnico como pela sua unidade (m/km, mm/m ou pol/mi). O sistema de medida tipo resposta de referência usado na determinação do IRI foi um modelo matemático chamado “simulação quarto-de-carro”, e quando obtido a partir de uma simulação de referência, a medida chama-se “declividade média retificada de referência”.

O IRI descreve uma escala de irregularidade na qual o valor zero é para uma superfície planar verdadeira. É um número que resume o impacto da qualidade da irregularidade longitudinal na resposta do veículo e é apropriado quando for necessário para ser relacionado com: custo operacional do veículo; qualidade de rolamento; carga dinâmica dos pneus e condição superficial.

Atualmente existem diferentes classificações quanto aos valores limites destinados a avaliar um determinado pavimento a partir da irregularidade longitudinal. A Tabela 3 (Souza et al., 2002) apresenta as faixas de classificação de irregularidade com base no IRI de diversas fontes, inclusive a usada pelo DNER (1998).

Desde 1990, a *Federal Highway Administration* (FHWA) tem exigido o uso da escala do IRI para avaliar as irregularidades longitudinais (anteriormente este órgão utilizava o PSR). A Tabela 04 contém os termos qualitativos das condições dos pavimentos e os respectivos valores correspondentes do IRI e do PSR, usando o modelo dado por Al-Omari e Darter (1994).

A Tabela 4 também indica o termo descritivo “qualidade de rolamento aceitável” introduzido em 1998 e usado pela “*National Highway System* da FHWA”. Para ser avaliado como “aceitável”, o desempenho do pavimento deve ter um valor máximo do IRI de 2,68 m/km (170 pol/mi). Não existem na literatura dados que suportam este limite de aceitabilidade dos usuários. A explicação provável encontrada pelos autores é que, tradicionalmente, um valor de PSR entre 2 a 3 tem sido usado para definir a “ruptura” no método de projeto estrutural de pavimentos da AASHTO. O valor médio do intervalo de 2,5, o que corresponde a um IRI de 2,68 m/km (170 pol/mi), é usado para designar a diretriz do parâmetro.

Tabela 2 - Comparativo dos limites de avaliação pela irregularidade

País	Classificação e escala						Fonte
EUA	<i>Funcional</i>	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	-	AASHTO (1999)
	<i>IRI</i>	0 – 0,95	0,95 – 1,5	1,5 – 2,7	> 2,7		
Brasil	<i>Funcional</i>	Excelente	Bom	Regular	Ruim	Péssimo	Pinto e Preussler (2001)
	<i>IRI</i>	1 – 1,9	1,9 – 2,7	2,7 – 3,5	3,5 – 4,6	> 4,6	
	<i>IRI</i>	-	1 – 3,5	3,5 – 4,5	> 4,5	-	DNER (1998)
Espanha	<i>Funcional</i>	Excelente	Aceitável	Regular	Não aceitável	-	Rios (1997)
	<i>IRI</i>	0 – 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 4	> 4	-	
Chile	<i>Funcional</i>	-	Bom	Regular	Ruim	-	Patiño e Anguas (1998)
	<i>IRI</i>	-	0 – 3	3 – 4	> 4	-	
Uruguai	<i>Funcional</i>	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	-	Patiño e Anguas (1998)
	<i>IRI</i>	0 – 3,2	3,2 – 3,9	4 – 4,6	> 4,6	-	

Fonte: Nakahara (2005).

Tabela 3 - Parâmetros da qualidade de rolamento nos pavimentos

Condição	PSR	IRI	Qualidade rolamento
Muito bom	≥ 4,0	< 0,95 m/km (< 60 pol/mi)	
Bom	3,5 – 3,9	0,95 – 1,48 m/km (60 – 94 pol/mi)	Aceitável: 0 – 2,68 m/km (0 – 170 pol/mi)
Regular	3,1 – 3,4	1,50 – 1,88 m/km (95 – 119 pol/mi)	
Ruim	2,6 – 3,0	1,89 – 2,68 m/km (120 – 170 pol/mi)	
Muito ruim	≤ 2,5	> 2,68 m/km (> 170 pol/mi)	Menos que aceitável: > 2,68 m/km (> 170 pol/mi)

Foi

Fonte: *Federal Highway Administration*.

2.6.8.1 Relação entre irregularidade

As correlações entre os índices foram determinadas a partir dos dados do IRRE (SAYERS et al., 1986) e do encontro *Ann Arbor Road Profilometer Meeting* (SAYERS; GILLESPIE, 1986). Os dados cobrem uma grande variedade de rodovias, desde rodovias regulares (IRI = 1,9 m/km) até as mais irregulares (IRI = 16,6 m/km). Para desenvolver as relações, Paterson (1987) usou o método dos mínimos quadrados para cada par de variáveis analisadas.

Entre as correlações apresentadas por Paterson (1987) uma das mais utilizadas foi a desenvolvida durante os estudos de custos rodoviários realizados no Brasil-PUND (GEIPOT, 1982), onde os dados brasileiros representados na escala de QI foram convertidos em IRI pela seguinte relação:

$$IRI = \frac{QI}{13}$$

A adoção do IRI como referência foi encorajada por Paterson (1987) para melhorar a confiabilidade de trocas de informações relacionadas à irregularidade longitudinal da rodovia. O IRI é um denominador comum, e em alguns casos, apresenta um paralelismo com os índices locais ou com as séries de estatísticas do perfil.

2.6.9 Processo de degradação dos pavimentos

Segundo Rodrigues (1997), os pavimentos se deterioram ao longo do tempo por meio de uma variedade de diferentes mecanismos e processos, que muitas vezes interagem entre si. As cargas do tráfego aplicam tensões e deformações transientes nas camadas do pavimento, em magnitudes que dependem da rigidez e da espessura das camadas. A sua repetição leva ao trincamento das camadas asfálticas e cimentadas, bem como ao acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas, em graus variáveis. O intemperismo faz com que os revestimentos betuminosos se tornem, em sua superfície, frágeis, ficando mais suscetíveis ao trincamento e à desagregação (arrancamento de agregados, erosão e quebra nos bordos).

Os modos predominantes pelos quais um pavimento se deteriora ao longo do tempo são, portanto:

- ✓ A fratura de camadas asfálticas e cimentadas;
- ✓ A desagregação do revestimento asfáltico;
- ✓ As deformações permanentes.

Em termos de desempenho, interessa a previsão da ocorrência dos seguintes tipos de defeitos:

1. Quanto à fratura: o trincamento no padrão couro-de-crocodilo (polígonos interconectados de dimensões menores que 30 cm);
2. Quanto à desagregação: o arrancamento de agregados da superfície, a perda da textura superficial (relacionada ao atrito) e a abertura de panelas;
3. Quanto às deformações permanentes: os afundamentos em trilha de roda (irregularidade transversal) e a irregularidade longitudinal.

Outros efeitos devem ser mencionados, tal como o fato de que, em pavimentos trincados sujeitos a tráfego de veículos de carga, um período, mesmo curto, de chuvas intensas provoca a abertura de panelas. Este fenômeno é bastante comum no Brasil durante os meses de janeiro e fevereiro nos estados do centro-sul.

2.6.10 Fatores que influenciam o desempenho dos pavimentos

Segundo Gonçalves (1998), muitos fatores afetam o desempenho a ser oferecido por um determinado pavimento, dentre estes se destacam: o número e a magnitude das cargas do tráfego, as propriedades dos materiais componentes das camadas e a sua heterogeneidade ao longo da via, a natureza do solo de subleito, a frequência e as práticas de manutenção aplicadas ao longo do tempo, as condições de drenagem e aspectos ambientais. Diversos indicadores podem ser utilizados para se quantificar o desempenho de um pavimento, variando desde aqueles que caracterizam a sua condição funcional até aqueles que consistem simplesmente do registro de defeitos de superfície ou das deformações plásticas.

2.6.10.1 Fatores climáticos

As condições ambientais a que o pavimento está sujeito, onde se incluem as condições de temperatura do ar, a insolação, a pluviometria e as condições de drenagem subsuperficial e profunda, afetam as velocidades com que a degradação estrutural se processa, por influírem nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais das camadas do pavimento e por gerarem tensões quando a estrutura tende a restringir movimentações volumétricas de natureza térmica ou de variação de umidade (GONÇALVES, 1998).

Segundo Huang (1993), a temperatura e umidade são os dois fatores climáticos que afetam a deflexão dos pavimentos. Para pavimentos asfálticos, temperaturas mais altas causaram a junção e o amolecimento do asfalto, aumentando a deflexão. Para pavimentos concretos, as temperaturas na forma de mudança total ou gradiente de temperatura tiveram uma influência significativa perto das juntas e rachaduras. O pedaço se expande em temperaturas muito quentes, causando quebra nas juntas e

rachaduras, resultando em melhor eficiência de transferência de carga e menor deflexão. A curvatura do pedaço se deve a gradientes de temperatura e podem causar uma larga variação na medida das deflexões. Medidas tiradas à noite ou cedo da manhã, quando a parte de cima está mais fria do que a de baixo, irão resultar em trincas mais altas e deflexões mais pontudas do que aquelas medidas à tarde, quando a parte de cima é muito mais quente do que a de baixo.

A estação do ano tem grande efeito nas medidas de deflexão. Em regiões frias, quatro períodos distintos podem ser observados. O período de profundas geadas ocorre durante a estação do inverno, quando o pavimento está mais rígido. No período da primavera, inicia o descongelamento quando o gelo começa a desaparecer do sistema do pavimento e a deflexão aumenta significativamente. O período de rápido refortalecimento começa no cedo do verão, quando o excesso de água livre do derretimento do gelo deixa o sistema do pavimento e a deflexão diminui rapidamente. O período de baixo fortalecimento se estende do final do verão até o outono, quando os níveis de deflexão diminuem lentamente conforme a água contida lentamente diminui. Para pavimentos em áreas que não sofrem gelo e degelo, a deflexão geralmente segue uma curva “sino” com o pico de deflexão ocorrendo na estação úmida, quando a umidade contida é alta. Em áreas relativamente secas, o período de máxima deflexão pode ocorrer no verão quando a camada superior do asfalto amolece devido a intensa radiação solar (POEHL, 1971 apud HUANG, 1993).

Para comparar e interpretar medidas de deflexão, a hora do dia e a estação do ano em que são feitas as medidas devem ser consideradas. Geralmente as medidas de deflexão são corrigidas para uma temperatura padrão 700F (210C), e um período crítico baseado nas condições da localidade onde foram realizados os procedimentos.

2.6.10.2 Carregamento

A magnitude e a duração do carregamento têm uma grande influência nas deflexões dos pavimentos. É desejável que o plano NDT possa aplicar uma carga para um pavimento semelhante ou para o projeto atual de carregamento, e. g., a 9000-lb (40KN) carga por roda. Infelizmente, nem todos os planos NDT que estão disponíveis comercialmente são capazes de simular o design da carga. Alguns podem simular a magnitude do design da carga, mas não sua duração ou frequência. É geralmente aceito

que o deflectometro de peso é o melhor plano de NDT desenvolvido até agora para simular a magnitude e a duração do movimento atual do carregamento (LYTTON, 1989 apud HUANG, 1993).

Devido a não linearidade, ou sensibilidade ao stress, propriedades da maioria dos materiais dos pavimentos, as deflexões não são proporcionais a carga. Resultados de testes obtidos por carregamentos leves devem ser extrapolados por aqueles de carregamentos pesados. Devido a esta extrapolação pode-se induzir a erros significativos, o uso de planos NDT que produzem cargas aproximadas daquelas pesadas são mais fortes de que o recomendado.

Muitas pesquisas têm buscado o desenvolvimento equações de correlação ou regressão relatando a deflexão abaixo de cargas leves de um plano, para cargas mais pesadas de outros planos. No entanto, grandes cuidados devem ser tomados na aplicação destas correlações porque os dados de cada uma das relações foram desenvolvidos normalmente contendo uma grande quantidade de dispersão e uma larga escala de erro é sempre possível. Além disso, a correlação para um tipo de estrutura de pavimento pode não ser aplicável a uma estrutura diferente. Igualmente, para uma mesma estrutura de pavimento, variações consideráveis foram encontradas entre correlações desenvolvidas por diferentes empresas, devido a diferenças na prática da construção e condições ambientais.

3 METODOLOGIA

A estrutura da metodologia aplicada para a análise e evolução da irregularidade longitudinal nos trechos em estudo está ilustrada na Figura 4.

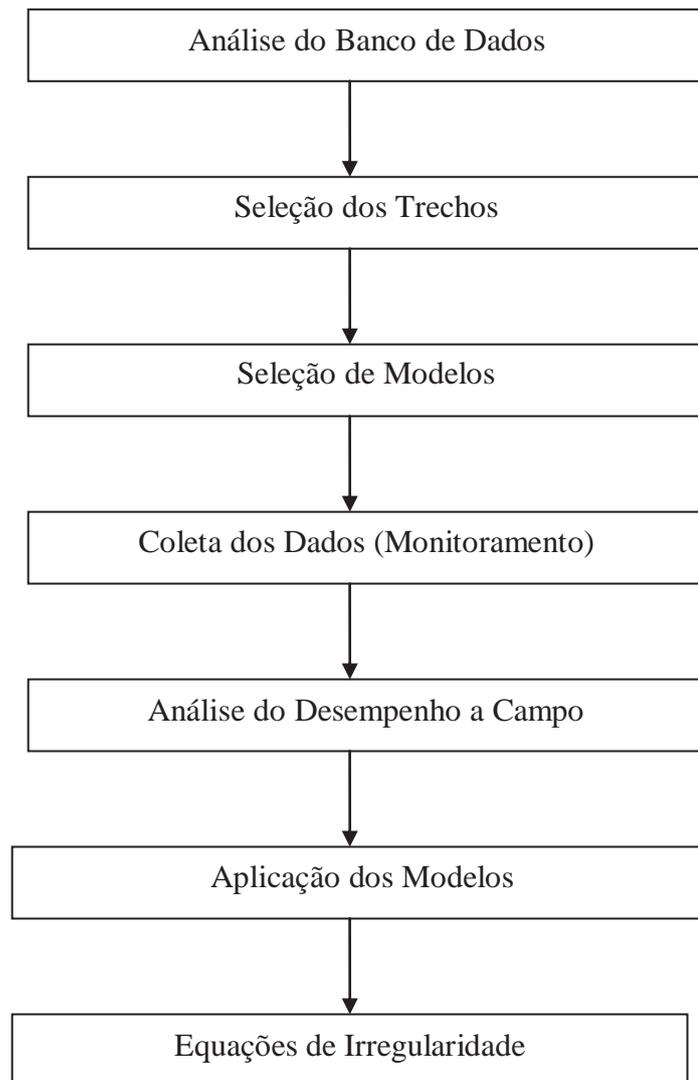


Figura 4 - Estrutura esquemática da Metodologia aplicada

Análise do banco de dados: Nos dias atuais no Brasil, praticamente a única fonte de dados disponível para a elaboração desse tipo de pesquisa são os bancos de dados dos SGP's de concessionárias, que dentro de seu escopo incorporadas aos programas de monitoramento anual da malha viária, que identificam a condição de superfície, como a irregularidade, afundamentos de trilhas de roda, avaliação subjetiva e levantamento contínuo a campo, condição estrutural, deflexões e situações específicas como degrau

acostamento e vistorias em obras de arte, tornando-se o maior e mais preciso acervo técnico que disponibilizamos para tal pesquisa. A utilização dos dados que deu base à pesquisa partiu do Consórcio Univias, que engloba a Sulvias, Metrovias e Convias, com extensão de aproximadamente 1.055 km, a qual realiza o monitoramento desde 2000. Assim, identificando as formas de armazenagem e saída dos dados registrados no seu banco de dados.

Seleção dos trechos: Foram escolhidas rodovias importantes por serem corredores de escoação da produção do estado, realizarem ligação entre os países vizinhos e estarem incorporadas à malha viária gaúcha e sob concessão. Destas, partiu-se para a seleção dos trechos para a verificação da evolução da irregularidade longitudinal, do comportamento real nos pavimentos em estudo e a evolução previstas por modelos específicos.

Assim, foram selecionados 6 (seis) trechos com intervalos de 5 km, dois trechos de cada rodovia, levando em consideração que nesse intervalo não se identificasse nenhuma obra de arte especial, que houvesse o mesmo número de faixas de tráfego, ou seja, mesma geometria de pista, mesma estrutura do pavimento e conseqüentemente o mesmo histórico de manutenção, analisando de forma diferenciada apenas o tipo de revestimento (delgado ou espesso) e realizando um comparativos dos modelos e as evoluções da irregularidade a campo.

Da seleção dos modelos: Após esta análise, entre modelos que possuem toda a sua base tecnológica documentada, deu-se a escolha de 3 (três) modelos de previsão de desempenho para serem aplicados a situações reais de campo. Estes, desenvolvidos por pesquisas já realizadas como SHRP e a LTPP. Os modelos em estudo foram analisados apenas um aspecto o da Irregularidade, este, levando em consideração os tipos de intervenção no pavimento, sendo um revestimento delgado ou CBUQ, assim diferenciando os modelos.

Da coleta dos dados: A contemplação dos dados dos trechos foram realizadas de modo a contemplar aspectos que interessam para o desempenho de pavimentos no campo. Partiu-se do princípio de que dados como irregularidade, afundamento de trilho de roda, tráfego e deflexões, deveriam ser levantados por equipamentos de mesma característica, assim a pesquisa incorpora dados apenas de 2003 a 2007. Além de dados registrados através de Levantamento Visual a Campo (LVC) como: idade do pavimento, tipo de estrutura, defeitos de superfície e aspectos climáticos. Quanto ao histórico de manutenção é necessário que os trechos possuam restaurações em CBUQ é necessário

que a espessura seja maior que 3 cm, pois comprovadamente com a bibliografia tais modelos se referem a essa espessura mínima. Porém, a escolha de trechos com intervenções de revestimento delgados com micro revestimento asfáltico, tornou-se necessário devido a grande utilização da concessionária, nestes casos os trechos foram analisados separadamente com o intuito analisar o seu comportamento com tais modelos, assim correlacionando.

Os dados retirados dos monitoramentos foram analisados km a km dentro do intervalo de seu trecho, fazendo-se uma análise em separado da importância de particular de cada km dentro de todo o trecho e conseqüentemente a integração de todos os km no trecho.

Da análise do desempenho a campo: Para a definição das equações da evolução da irregularidade foram realizadas aplicações práticas dos mesmos nos trechos selecionados. Segundo (SEVERO 2003), O SGP do Consórcio Univias possui a característica básica de ser uma ferramenta multiusuário. O SGP permite aos diferentes níveis da administração das empresas concessionárias (Sulvias, Convias e Metrovias) a obtenção de sínteses da condição e das necessidades atuais de manutenção da rede ou de uma sub-rede (Polo ou Trecho) em um dado momento, ou efetuar previsões acerca do futuro (análises de conseqüências), além de elaborar todo um Plano Plurianual de Investimentos, abrangendo até o final do período de análise ou parte dele. O SGP fornece informações úteis para projetistas, engenheiros de materiais e pessoal ligado aos serviços de conservação.

Aplicação dos modelos de desempenho: Utilizando a base de dados registrada a aplicação dos modelos selecionados e o comportamento da evolução da irregularidade são evidenciadas.

Equações de irregularidade: Finalizando com as equações de evolução de irregularidade para diferentes tipos de intervenção geradas pelas curvas de tendências, bem como equações para o comportamento dos pavimentos sem intervenção alguma registrada.

4. EVOLUÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM ESCALA REAL E APLICAÇÃO DE MODELOS DE DESEMPENHO

A evolução da irregularidade longitudinal pode ser evidenciada pelo simples registro de seu parâmetro ao longo do tempo (QI ou IRI). Campanhas de monitoramento de pavimentos identificam a campo e registram em banco de dados tal evolução. O consórcio Univias, como base técnica dessa pesquisa, realiza o monitoramento periodicamente desde 1998 em toda a sua malha de concessão, cerca de 1.055 km, divididos nos três polos, Figura 5, Metrovias (533,82 km – cor verde), Sulvias (328,81 km – cor vermelha) e Convias (192,41 km – cor azul). Dentre esses, estão alguns segmentos (trechos) que delimitaram a pesquisa.

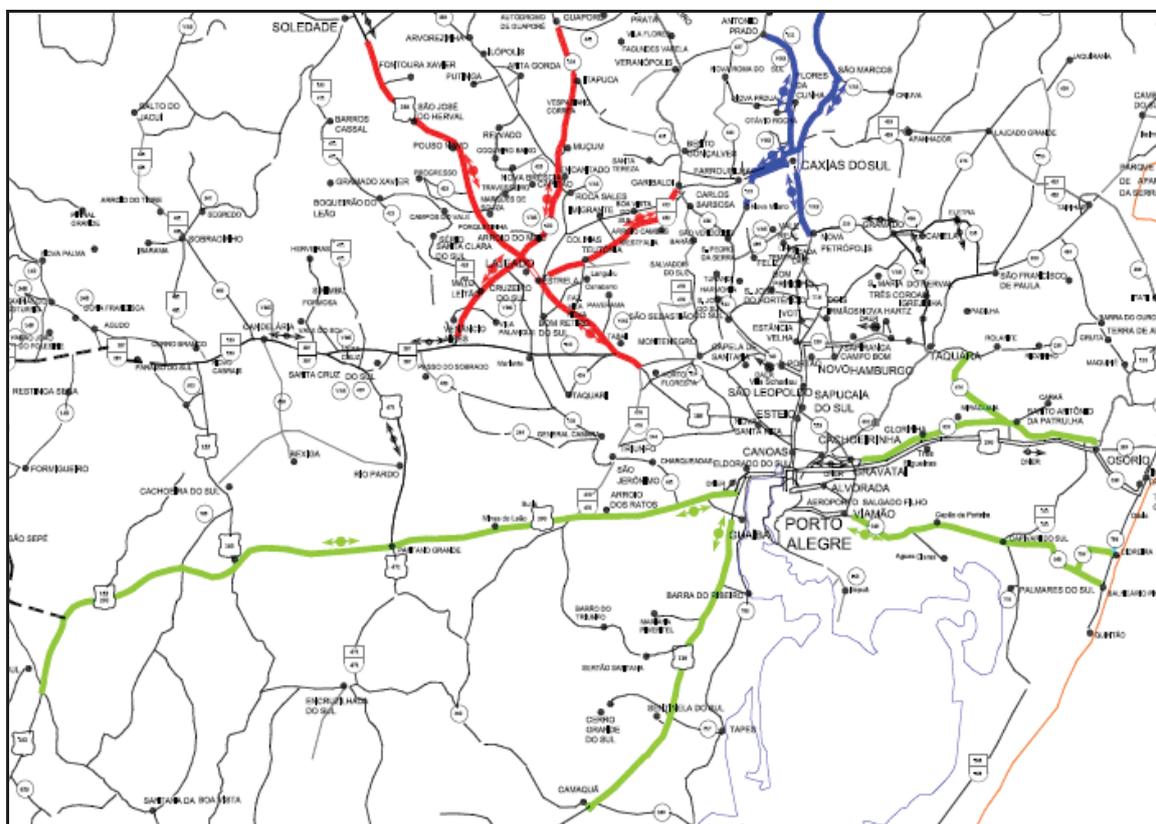


Figura 5 – Malha sob concessão do Consórcio Univias

Fonte: Adaptado de Consórcio Univias (2006).

Os procedimentos e equipamentos utilizados na coleta dos parâmetros da irregularidade são fundamentais para o acompanhamento da evolução da irregularidade, dessa forma, a utilização da base de dados restringiu-se aos últimos 5 anos (2003 a

2007), devido à desigualdade do equipamento utilizado no monitoramento (2002 *Bump Integrator* e a partir de 2003 com barra laser).

4.1 Seleção dos trechos

Inseridas na malha sob concessão do consórcio Univias, existem rodovias estaduais e federais que se destacam pela sua importância, (Figura 6), sendo fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das nossas cidades, estado e país. Nesse contexto, rodovias como a BR 116, rodovia longitudinal que tem início na cidade de Fortaleza, no estado do Ceará e término na cidade de Jaguarão, no estado do Rio Grande do Sul, na fronteira com o Uruguai, com extensão total de 4.385 km destes 653,8 km em solo gaúcho, iniciando na cidade de Vacaria. Por sua implantação estratégica torna-se a principal ligação do porto de Rio Grande ao centro do estado e país.



Figura 6 – Localização das Rodovias em estudo no Rio Grande do Sul.

A rodovia da Produção BR 386, com extensão total de 531,70 km, destes 457,9 km em solo gaúcho, iniciando na cidade de Iraí até a cidade de Canoas é atualmente a principal via de escoamento da produção agrícola e industrial do núcleo do estado aos centros industriais (região Metropolitana).

Destaca-se ainda a BR 290 com 726,4 km de extensão, toda em solo gaúcho, principal corredor de importação e exportação do estado, atravessando o estado no sentido leste/oeste. Além dessas considerações, as três rodovias mencionadas possuem os maiores tráfegos do estado.

Dentre os segmentos das respectivas rodovias que incorporam a malha de concessão do Consórcio Univias, foram selecionados os trechos pertencentes à pesquisa, conforme metodologia já descrita, que identificou dois segmentos com intervalos de 5 km de extensão para cada rodovia BR 116, 386 e 290 (Anexo I), diferenciados pelo seu histórico de manutenção e o revestimento (CBUQ e Micro concreto Asfáltico). A composição dos trechos tem as seguintes nomenclaturas:

- Trecho 01: BR 116 km 332 -336
- Trecho 02: BR 116 km 382 - 386
- Trecho 03: BR 290 km 123 - 127
- Trecho 04: BR 290 km 176 - 180
- Trecho 05: BR 386 km 259 - 263
- Trecho 06: BR 386 km 317 - 321

4.2 Localização dos trechos

A localização dos trechos selecionados para análise, quanto à evolução da irregularidade ao longo do tempo, estão apresentadas nas Figuras 8 e 9, bem como a distribuição dos mesmos em cada polo. Os quatro primeiros trechos (01 a 04) pertencem ao polo Metropolitano (Figura 7) e os dois restantes (05 e 06) ao polo Sulvias (Figura 8), totalizando uma extensão de 30 km de pista e 60 km de faixa de rodagem a atuação da pesquisa.

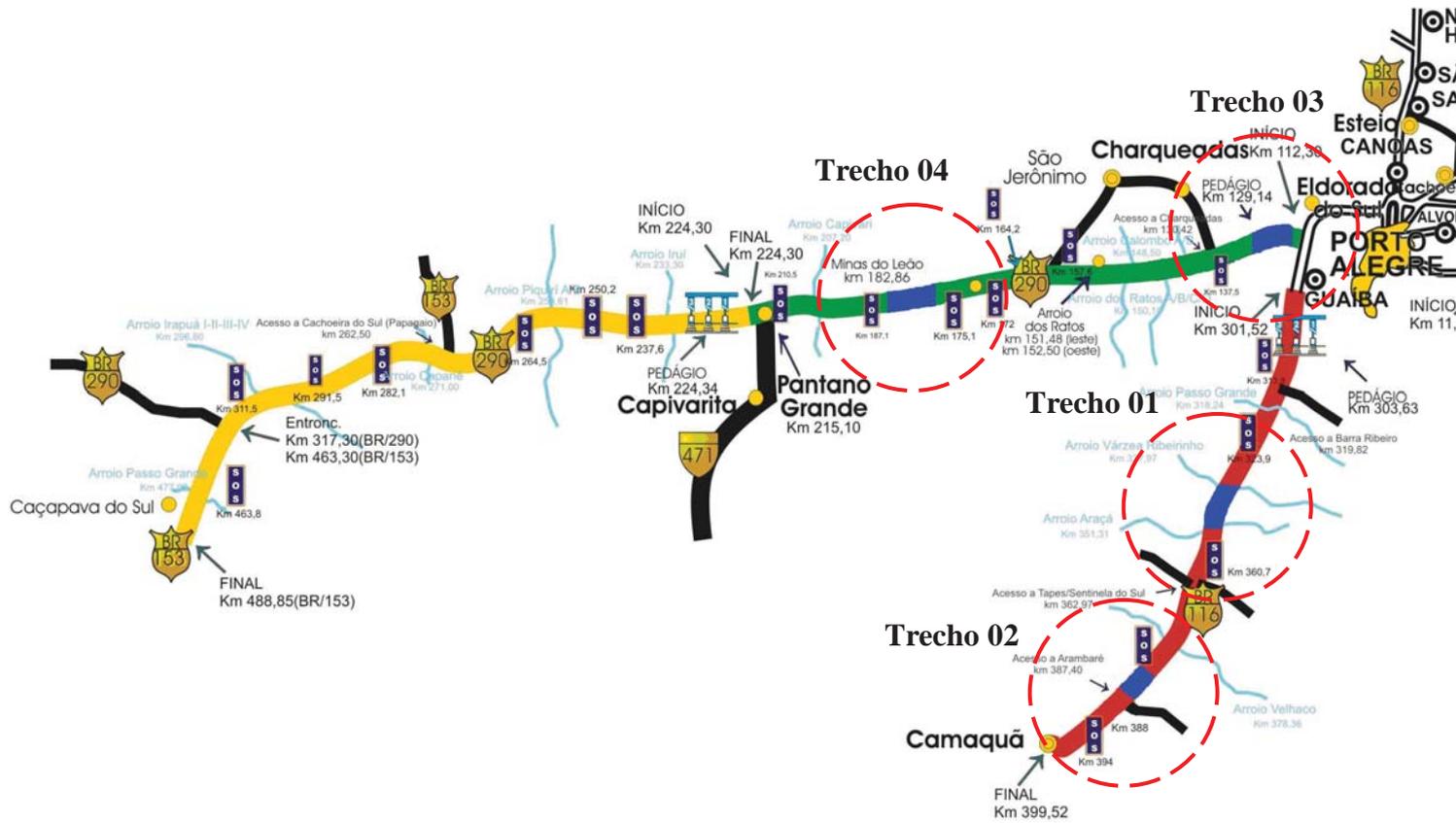


Figura 7 – Localização trechos 01/02/03/04 no polo Metropolitano

Fonte: Adaptado de Consórcio Univias (2006).

Trecho 05

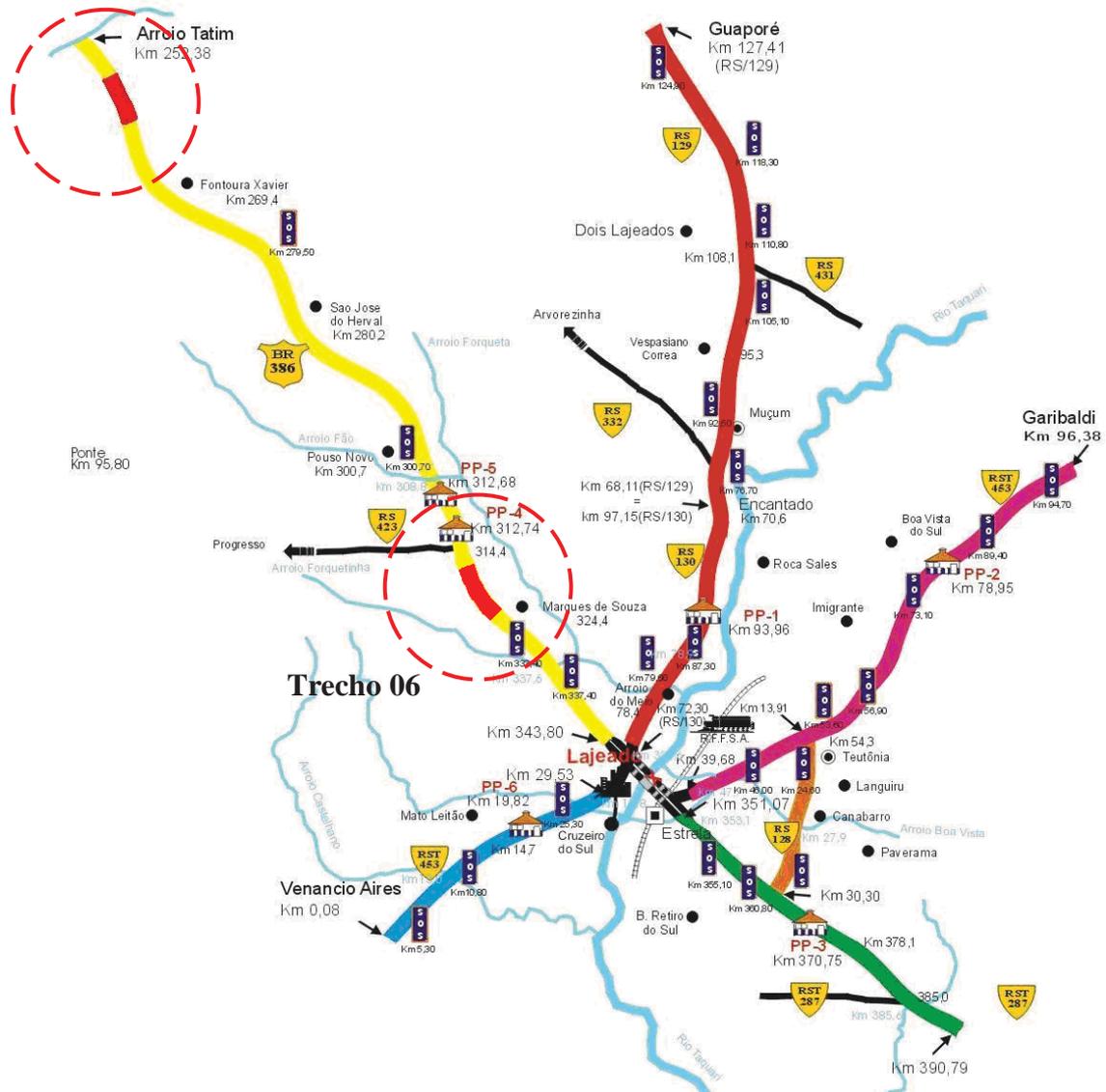


Figura 8 – Localização trechos 05 e 06 no polo Sulvias

Fonte: Adaptado de Consórcio Univias (2006).

4.3 Levantamentos dos parâmetros

Os parâmetros pertinentes à pesquisa foram obtidos do banco de dados do Sistema de Gerência de Pavimentos – SGP, do consórcio Univias, Figura 9, que passa por atualizações periódicas pelas campanhas de monitoramento, que possui armazenado o histórico de manutenção, estrutura, deflexões, afundamento de trilha de roda, tráfego e irregularidade longitudinal dos pavimentos além de previsões de comportamento de desempenho.

Sistema de Gerência de Pavimentos da Univias - [Estratégias sob Restrições Orçamentárias]

File Edit Window Help

Restrições Orçamentárias

Modo: Polo: Lajeado

Por Polo Ano: 2011 Valor (R\$) = 25000000 Inserir

Período de Projeto para as Restaurações

Ano: 2011 PP (anos) = 7 Inserir

Inflação (% ao ano) = 5.0

Resultados anteriores Run Close

ANO	CUSTO(MR\$)	PSI_MEDIO	OCORR. (%)	VR (ANOS)
2003	46782	3.18	35.9	4.27
2004	14197	3.26	37.9	5.21
2005	15933	3.23	39.4	5.3
2006	9112	3.19	40.2	5.33

Situação Atual:

PSI médio da rede = 3.145

Ocorrências (% da rede) = 33.03

VR média (anos) = 3.792

Pólo: Lajeado Trecho: 386 "Estrela - Entr. RST287" km 351.070 ao km 385.800

Plano Plurianual de Investimentos

ANO	STH	INICIOKM	FINALKM	MEDIDAF1	HFRESCM1	HRECCM1	MEDIDAF2	HFRESCM2	HRECCM2	MEDIDAF3	HFRESCM3	HRECCM3	MEDIDAF4	HFRESCM4	HRECCM4
2003	17000	351.07	351.88	RS	0	7	RS	0	7	0	0	0	0	0	0
2003	17001	351.88	353	RS	0	6	RS	0	6	0	0	0	0	0	0
2003	17002	353	354	RS	0	7	RS	0	7	0	0	0	0	0	0
2003	17003	354	354.84	RS	0	7	RS	0	7	0	0	0	0	0	0
2003	17004	354.84	355.28	CL	0	0	CL	0	0	0	0	0	0	0	0
2003	17005	355.28	356	RS	0	9	RS	0	9	0	0	0	0	0	0
2003	17006	356	357	CL	0	0	FR+RC	6	6	0	0	0	0	0	0
2003	17007	357	358	RS	0	6	RS	0	6	0	0	0	0	0	0
2003	17008	358	359	RS	0	6	RS	0	6	0	0	0	0	0	0
2003	17009	359	360	RS	0	6	RS	0	6	0	0	0	0	0	0
2003	17010	360	361	RS	0	6	RS	0	6	0	0	0	0	0	0
2003	17011	361	362	FR+RC	7	7	FR+RC	7	7	0	0	0	0	0	0
2003	17012	362	363	FR+RC	7	7	FR+RC	7	7	0	0	0	0	0	0
2003	17013	363	364	RS	0	7	RS	0	7	0	0	0	0	0	0

Figura 9 – Tela SGP Univias, parâmetros de entrada

Fonte: Consórcio Univias (2006).

A irregularidade longitudinal, fundamento da pesquisa, teve um tratamento diferenciado dos demais parâmetros, conforme descrevemos a seguir.

4.3.1 Estrutura dos pavimentos

Nos trechos em estudo, pertencentes às mesmas rodovias, possuem igualdade entre eles tanto na estruturas dos pavimentos como no revestimento original. Os materiais constituintes dos trechos e rodovias estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Estrutura dos pavimentos

Rodovia	Trecho	Tipo	Espessura Base	Revestimento Original
		Estrutura	(cm)	(cm)
BR 116	01 e 02	Saibro	24	6
BR 290	03 e 04	Cascalho	30	12
BR 386	05 e 06	Brita Graduada	27	14

Campanhas de sondagem acontecem também de forma periódica, a fim de cadastrar e atualizar informações do banco de dados.

4.3.2 Histórico de manutenção dos pavimentos

O histórico de manutenção foi obtido com base em informações registradas no Sistema Strada do consórcio Univias. Tal sistema, desenvolvido ao longo do tempo, auxilia e acompanha as medições de todos os serviços executados tanto na pista como em serviços administrativos, registra e cataloga todas as intervenções quanto ao tipo e percentual de área abrangida e interage todas as informações relevantes às intervenções da pista de rodagem com o SGP Univias, mantendo-se atualizado nesse aspecto mensalmente.

A manutenção da rede do Consórcio Univias consiste na aplicação das seguintes mediam principais:

4.3.2.1 Tratamento superficial

O termo tratamentos de superfícies engloba uma ampla variedade de serviços rodoviários sem que, geralmente, o ligante asfáltico e os materiais pétreos são aplicados em espessuras inferiores a 2,5cm, sobre bases granulares ou pavimentos estruturalmente adequados.

Nesta modalidade de serviço, destacam-se os executados a frio no local, devido a sua simplicidade de aplicação, economia de energia no processo e nas operações de transporte e estocagem dos materiais. Trata-se de uma excelente solução técnica, principalmente quando se deseja a implantar um programa de pavimentação por etapas, pois além de otimizar a

aplicação dos recursos disponíveis, asseguram a preservação do sistema de drenagem pluvial em caso de um futuro reforço estrutural.

O tratamento superficial é o método mais antigo e econômico de fazer revestimento asfáltico para baixo volume de tráfego. Porém, com o desenvolvimento desta tecnologia, com a introdução de ligantes modificados por polímeros permitem estender o campo de aplicação deste tipo de serviço para rodovias de médio volume de tráfego.

Da execução, o ligante é aplicado sobre a superfície do pavimento em taxas que variam entre 1 a 1,5 litros/m², aquecida no distribuídos de ligante entre 50 a 70°C e obedecendo a uma relação ponderal emulsão/agregado de, aproximadamente, 1/10.

O tratamento superficial é dito de penetração invertida em função de o ligante penetrar no agregado de baixo pra cima, estes deverão obedecer às especificações de serviços quanto à granulometria, desgaste por abrasão Los Angeles, índice de forma, durabilidade e limpeza. De acordo com o número de camadas sucessivas de ligante e agregados empregados, é classificado em simples, duplo ou triplo. Dependendo do projeto da obra têm-se, como opções de acabamento, o banho diluído e a capa selante.

4.3.2.2 Lama asfáltica

Originária na França e Brasil, na década de 60, a partir de um procedimento desenvolvido nos EUA, particularmente no Texas, denominada “*slurry seal*”. Tem sua aplicabilidade na manutenção preventiva, isto é na conservação de pavimentos asfálticos que se encontram em bom estado, necessitando apenas selagem, impermeabilização e rejuvenescimento da superfície de rolamento, desgastada pela ação do tráfego e do clima.

Da execução, espalhada em usina móvel de fluxo contínuo, com espessuras delgadas, geralmente entre 3 a 9 mm, não excedendo, por aplicação o tamanho máximo do agregado da mistura. O agregado mineral empregado na produção deve ser limpo, anguloso, de elevada resistência mecânica, menor que 9,5mm.

A taxa de aplicação será de acordo com as condições de superfície e granulometria, geralmente entre 4 a 15 kg/m². Recomenda-se executar a pintura de ligação com emulsão ruptura rápida ou média.

4.3.2.3 Microrrevestimento asfáltico

Durante a segunda metade dos anos 70, paralelamente ao uso corrente e já consagrado das técnicas de aplicação a frio com a utilização de emulsões, um novo sistema derivado da lama Asfáltica, porém com um emprego muito mais amplo, surgiu na Europa e posteriormente nos EUA recebendo a terminologia de microrrevestimento asfáltico.

O microrrevestimento asfáltico, é uma mistura, á frio, de emulsão modificada por polímeros com agregado mineral, material de enchimento, também denominado de filer, água, aditivos químicos para controle da velocidade de ruptura da emulsão e dependendo do projeto, aditivos sólidos (fibras de reforço) para melhoria das propriedades mecânicas de flexibilidade do revestimento. Sua maior aplicação ocorre na manutenção preventiva dos pavimentos, que apenas necessitam um rejuvenescimento e melhoria nas condições de aderência pneu-superfície de rolamento. Apresenta espessura geralmente delgada, entre 6 a 15 mm, não excedendo, por aplicação, a 1,5 vezes a espessura equivalente da lama asfáltica para o mesmo tamanho do agregado, este, tendo uma excepcional importância no desempenho da mistura sendo limpo, de elevada resistência mecânica menor que 12,5 mm, acompanhado de uma curva granulométrica bem graduada, confere ao microrrevestimento asfáltico qualidade superior de desempenho quando comparada a matérias similares.

A taxa de aplicação varia com as condições da superfície e a granulometria, geralmente entre 10 a 30 kg/m². Uma vez curado, apresenta-se um aumento da rugosidade que é responsável pela melhoria da aderência pneu/pavimento, da drenagem superficial e da diminuição do “*Spray*” que se forma pela movimentação, em particular de caminhões, sob chuva, reduzindo a as condições de segurança para os usuários que trafegam em veículos menores.

4.3.2.4 Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)

Trata-se do produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. As misturas asfálticas a quente também se dividem em grupos específicos em função da granulometria dos agregados.

Tanto o Strada como o SGP Univias possuem codificações específicas (abreviaturas), para identificar determinados tipos de serviço e intervenção,

INT.: Intervenção número.

MÊS: Mês da intervenção.

ANO: Ano da intervenção.

HR: Espessura do revestimento.

HC: Espessura de corte.

TIPO: Tipo da intervenção.

SD: Sem Dados.

RRP: Remoção Reconstrução Parcial.

CBUQ: Concreto Usinado a Quente.

PMQ: Pré- Misturado a Quente.

CBUQ+PMQ: Concreto Usinado a Quente + Pré-Misturado a Quente.

FR+RC: Recapeamento após fresagem.

MF+RC: Recapeamento após Reperfilagem com Massa Fina de PMQ.

Micro CA: Micro Concreto Asfáltico.

Reperf.: Reperfilagem

CR: Conserva Rotineira (sem intervenções no pavimento)

CL: Conserva Leve.

ST: Selagem de Trincas.

CP: Conserva Pesada (aplicação de camada delgada de desgaste)

RS: Recapeamento Simples em CBUQ.

RRV,RRP,RRT: Reconstrução (revestimento, parcial ou total)

A seção dos pavimentos existentes nos trechos de estudo estão demonstradas de forma esquemática apresentadas nas Figuras 10 a 15 bem como um detalhamento dessa estrutura nas Tabelas 6 a 11.

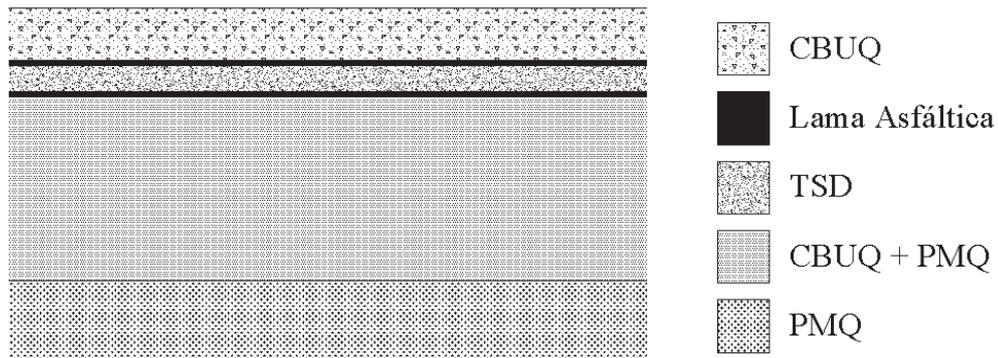


Figura 10 – Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 01

Tabela 6 - Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 01

Intervenção	Mês	Ano	Faixa 01		Faixa 02	
			Tipo	Espessura	Tipo	Espessura
1	Sem dados	1973	PMQ	6,0	PMQ	6,0
2	Sem dados	1992	CBUQ+PMQ	14,0	CBUQ+PMQ	14,0
3	Sem dados	1998	Lama Asf.	1,0	Lama Asf.	1,0
4	Jan	2003	TSD	2,0	TSD	2,0
5	Out	2005	Lama Asf.	0,4	Lama Asf.	0,4
6	Dez	2007	CBUQ	4,0	CBUQ	4,0

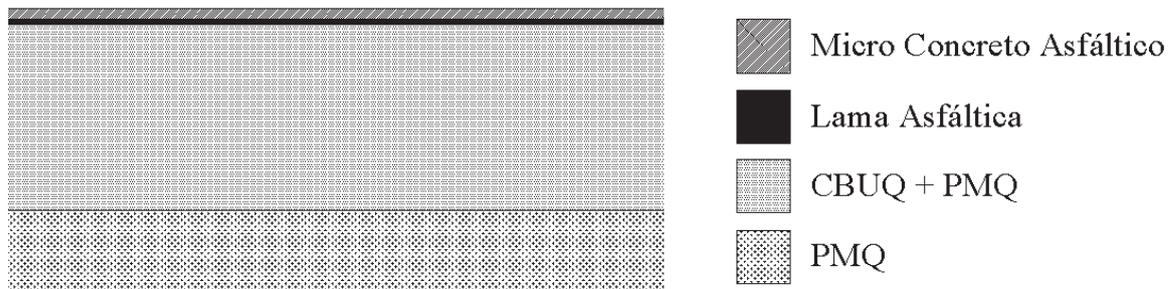


Figura 11 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 02

Tabela 7 - Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 02

Intervenção	Mês	Ano	Faixa 01		Faixa 02	
			Tipo	Espessura	Tipo	Espessura
1	Sem dados	1973	PMQ	6,0	PMQ	6,0
2	Sem dados	1992	CBUQ+PMQ	14,0	CBUQ+PMQ	14,0
3	Sem dados	1998	Lama Asf.	1,0	Lama Asf.	1,0
4	Ago	2004	Micro CA	2,0	Micro CA	2,0

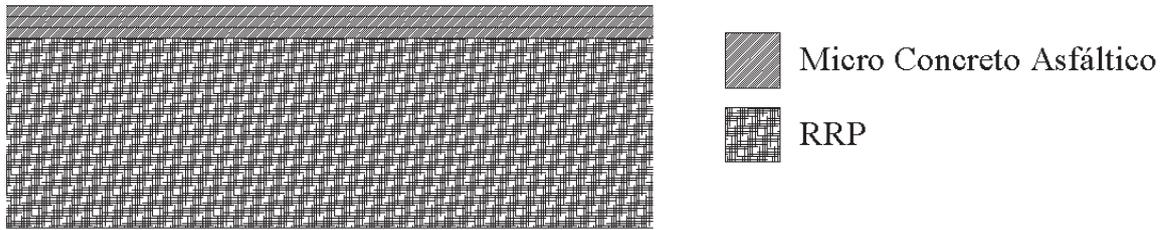


Figura 12 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 03

Tabela 8 - Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 03

Intervenção	Mês	Ano	Faixa 01		Faixa 02	
			Tipo	Espessura	Tipo	Espessura
1	Sem dados	1980	RRP	12,0	RRP	12,0
2	Set	2003	Micro CA	1,0	Micro CA	1,0
3	Mai	2005	Micro CA	1,0	Micro CA	1,0
4	Mar	2007	Micro CA	1,0	Micro CA	1,0

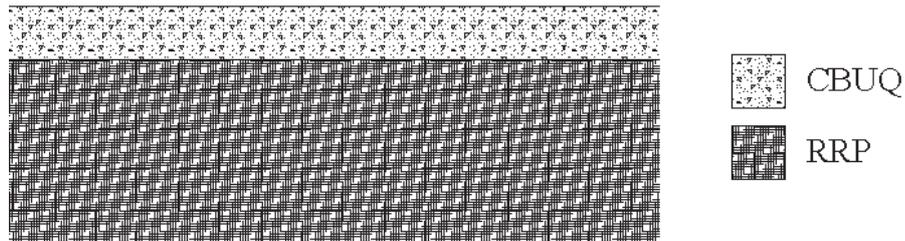


Figura 13 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 04

Tabela 9 - Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 04

Intervenção	Mês	Ano	Faixa 01		Faixa 02	
			Tipo	Espessura	Tipo	Espessura
1	Sem dados	1980	RRP	12,0	RRP	12,0
2	CBUQ	2006	CBUQ	4,0	CBUQ	4,0

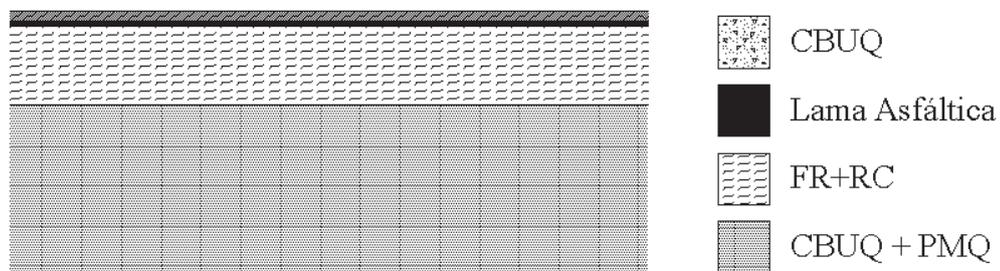


Figura 14 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 05

Tabela 10 - Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 05

Intervenção	Mês	Ano	Faixa 01		Faixa 02	
			Tipo	Espessura	Tipo	Espessura
1	Sem dados	1984	CBUQ+PMQ	14,0	CBUQ+PMQ	14,0
2	Sem dados	1998	FR+RC	5,0	FR+RC	5,0
3	Sem dados	2001	Lama Asf.	0,4	Lama Asf.	0,4
4	Mar	2005	Micro CA	0,7	Micro CA	0,7

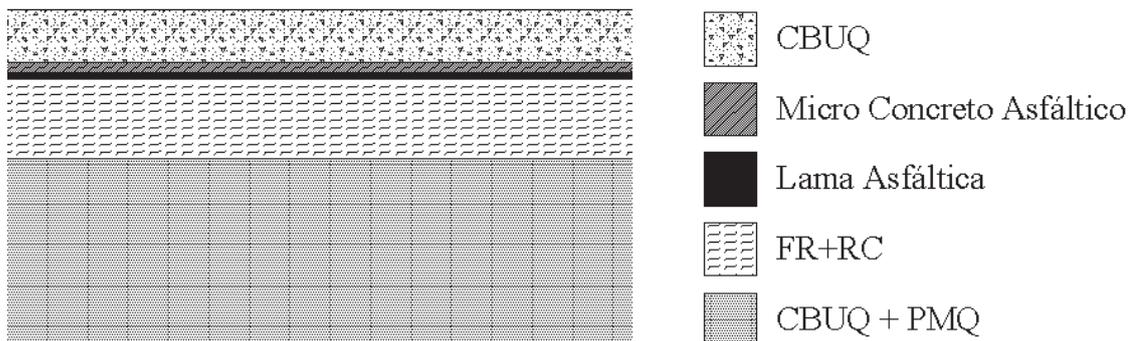


Figura 15 - Detalhamento estrutura do pavimento - Trecho 06

Tabela 11 - Detalhamento histórico de manutenção – Trecho 06

Intervenção	Mês	Ano	Faixa 01		Faixa 02	
			Tipo	Espessura	Tipo	Espessura
1	Sem dados	1984	CBUQ+PMQ	14,0	CBUQ+PMQ	14,0
2	Sem dados	1998	FR+RC	5,0	FR+RC	5,0
3	Sem dados	2001	Micro	0,7	Micro	0,7
4	Jul	2004	Micro	0,7	Micro	0,7
5	Set	2007	CBUQ	4,0	CBUQ	4,0

Para a montagem do histórico de manutenção, foram incorporadas apenas intervenções que tiveram área de abrangência em relação com a pista de 100%, ou seja, todas as faixas de rodagem tiveram a mesma intervenção tanto no tipo quanto na área de abrangência. Nesse caso, intervenções de reparos localizados que abrangem de certa forma um percentual pequeno não foi considerado.

4.3.3 Deflexões

Deflexões é o único parâmetro do banco de dados que não é atualizado anualmente, e sim a cada dois anos, tendo ocorrido em 2003/2005/2007. O levantamento a campo para essa

parâmetro, nestes três biênios foram realizados com o mesmo equipamento, *Falling Weight Deflectometer* (FWD), modelo KUAB (Figura 16), que permite a avaliação estrutural do pavimento por intermédio de medições de deslocamento na superfície provocados por uma carga de impacto.



Figura 16 - FWD KUAB

Fonte: Univias (2007).

A metodologia de coleta dos dados a campo se diferencia entre rodovias, conforme solicitação do consórcio, tendo-se assim leituras em segmentos a cada 80 e 40 m. A média dessas leituras por km formam as planilhas utilizadas na pesquisa.

4.4 Tratamento dos dados

Os dados oriundos do bando de dados do SGP Univias, principalmente para a irregularidade longitudinal, já produz um valor referente à média de cada subtrecho homogêneo. Dessa forma, para a pesquisa, foram trabalhados com os dados coletados pelo equipamento, dando apenas um tratamento estatístico como se descreve.

Quanto ao tráfego, optou-se pelo cálculo de cada trecho escolhido, com base no Volume Diário Médio-VDM das praças de pedágio.

4.4.1 Tratamento dos dados de irregularidade

Como já mencionado, o cuidado com os mesmos procedimentos e equipamentos de coleta, a pesquisa teve 2003 como o ano de partida, pois se tornou usual a utilização da barra laser, Figura 17, não tendo assim possíveis correlações com equipamentos anteriormente utilizados.



Figura 17 - Barra laser

Fonte: Univias (2007).

A barra “laser” realiza uma “varredura” em toda a superfície do pavimento e integra valores para o consórcio de 200 a 200 m, demonstrado na planilha a campo, Tabela 12, em que consta km inicial e final, leituras por faixa, data do levantamento (mês/ano) e ainda o equipamento utilizado.

Tabela 12 - Planilha da leitura a campo gerada pelo equipamento barra laser

kmi	kmf	QI1	QI2	QI3	QI4	Data	Equip.
309.92	310.12	23	23	-	-	Set. 2005	Laser
310.12	310.32	23	27	-	-	Set. 2005	Laser
310.32	310.52	41	41	-	-	Set. 2005	Laser
310.52	310.72	43	41	-	-	Set. 2005	Laser
310.72	310.92	42	33	-	-	Set. 2005	Laser

Fonte: Univias (2007).

Analisando a planilha da leitura a campo, identifica-se que para cada “km” de pista foram coletados 10 leituras de QI (5 leituras para cada faixa de tráfego). A Figura 18 esboça o início do procedimento para o tratamento dos dados que é a média de todas as leituras na faixa

de tráfego, dentro um “km”, torna-se uma única leitura. Dessa forma o intervalo de um “km” que possuía 10 leituras passa a ter apenas duas (uma para cada faixa de tráfego).

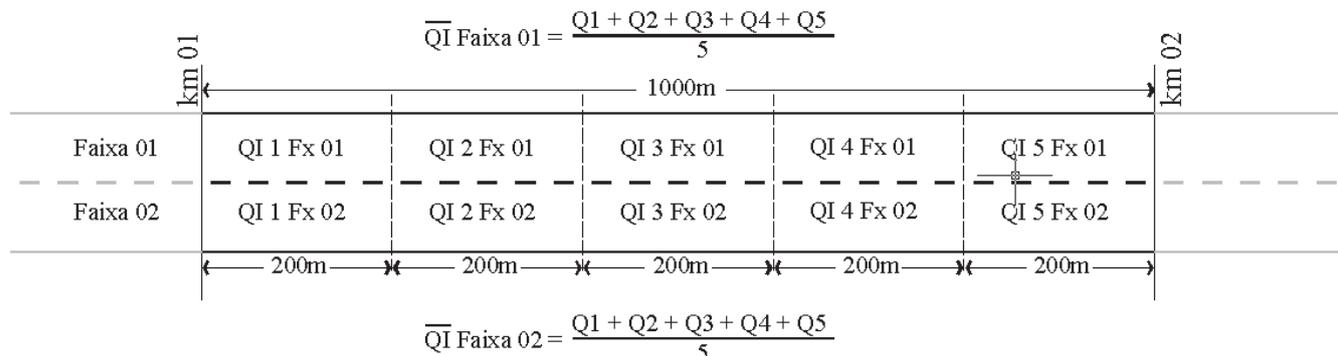


Figura 18 – Representação esquemática da divisão dos segmentos

Analisando-se a média diferenciada para cada faixa de tráfego, foi identificada uma certa diferença entre as faixas dentro do mesmo “km”, a variação entre elas se dá, principalmente, pelo QI de origem de cada faixa.

Numa segunda etapa da análise, fez-se uma média para cada “km” pertencente aos 5 km de cada trecho em estudo, Figura 19.

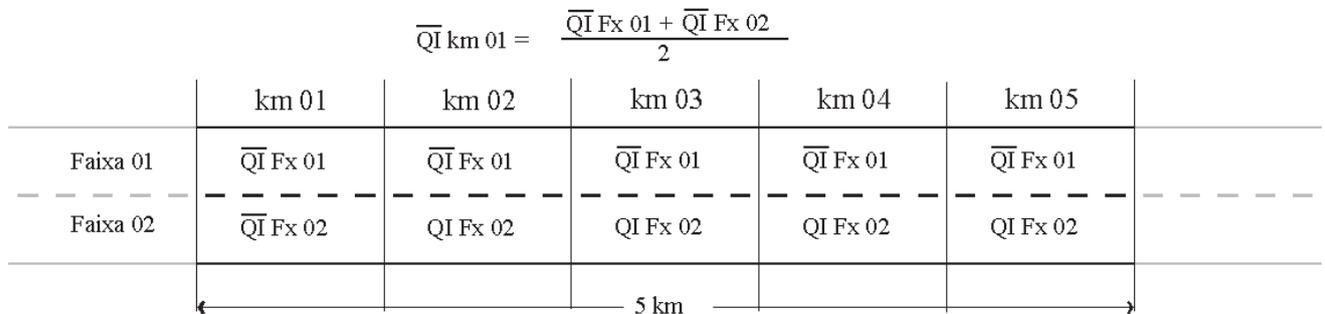


Figura 19 – Médias de QI entre as faixas de rolagem

Finalizando o tratamento dos dados para a irregularidade longitudinal, a média global entre todas as faixas de tráfego e todos os “km” de cada trecho, Figura 20, formam a base de dados da pesquisa.

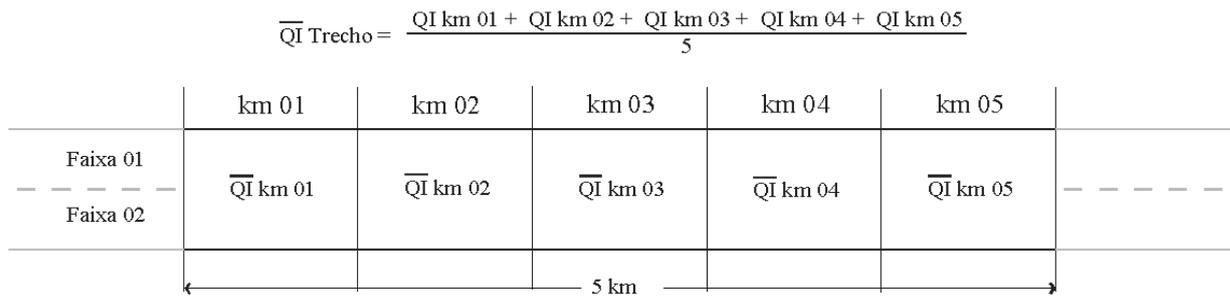


Figura 20 – Média de QI por km e trecho

O procedimento adotado para o tratamento e análise dos dados de irregularidade dos dados coletados a campo, descritos anteriormente, constitui de tabulações das leituras e cálculo das médias. Na Tabela 13, está apresentado um exemplo do tratamento integrante a pesquisa na forma do Trecho 01.

Tabela 13 - Média por km/faixa ao longo do tempo média a campo – Trecho 01

km Inicial	km Final	QI - 2003		QI - 2004		QI - 2005		QI - 2006		QI - 2007	
		Faixa 01	Faixa 02								
332	333	12,6	39,4	27,3	34,3	37,6	40,0	36,2	41,4	39,5	36,5
333	334	10,9	34,8	25,2	31,1	40,6	39,4	38,0	34,8	36,3	35,6
334	335	11,7	35,3	28,2	31,1	38,4	34,0	33,0	36,6	31,1	34,6
335	336	9,5	31,6	28,3	24,1	29,2	39,4	28,8	38,8	29,2	41,5
336	337	9,8	30,1	27,7	26,4	27,2	25,8	28,2	32,8	26,7	32,1
Média Faixa		10,9	34,2	27,3	29,4	34,6	35,7	32,8	36,9	32,6	36,1
Média Trecho		22,6		28,4		35,2		34,9		34,3	

A análise da evolução da irregularidade longitudinal entre as faixas de tráfego e o detalhamento dos demais trechos incorpora o Anexo II.

4.4.2 Tratamento dos dados de tráfego

O consórcio Univias possui para controle e acompanhamento do tráfego um sistema totalmente independente. Tal sistema possui um banco de dados que serve como base para a atualização do SGP Univias, o qual identifica diariamente o volume de veículos em todas

praças de pedágio desde 2001, diferenciando ainda pela categoria do veículo. As categorias adotadas para controle de arrecadação estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Detalhamento das categorias de veículos

Categoria		Eixo
1	Automóveis	2
2	Caminhões	2
3	Caminhões	3
4	Caminhões	4
5	Caminhões	5
6	Caminhões	6
7	Automóveis (reboque)	3
8	Automóveis (reboque)	4
9	Caminhões	7
10	Caminhões	8
11	Caminhões	9
12	Ônibus	2
13	Ônibus	3
14	Ônibus	4

A composição entre as categorias registradas no sistema, para as categorias referentes ao cálculo do número N, Tabela 11, onde foram agrupadas as categorias de veículos (1, 7 e 8) em uma única, outra situação foi o agrupamento dos respectivos eixos até caminhões de 5 eixos, acrescidos da categoria ônibus com os seus eixos correspondentes. Ainda a distinção dos veículos com 6 ou mais eixos.

Tabela 15 - Composição dos eixos por categorias

Categoria		Eixo
1 7 8	Automóveis	2
2 12	Caminhões	2
3 13	Caminhões	3
4 14	Caminhões	4
5	Caminhões	5
6 9 10	Caminhões	6 +

Para o cálculo do número N, foram utilizados os fatores de veículos, Tabela 16, do Método da AASHTO, retiradas do próprio banco dados do SGP Univias.

Tabela 16 - Fatores de veículos

Categoria		FV
1 7 8	Automóveis	
2 12	Caminhões	0,511
3 13	Caminhões	2,237
4 14	Caminhões	1,261
5	Caminhões	11,070
6 9 10	Caminhões	8,336

Utilizando as composições das categorias e os fatores de veículos, na equação do Método da AASHTO, os valores respectivos do N para as determinadas praças de pedágio que mais se aproximam dos trechos em estudo, Tabela 17, bem como os valores acumulados ao longo do período da pesquisa, Tabela 18.

Tabela 17 - Tráfego por praça de pedágio e Trechos

Tráfego (N 10⁶)						
Trecho	Praça de Pedágio	2003	2004	2005	2006	2007
1	Guaíba	2,24	2,36	2,28	2,22	2,39
2						
3	Eldorado	2,25	2,39	2,34	2,36	2,52
4						
5	Marques	1,31	1,34	1,26	1,23	1,34
6						

Tabela 18 - Tráfego acumulado por praça de pedágio e Trechos

Tráfego Acumulado (N 10⁶)						
Trecho	Praça de Pedágio	2003	2004	2005	2006	2007
1	Guaíba	2,24	4,61	6,88	9,10	11,49
2						
3	Eldorado	2,25	4,63	6,97	9,33	11,85
4						
5	Marques	1,31	2,65	3,91	5,14	6,48
6						

4.5 Resumo dos parâmetros

Com todas as considerações descritas da obtenção, moldagem e tratamentos dos dados de todos os trechos em estudo, todos os parâmetros necessários tanto para a pesquisa em si, quanto para o melhor entendimento do comportamento dos pavimentos, estão apresentados nas Tabelas 19 a 24. O parâmetro trilha de roda é coletado pelo mesmo equipamento e na mesma campanha de monitoramento que a irregularidade longitudinal, assim os dados tiveram o mesmo tratamento, diferenciando apenas a quantidade de leituras para cada parâmetro (diferentemente da irregularidade que são 10 leituras por “km” a trilha de roda possui 200 leituras por “km”).

Além dos parâmetros as tabelas demonstram as intervenções ao longo do tempo (histórico de manutenção), bem como o período em que foram realizadas as campanhas de coleta dos dados (monitoramento)

Tabela 19 - Resumo dos parâmetros – Trecho 01

TRECHO 01			2003	2004	2005	2006	2007
QI	Faixa 01		10,9	27,3	34,6	32,8	32,6
	Faixa 02		34,2	29,4	35,7	36,9	36,1
	Média		22,6	28,4	35,2	34,9	34,3
	Variância		157,9	9,3	32,6	18,0	20,9
	Desvio		12,6	3,1	5,7	4,2	4,6
IRI	Média		1,7	2,2	2,7	2,7	2,6
ATR	Faixa 01	Esquerda	3,5	4,3	3,9	2,9	4,4
		Direita	3,0	3,5	3,2	2,4	3,2
	Média		3,3	3,9	3,6	2,7	3,8
	Faixa 02	Esquerda	3,6	5,6	6,0	3,6	2,7
		Direita	2,6	3,3	2,2	4,6	4,9
	Média		3,1	4,5	4,1	4,1	3,8
Deflexão (D0)		0,01	54,6		56,2		57,4
Tráfego		N	2,24	2,35	2,27	2,21	2,37
Histórico de Manutenção			Jan -		Out -		Dez -
Monitoramento			TSD		Lama		CBUQ
			Nov	Out	Set	Set	Out

Tabela 20 - Resumo dos parâmetros – Trecho 02

TRECHO 02			2003	2004	2005	2006	2007	
QI	Faixa 01		cont./km	22,2	11,7	9,7	10,6	10,2
	Faixa 02			14,7	13,1	10,5	10,6	11,0
	Média			18,4	12,4	10,1	10,6	10,6
	Variância			30,5	13,7	3,1	3,5	4,7
	Desvio			5,5	3,7	1,8	1,9	2,2
IRI	Média		1,4	1,0	0,8	0,8	0,8	
ATR	Faixa 01	Esquerda	mm	6,3	6,2	6,5	4,9	7,7
		Direita		2,1	3,3	3,3	2,3	3,0
	Média			4,2	4,8	4,9	3,6	5,4
	Faixa 02	Esquerda		3,7	4,7	4,5	2,7	2,9
		Direita		4,0	4,4	2,9	4,1	5,3
	Média			3,8	4,5	3,7	3,4	4,1
Deflexão (D0)		0,01	38,7		46,3		46,3	
Tráfego		N	2,24	2,35	2,27	2,21	2,37	
Histórico de Manutenção				Ago - MICRO				
Monitoramento			Nov	Out	Set	Set	Out	

Tabela 21 - Resumo dos parâmetros – Trecho 03

TRECHO 03			2003	2004	2005	2006	2007	
QI	Faixa 01		cont./km	24,8	24,1	33,4	31,9	28,7
	Faixa 02			20,8	19,8	24,4	25,1	24,3
	Média			22,8	21,9	28,9	28,5	26,5
	Variância			21,3	15,6	36,0	33,4	10,0
	Desvio			4,6	4,0	6,0	5,8	3,2
IRI	Média		1,8	1,7	2,2	2,2	2,0	
ATR	Faixa 01	Esquerda	mm	6,8	7,8	2,5	5,8	5,9
		Direita		4,1	3,8	2,1	2,4	4,3
	Média			5,5	5,8	2,3	4,1	5,1
	Faixa 02	Esquerda		3,8	7,1	4,2	4,0	9,2
		Direita		3,7	1,4	1,6	4,8	4,9
	Média			3,8	4,2	2,9	4,4	7,1
Deflexão (D0)		0,01	34,7		40,1		47,7	
Tráfego		N	2,24	2,38	2,33	2,34	2,49	
Histórico de Manutenção			Set - MCRO		Mar - MICRO		Mai - MICRO	
Monitoramento			Nov	Out	Set	Set	Out	

Tabela 22 - Resumo dos parâmetros – Trecho 04

TRECHO 04			2003	2004	2005	2006	2007	
QI	Faixa 01		cont./km	16,4	16,9	22,1	14,2	13,2
	Faixa 02			15,8	15,4	17,6	11,9	10,0
	Média			16,1	16,1	19,8	13,1	11,6
	Variância			7,7	7,8	12,1	27,6	20,8
	Desvio			2,8	2,8	3,5	5,3	4,6
IRI	Média		1,2	1,2	1,5	1,0	0,9	
ATR	Faixa 01	Esquerda	mm	6,1	7,4	3,9	2,4	3,6
		Direita		4,1	5,3	5,9	1,1	1,7
	Média			5,1	6,3	4,9	1,8	2,6
	Faixa 02	Esquerda		5,1	7,2	4,4	1,8	4,2
		Direita		4,0	3,1	4,0	1,3	1,6
	Média			4,5	5,2	4,2	1,5	2,9
Deflexão (D0)		0,01	38,3		38,2		23,0	
Tráfego		N	2,24	2,38	2,33	2,34	2,49	
Histórico de Manutenção						Mar -		
Monitoramento			Nov	Out	Set	Set	Out	

Tabela 23 - Resumo dos parâmetros – Trecho 05

TRECHO 05			2003	2004	2005	2006	2007	
QI	Faixa 01		cont./km	26,0	25,1	27,2	28,5	29,8
	Faixa 02			36,4	36,6	37,6	42,0	43,8
	Média			31,2	30,9	32,4	35,3	36,8
	Variância			76,9	89,4	47,6	55,0	64,9
	Desvio			8,8	9,5	6,9	7,4	8,1
IRI	Média		2,4	2,4	2,5	2,7	2,8	
ATR	Faixa 01	Esquerda	mm	4,6	5,8	2,5	4,6	3,3
		Direita		8,0	4,4	0,8	6,1	5,4
	Média			6,3	5,1	1,7	5,3	4,4
	Faixa 02	Esquerda		5,5	5,1	3,0	4,8	3,2
		Direita		5,4	3,6	1,2	4,0	2,9
	Média			5,5	4,3	2,1	4,4	3,1
Deflexão (D0)		0,01	28,8		33,9		38,5	
Tráfego		N	1,30	1,32	1,24	1,21	1,31	
Histórico de Manutenção					Mar -			
Monitoramento			Nov	Out	Set	Set	Out	

Tabela 24 - Resumo dos parâmetros – Trecho 06

TRECHO O6			2003	2004	2005	2006	2007	
QI	Faixa 01		cont./km	33,2	33,9	41,6	42,2	33,9
	Faixa 02			39,6	37,4	41,8	46,5	37,4
	Média			36,4	35,6	41,7	44,4	35,6
	Variância			43,6	32,9	36,3	45,3	179,3
	Desvio			6,6	5,7	6,0	6,7	13,4
IRI	Média		2,8	2,7	3,2	3,4	2,7	
ATR	Faixa 01	Esquerda	mm	4,9	3,6	2,8	3,1	1,8
		Direita		6,3	3,0	4,6	4,7	2,2
	Média			5,6	3,3	3,7	3,9	2,0
	Faixa 02	Esquerda		5,6	2,9	1,6	4,5	1,1
		Direita		4,2	1,8	2,2	3,1	1,3
	Média			4,9	2,4	1,9	3,8	1,2
Deflexão (D0)		0,01	26,1		26,4		26,4	
Tráfego		N	1,30	1,32	1,24	1,21	1,31	
Histórico de Manutenção				Jul -			Set -	
Monitoramento			Nov	Out	Set	Set	Out	
				MICRO			CBUQ	

Nas Figuras 20 a 25, estão plotadas as evoluções das irregularidades longitudinais ao longo do tempo nos trechos em estudo, assim as equações de evolução contemplam todas as intervenções registradas nos pavimentos. Valores de QI, diferenciados por cores, (cor preta: nenhuma intervenção registrada; cor verde: intervenção do tipo tratamento superficial duplo (2cm); cor amarela: intervenção do tipo lama asfáltica (5mm); cor laranja: intervenção do tipo micro revestimento asfáltico (7mm); cor vermelha: intervenção do tipo CBUQ (4cm)), demonstram os tipos de intervenção nos determinados períodos de sua execução.

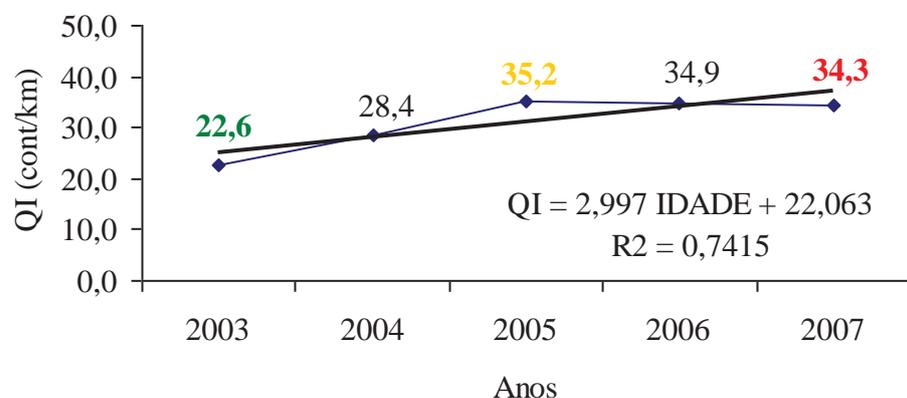


Figura 21 – Evolução irregularidade longitudinal – Trecho 01

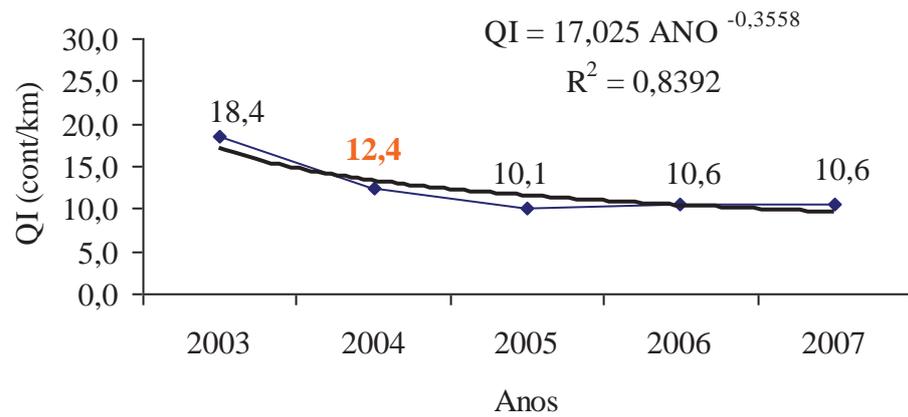


Figura 22 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 02

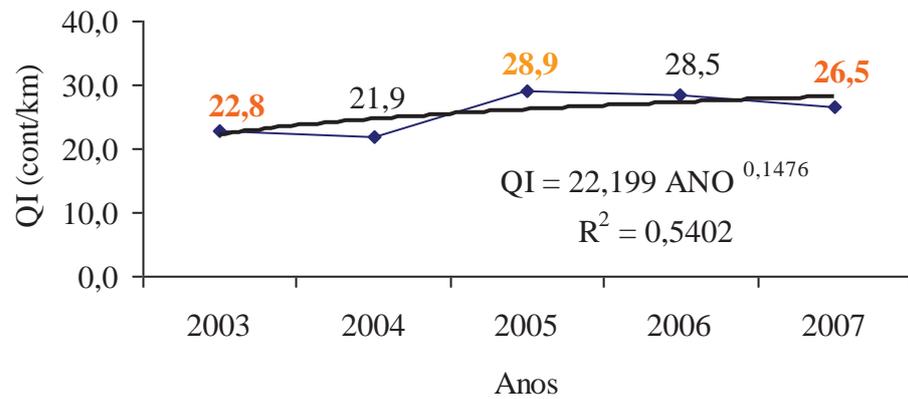


Figura 23 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 03

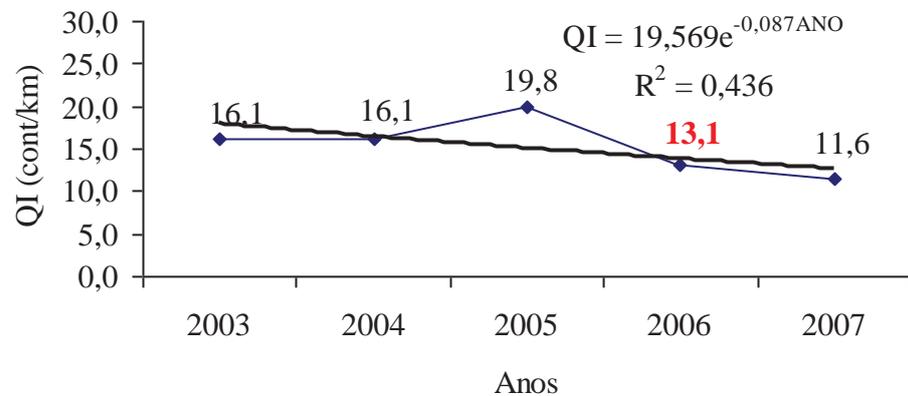


Figura 24 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 04

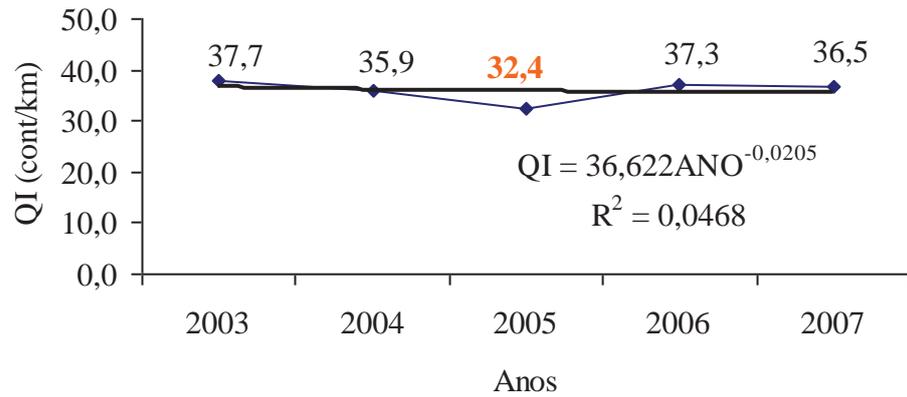


Figura 25 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 05

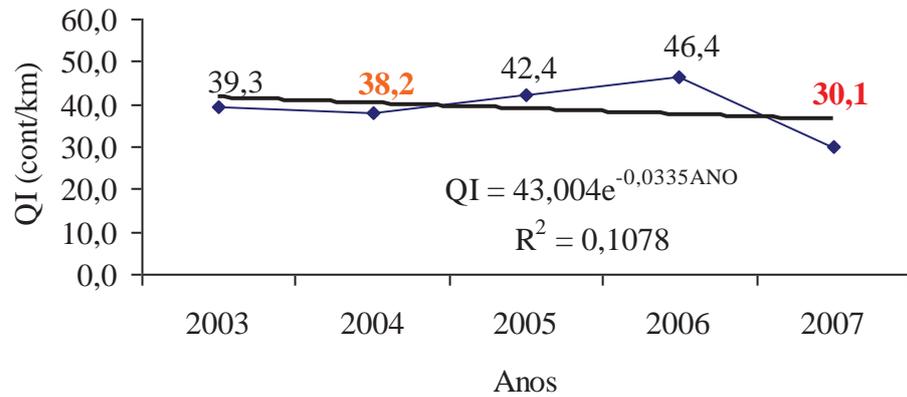


Figura 26 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 06

Os segmentos investigados quanto à evolução da irregularidade longitudinal nesta pesquisa possuem a distribuição amostral quanto ao tipo de revestimento adotado na restauração dos pavimentos apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Intervenções analisadas na pesquisa

Tipo de Revestimento	Numero de amostras (n)	Percentual
Concreto Asfáltico (CBUQ = 4cm)	3	28%
Micro Concreto Asfáltico (Micro=7mm)	6	55%
Lama Asfáltica (Lama=5mm)	1	1%
Tratamento Superficial Duplo (TSD=2cm)	1	1%
Total	11	100%

4.6 Seleção dos modelos

Com base na revisão bibliográfica foram selecionados os seguintes modelos, que serão aplicados nos trechos em estudo:

1º) Equação – Paterson (1987);

$$IRI(t) = \left[IRI_0 + 725(1 + SNC)^{-4,99} NE_4(t) \right] e^{0,0153AGE} \quad (25)$$

2º) Equação – Queiroz (1981);

$$\log QI = 1,478 - 0,138ER + 0,000795A + 0,0224 \left(\frac{\log N}{SNC} \right)^2 \quad (4)$$

$$QI = 21,8 - 7,52ER + 5,16TR + 0,515A + 7,22 \times 10^{-5} x (Bx \log N)^2 \quad (5)$$

$$QI = 12,63 - 5,16ER + 3,31TR + 0,393A + 8,66 \left(\frac{\log N}{SNC} \right) + 7,17 \times 10^{-5} x (Bx \log N)^2 \quad (6)$$

3º) Equação – DNER-PRO 159/85;

$$QI_{previsto} = 19 + \frac{QI_{antes} - 19}{0,602H + 1} \quad (24)$$

Na segunda equação (QUEIROZ, 1981), mostram-se as variações que o modelo sofre, devido a particularidade de englobar ou não aspectos relevantes para a determinação da evolução da irregularidade longitudinal dos pavimentos. Assim, identificam-se os parâmetros mais importantes para o acompanhamento dessa evolução.

4.7 Aplicação dos modelos

Inicialmente, a aplicação do modelo desenvolvido por Paterson (1987) destina-se basicamente para o acompanhamento da evolução da irregularidade ao longo do tempo, nos mais diversos tipos de revestimentos, em seguida a aplicação do modelo desenvolvido pelo DNER – PRO 159/85 - voltado para a identificação da irregularidade logo após a intervenção de revestimento com CBUQ e finalizando com o modelo desenvolvido por Queiroz (1984), englobando suas diferentes composições.

O detalhamento de todo o procedimento e metodologias aplicadas para a determinação da evolução da irregularidade pelos respectivos modelos nos trechos em estudo está representado pelo Trecho 01, que servirá para esclarecer e ilustrar esse capítulo, que finaliza com um resumo da evolução para cada modelo no respectivo trecho. Os demais trechos com seus detalhamentos incorporam o Anexo III.

4.7.1 Paterson (1987)

Modelo que contempla os principais parâmetros da evolução da irregularidade, iniciando com a irregularidade inicial do pavimento (IRI 0), idade do pavimento (AGE), o tráfego (NE4) e a estrutura do pavimento (SNC), este correlacionado com a deflexão do pavimento conforme expressão:

$$SNC = 3,2xD_{VB}^{-0,63} \quad (41)$$

Como os dados a campo foram coletados com o equipamento FWD, tornou-se necessária a correlação entre as deflexões, pois o modelo incorpora valores de deflexão coletados pela viga Benkelmam, que utiliza a equação 42.

$$D_{FWD} = 2,8281 + 0,7502xD_{VB} \quad (42)$$

A Tabela 21 demonstra a evolução das deflexões ao longo do tempo juntamente com o SNC do Trecho 01, além do comparativo entre as deflexões médias a campo pelo FWD com as deflexões DVB correlacionadas.

Tabela 26 - Número estrutural corrigido, Trecho 01

Ano	DFWD	DVB	SNC
2003	54,6	89,39	11,58
2004	54,6	89,39	11,58
2005	56,2	92,12	11,72
2006	56,2	92,12	11,72
2007	57,4	94,17	11,83

A evolução da irregularidade longitudinal através da expressão do modelo está apresentada na Tabela 27 e Figura 27.

Tabela 27 - IRI Previsto

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI Previsto
2003	1,74	11,58	2,24	0,92	1,76
2004	2,18	11,58	2,35	0,92	2,21
2005	2,70	11,72	2,27	0,92	2,74
2006	2,68	11,72	2,21	1,00	2,72
2007	2,64	11,83	2,37	1,10	2,68

Fonte: Paterson (1987).

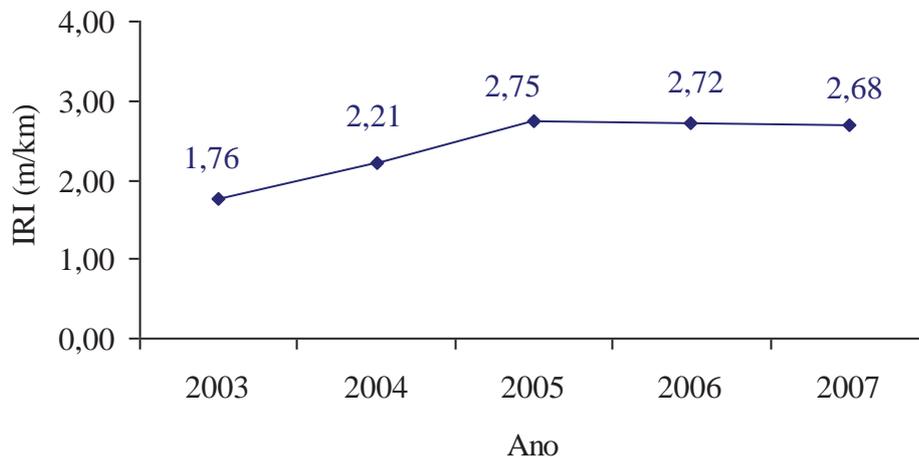


Figura 27 – Evolução Irregularidade longitudinal – Trecho 01

Fonte: Paterson (1987).

4.7.2 Queiroz (1981)

Dentro da particularidade do modelo, de possuir variações nas equações devido aos parâmetros que compõem e estruturam os modelos, tornou-se necessária a denominação separadamente para cada variável. Assim a equação que inclui o número estrutural será nomeada como “Queiroz A”, a equação que inclui a deflexão da viga Benkelman “Queiroz B” e a equação que engloba as duas variáveis “Queiroz C”.

“Queiroz A”

$$\log QI = 1,478 - 0,138ER + 0,000795A + 0,0224 \left(\frac{\log N}{SNC} \right)^2 \quad \left| \quad 4) \right.$$

Onde:

QI = Irregularidade do pavimento, contagens / km;

ER = Variável indicadora do estado de reabilitação:

$ER = 0$, como construído;

$ER = 1$, reabilitado.

A = Idade do pavimento desde a construção ou reabilitação, em anos;

N = Número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão 80 KN, calculado pelo método AASHTO.

SNC = Número estrutural corrigido.

“Queiroz B”

$$QI = 21,8 - 7,52ER + 5,16TR + 0,515A + 7,22 \times 10^{-5} x (Bx \log N)^2 \quad \left| \quad (5) \right.$$

Onde:

TR = Variável indicadora do tipo de pavimento:

$TR = 0$, concreto asfáltico;

$TR = 1$, tratamento superficial;

B = Deflexão Viga Benkelman, em 0,01mm.

“Queiroz C”

$$QI = 12,63 - 5,16ER + 3,31TR + 0,393A + 8,66 \left(\frac{\log N}{SNC} \right) + 7,17 \times 10^{-5} x (Bx \log N)^2 \quad \left| \quad 6) \right.$$

As evoluções da irregularidade longitudinal para tais equações estão detalhadas nas Tabelas e ilustradas nas Figuras 27, 28 e 29.

Tabela 28 - QI calculado, “Queiroz A” – Trecho 01

Ano	N	SNC	A	ER	Log QI	QI calculado
2003	2237546,56	11,6	1,0	1,0	1,348	22,26
2004	4590295,29	11,6	2,0	1,0	1,349	22,34
2005	6856769,29	11,7	1,0	1,0	1,348	22,31
2006	9061822,86	11,7	2,0	1,0	1,349	22,36
2007	11431114,79	10,8	1,0	1,0	1,350	22,40

Tabela 29 - QI calculado, “Queiroz B” – Trecho 01

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	QI calculado
2003	2237546,56	1,0	1,0	1,0	89,457	36,40
2004	4590295,29	1,0	2,0	1,0	89,457	38,57
2005	6856769,29	1,0	1,0	1,0	92,078	40,15
2006	9061822,86	1,0	2,0	1,0	92,078	41,39
2007	11431114,79	1,0	1,0	1,0	95,683	43,20

Tabela 30 - QI calculado, “Queiroz C” – Trecho 01

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	SNC	QI calculado
2003	2.237.546,56	1,0	1,0	1,0	89,457	11,585	39,05
2004	4.590.295,29	1,0	2,0	1,0	89,457	11,585	42,01
2005	6.856.769,29	1,0	1,0	1,0	92,078	11,724	44,63
2006	9.061.822,86	1,0	2,0	1,0	92,078	11,724	46,13
2007	11.431.114,79	1,0	1,0	1,0	95,683	11,911	49,10

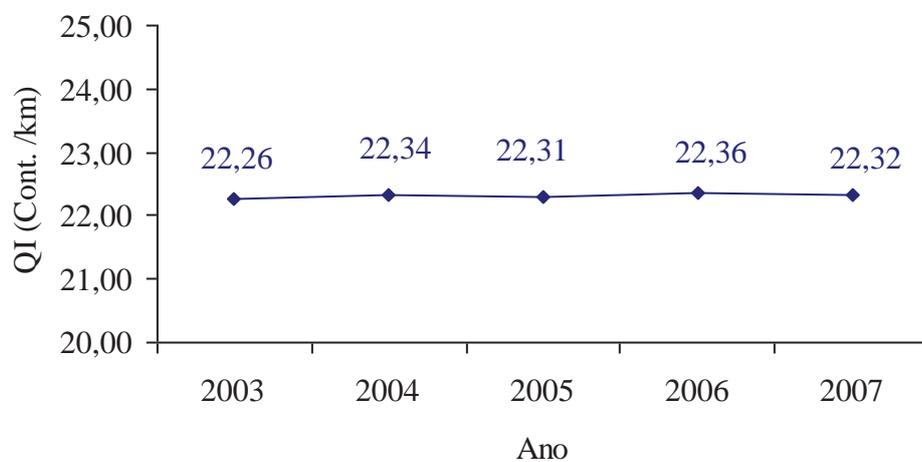


Figura 28 – Evolução da Irregularidade longitudinal “Queiroz A” – Trecho 01

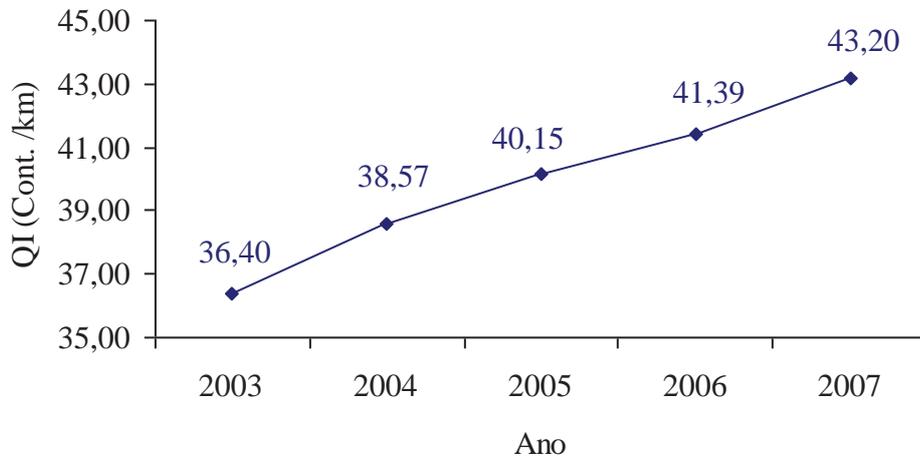


Figura 29 – Evolução da irregularidade longitudinal “Queiroz B”– Trecho 01

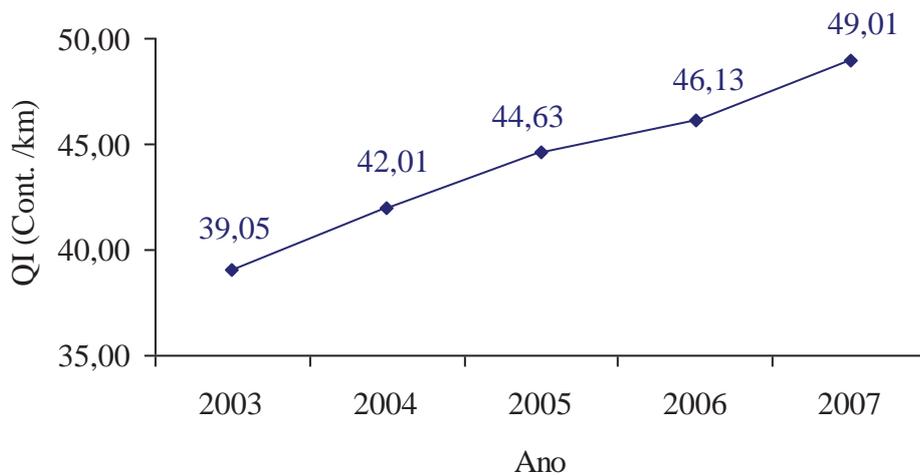


Figura 30 – Evolução da irregularidade longitudinal “Queiroz C”– Trecho 01

4.7.3 DNER – PRO 159/85 (DNER, 1985)

Modelo desenvolvido para a previsão da queda de irregularidade, logo após a intervenção de revestimentos espessos, ou seja, basicamente CBUQ. Aplicação desse modelo para revestimentos delgados se tornou fundamental para a pesquisa por dois aspectos. Primeiramente pela grande utilização pelo consórcio Univias de intervenções com essas

características (revestimento delgada), como podemos evidenciar em seu banco de dados e além de analisar o comportamento desse modelo para tais revestimentos.

$$QI_{previsto} = 19 + \frac{QI_{antes} - 19}{0,602H + 1} \quad (24)$$

Onde:

$QI_{previsto}$ = Irregularidade do pavimento prevista, após a aplicação do concreto asfáltico;

QI_{antes} = Irregularidade do pavimento antes da aplicação do concreto asfáltico;

H = Espessura da camada de restauração, em cm.

Aplicando-se essa equação pode-se estimar a possível queda da irregularidade (QI), nos diferentes tipos de intervenção nos pavimentos. A demonstração da irregularidade, tendo como exemplo o Trecho 01, está apresentado na Tabela 31 e Figura 31.

Tabela 31 - Resultado QI para o modelo.

Intervenção	HR	QI Antes	QI Calculado
TSD	2,0	22,6	20,6
LAMA	0,7	35,2	30,4

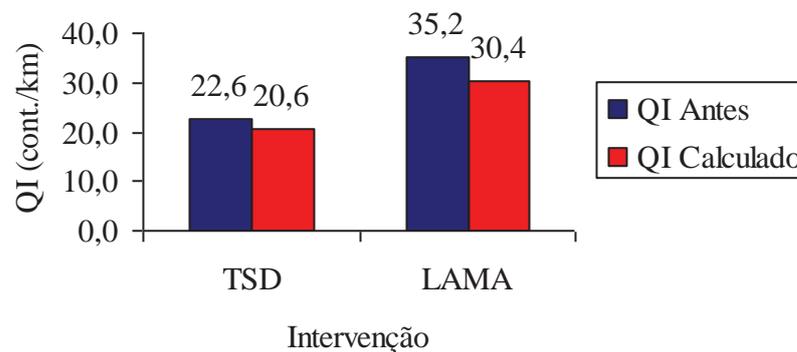


Figura 31 – QI após intervenção, Trecho 01.

5 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

A análise da evolução da irregularidade longitudinal dos trechos em estudo foram diferenciada por três principais aspectos, primeiramente a análise da irregularidade longitudinal imediatamente após a intervenção, diferenciando nesse caso apenas o tipo da intervenção em cada trecho. Em seguida, a análise da evolução da irregularidade ao longo do tempo, ou seja, o comportamento em períodos distintos de cada intervenção para cada trecho. O terceiro aspecto analisa a evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos que não tiveram nenhum tipo de intervenção em um intervalo de tempo igual ou superior a três anos, e por fim o comparativo entre a evolução em escala real (a campo) e a prevista pelos modelos, tanto para ao longo do tempo, quanto para a imediatamente após a intervenção.

5.1 Evolução da irregularidade logo após a intervenção (campo)

O intervalo entre as intervenções identificadas com a próxima leitura do monitoramento forma o período de análise da evolução da irregularidade longitudinal após a intervenção. Para isso todas as intervenções evidenciadas nos trechos em estudo. O registro das intervenções quanto ao tipo e com os períodos de execução e monitoramento, montam os “calendários” de análise, demonstrados a seguir e que ilustram o processo de definição da queda da irregularidade, evidenciada pelo QI, nos trechos em estudo.

As abreviaturas que incorporam os “calendários” são:

M= Monitoramento(coleta dos dados);

TSD = Tratamento Superficial Duplo (2cm);

Lama = Lama Asfáltica (5mm);

Micro = Micro Concreto Asfáltico (7mm);

CBUQ = Concreto Betuminoso Usinado a Quente (4cm).

As intervenções identificadas no Trecho 01, Quadro 02, iniciam com um TSD executado em janeiro de 2003, não podendo compor a pesquisa pelo simples fato de que não há registro da irregularidade do ano anterior para realizar o comparativo entre as leituras de QI_{Antes} e QI_{Depois} . Ocorrendo a mesma situação com a última intervenção (CBUQ) registradas,

durante o período da pesquisa, de não poder realizar o comparativo entre os QI's, pois está executada após o monitoramento do último ano de estudo. Dessa forma das três intervenções registradas no trecho 01, apenas uma, Lama, executada em outubro de 2005 e que teve a coleta no mês seguinte a campanha.

Quadro 02 – Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 01

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	TSD										M	
2004										M		
2005									M	Lama		
2006									M			
2007										M		CBUQ

A intervenção de lama asfáltica (5mm) teve o comportamento referente à queda da irregularidade longitudinal no Trecho 01, demonstrada na Tabela 32, que compara os QI's antes e depois da execução da intervenção na pista, além da identificação do tempo em meses do período entre a execução da intervenção na pista até a leitura do dado (QI_{Depois}) em escala real (campo). Identifica-se a campo que a irregularidade longitudinal no pavimento se manteve estável após a intervenção.

Tabela 32 - Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 01.

Intervenção	QI Antes	Tempo	QI Depois	Diferença	(%)
	(cont. / km)	(meses)	(cont. / km)		
LAMA	35,16	10	34,86	-0,3	-1%

Com apenas uma intervenção ao longo da pesquisa, Micro em Agosto de 2004, apresentado no Quadro 03, tendo o registro do QI antes em novembro de 2003 e QI depois logo após um mês da execução da intervenção o Trecho 02 incorpora a análise da queda da irregularidade após a intervenção.

Quadro 03 – Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 02

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003											M	
2004								Micro		M		
2005									M			
2006									M			
2007										M		

O comparativo entre os QI's antes e depois e o período (tempo) da coleta após a intervenção de Micro, nesse trecho em estudo, estão demonstrados na Tabela 33.

Tabela 33 - Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 02

Intervenção	QI Antes	Tempo	QI Depois	Diferença	(%)
	(cont. / km)	(meses)	(cont. / km)		
Micro	12,4	1	10,1	-2,3	19%

Mesmo sendo os valores de QI relativamente de baixa grandeza ($QI_{\text{antes}}=12,4$ cont./km e $QI_{\text{depois}}=10,1$ cont./km), o percentual da queda da irregularidade longitudinal demonstrada pelo QI, foi significativa, cerca de 20%. Tendo-se nessa determinada intervenção no trecho em estudo uma particularidade, a coleta dos dados (campanha de monitoramento) foi realizada apenas um mês após sua execução na pista (execução em agosto, monitoramento em outubro de 2004), validando a análise da queda imediatamente após a intervenção. A leitura anterior, para o comparativo, foi coletada 9 meses antes da execução da intervenção (monitoramento em novembro de 2003 e execução em agosto de 2004), possivelmente esse valor de QI_{antes} tenha evoluído até a execução da intervenção sendo maior que $QI=12,4$ cont./km registrados.

A intervenção de Micro em setembro de 2003 não incorpora a análise da pesquisa no Trecho 3 em estudo, simplesmente por essa não possuir dados anteriores para o comparativo da queda da irregularidade após a intervenção. Duas intervenções, Micro em março de 2005 e maio de 2007, Quadro 04, são analisadas.

Quadro 04 – Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 03

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003									Micro		M	
2004										M		
2005			Micro						M			
2006									M			
2007					Micro					M		

O comparativo entre os QI's antes e depois e o período (tempo) da coleta após as intervenções de Micro, nesse trecho em estudo, estão demonstrados na Tabela 34.

Tabela 34 - Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 03

Intervenção	QI Antes	Tempo	QI Depois	Diferença	(%)
	(cont. / km)	(meses)	(cont. / km)		
Micro	22,8	11	21,92	-0,88	-4%
Micro	28,5	12	26,53	-1,97	-7%

A intervenção na pista de CBUQ, executada em março de 2006, do Trecho 04, a única intervenção registrada (Quadro 05), diferencia-se das já analisadas por não ser uma intervenção com um revestimento delgado. Tendo-se as leituras de $QI_{anterior}$ cinco meses anterior à intervenção e QI_{depois} cinco meses após a execução na pista.

Quadro 05 - Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 04

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003											M	
2004										M		
2005									M			
2006			CBUQ						M			
2007										M		

O comparativo entre os QI's antes e depois e o período (tempo) da coleta após a intervenção de CBUQ, nesse trecho em estudo, estão demonstrados na Tabela 35.

Tabela 35 - Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 04

Intervenção	QI Antes	Tempo	QI Depois	Diferença	(%)
	(cont. / km)	(meses)	(cont. / km)		
CBUQ	19,81	5	13,06	-6,75	34%

Mesmo com medições relativamente baixas, QI=13 cont./km e QI=19 cont./km, o revestimento CBUQ mostrou uma grande funcionalidade referente à queda de QI após sua intervenção, cerca de 34% do QI anterior.

No Trecho 05, registra-se apenas uma intervenção na pista com revestimento delgado, Micro, conforme Quadro 06. Sua execução ocorreu em março de 2005 e a coleta dos dados (monitoramento) de QI anterior em outubro de 2004. A leitura após a intervenção QI depois, foi realizada em setembro de 2005, ou seja, cinco meses da sua execução.

Quadro 06– Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 05

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003											M	
2004										M		
2005			Micro						M			
2006									M			
2007										M		

O comparativo entre os QI's antes e depois e o período (tempo) da coleta após a intervenção de Micro, nesse trecho em estudo, estão demonstrados na Tabela 36.

Tabela 36 - Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 05

Intervenção	QI Antes	Tempo	QI Depois	Diferença	(%)
	(cont. / km)	(meses)	(cont. / km)		
Micro	35,86	4	32,42	-3,44	10%

Duas intervenções diferenciadas pelo tipo de revestimento no Trecho 06, demonstradas no Quadro 07, Micro executado em julho de 2004 e CBUQ executado em setembro de 2007, finalizam quanto a análise da queda da irregularidade longitudinal após a intervenção da pesquisa.

Quadro 07 - Calendário das intervenções e monitoramento no Trecho 06

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003											M	
2004							Micro			M		
2005									M			
2006									M			
2007									CBUQ	M		

O comparativo entre os QI's antes e depois e o período (tempo) da coleta após as intervenções de Micro e CBUQ, nesse trecho em estudo, estão demonstrados na Tabela 37.

Tabela 37 - Comportamento QI antes e depois, após intervenção, Trecho 06

Intervenção	QI Antes	Tempo	QI Depois	Diferença	(%)
	(cont. / km)	(meses)	(cont. / km)		
Micro	39,3	2	38,18	-1,12	-3%
CBUQ	46,26	1	30,13	-16,13	-35%

Na análise da primeira intervenção, Micro identificou-se uma pequena redução praticamente uma igualdade entre os QI_{antes} e QI_{depois} . Entretanto, para a segunda intervenção registrada CBUQ, identificou-se na análise uma redução (queda) de QI significativa, cerca de 35%, sendo coletado o QI_{depois} , a apenas um mês da execução da intervenção. E a leitura anterior (QI_{antes}), coletado cerca de um ano antes da intervenção, dessa forma a leitura de QI_{antes} , possivelmente na período da execução já teria valores maiores que o registrado, tendo assim uma redução de QI, ainda maior que a evidenciada.

De uma forma geral, basicamente todas as intervenções com seus diferentes tipos de revestimento reduziram ou mantiveram a irregularidade longitudinal (QI), logo após a intervenção, diferenciando disso apenas a situação do Tratamento Superficial Duplo, como podemos ver na Figura 32.

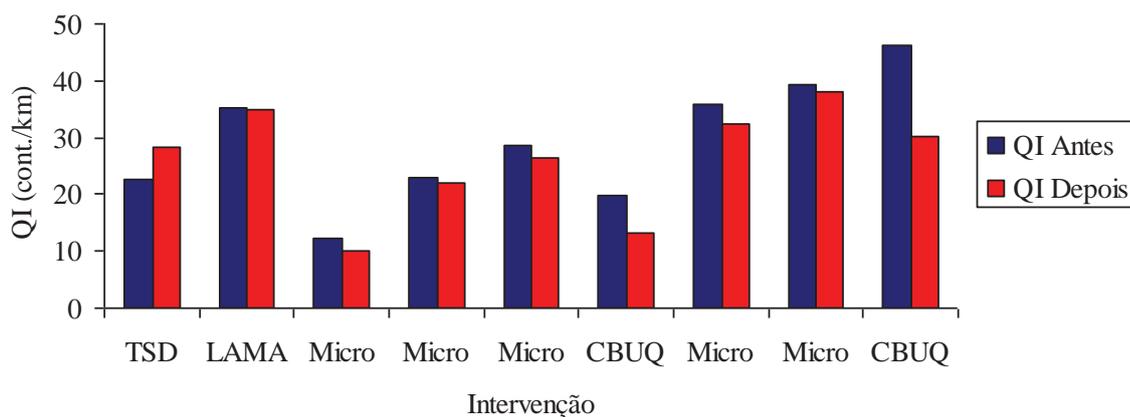


Figura 32 - Evolução do QI, para diferentes medidas de restauração

A restauração com CBUQ apresentou a maior redução após intervenção, da irregularidade longitudinal, na ordem de 35%, nos Trechos 04 e 06. Já no caso da Lama asfáltica não se verificaram alterações em relação à irregularidade, não possuindo, portanto, percentual de redução, conforme Quadro 08.

Quadro 08 - Percentual de redução de QI por tipo de restauração

Trecho	Restauração	QI (contg./km)	Percentual de Redução de QI (%)
1	Lama	35	0
2	Micro	12	20
3	Micro	23	4
	Micro	28	7
4	CBUQ	20	34
5	Micro	35	10
6	Micro	39	3
	CBUQ	46	35

A restauração de micro concreto asfáltico (7mm), com o maior número de amostragem, possui algumas particularidades identificadas entre os trechos. Como demonstra-se a relação da magnitude do QI inicial com o percentual de redução, imediatamente após a restauração na Figura 33.

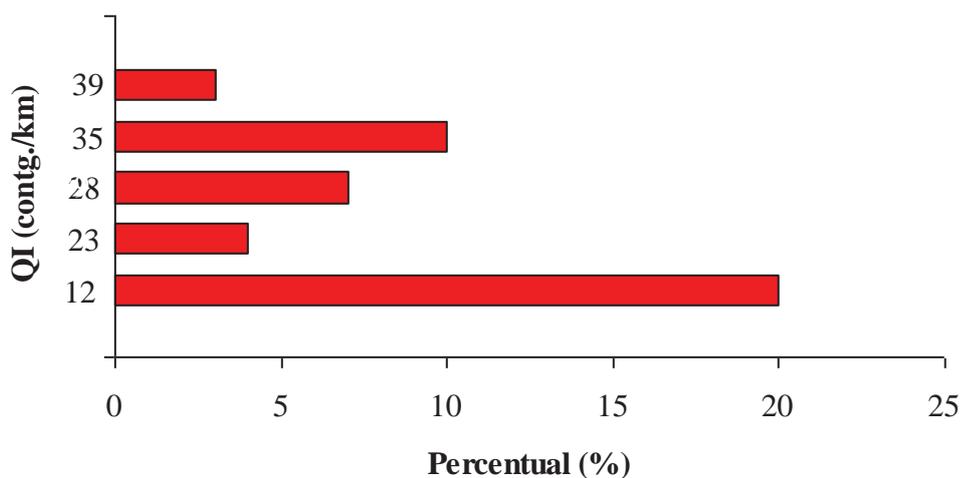


Figura 33 - QI versus percentual de redução

Os valores de QI com menor grandeza, ou seja, $QI=12\text{cont./km}$ o percentual de redução da irregularidade longitudinal teve a maior grandeza cerca de 20%. À medida que os valores de QI aumentam o percentual de redução imediatamente após a intervenção diminui. Partindo do princípio que valores de $QI=25\text{ cont./km}$, são praticamente imperceptíveis e que o uso da intervenção de micro concreto asfáltico possui um maior desempenho na queda da irregularidade longitudinal para valores baixos de QI, se torna não recomendada para a redução de QI imediatamente após a intervenção, tendo apenas função de manutenção dos pavimentos no que se diz a esse parâmetro, pois não foi identificado aumento da irregularidade longitudinal após essa intervenção.

5.2 Evolução da irregularidade ao longo do tempo (campo)

No Trecho 01, foi constatada uma primeira intervenção no início de 2003 (janeiro), um Tratamento Superficial Duplo (TSD) de 2cm de espessura. A campanha de monitoramento desse ano foi realizada em novembro, assim, a leitura da irregularidade longitudinal da intervenção foi obtida dez meses após a execução desta no pavimento. A análise se deteve, para essa intervenção, no intervalo de três anos (2003-2004-2005), período em que o trecho não recebeu maiores intervenções. A Figura 34 demonstra a evolução da irregularidade longitudinal a campo (QI), bem como o aumento significativo, nesse período, cerca de 55,8%, passando de $QI=22,6$ para $QI=35,2$.

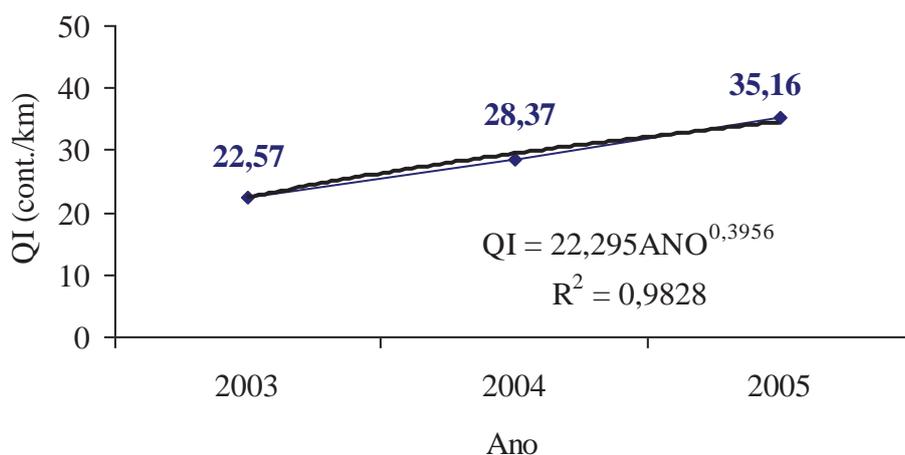


Figura 34 - Evolução do QI com Tratamento Superficial Duplo, Trecho 01

Uma segunda intervenção foi evidenciada nesse mesmo trecho em estudo, a execução de Lama Asfáltica (5mm) no pavimento em outubro de 2005. Foi a última intervenção na pista identificada até o final do período da pesquisa (2007). A Figura 35 demonstra a evolução da irregularidade longitudinal dessa intervenção nesse trecho, além do demonstrativo da pequena queda de QI, cerca de 2% referente ao QI inicial (2005) no intervalo de tempo analisado (2005-2006-2007).

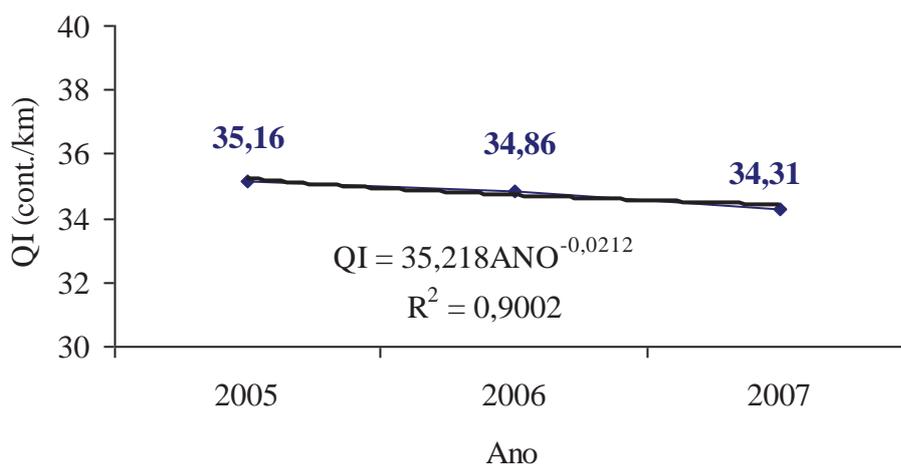


Figura 35 - Evolução da Lama Asfáltica, Trecho 01

Em todo o período da pesquisa (2003 a 2007), foi identificado apenas uma intervenção na pista no Trecho 02, um Micro Revestimento Asfáltico (7mm), executado em agosto de 2004, tendo-se um intervalo de quatro anos para a análise (2004-2005-2006-2007) da evolução

da irregularidade longitudinal no pavimento. A Figura 36 demonstra a pequena queda de QI entre 2004($QI_{2004}=12,4$) e 2005 ($QI_{2005}=10,1$), porém em percentual chegando a 18,5%, com um comportamento quase que constante até 2007.

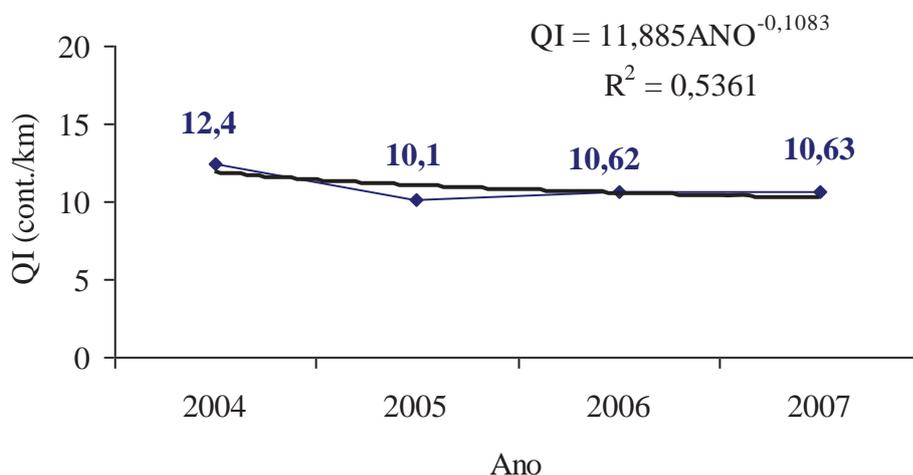


Figura 36 - Evolução do Micro Concreto Asfáltico, Trecho 02

Diferentemente do Trecho 02, com apenas uma intervenção na pista, no Trecho 03, foram evidenciadas ao longo do período da pesquisa três intervenções na pista, todas com o mesmo tipo Micro Concreto Asfáltico (7mm). Intercaladas em intervalos de dois anos (2003-2005-2007). Nestes termos, da análise da evolução da irregularidade longitudinal, partiu-se para a identificação do comportamento geral de todas as intervenções na pista, ou seja, não analisando a evolução da irregularidade de forma individual para cada intervenção na pista. A Figura 37 demonstra a evolução da irregularidade que oscilou em um pequeno intervalo de QI ($QI_{2003}=22,8$ / $QI_{2007}=26,5$), durante o período da pesquisa.

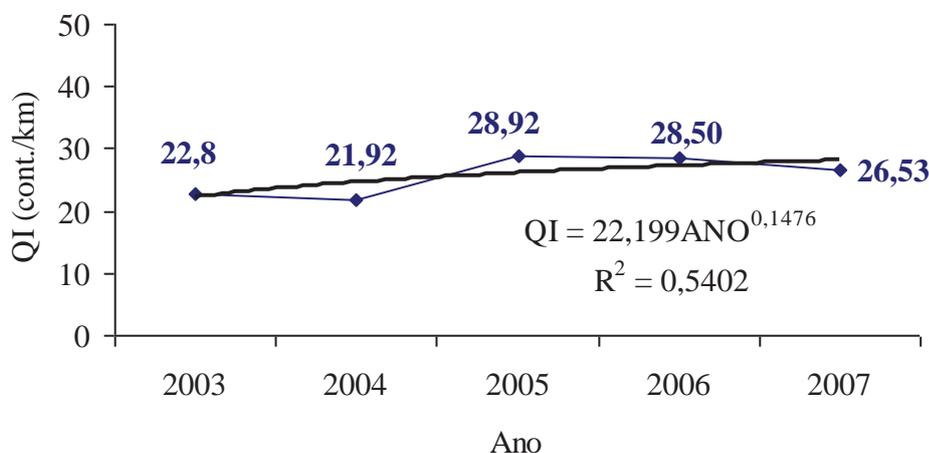


Figura 37 - Evolução das intervenções de micro concreto asfáltico, Trecho 03

A identificação de apenas uma intervenção no Trecho 04, Concreto Usinado a Quente (CBUQ), com 4cm de espessura, e essa no ano de 2006, ficando assim apenas um ano (intervalo da pesquisa 2003 a 2007) para analisar a evolução da irregularidade longitudinal da intervenção nesse trecho, fica desaconselhada. Esse trecho foi analisado quando a queda da irregularidade imediatamente após a intervenção anteriormente e ainda a evolução da irregularidade no período em que o pavimento não possui nenhuma intervenção registrada a seguir.

Se igualando ao Trecho 04 e 02, em número de intervenções, apenas uma ao longo do período da pesquisa Micro Concreto Asfáltico (7mm), o Trecho 05 demonstra uma pequena variação em os valores de QI (Figura 38).

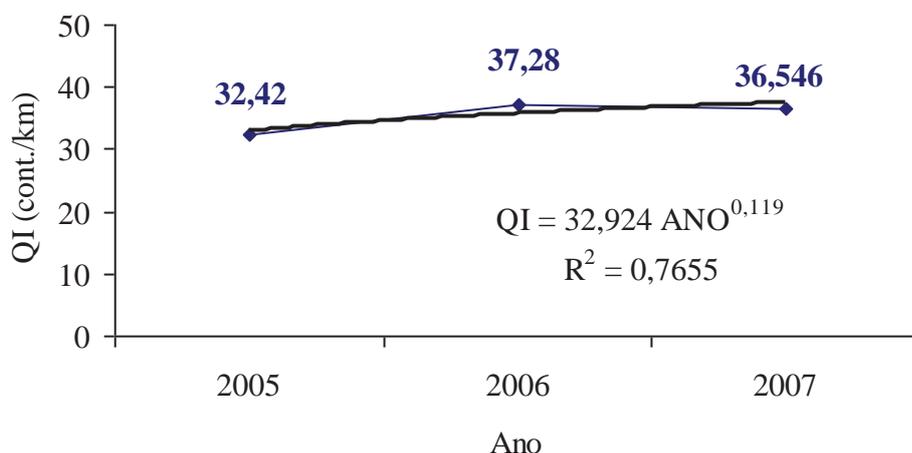


Figura 38 - Evolução do Micro Concreto Asfáltico, Trecho 05

Uma intervenção de Micro Concreto Asfáltico (7mm), em julho de 2004, juntamente com a execução de um CBUQ (4cm) em setembro de 2007, contemplam as intervenções identificadas no Trecho 06. A segunda intervenção CBUQ, por possuir apenas duas leituras nos anos de 2006 e 2007, incorporou a pesquisa apenas no que se diz respeito à queda da irregularidade longitudinal imediatamente após a intervenção. A Figura 39 demonstra a evolução da irregularidade da primeira intervenção (Micro), tendo um acréscimo da leitura inicial do QI ($QI_{2004}=38,2 / QI_{2006}=46,45$) de mais de 21%, no período de dois anos.

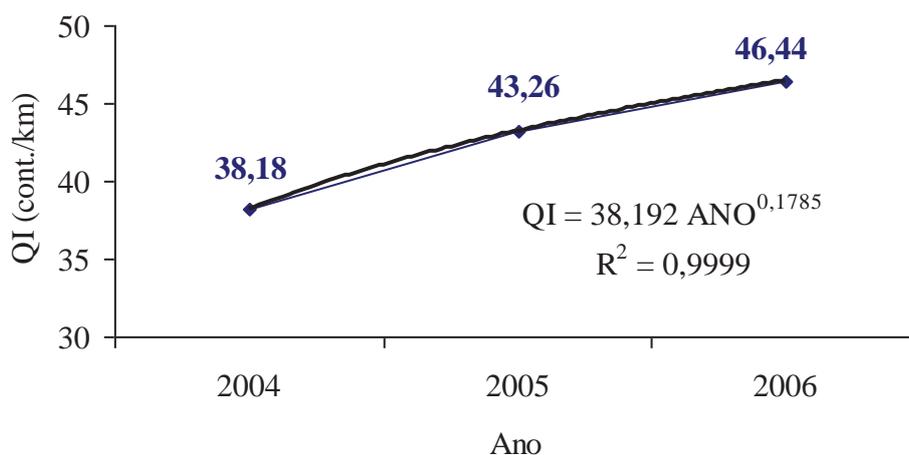


Figura 39 - Evolução de Micro Concreto Asfáltico, Trecho 06

O comportamento da evolução da irregularidade longitudinal pode ser demonstrado no Quadro 08, que compara as equações registradas a campo pelas curvas de tendências com o tipo de intervenção, estrutura e tráfego.

Quadro 08 - Comparativo entre as equações de evolução do QI

Intervenção	Estrutura (SNC)	Tráfego (N)	Equação	R ²
TSD	10,82	6,88 x 10 ⁶	QI = 22,295 ANO ^{0,3956}	0,9828
Lama	10,83	6,89 x 10 ⁶	QI = 35,218 ANO ^{0,0212}	0,9002
Micro	10,95	9,25 x 10 ⁶	QI = 11,885 ANO ^{-0,1083}	0,5361
Micro	8,03	11,49 x 10 ⁶	QI = 22,199 ANO ^{0,1476}	0,5402
Micro	8,81	3,83 x 10 ⁶	QI = 32,924 ANO ^{0,1190}	0,7655
Micro	8,52	3,83 x 10 ⁶	QI = 38,192 ANO ^{0,1785}	0,9990

5.3 Evolução irregularidade sem intervenção

A identificação da irregularidade longitudinal em pavimentos que não possuíram nenhum registro em seu histórico de manutenção, pelo período mínimo de três anos, nos trechos em estudo e durante o intervalo da pesquisa, serviram para a análise da evolução da irregularidade longitudinal. Restringindo-se assim a pesquisa em apenas três Trechos 02, 04 e 06. O primeiro teve um intervalo de três anos (2005-2006-2007) sem intervenções após a

execução de um Micro Concreto asfáltico (0,7mm). O segundo, sem nenhuma intervenção desde o início da pesquisa (2003), até a execução de uma intervenção de CBUQ em 2006, tendo assim um intervalo de três anos (2003-2004-2005) para a análise da evolução da irregularidade ao longo do tempo. E o terceiro, intervalo também de três anos (2004-2005-2006), este entre o intervalo da execução de Micro Concreto asfáltico (0,7mm) e CBUQ na pista, conforme calendários de intervenções, demonstrados no capítulo 5.1. As particularidades dos trechos se intensificam por pertencerem a rodovias distintas (BR 116, Trecho 02 e BR 290 Trecho 04 e BR 386 Trecho 06), diferenciando-se em aspectos como estrutura da pista e tráfego atuante.

No Quadro 09, encontram-se os parâmetros pertinentes à pesquisa, separados por cada trecho de estudo.

Quadro 09 – Parâmetros para análise da evolução da irregularidade

Parâmetros		Ano 1	Ano 2	Ano 3
Trecho 02	QI (cont./km)	10,1	10,6	10,6
	N (10^6)	2,3	2,2	2,4
	Deflexão (0,01)	46,3		46,3
Trecho 04	QI (cont./km)	16,1	16,1	19,8
	N (10^6)	2,2	2,4	2,3
	Deflexão (0,01)	38,3		38,2
Trecho 06	QI (cont./km)	35,6	41,7	44,4
	N (10^6)	1,3	1,2	1,2
	Deflexão (0,01)	23,4		26,4

A evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos sem nenhuma intervenção registrada, em um período mínimo de três anos, está demonstrada na Figura 40, que particulariza a evolução da irregularidade em cada trecho em estudo.

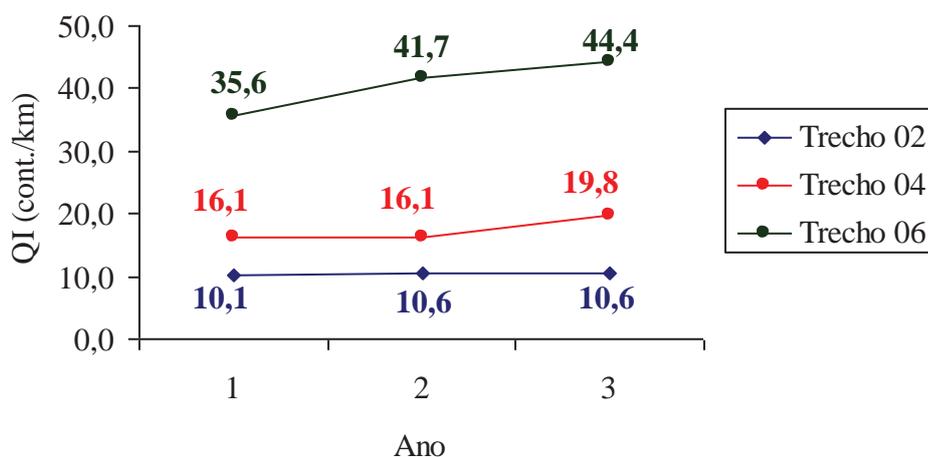


Figura 40 – Evolução Irregularidade a campo em pavimentos sem intervenções

O comportamento dos pavimentos, para a evolução da irregularidade longitudinal, se diferencia entre os três trechos em estudo. A evolução dos parâmetros como tráfego atuante (N) e a estrutura (deflexão), mantiveram-se de certa forma constantes. As equações que demonstram a evolução da irregularidade longitudinal a campo estão demonstradas no Quadro 10.

Quadro 10 - Evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos sem intervenções

Trecho	Equação	R ²
02	$QI=10,144 \text{ ANO}^{0,0493}$	0,8776
04	$QI=14,03 e^{0,1037 \text{ ANO}}$	0,7567
06	$QI=35,807 \text{ ANO}^{0,2022}$	0,9904

A análise do comportamento dos três trechos em estudo, nessa questão, com seus aspectos diferenciados, aplicados no modelo de previsão de irregularidade ao longo do tempo desenvolvido por Paterson (1987), Anexo VI, juntamente com o comparativo da evolução da irregularidade longitudinal em escala real (dados a campo), estão apresentados nas Figuras 41, 42 e 43.

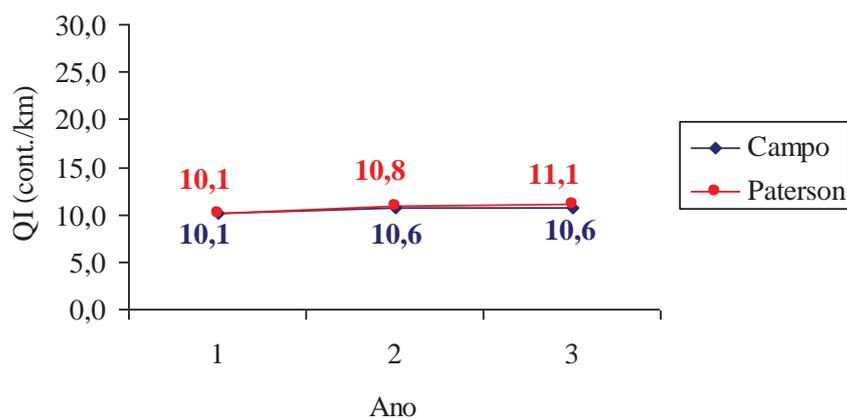


Figura 41 – Evolução irregularidade, escala real e Paterson, 1987 – Trecho 02

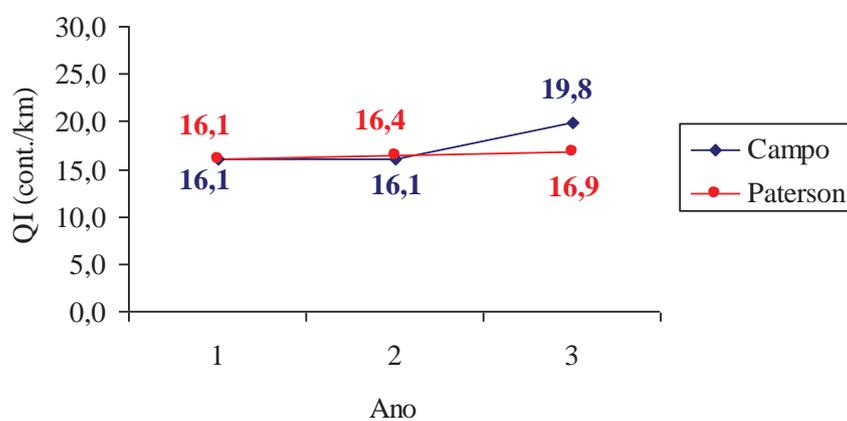


Figura 42 – Evolução irregularidade, escala real e Paterson, 1987 – Trecho 04

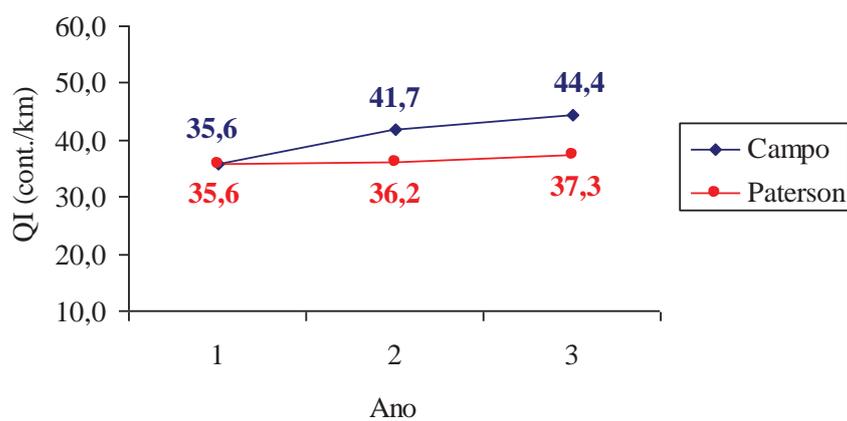


Figura 43 – Evolução irregularidade, escala real e Paterson, 1987 – Trecho 06

5.4 Comparativo entre os modelos de previsão de irregularidade longitudinal com os dados coletados no campo

A evolução da irregularidade ao longo do tempo, prevista pelos modelos (PATERSON, 1987; QUEIROZ 1884), e a queda da irregularidade (QI) logo após a intervenção (DNER PRO 159/1985) com a evolução em escala real (campo) da irregularidade longitudinal identificada por campanhas de monitoramento durante o período da pesquisa, finalizam as análises desse estudo.

5.4.1 Evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo

Os modelos iniciaram o desenvolvimento para a previsão do comportamento a irregularidade ao longo do tempo com a primeira leitura a campo, QI_{2003} . Considerando todas as intervenções registradas no pavimento independentemente do tipo de revestimento executado, apenas “Queiros B” possui em sua formulação a componente referente diferenciar do tipo de revestimento executado, $TR=1$ para tratamento superficial e $TR=0$, para concretos asfálticos, interpretamos assim $TR=1$, revestimentos delgados (além de tratamento superficial, as intervenções de Micro e Lama) e $TR=0$, para revestimentos espessos ($CBUQ=4cm$). Para Paterson (1987), a definição na aplicação do modelo teve a particularidade e prever anualmente a evolução da irregularidade, tendo assim para valores de IRI_0 , leitura a campo no determinado período e não a prevista para aquele pelo modelo.

O comparativo entre os valores de QI previstos pelos modelos e dos coletados a campo estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Irregularidade (QI), ao longo do tempo previsto e no campo

Evolução Irregularidade		Ano				
		2003	2004	2005	2006	2007
		QI (cont./km)				
Trecho 01	Campo	22,6	28,4	35,2	34,9	34,3
	Paterson	22,6	22,9	23,2	23,6	24,0
	Queiroz "A"	22,6	22,3	22,3	22,3	22,3
	Queiroz "B"	22,6	36,4	38,6	40,2	41,4
	Queiroz "C"	22,6	39,1	42,0	44,6	46,1
Trecho 02	Campo	18,4	12,4	10,1	10,6	10,6
	Paterson	18,4	18,7	19,0	19,3	19,6
	Queiroz "A"	18,4	22,4	22,4	22,4	22,5
	Queiroz "B"	18,4	28,2	29,0	34,2	35,2
	Queiroz "C"	18,4	28,3	29,7	36,3	37,5
Trecho 03	Campo	22,8	21,9	28,9	28,5	26,5
	Paterson	22,8	23,2	23,5	23,9	24,3
	Queiroz "A"	22,8	22,4	22,5	22,4	22,5
	Queiroz "B"	22,8	26,6	27,8	30,2	31,1
	Queiroz "C"	22,8	26,3	27,9	31,4	32,5
Trecho 04	Campo	16,1	16,1	19,8	13,1	11,6
	Paterson	16,1	16,4	16,6	16,9	17,2
	Queiroz "A"	16,1	22,4	22,5	22,5	22,5
	Queiroz "B"	16,1	28,0	29,4	30,3	29,6
	Queiroz "C"	16,1	24,7	26,6	27,7	27,5
Trecho 05	Campo	31,2	30,9	32,4	35,3	36,8
	Paterson	31,2	31,7	32,2	32,7	33,2
	Queiroz "A"	31,2	22,5	22,6	22,5	22,6
	Queiroz "B"	31,2	24,5	25,5	27,3	28,1
	Queiroz "C"	31,2	23,8	25,2	27,7	28,6
Trecho 06	Campo	36,4	35,6	41,7	44,4	35,6
	Paterson	36,4	37,0	37,6	38,2	38,8
	Queiroz "A"	36,4	22,6	22,7	22,7	22,8
	Queiroz "B"	36,4	23,7	24,6	23,5	24,1
	Queiroz "C"	36,4	22,9	24,2	23,4	24,1

Analisando-se o modelo separadamente desenvolvido por Queiroz (1984), dentre suas variações das componentes de suas equações de estimativa da irregularidade longitudinal, evidenciam-se, assim, os parâmetros que mais representam a evolução ao longo do tempo. As equações denominadas “Queiroz B” e “Queiroz C”, a primeira contemplando a estrutura do pavimento, na equação pela variável da deflexão do pavimento e a segunda englobando em sua formulação duas variáveis referentes à estrutura dos pavimentos. Além das deflexões

inclui em sua formulação o número estrutural corrigido (SNC), tendo uma certa similaridade com o comportamento do pavimento a campo no Trecho 01, em estudo (Figura 44). Ficando a evolução da irregularidade nos outros trechos mais distantes da evidenciada a campo.

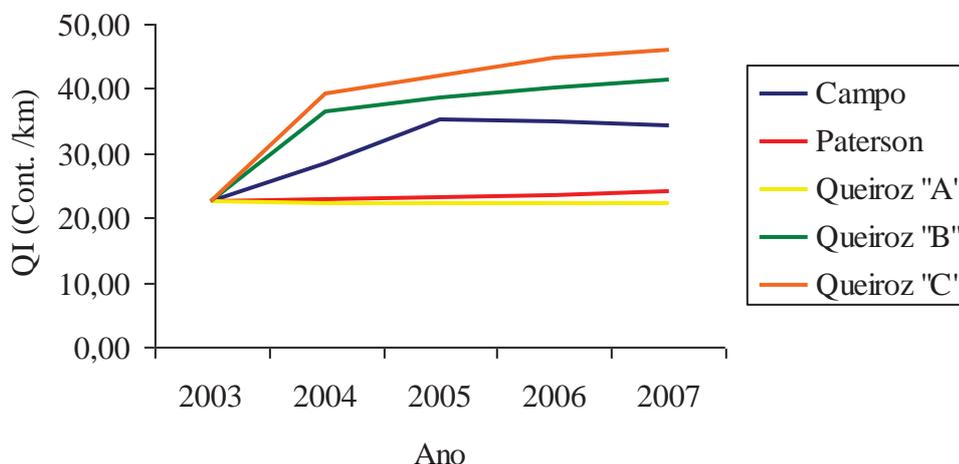


Figura 44 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 01

Nos demais trechos em estudos, Paterson (1987) teve um melhor relação com a previsão da irregularidade longitudinal estimada da identificada a campo. Mesmo tendo ao longo do tempo variações significativas, a previsão final (QI_{2007}) estimada apresenta, com exceção do Trecho 01, a menor diferença entre o campo, como demonstram as Figuras 45 a 49.

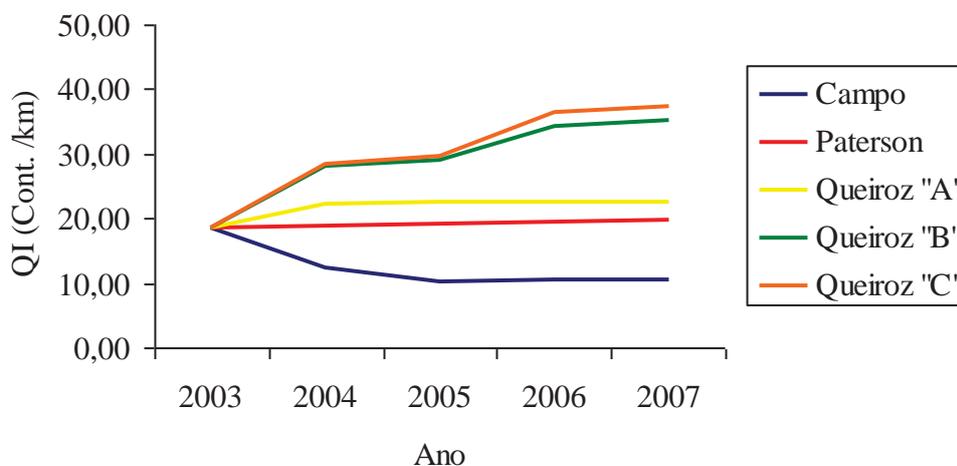


Figura 45 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 02

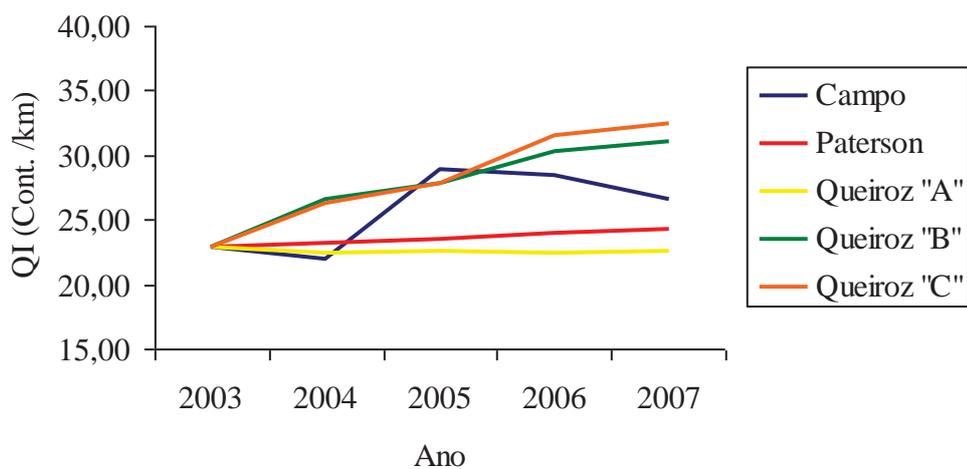


Figura 46 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 03

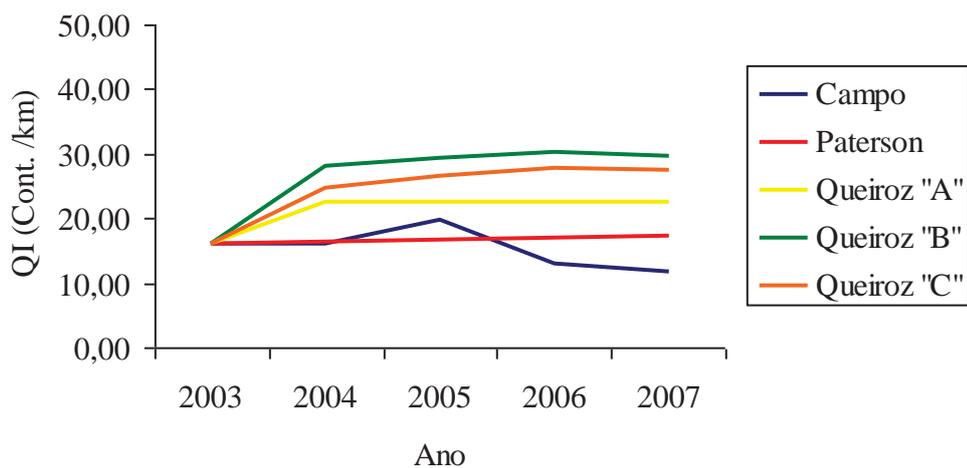


Figura 47– Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 04

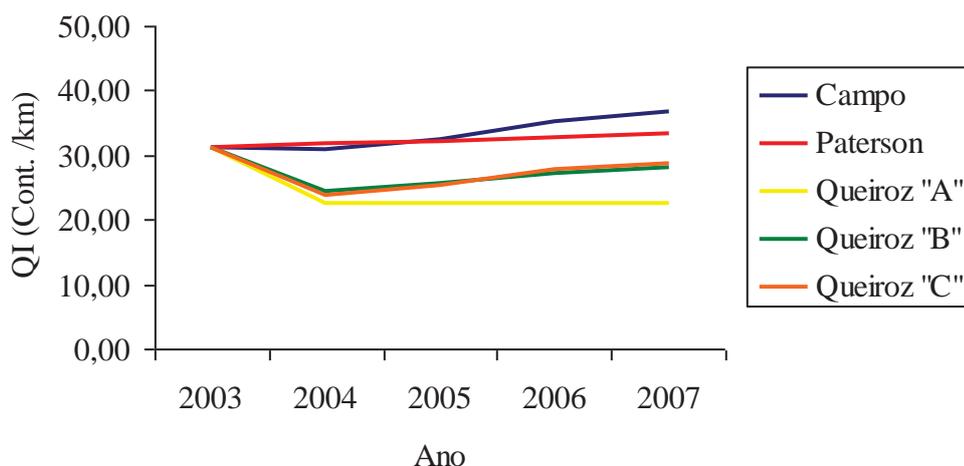


Figura 48 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 05

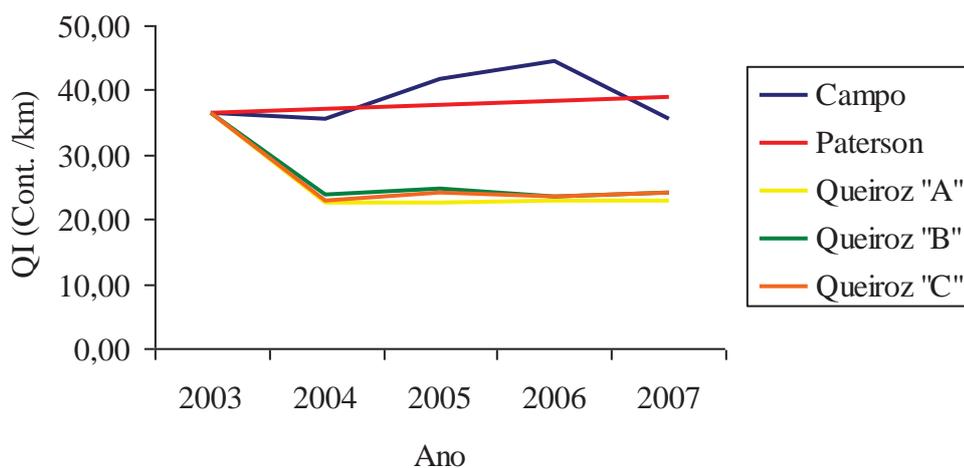


Figura 49 – Evolução da irregularidade longitudinal prevista e real – Trecho 05

5.4.2 Comparativo queda da irregularidade longitudinal após intervenção

A coleta dos dados a campo, para a aplicação do modelo DNER PRO 159/1985 e comparativo entre a queda da irregularidade longitudinal estimada pelo modelo após intervenções, e as leituras registradas a campo, possui uma determinada variação de tempo, pois a coleta dos dados de QI não ocorreu imediatamente após a execução da intervenção na pista e, sim, nos períodos em que as campanhas de monitoramento foram realizadas. Assim,

para leituras de QI_{Antes} e QI_{Depois} , podem existir variações em suas grandezas. A análise da relação campo / modelos deu-se separadamente para cada tipo de revestimento na intervenção. A Tabela 38 identifica os tipos de revestimentos com suas respectivas espessuras, bem como o comparativo entre os QI_{Antes} , $QI_{Calculado}$ e QI_{Campo} .

Tabela 37 - Comparativo entre QI_{campo} e $QI_{calculado}$, nos trechos da pesquisa

Trecho	Intervenção	HR (cm)	QI_{Antes} (Cont./km)	$QI_{Calculado}$ (Cont./km)	QI_{Campo} (Cont./km)
01	TSD	2,0	22,6	20,6	28,4
	LAMA	0,7	35,2	30,4	34,9
02	Micro	0,7	12,4	14,4	10,1
03	Micro	0,7	22,8	21,7	21,9
	Micro	0,7	28,5	25,7	26,5
04	CBUQ	4,0	19,8	19,2	13,1
05	Micro	0,7	35,9	30,9	32,4
06	Micro	0,7	39,3	33,3	38,2
	CBUQ	4,0	46,3	27,0	30,1

No que se refere a pavimentos delgados, o modelo DNER 159/85, originado para pavimentos espessos, aplicou-se muito bem para a estimativa de queda da irregularidade longitudinal, Figura 50, em que os valores das leituras de QI_{Antes} se mantiveram em intervalos entre $QI = 20$ cont./km e $QI = 30$ cont./km, em intervenções com Micro Concreto Asfáltico (7mm), ocorrendo em duas situações no Trecho 03. A primeira, executada em março de 2005, está em perfeita sintonia entre a estimativa de queda da irregularidade prevista pelo modelo com leitura registrada a campo, diferenciando apenas os valores de QI , na segunda casa numérica ($QI_{Antes} = 22,8$ cont./km, $QI = 21,7$ cont./km Calculado e $QI_{Campo} = 21,9$ cont./km).

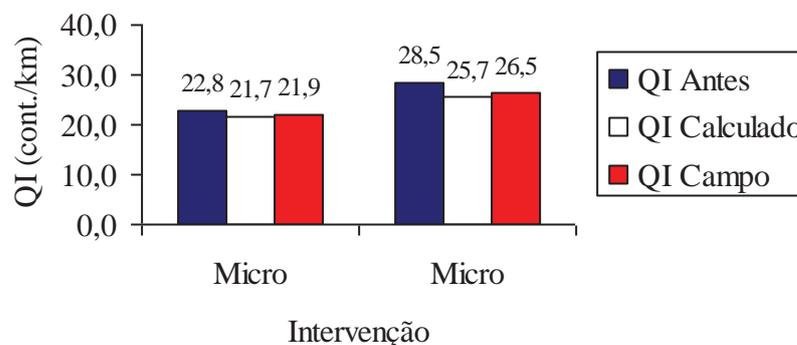


Figura 50 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio - Trecho 03

A segunda intervenção, executada em maio de 2007, apresenta também um bom desempenho quanto à previsão do modelo para a queda da irregularidade com a leitura registrada no campo, tendo uma pequena variação de QI, cerca de 3% maior que a leitura a campo (QI Antes = 28,5 cont./km, QI = 25,7 cont./km Calculado e QI Campo = 26,5 cont./km). Para valores na ordem de QI= 35 cont./km, no Trecho 05, manteve-se uma variação para a leitura a campo entre o QI_{Campo} do QI_{Calculado}, maior que cerca de 5%, ilustrado na Figura 51.

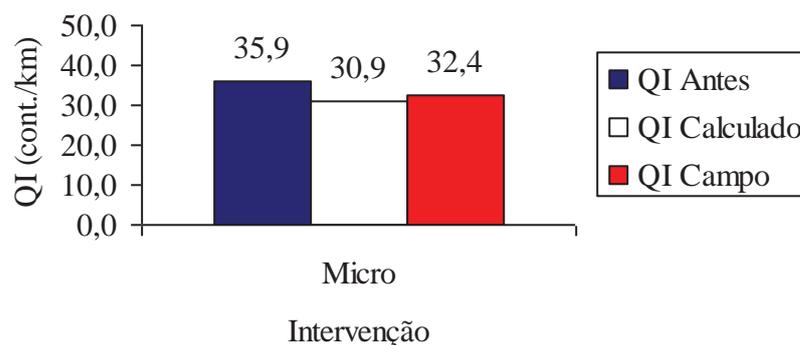


Figura 51 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio - Trecho 05

Ainda nessas grandezas de QI= 35 cont./km, a Lama, intervenção registrada no Trecho 01, Figura 52, teve uma maior variação das demais entre QI_{Campo} do QI_{Calculado}, cerca de 14,8%, maior que a leitura a campo.

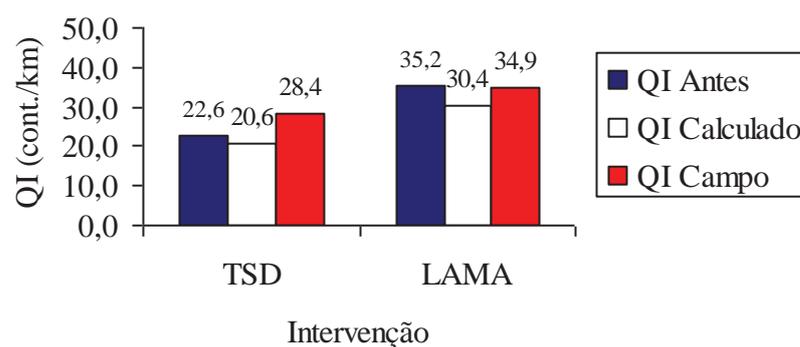


Figura 52 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio - Trecho 01

Pode-se identificar a inconsistência do modelo para leituras inferiores ou muito próximas a QI = 19 cont/ km, que, por serem inferiores, não representam a queda e, sim, a evolução da irregularidade após a execução de intervenção. E valores de QI próximos não

possuem a mesma consistência (Figura 53 e 54), para demais valores com maior grandeza de QI em intervenções com revestimento espesso (Figura 54).

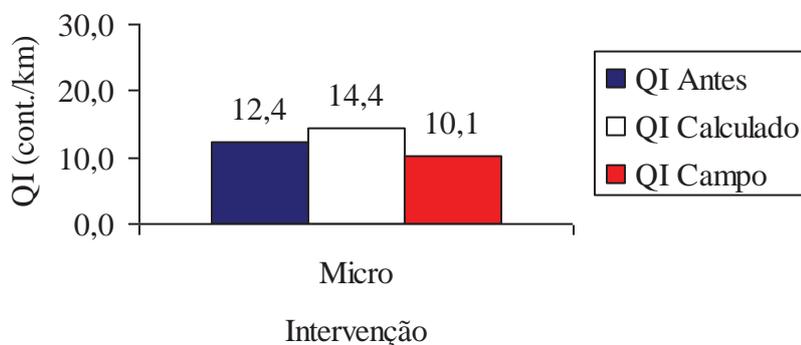


Figura 53 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio - Trecho 02

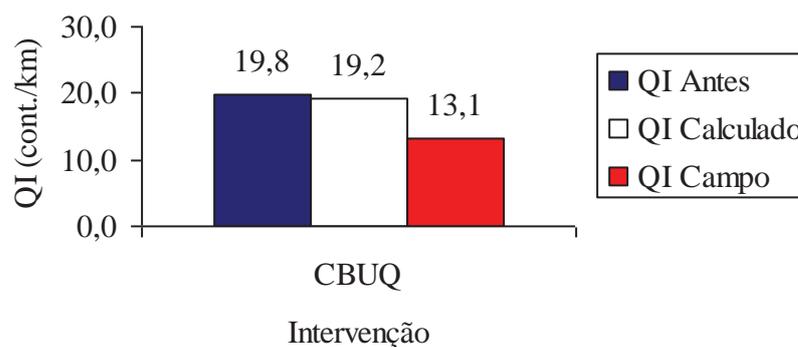


Figura 54 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio - Trecho 04

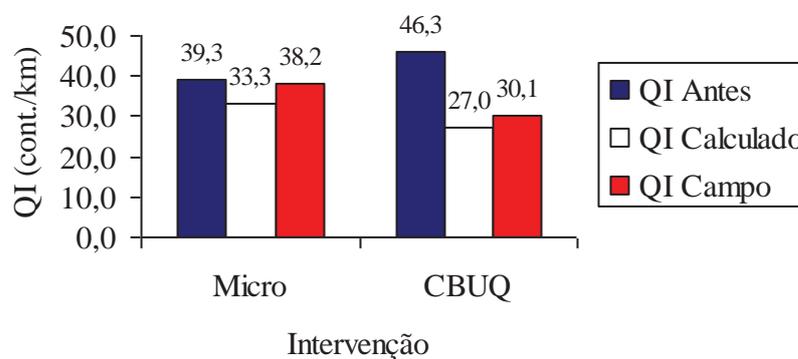


Figura 55 – QI antes da restauração, QI calculado e calculado e QI médio - Trecho 06

Analisando-se o comportamento do Modelo DNER 159/85, nos dados aplicados na pesquisa, observa-se que este teve sua relação entre a previsão da queda da irregularidade

longitudinal com as leituras registradas a campo de certa forma regular, tendo algumas particularidades para cada trecho em estudo e tipo de revestimento de cada intervenção.

5.4.3 Eficiência entre modelos de previsão ao longo do tempo e evolução registrada a campo

Para a análise da eficiência dos modelos em estudo, a respeito da evolução da irregularidade longitudinal em pavimentos flexíveis restaurados, partiu-se do princípio que o QI a campo dividido pelo QI calculado pelos modelos gerasse um valor idêntico, 1 (um), assim a média de cada ano para cada trecho em estudo formaram as Tabelas 39 a 42.

Tabela 39 - Relação entre QI campo dividido por QI calculado - Paterson

Rodovia	BR 116		BR 290		BR 386	
Ano	Trecho 01	Trecho 02	Trecho 03	Trecho 04	Trecho 05	Trecho 06
2004	-0,23910	0,33751	0,05387	0,01417	0,02571	0,03618
2005	-0,51379	0,46898	-0,22828	-0,19131	-0,00691	-0,11061
2006	-0,47767	0,45039	-0,19153	0,22719	-0,07818	-0,16237
2007	-0,43189	0,45849	-0,09174	0,32574	-0,10877	0,08076
Média	-0,41561	0,42884	-0,11442	0,09395	-0,04204	-0,03901
Percentual	-42%	43%	-11%	9%	-4%	-4%
Média Geral	-0,01471					
Percentual	-1%					

Tabela 40 - Relação entre QI campo dividido por QI calculado – Queiroz “A”

Rodovia	BR 116		BR 290		BR 386	
Ano	Trecho 01	Trecho 02	Trecho 03	Trecho 04	Trecho 05	Trecho 06
2004	-0,27449	0,44581	0,02228	0,27924	-0,37200	-0,57976
2005	-0,57705	0,54954	-0,28452	0,11827	-0,43395	-0,84051
2006	-0,56285	0,52621	-0,27046	0,42050	-0,56625	-0,95072
2007	-0,53723	0,52697	-0,17950	0,48474	-0,63144	-0,56234
Média	-0,48790	0,51213	-0,17805	0,32569	-0,50091	-0,73333
Percentual	-49%	51%	-18%	33%	-50%	-73%
Média Geral	-0,17706					
Percentual	-18%					

Tabela 41 - Relação entre QI campo dividido por QI calculado – Queiroz “B”

Rodovia	BR 116		BR 290		BR 386	
Ano	Trecho 01	Trecho 02	Trecho 03	Trecho 04	Trecho 05	Trecho 06
2004	0,22062	0,56055	0,17586	0,42490	-0,25883	-0,50298
2005	0,08846	0,65231	-0,04088	0,32567	-0,27105	-0,69549
2006	0,13176	0,68926	0,05743	0,56920	-0,29143	-0,89119
2007	0,17099	0,69785	0,14747	0,60903	-0,31158	-0,47907
Média	0,15296	0,65000	0,08497	0,48220	-0,28322	-0,64218
Percentual	15%	65%	8%	48%	-28%	-64%
Média Geral	0,07412					
Percentual	7%					

Tabela 42 - Relação entre QI campo dividido por QI calculado – Queiroz “C”

Rodovia	BR 116		BR 290		BR 386	
Ano	Trecho 01	Trecho 02	Trecho 03	Trecho 04	Trecho 05	Trecho 06
2004	0,27357	0,56145	0,16510	0,34828	-0,29626	-0,55349
2005	0,16306	0,66010	-0,03754	0,25413	-0,28809	-0,72498
2006	0,21893	0,70760	0,09374	0,52862	-0,27071	-0,89433
2007	0,25622	0,71652	0,18270	0,57881	-0,28681	-0,47786
Média	0,22795	0,66142	0,10100	0,42746	-0,28547	-0,66267
Percentual	23%	66%	10%	43%	-29%	-66%
Média Geral	0,07828					
Percentual	8%					

Na análise entre os trechos em estudo ao longo do tempo, Paterson (1987) teve uma aproximação nos 4 trechos: 02, 04, 05 e 06. E o modelo proposto por Queiroz (1984), na sua variação nessa pesquisa Queiroz “C”, nos Trechos 01 e 03.

Na média geral entre todos os trechos e modelos estudados, Paterson (1987) teve a maior aproximação da evolução da irregularidade prevista com a identificada a campo.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no estudo realizado nessa pesquisa, em que foram investigados os desempenhos em termos da irregularidade longitudinal de pavimentos flexíveis restaurados, pode-se estabelecer as seguintes conclusões principais:

- Dentre os diferentes tipos de revestimento asfálticos utilizados nos segmentos teste, verificou-se a seguinte redução média de QI após as restaurações:
 - ✓ Revestimento em concreto asfáltico (duas análises em trechos distintos) percentual de redução de 35%;
 - ✓ Lama asfáltica (uma análise): apenas manteve o QI;
 - ✓ Microrrevestimento (seis análises em trechos distintos), percentual de redução média de 8,8%.

Nestes termos, a melhor restauração evidenciada no campo para a queda da irregularidade imediatamente após a intervenção em pavimentos com revestimento asfáltico é o CBUQ. É válido salientar que o processo executivo é fundamental para que as intervenções tenham o maior desempenho possível quanto à irregularidade longitudinal.

- , A comparação entre os valores de QI observados no campo e a expectativa de QI depois calculado pelo modelo DNER 159/85, na situação o QI antes ou inicial, se aproximava muito de 19, assim, o modelo não teve um bom comportamento, pois evidencia uma redução insignificante e, no campo, as leituras demonstraram uma redução significativa. Nos demais casos, mostrou-se a seguinte equivalência:
 - ✓ Revestimento em concreto asfáltico cerca de 10% de redução entre o QI calculado e QI medido no campo;
 - ✓ Lama asfáltica, aproximadamente 15% o valor calculado menor que o observado a campo;
 - ✓ Microrrevestimento, cerca de 5% de redução entre o QI calculado e QI medido a campo;
 - ✓ Tratamento superficial duplo, esse com a maior diferença entre o modelo e o campo, cerca de 38% menor que o valor calculado.

O modelo analisado DNER 159/85 mostrou-se aconselhável para utilização na previsão da queda da irregularidade longitudinal, tanto para revestimentos espessos, destinando-se para restaurações com microrrevestimento asfáltico.

- Ao longo do tempo, foram derivadas as seguintes equações de ajuste para a evolução do QI, nos trechos em estudo:
 - ✓ Tratamento superficial duplo: $QI = 22,295 \text{ ANO}^{0,3956} - R^2 = 0,9828$;
 - ✓ Micro Concreto Asfáltico: $QI = 38,192 \text{ ANO}^{0,1785} - R^2 = 0,9990$;
 - ✓ Lama: $QI = 35,218 \text{ ANO}^{0,0212} - R^2 = 0,9002$.
- O modelo desenvolvido por Paterson (1987), nesse estudo, apresentou uma melhor aproximação com os dados a campo nos tipos de restaurações analisadas.

Como recomendações e sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se analisar um trecho experimental no campo, com o monitoramento de irregularidade imediatamente após as intervenções, a fim de poder identificar fatores de ajustes entre os modelos e o campo.

Ajustar matematicamente as curvas de desempenho determinadas pelos modelos com as equações derivadas no campo.

Aplicar novos modelos de previsão de irregularidade longitudinal para o comparativo entre os demais modelos entre si e entre os dados de campo.

Sugere-se também a continuidade da coleta e análise das medidas de irregularidade nos trechos já estudados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. **The AASHTO guide for design of pavement structures**. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1986.

_____. **Guidelines for pavement management system**. Washington – DC/USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1990.

BALBO, J. T. **Pavimentos asfálticos: patologia e manutenção**. São Paulo: Plêiade, 1997.

BARELLA, Rodrigo; MASSARA, O. S.; BALBO, J. T. **A avaliação de irregularidade com perfilômetros inerciais de sensores laser: resultado comparativo e vantagens técnicas**. 35 Reunião de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2004.

BOTTURA, E. J. **Contribuição para o estudo da calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade rodoviária tipo resposta**. 1998. 317p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

DNER. **Manual de pavimentação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, 1996.

ESSE, Viviane. **Análise crítica de modelos mecanístico-empíricos para previsão de desempenho de pavimentos com base nos experimentos LTPP-FHWA-DATA PAVE 2.0**. São Bernardo do Campo: Instituto de Tecnologia da Aeronáutica, 2003.

FERNANDES JR, J. L.; ODA, S.; ZERBINI, L. F. **Defeitos e atividades de manutenção e reabilitação em pavimentos asfálticos**. São Carlos: Escola Engenharia São Carlos, 2001.

GEIPOT. **Pesquisa sobre o interrelacionamento dos custos de construção, conservação e utilização de rodovias**. Relatório Final. Ministério dos Transportes. Empresa de Planejamento de Transportes, 1991.

GONÇALVES, F. P. **O desempenho dos pavimentos flexíveis: uma revisão de literatura**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

_____. **O diagnóstico e a manutenção dos pavimentos**. Passo Fundo: Universidade Passo Fundo, 1999.

GONÇALVES, F. J. P.; CERATTI, J. A. P. E.; SOMACAL, L. **Resultados de ensaios acelerados em pistas experimentais de pavimentos no campus da UFRGS**. In: Seminário de Engenharia Geotécnica, Santa Maria, 2001.

GONÇALVES, F. J. P. et al. **Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico: construção e instrumentação de seções-teste**. 32 Reunião Anual de Pavimentação. Brasília, 2000.

HASS, R.; HUDSON, W. R.; ZANNIEWSKI, J. **Modern pavement management**. Florida: Krieger Publishing Co. Malabar, 1994.

- HUANG, Y. H. **Pavement analysis and desing**. New Jersey: University of Hentucky, 1993.
- JUNIOR, J. L. et al. **Priorização em sistemas de gerência de pavimentos**. In: 7º Reunião Anual de Pavimentação Urbana, São José dos Campos, 1996.
- LERCH, L. R. et al. **Redução da irregularidade apos recape em concreto asfáltico: efeito da reperfilagem prévia**. Anais do 16º Encontro do Asfalto, Rio de Janeiro, 2002, CD-Room.
- MARCON, A. F. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 1996. Tese (Doutorado) - Instituto de Tecnologia da Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.
- _____. Gerência rodoviária de pavimentos: da construção à restauração. **Revista Estradas**, Porto Alegre, Sociedade dos Técnicos Universitários do DAER / Sociedade dos Engenheiros Civis do DAER, edição especial, v. 5, p. 81-85, novembro 2003. 8º ENACOR - Gramado RS.
- PATERSON, W. D. O. **International roughness index: relationship to other measures of roughness and riding quality**. Transportation Research Record, 1986.
- _____. **Road deterioration and maintenance effects – models for planning and management**. Baltimore: The World Bank, The Johns Hopkins University Press, 1987.
- QUEIROZ, C. A. V. **Performance prediction moldels for pavement management in Brazil**. Dissertation foe Degree of Doctor of Philosophs. Texas: The University of Texas at Austi, 1981.
- _____. **Modelos de previsão de desempenho para a gerência de pavimentos no Brasil**. Brasília: GEIPOT, 1984.
- RAUBER, J. J. et al. **Apresentação de trabalhos científicos: normas e orientações práticas**. 3. ed. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2003.
- RODRIGUES, R. M. **Modelos de previsão de desempenho**. Parte III. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1997.
- SEVERO, L. E. P. et al. **Sistema de gerência do consórcio Univias**. 8º ENACOR, Gramado RS, 2003.
- SEVERO, L. E. P. et al. **Utilização de perfilômetro laser para medida de irregularidade longitudinal e do afundamento de trilha de roda**. 9º ENACOR. Encontro Nacional de Conservação Rodoviária – Natal RN, 2004.
- SAYERS, W.; KARAMIHAS, S. M. **The little book od profiling**. September, 1998.
- SHAHIN, M. Y. **Pavement management for aiports, roads, and parkin lots**. Massachusetts/USA: Kluwer Academic Publischers, Norwell, 1994.
- PROZZI, J. A. **Modeling pavement performance by combining field and experimental**. 2001. 126p. Tese (Doutorado), Graduate Division of the University of California, Berkeley, 2001.

YSCHIBA, J. K. **Modelos de desempenho de pavimentos:** estudo de rodovias do estado do Paraná. 2003. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2003.

ANEXO I

Trecho 01: BR 116, km 332 – 336



Figura 56 – Trecho 01, BR 116, Km 332



Figura 57 – Trecho 01, BR 116, Km 333



Figura 58 – Trecho 01, BR 116, Km 334



Figura 59 – Trecho 01, BR 116, Km 335



Figura 60 – Trecho 01, BR 116, Km 336

Trecho 02: BR 116, km 382 – 386



Figura 61 – Trecho 02, BR 116, Km 382



Figura 62 – Trecho 02, BR 116, Km 383



Figura 63 – Trecho 02, BR 116, Km 384



Figura 64 – Trecho 02, BR 116, Km 385



Figura 65 – Trecho 02, BR 116, Km 386

Trecho 03: BR 290, km 123 – 127



Figura 66 – Trecho 03, BR 290, Km 123



Figura 67 – Trecho 03, BR 290, Km 124



Figura 68 – Trecho 03, BR 290, Km 125



Figura 69 – Trecho 03, BR 290, Km 126



Figura 70 – Trecho 03, BR 290, Km 127

Trecho 04: BR 290, km 176 – 180



Figura 71 – Trecho 04, BR 290, Km 176



Figura 72 – Trecho 04, BR 290, Km 177



Figura 73 – Trecho 04, BR 290, Km 178



Figura 74 – Trecho 04, BR 290, Km 179



Figura 75 – Trecho 04, BR 290, Km 180

Trecho 05: BR 386, km 259 – 263



Figura 76 – Trecho 05, BR 386, Km 259



Figura 77 – Trecho 05, BR 386, Km 260



Figura 78 – Trecho 05, BR 386, Km 261



Figura 79 – Trecho 05, BR 386, Km 262



Figura 80 – Trecho 05, BR 386, Km 263

Trecho 06: BR 386, km 317 – 321



Figura 81 – Trecho 06, BR 386, Km 317



Figura 82 – Trecho 06, BR 386, Km 318



Figura 83 – Trecho 06, BR 386, Km 319



Figura 84 – Trecho 06, BR 386, Km 320



Figura 85 – Trecho 06, BR 386, Km 321

ANEXO II

Evolução da irregularidade longitudinal, analisadas em cada faixa de tráfego, bem como a composição das médias incorporadas à pesquisa.

Tabela 43 - Trecho 02

km	km	QI - 2003		QI - 2004		QI - 2005		QI - 2006		QI - 2007	
Inicial	Final	Faixa 01	Faixa 02								
382	383	23,5	10,5	8,5	8,7	8,4	9,4	9,8	11,6	9,0	9,9
383	384	26,2	13,1	10,2	10,6	8,6	8,2	8,4	7,4	7,9	7,9
384	385	21,3	13,3	10,7	12,1	9,4	11,0	10,4	9,8	9,4	11,8
385	386	18,5	13,0	12,8	13,6	9,2	11,0	10,8	12,6	10,8	12,3
386	387	21,4	23,4	16,2	20,6	12,8	13,0	13,6	11,8	14,1	13,2
Média Faixa		22,2	14,7	11,7	13,1	9,7	10,5	10,6	10,6	10,2	11,0
Média Trecho		18,4		12,4		10,1		10,6		10,6	

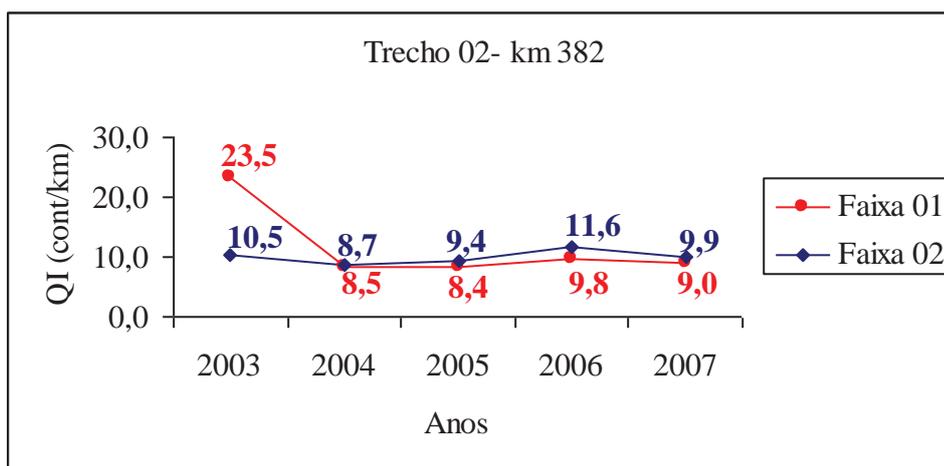


Figura 86 - Trecho 02, Km 382

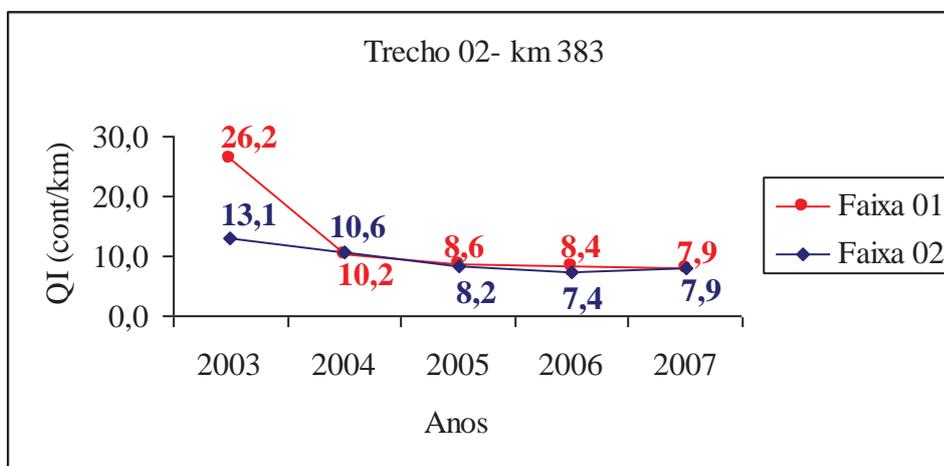


Figura 87 - Trecho 02, Km 383

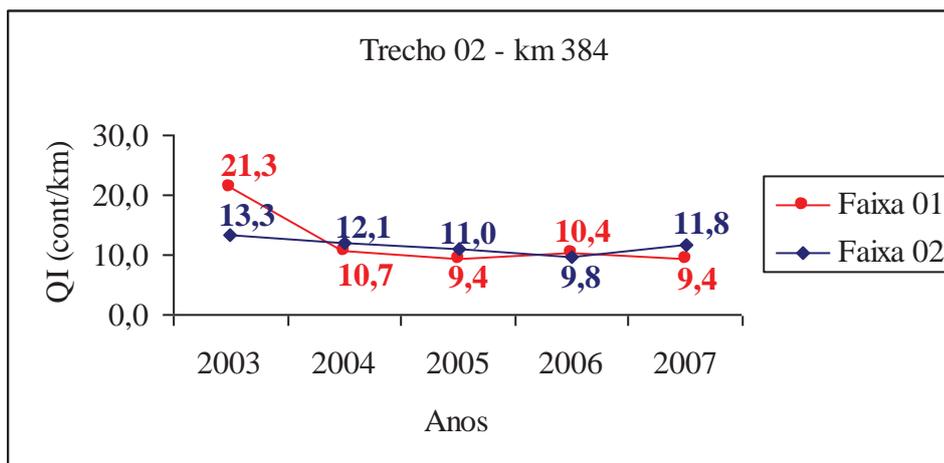


Figura 88 - Trecho 02, Km 384

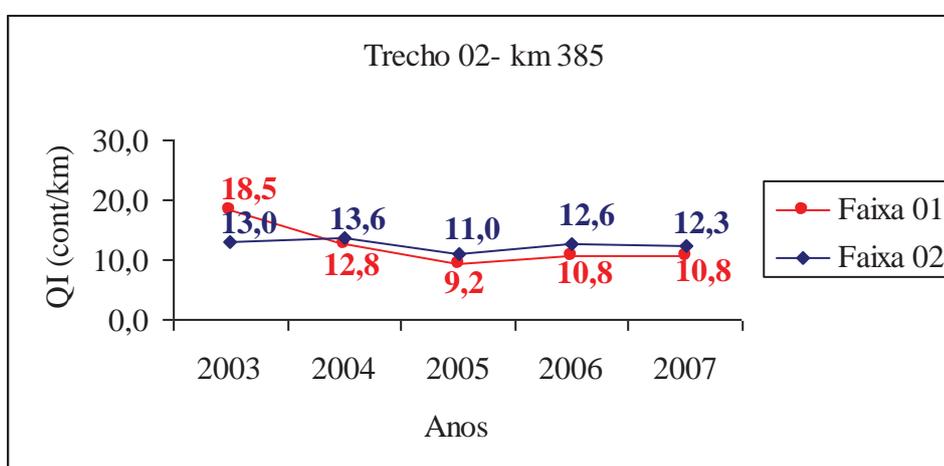


Figura 89 - Trecho 02, Km 385

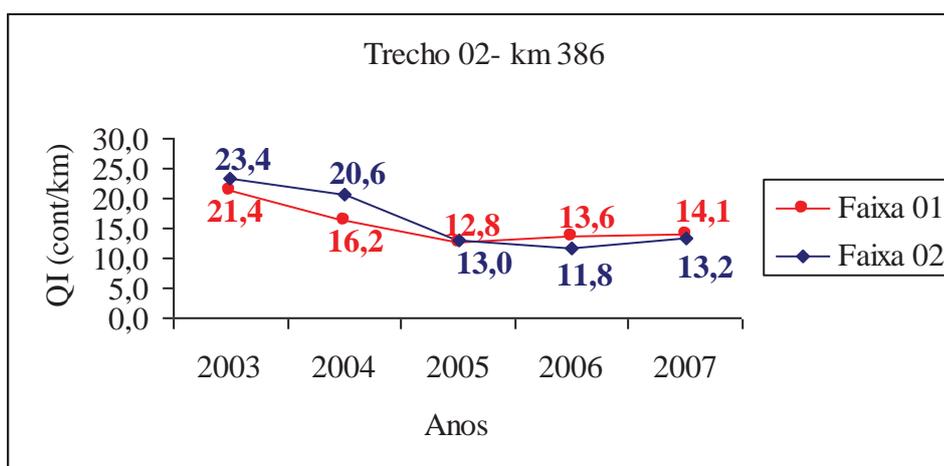


Figura 90 - Trecho 02, Km 386

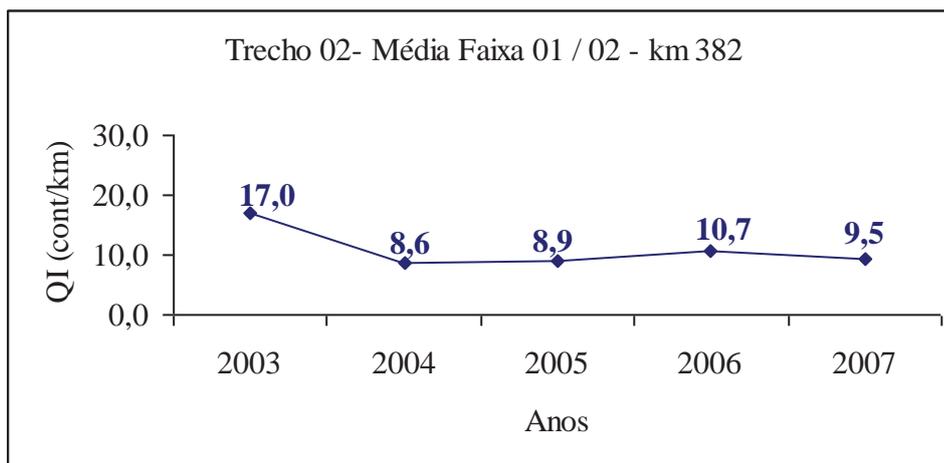


Figura 91 - Trecho 02, Média Faixa 01 / 02 - Km 382

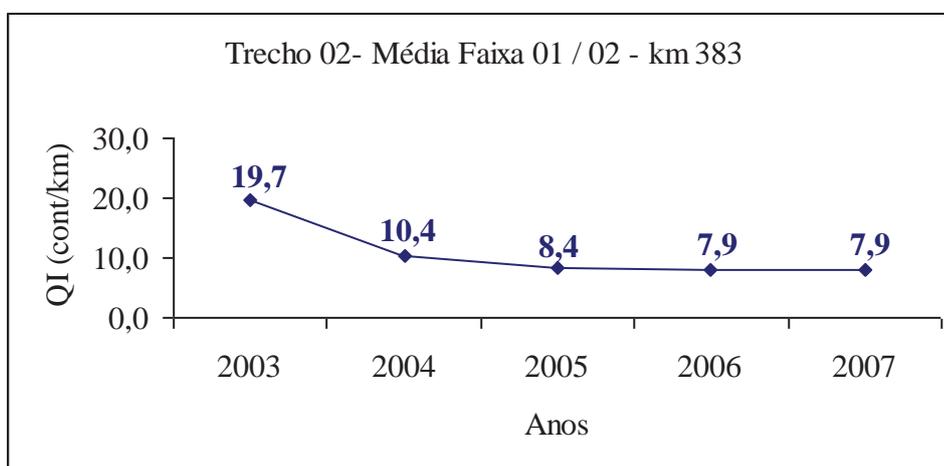


Figura 92 - Trecho 02, Média Faixa 01 / 02 - Km 383

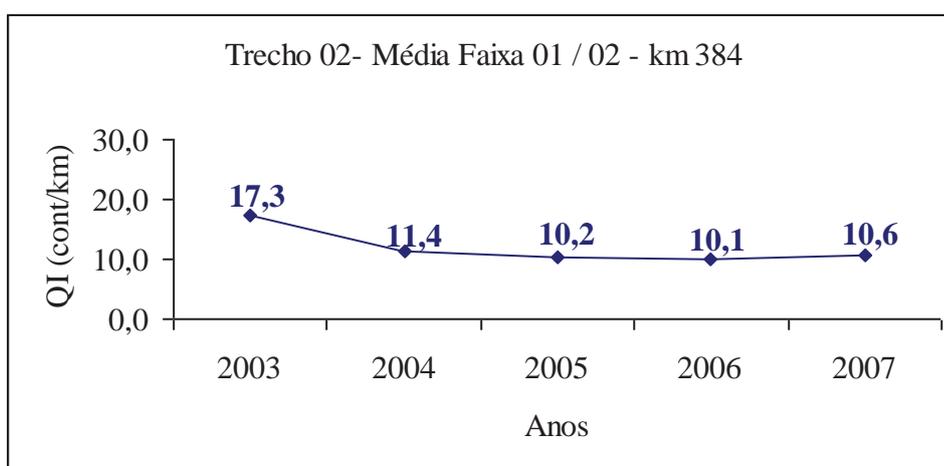


Figura 93 - Trecho 02, Média Faixa 01 / 02 - Km 384

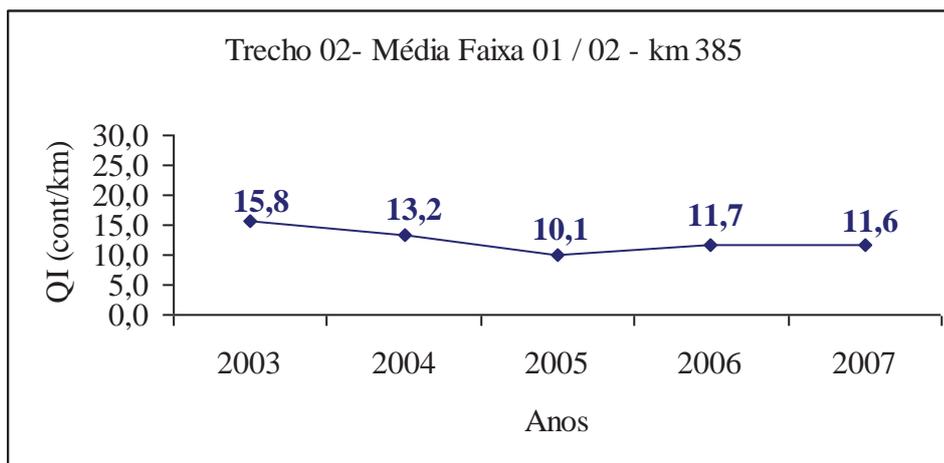


Figura 94 - Trecho 02, Média Faixa 01 / 02 - Km 385

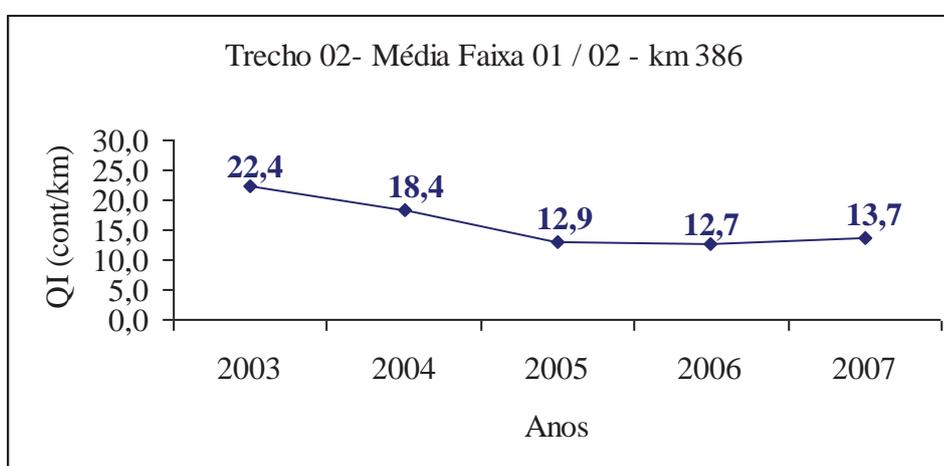


Figura 95 - Trecho 02, Média Faixa 01 / 02 - Km 386

Tabela 44 - Trecho 03

km	km	QI - 2003		QI - 2004		QI - 2005		QI - 2006		QI - 2007	
		Faixa 01	Faixa 02								
Inicial	Final										
123	124	18,0	15,0	19,7	18,9	26,3	21,0	24,6	20,8	26,7	23,5
124	125	23,0	19,0	21,0	16,1	32,9	25,7	27,8	22,8	26,3	26,8
125	126	28,0	27,0	26,2	24,6	34,1	23,1	33,0	30,0	29,6	26,8
126	127	28,0	21,0	28,9	20,3	33,7	24,2	39,6	26,2	31,4	23,0
127	128	27,0	22,0	24,5	19,0	39,9	28,2	34,4	25,8	29,7	21,5
Média Faixa		24,8	20,8	24,1	19,8	33,4	24,4	31,9	25,1	28,7	24,3
Média Trecho		22,8		21,9		28,9		28,5		26,5	

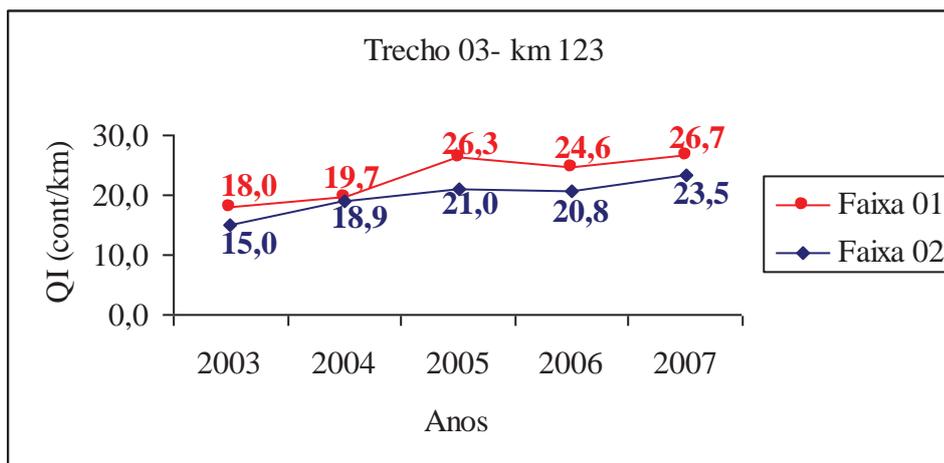


Figura 96 - Trecho 03, Km 123

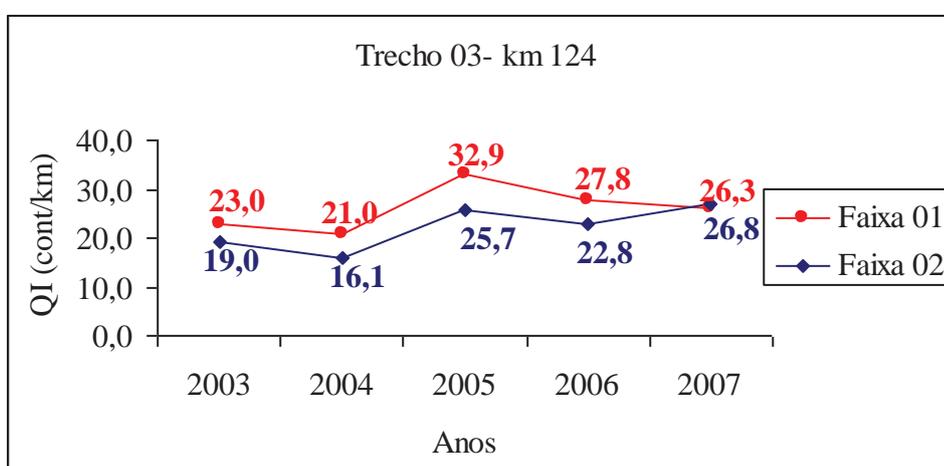


Figura 97 - Trecho 03, Km 124

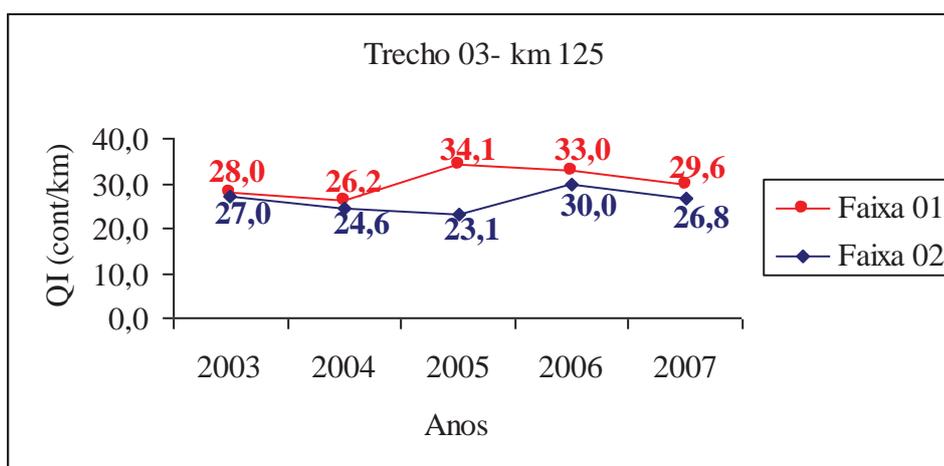


Figura 98 - Trecho 03, Km 125

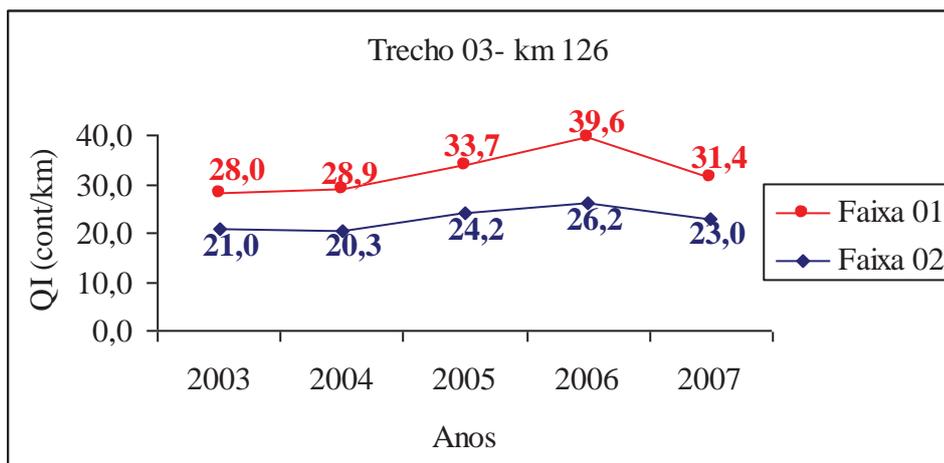


Figura 99 - Trecho 03, Km 126

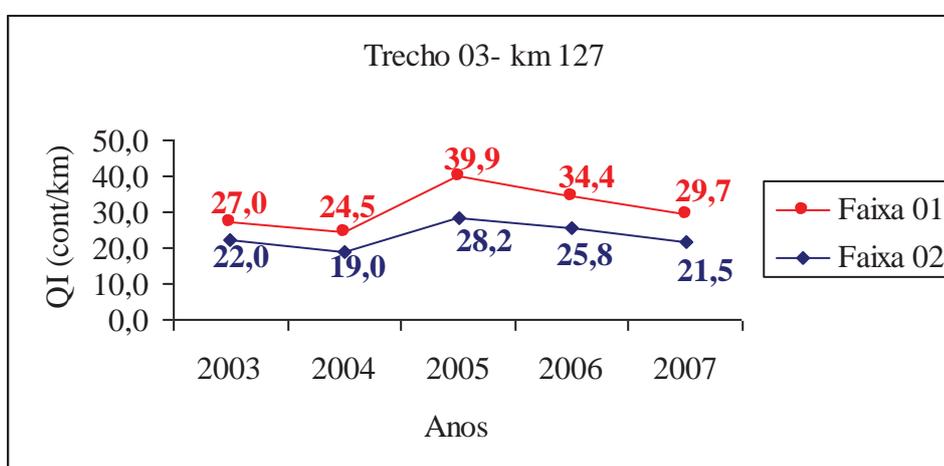


Figura 100 - Trecho 03, Km 127

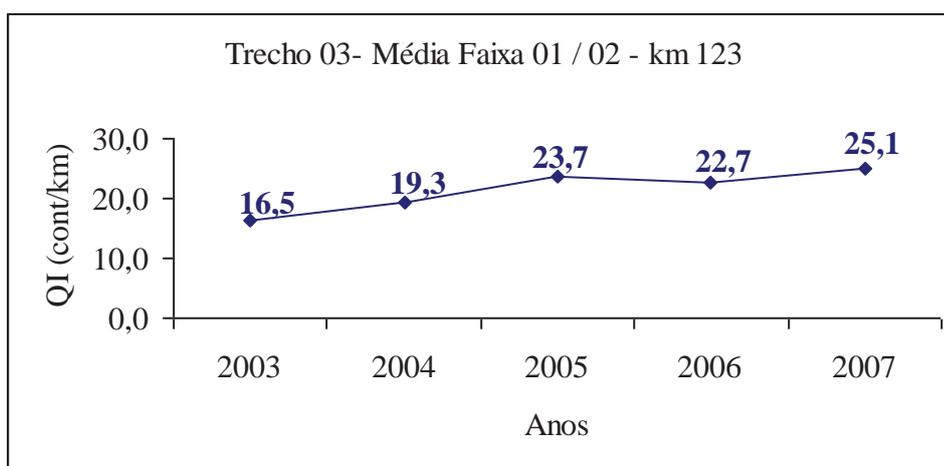


Figura 101 - Trecho 03, Média Faixa 01 / 02 - Km 123

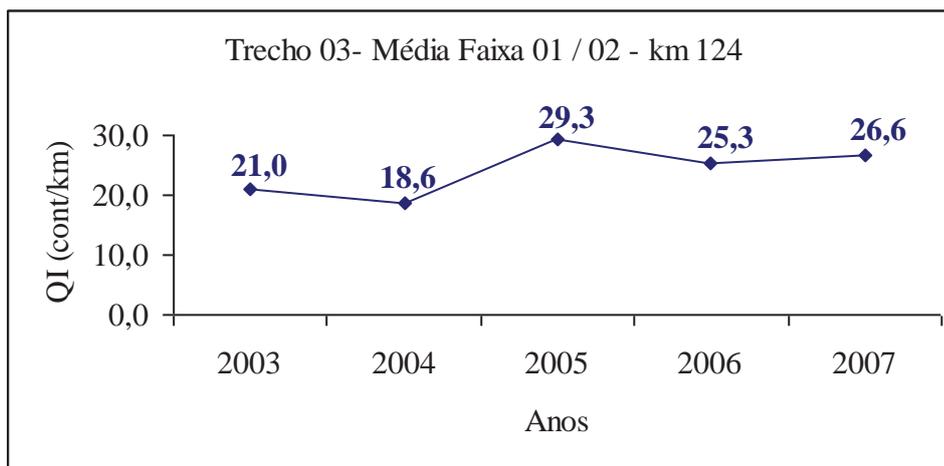


Figura 102 - Trecho 03, Média Faixa 01 / 02 - Km 124

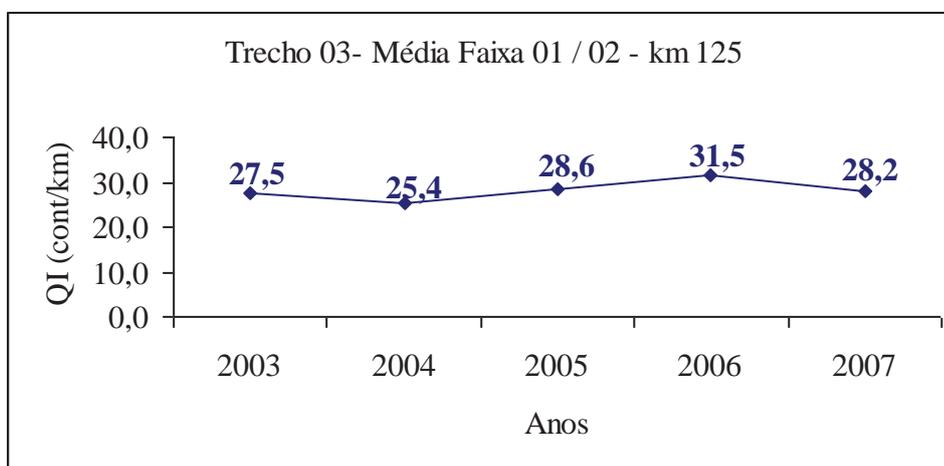


Figura 103 - Trecho 03, Média Faixa 01 / 02 - Km 125

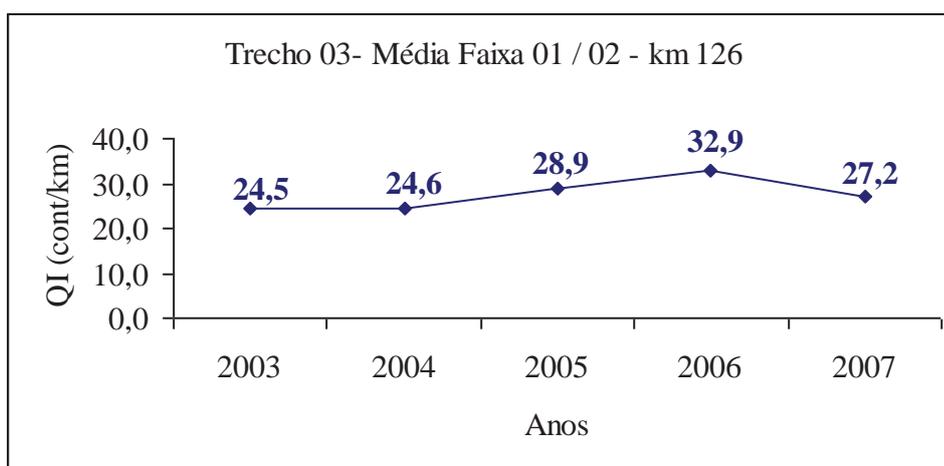


Figura 104 - Trecho 03, Média Faixa 01 / 02 - Km 126

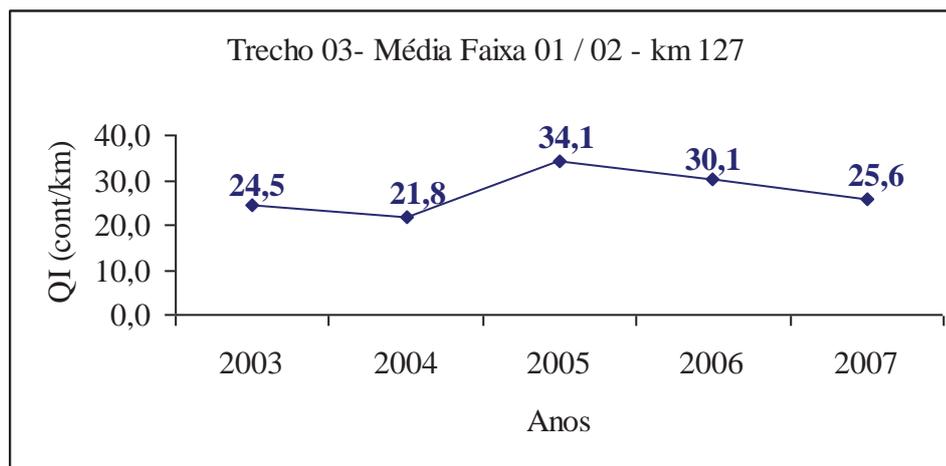


Figura 105 - Trecho 03, Média Faixa 01 / 02 - Km 127

Tabela 45 - Trecho 04

km Inicial	km Final	QI - 2003		QI - 2004		QI - 2005		QI - 2006		QI - 2007	
		Faixa 01	Faixa 02								
176	177	15,0	15,0	14,9	14,5	25,3	20,2	25,0	20,0	22,5	16,1
177	178	16,0	16,0	17,9	15,6	25,4	17,4	9,6	9,4	9,5	7,9
178	179	22,0	17,0	22,6	17,0	17,0	17,0	12,8	9,0	12,0	7,4
179	180	11,0	15,0	12,1	15,1	21,6	16,6	11,2	10,8	11,0	9,7
180	181	18,0	16,0	16,9	14,7	21,0	16,6	12,4	10,4	10,9	8,8
Média Faixa		16,4	15,8	16,9	15,4	22,1	17,6	14,2	11,9	13,2	10,0
Média Trecho		16,1		16,1		19,8		13,1		11,6	

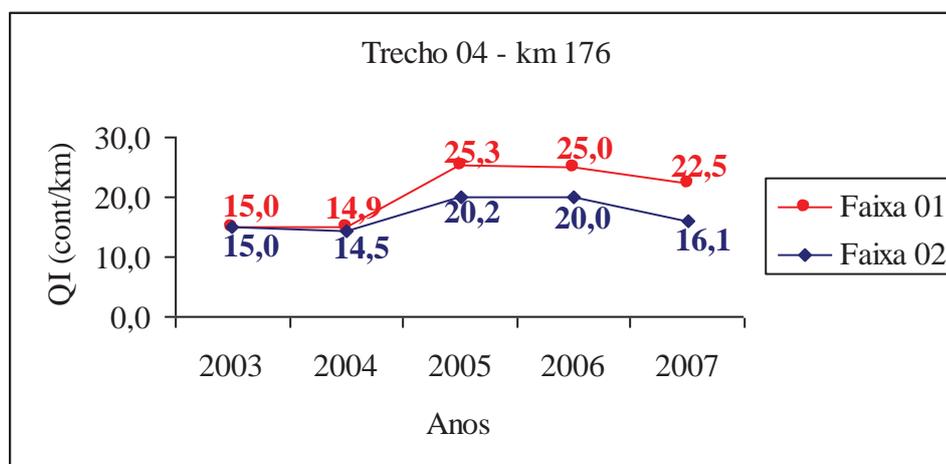


Figura 106 - Trecho 04, Km 176

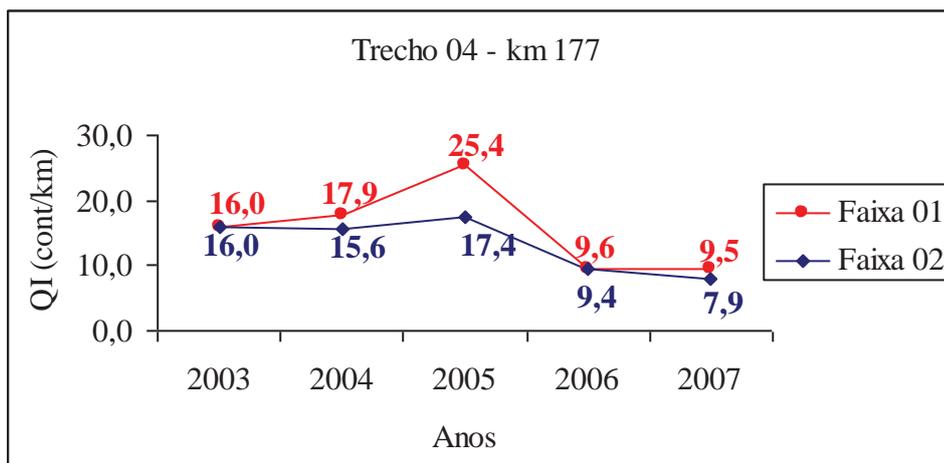


Figura 107 - Trecho 04, Km 177

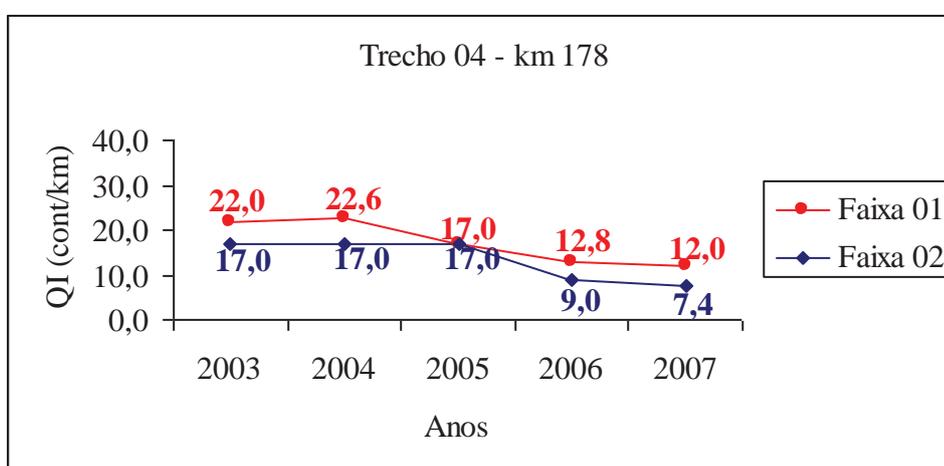


Figura 108 - Trecho 04, Km 178

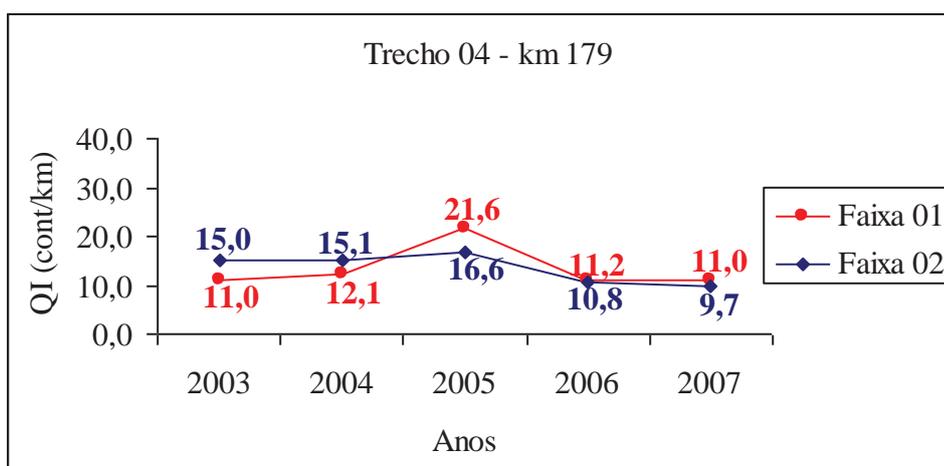


Figura 109 - Trecho 04, Km 179

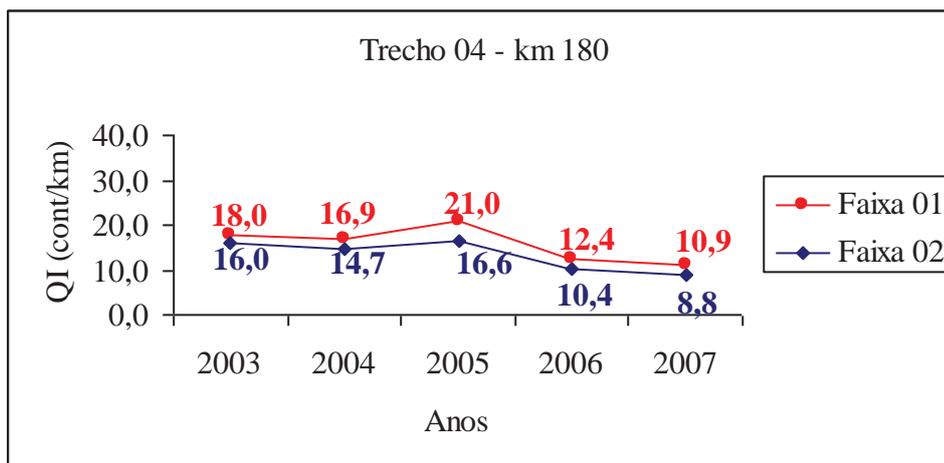


Figura 110 - Trecho 04, Km 180

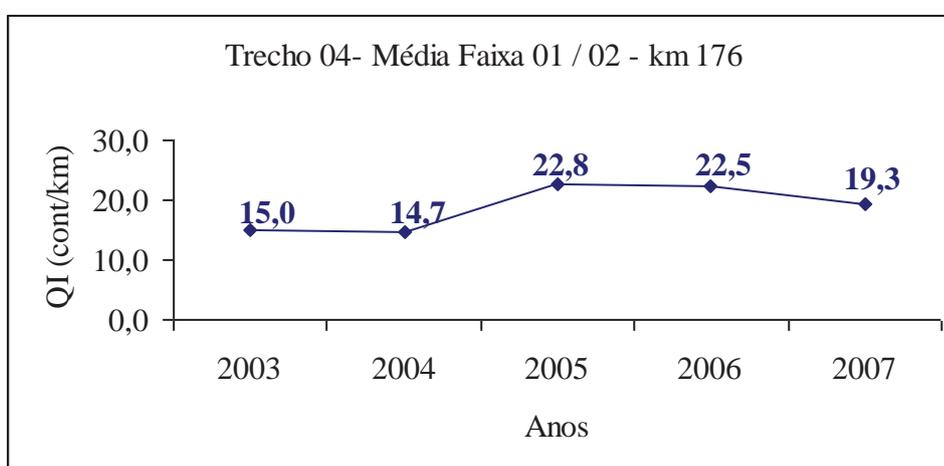


Figura 111 - Trecho 04, Média Faixa 01 / 02, Km 176

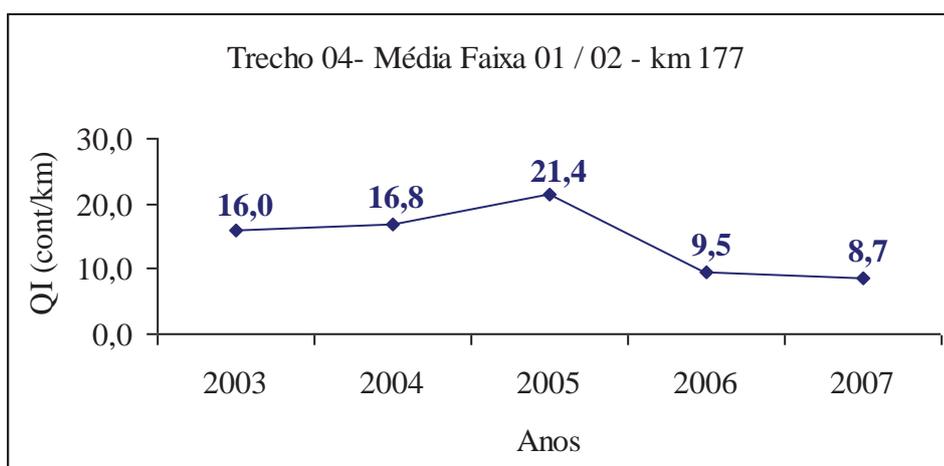


Figura 112 - Trecho 04, Média Faixa 01 / 02, Km 177

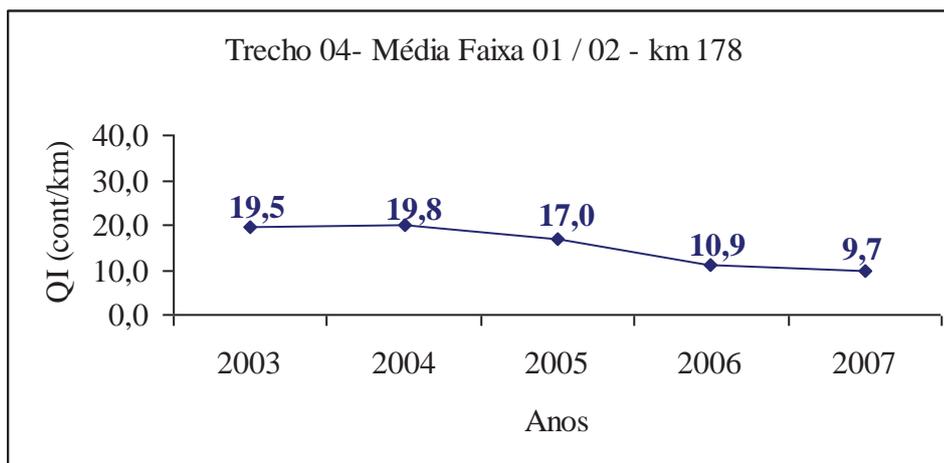


Figura 113 - Trecho 04, Média Faixa 01 / 02, Km 178

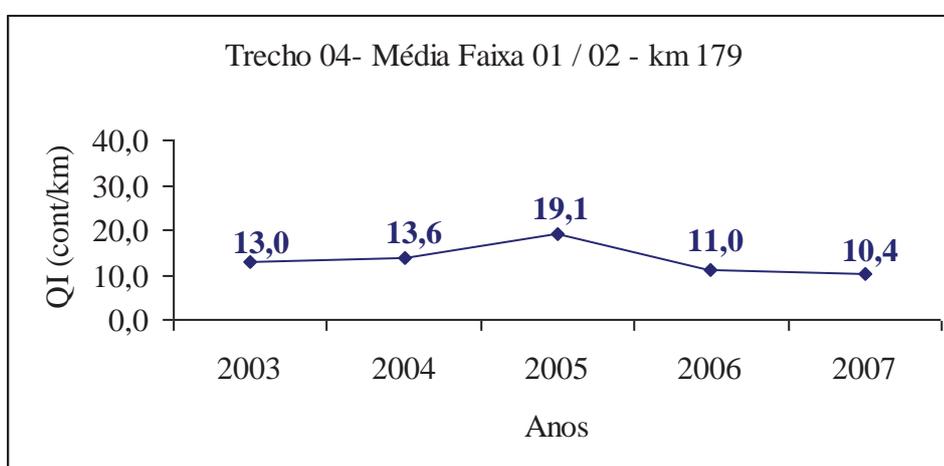


Figura 114 - Trecho 04, Média Faixa 01 / 02, Km 179

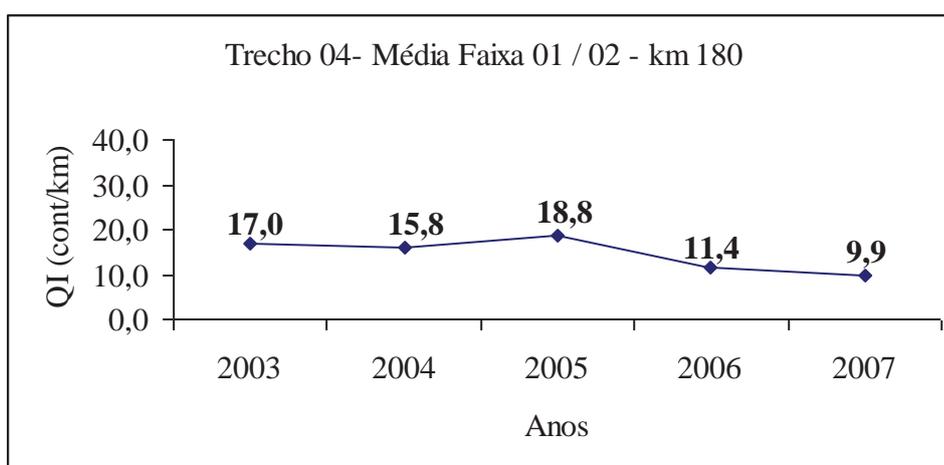


Figura 115 - Trecho 04, Média Faixa 01 / 02, Km 180

Tabela 46 - Trecho 05

km	km	QI - 2003		QI - 2004		QI - 2005		QI - 2006		QI - 2007	
		Faixa 01	Faixa 02								
259	260	41,0	50,0	40,0	46,2	33,4	40,2	39,2	46,8	39,7	47,5
260	261	28,0	41,0	23,8	41,0	23,4	36,2	30,2	40,0	30,0	34,3
261	262	19,0	42,0	17,0	36,6	19,4	33,6	22,0	37,6	21,1	38,2
262	263	39,0	44,0	35,0	44,6	30,8	38,4	34,6	46,2	32,5	47,0
263	264	34,0	39,0	31,2	43,2	29,2	39,6	34,8	41,4	33,3	42,0
Média Faixa		32,2	43,2	29,4	42,3	27,2	37,6	32,2	42,4	31,3	41,8
Média Trecho		37,7		35,9		32,4		37,3		36,5	

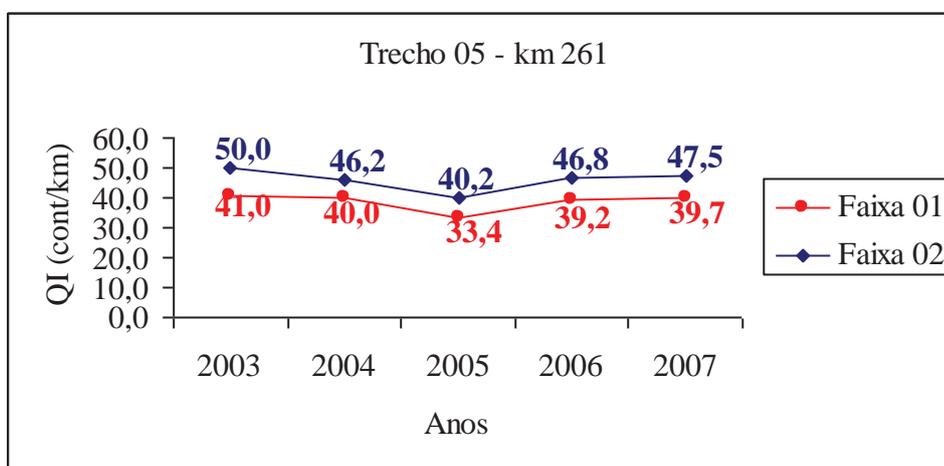


Figura 116 - Trecho 05, Km 261

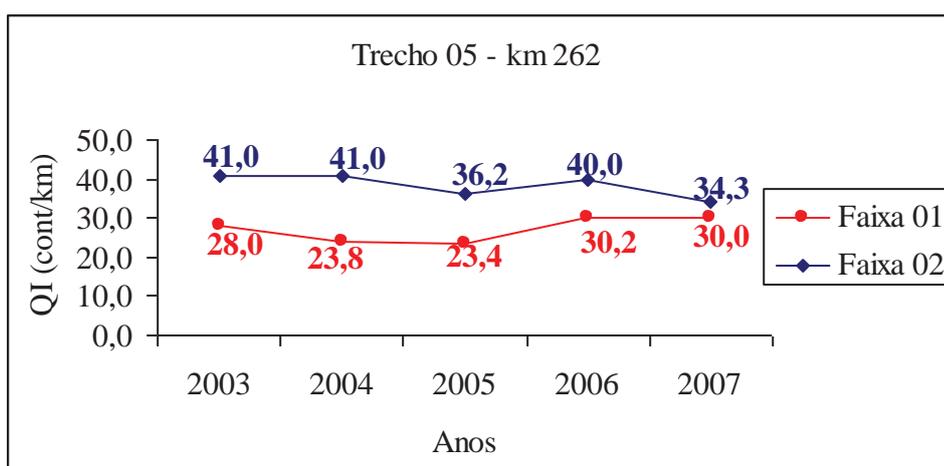


Figura 117 - Trecho 05, Km 262

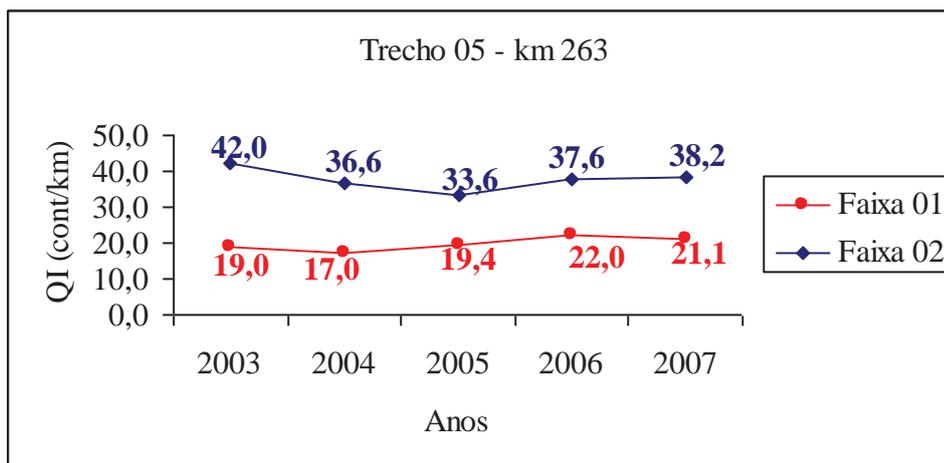


Figura 118 - Trecho 05, Km 263

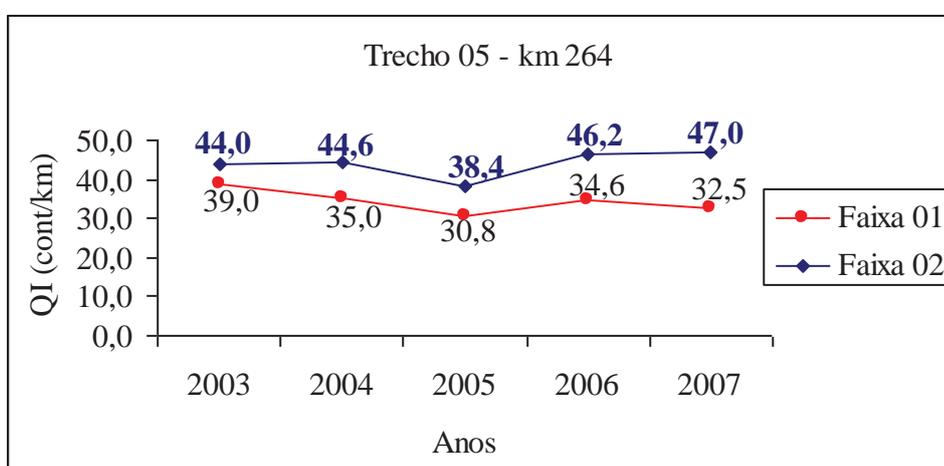


Figura 119 - Trecho 05, Km 264

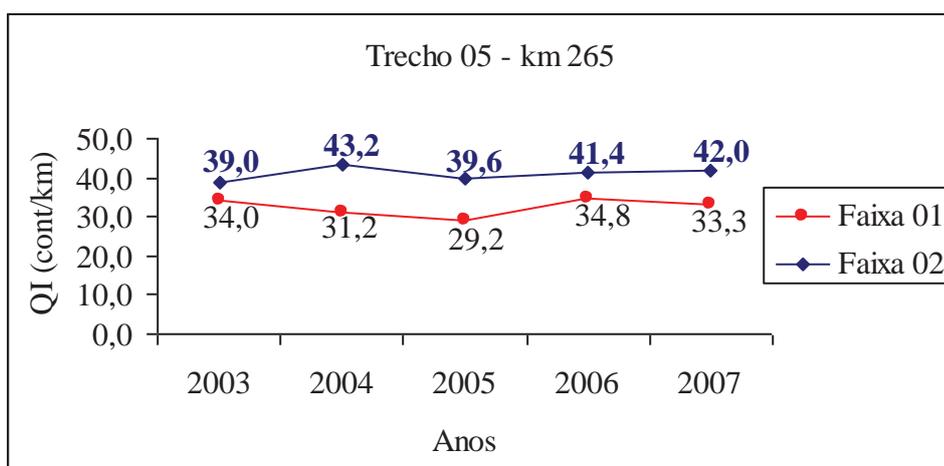


Figura 120 - Trecho 05, Km 265

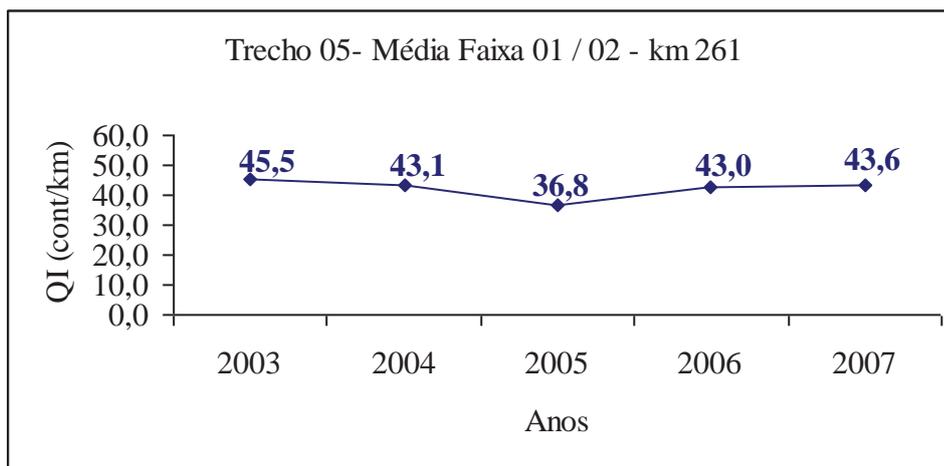


Figura 121 - Trecho 05, Média Faixa 01 / 02 - Km 261

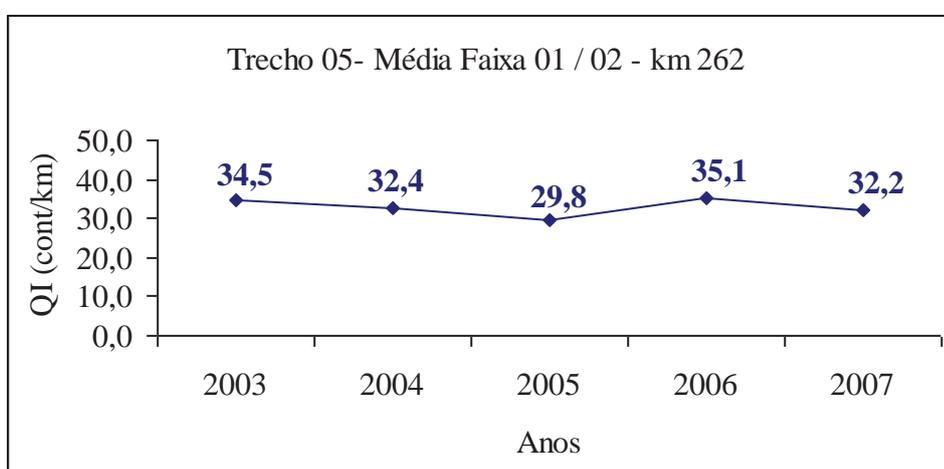


Figura 122 - Trecho 05, Média Faixa 01 / 02 - Km 262

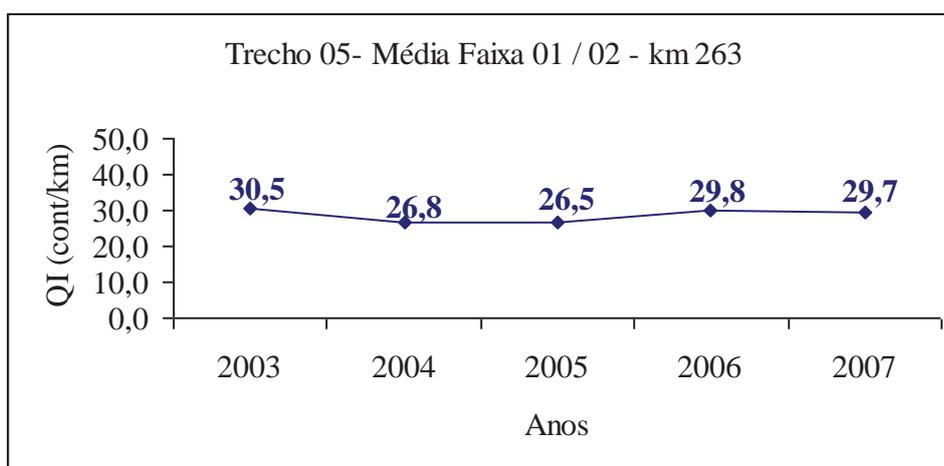


Figura 123 - Trecho 05, Média Faixa 01 / 02 - Km 263

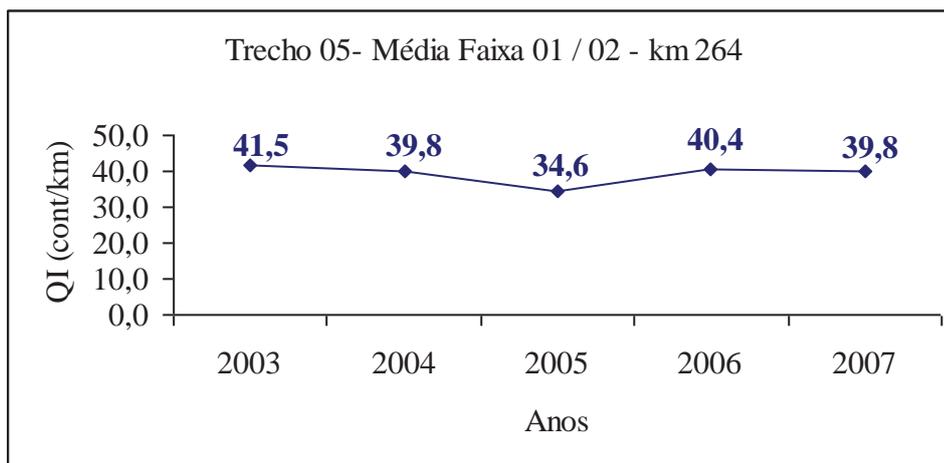


Figura 124 - Trecho 05, Média Faixa 01 / 02 - Km 264

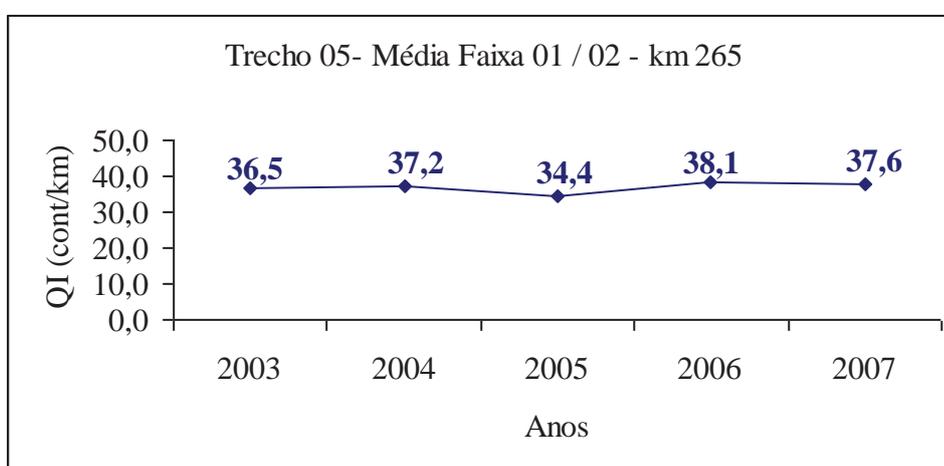


Figura 125 - Trecho 05, Média Faixa 01 / 02 - Km 265

Tabela 47 - Trecho 06

km	km	QI - 2003		QI - 2004		QI - 2005		QI - 2006		QI - 2007	
		Faixa 01	Faixa 02								
Inicial	Final										
317	318	46,0	40,0	45,2	42,0	48,4	35,0	51,2	47,0	45,7	45,2
318	319	37,0	40,0	41,2	42,8	45,6	48,2	49,2	50,6	47,9	39,6
319	320	45,0	47,0	38,4	38,8	47,4	47,8	51,8	51,4	29,2	14,5
320	321	26,0	37,0	25,6	35,6	29,2	42,0	31,2	48,6	16,1	18,0
321	322	32,0	43,0	32,4	39,8	37,6	42,4	38,2	45,2	18,3	26,9
Média Faixa		37,2	41,4	36,6	39,8	41,6	43,1	44,3	48,6	31,4	28,8
Média Trecho		39,3		38,2		42,4		46,4		30,1	

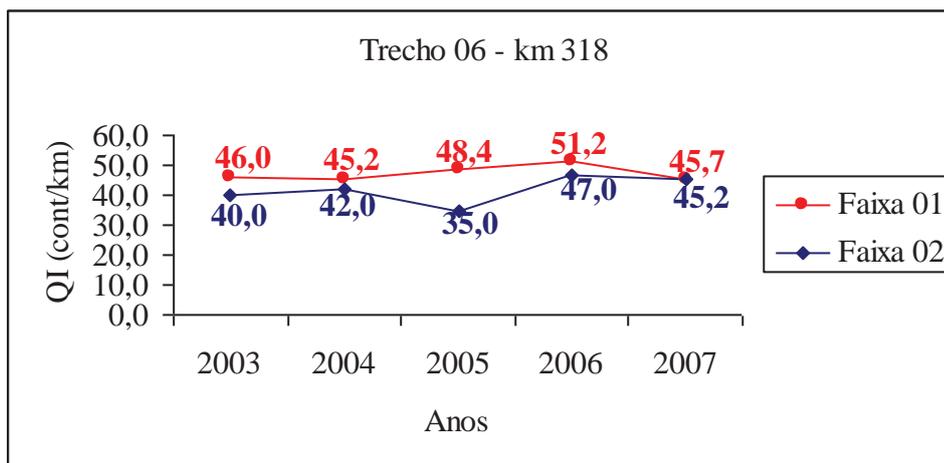


Figura 126 - Trecho 06, Km 318

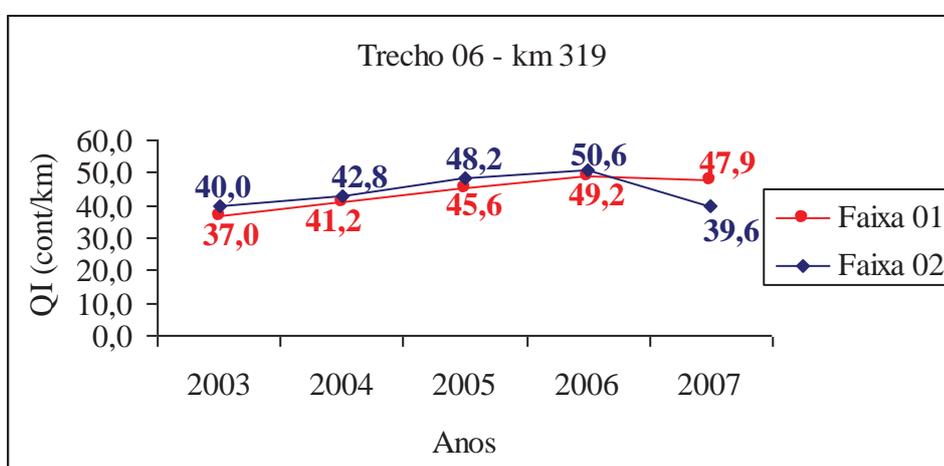


Figura 127 - Trecho 06, Km 319

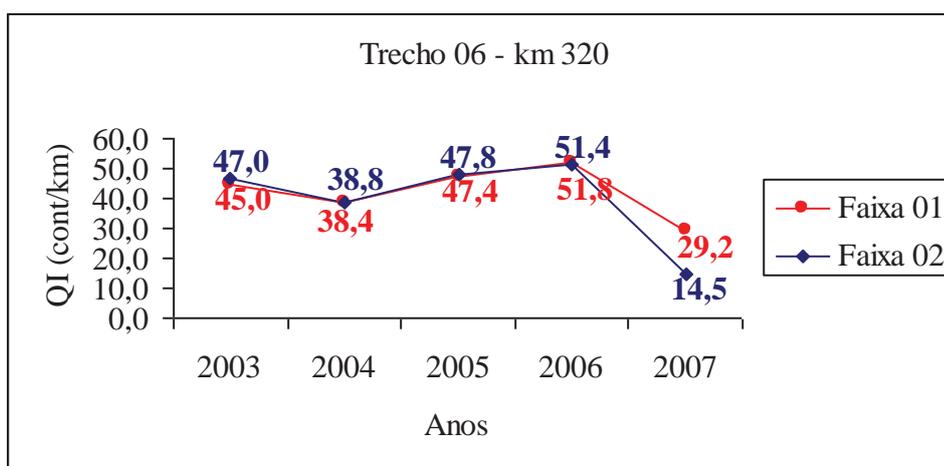


Figura 128 - Trecho 06, Km 320

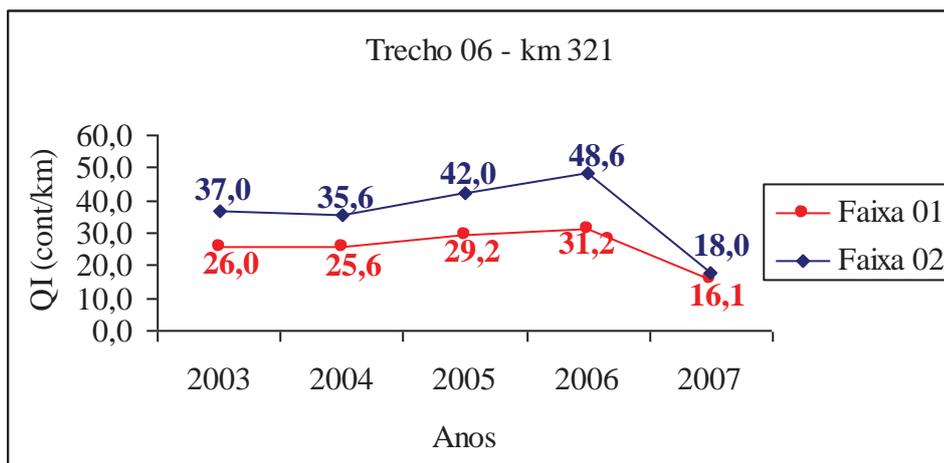


Figura 129 - Trecho 06, Km 321

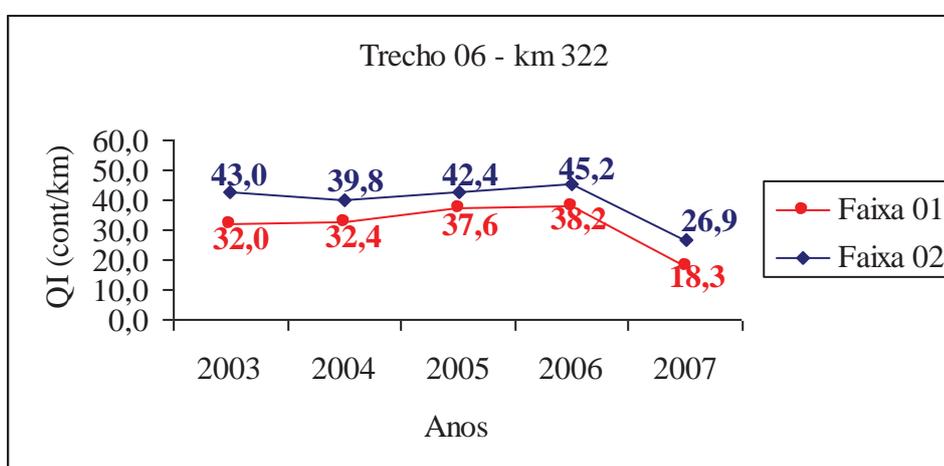


Figura 130 - Trecho 06, Km 322

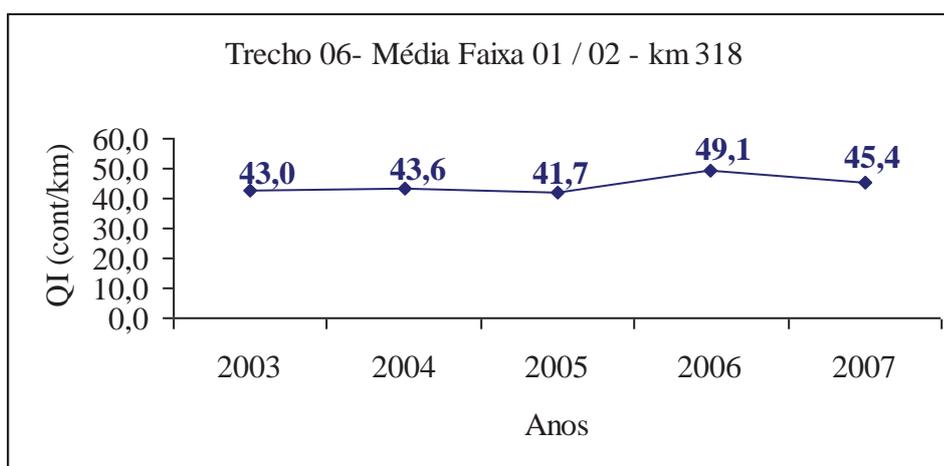


Figura 131 - Trecho 06, Média Faixa 01 / 02 - Km 318

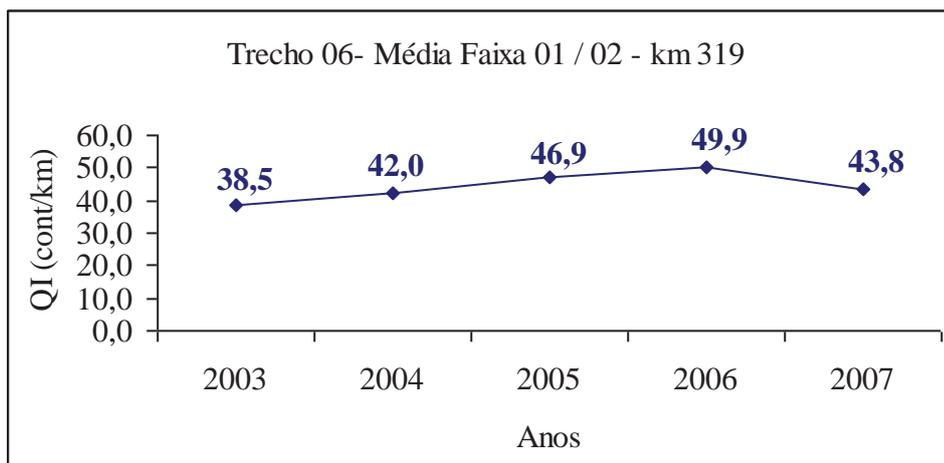


Figura 132 - Trecho 06, Média Faixa 01 / 02 - Km 319

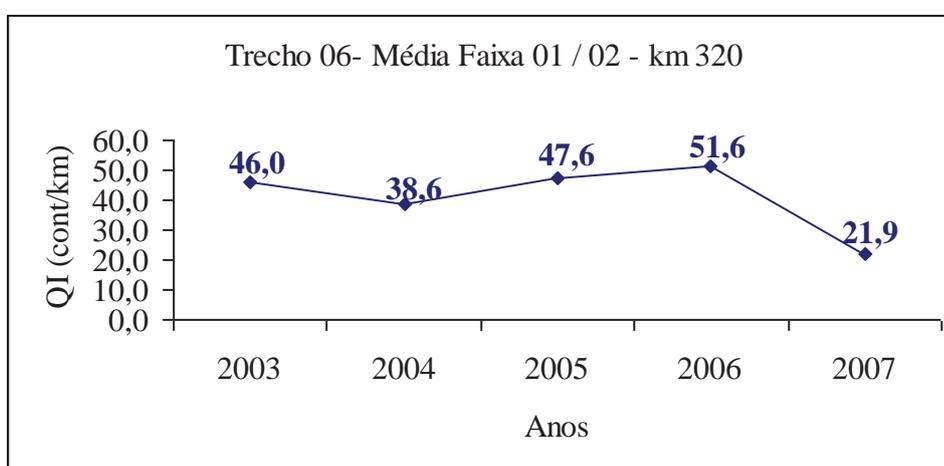


Figura 133 - Trecho 06, Média Faixa 01 / 02 - Km 320

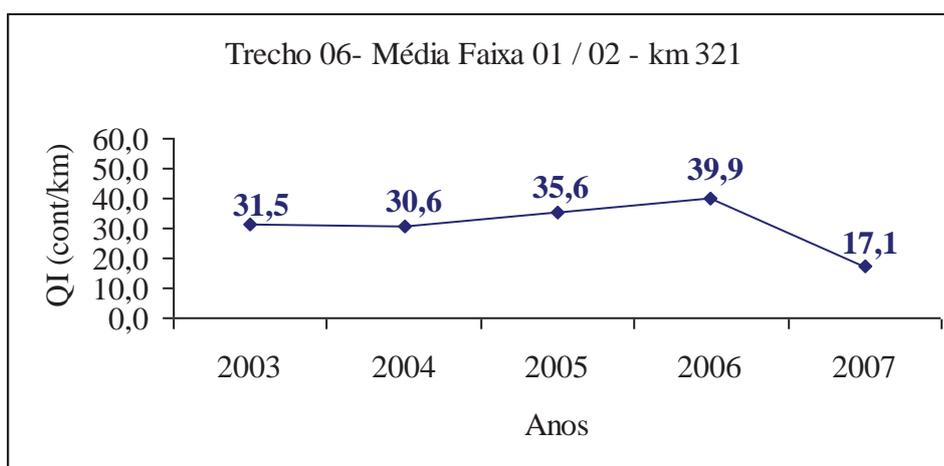


Figura 134 - Trecho 06, Média Faixa 01 / 02 - Km 321

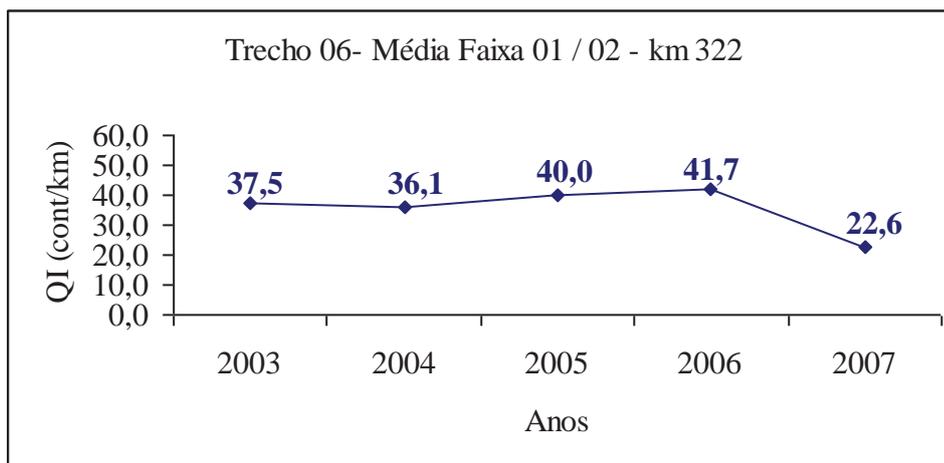


Figura 135 - Trecho 06, Média Faixa 01 / 02 - Km 322

ANEXO III

- **Evolução da irregularidade Paterson (1987).**

Trecho 01

- **Cálculo do número estrutural corrigido, Tabela 48.**

Tabela 48 - Cálculo SNC, trecho 01

Ano	DFWD	DVB	SNC
2003	54,6	89,39	11,58
2004	54,6	89,39	11,58
2005	56,2	92,12	11,72
2006	56,2	92,12	11,72
2007	57,4	94,17	11,83

- **Cálculo do IRI, Tabela 49.**

Tabela 49 - Cálculo IRI, conforme Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI Previsto
2003	1,74	11,58	2,24	0,92	1,76
2004	2,18	11,58	2,35	0,92	2,21
2005	2,70	11,72	2,27	0,92	2,74
2006	2,68	11,72	2,21	1,00	2,72
2007	2,64	11,83	2,37	1,10	2,68

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 136.**

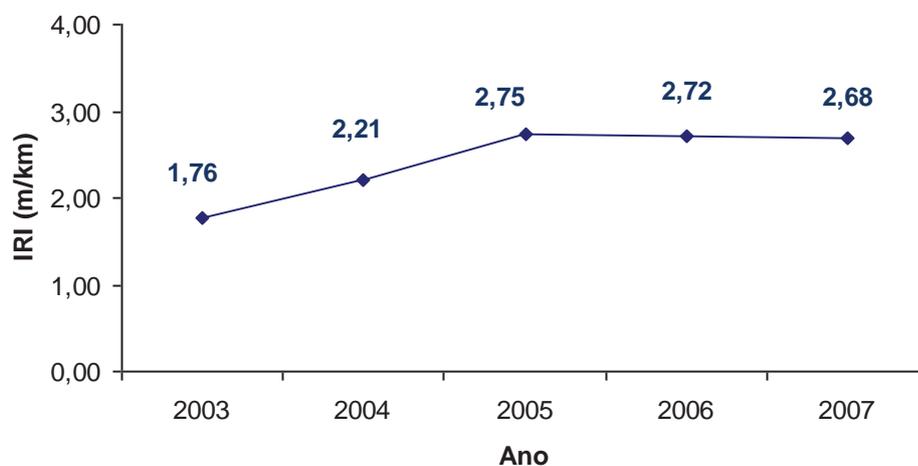


Figura 136 – Evolução da IRI, Trecho 01

Trecho 02

- **Cálculo do número estrutural corrigido, Tabela 50.**

Tabela 50 - Cálculo SNC, Trecho 02

Ano	DFWD	DVB	SNC
2003	38,7	62,26	10,04
2004	38,7	62,26	10,04
2005	46,3	75,23	10,82
2006	46,3	75,23	10,82
2007	46,3	75,23	10,82

- **Cálculo do IRI, Tabela 51.**

Tabela 51 - Cálculo IRI, conforme Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI Previsto
2003	1,42	10,04	2,24	1,00	1,44
2004	0,95	10,04	2,35	1,00	0,97
2005	0,78	10,82	2,27	1,00	0,79
2006	0,82	10,82	2,21	1,00	0,83
2007	0,85	10,82	2,37	1,00	0,86

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 137.**

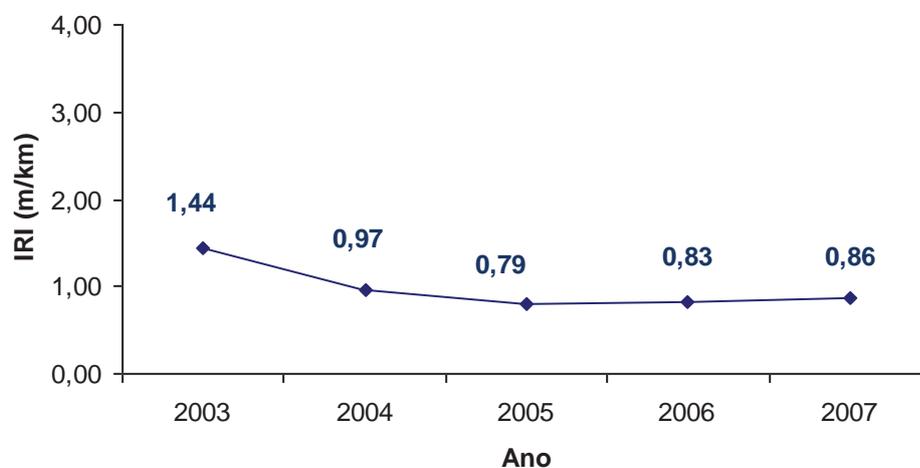


Figura 137 – Evolução IRI, Trecho 02

Trecho 03

- **Cálculo do número estrutural corrigido, Tabela 52.**

Tabela 52 - Cálculo SNC, Trecho 03

Ano	DFWD	DVB	SNC
2003	34,7	55,44	9,58
2004	34,7	55,44	9,58
2005	40,1	64,65	10,19
2006	40,1	64,65	10,19
2007	47,7	77,62	10,95

- **Cálculo do IRI, Tabela 53.**

Tabela 53 - Cálculo IRI, conforme Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI Previsto
2003	1,60	9,58	2,24	1,00	1,63
2004	1,52	9,58	2,38	1,00	1,55
2005	1,88	10,19	2,33	1,00	1,91
2006	1,93	10,19	2,34	1,00	1,96
2007	1,87	10,95	2,49	1,00	1,90

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 138.**

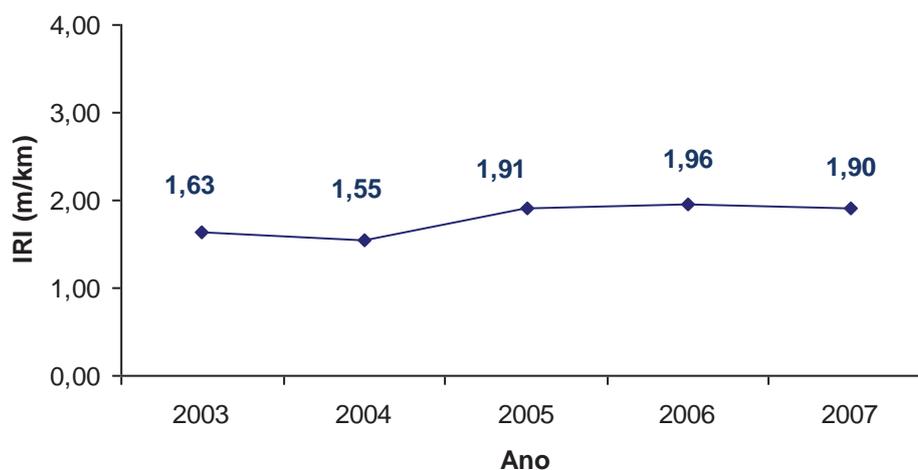


Figura 138 – Evolução IRI, Trecho 03

Trecho 04

- **Cálculo do número estrutural corrigido, Tabela 54.**

Tabela 54 - Cálculo SNC, Trecho 04

Ano	DFWD	DVB	SNC
2003	38,3	61,58	9,99
2004	38,3	61,58	9,99
2005	38,2	61,41	9,98
2006	38,2	61,41	9,98
2007	23,0	35,47	8,03

- **Cálculo do IRI, Tabela 55.**

Tabela 55 - Cálculo IRI, conforme Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI
					Previsto
2003	1,22	9,99	2,24	1,00	1,24
2004	1,18	9,99	2,38	1,00	1,20
2005	1,35	9,98	2,33	1,00	1,37
2006	0,92	9,98	2,34	1,00	0,93
2007	0,77	8,03	2,49	1,00	0,78

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 139.**

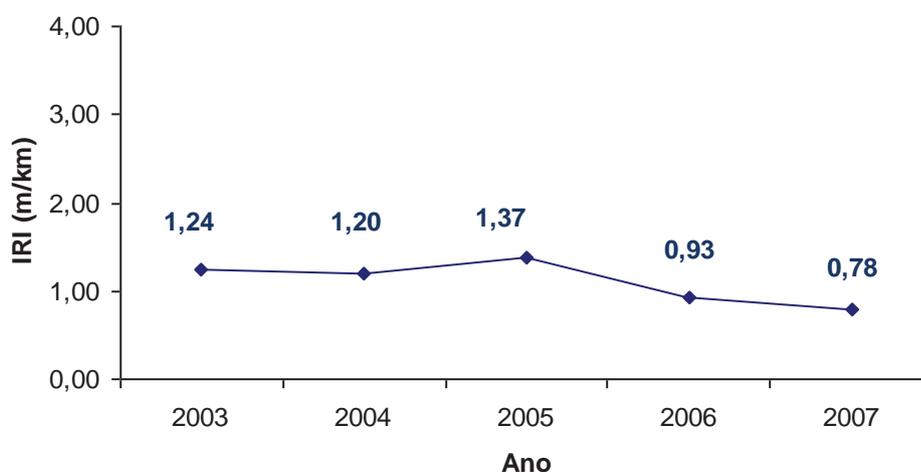


Figura 139 – Evolução IRI, Trecho 04.

Trecho 05

- **Cálculo do número estrutural corrigido, Tabela 56.**

Tabela 56 - Cálculo SNC, Trecho 05

Ano	DFWD	DVB	SNC
2003	28,8	45,37	8,85
2004	28,8	45,37	8,85
2005	33,9	54,07	9,49
2006	33,9	54,07	9,49
2007	38,5	61,92	10,01

- **Cálculo do IRI, Tabela 57.**

Tabela 57 - Cálculo IRI, conforme Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI
					Previsto
2003	2,80	8,85	1,30	1,00	2,84
2004	2,82	8,85	1,32	1,00	2,86
2005	2,89	9,49	1,24	1,00	2,94
2006	3,23	9,49	1,21	1,00	3,28
2007	3,37	10,01	1,31	1,00	3,42

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 140.**

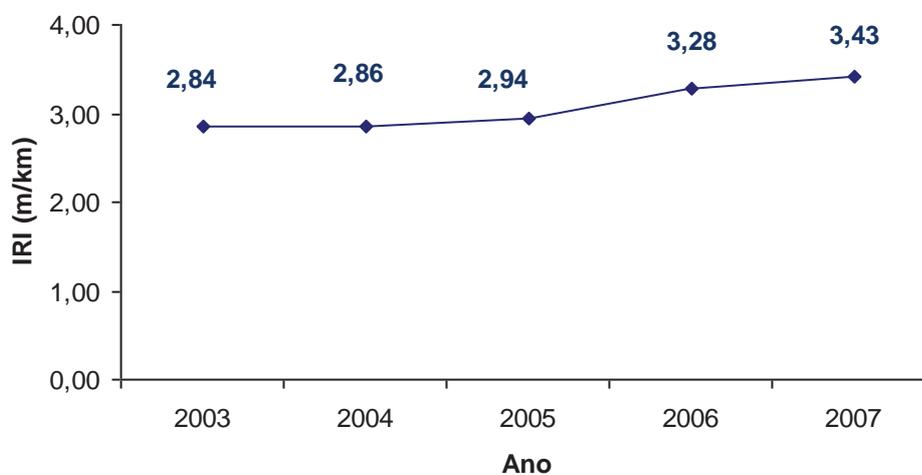


Figura 140 – Evolução IRI, Trecho 05

Trecho 06

- **Cálculo do número estrutural corrigido, Tabela 58.**

Tabela 58 - Cálculo SNC, Trecho 06

Ano	DFWD	DVB	SNC
2003	26,1	40,76	8,48
2004	26,1	40,76	8,48
2005	26,4	41,27	8,52
2006	26,4	41,27	8,52
2007	26,4	41,26	8,52

- **Cálculo do IRI, Tabela 59.**

Tabela 59 - Cálculo IRI, conforme Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI
					Previsto
2003	3,05	8,48	1,30	1,00	3,09
2004	2,87	8,48	1,32	1,00	2,92
2005	3,22	8,52	1,24	1,00	3,27
2006	3,58	8,52	1,21	1,00	3,63
2007	2,87	8,52	1,31	1,00	2,92

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 141.**

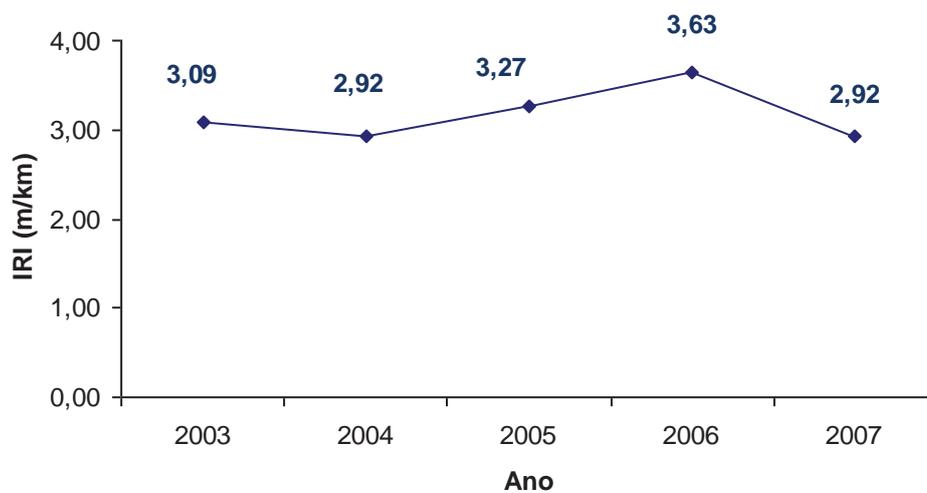


Figura 141 – Evolução IRI, Trecho 06

- **Evolução da irregularidade Queiroz (1981).**

Trecho 01

- **Cálculo QI por “Queiroz A”, Tabela 60.**

Tabela 60 - Resultado QI para o modelo.

Ano	N	SNC	A	ER	Log QI	QI calculado
2003	2237546,56	11,6	1,0	1,0	1,348	22,26
2004	4590295,29	11,6	2,0	1,0	1,349	22,34
2005	6856769,29	11,7	1,0	1,0	1,348	22,31
2006	9061822,86	11,7	2,0	1,0	1,349	22,36
2007	11431114,79	10,8	1,0	1,0	1,350	22,40

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 142.**

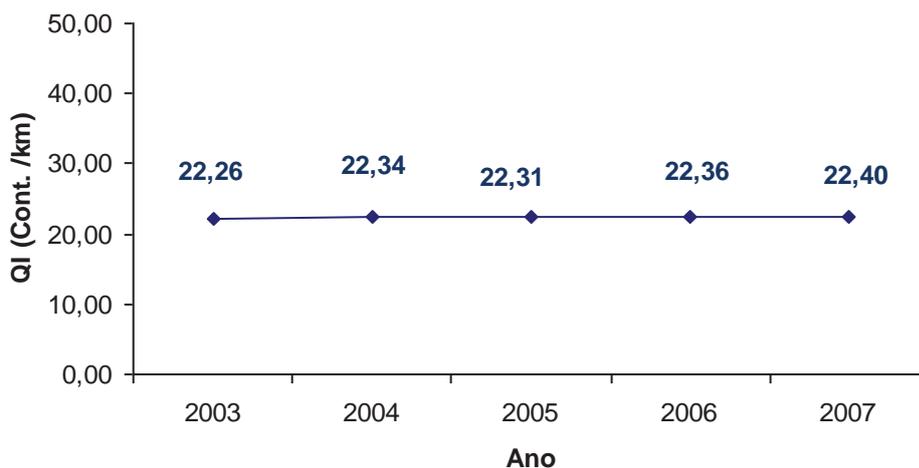


Figura 142 – Evolução QI, “Queiroz A”, Trecho 01

- **Cálculo QI por “Queiroz B”, Tabela 61.**

Tabela 61 - Resultado QI para o modelo.

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	QI calculado
2003	2237546,56	1,0	1,0	1,0	89,457	36,40
2004	4590295,29	1,0	2,0	1,0	89,457	38,57
2005	6856769,29	1,0	1,0	1,0	92,078	40,15
2006	9061822,86	1,0	2,0	1,0	92,078	41,39
2007	11431114,79	1,0	1,0	1,0	95,683	43,20

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 143.

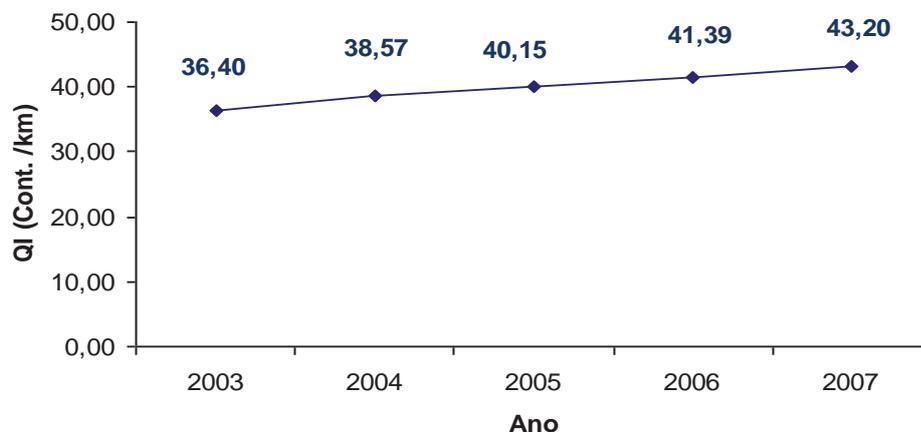


Figura 143 – Evolução QI, “Queiroz B”, Trecho 01

- Cálculo QI por “Queiroz C”, Tabela 62.

Tabela 62 - Resultado QI para o modelo.

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	SNC	QI calculado
2003	2.237.546,56	1,0	1,0	1,0	89,457	11,585	39,05
2004	4.590.295,29	1,0	2,0	1,0	89,457	11,585	42,01
2005	6.856.769,29	1,0	1,0	1,0	92,078	11,724	44,63
2006	9.061.822,86	1,0	2,0	1,0	92,078	11,724	46,13
2007	11.431.114,79	1,0	1,0	1,0	95,683	11,911	49,10

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 144.

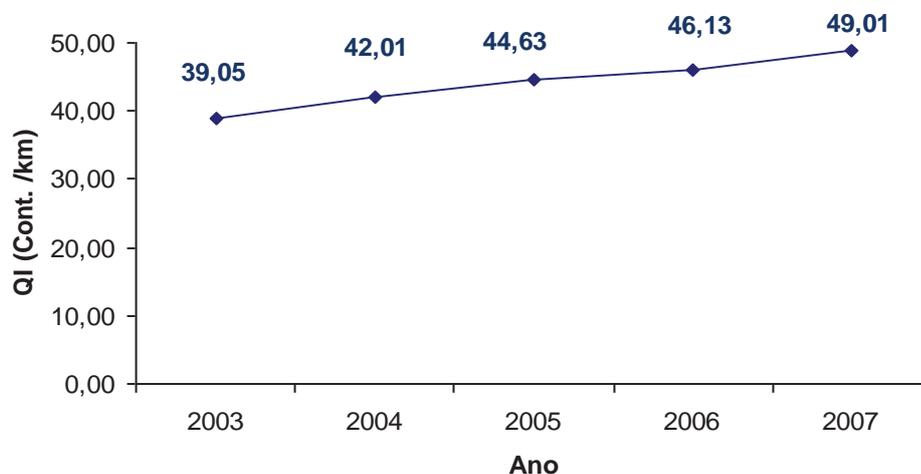


Figura 144 – Evolução QI, “Queiroz C”, Trecho 01

Trecho 02

- Cálculo QI por “Queiroz A”, Tabela 63.

Tabela 63 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	SNC	A	ER	Log QI	QI calculado
2003	2237546,56	10,0	1,0	1,0	1,350	22,37
2004	4590295,29	10,0	1,0	1,0	1,351	22,42
2005	6856769,29	10,8	2,0	1,0	1,351	22,41
2006	9061822,86	10,8	3,0	1,0	1,352	22,47
2007	11431114,79	10,8	4,0	1,0	1,353	22,53

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 145.

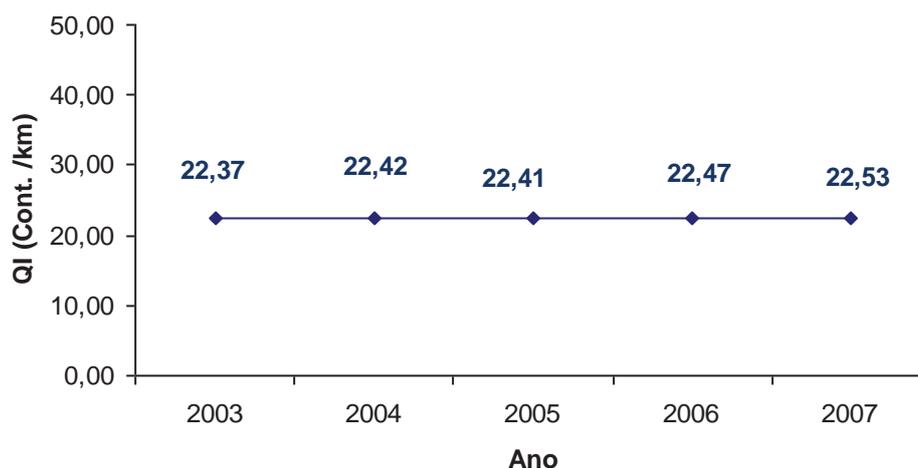


Figura 145 – Evolução QI, “Queiroz A”, Trecho 02

- Cálculo QI por “Queiroz B”, Tabela 64.

Tabela 64 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	QI calculado
2003	2237546,56	1,0	1,0	1,0	63,406	28,22
2004	4590295,29	1,0	1,0	1,0	63,406	29,05
2005	6856769,29	1,0	2,0	1,0	75,858	34,18
2006	9061822,86	1,0	3,0	1,0	75,858	35,18
2007	11431114,79	1,0	4,0	1,0	75,858	36,11

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 146.

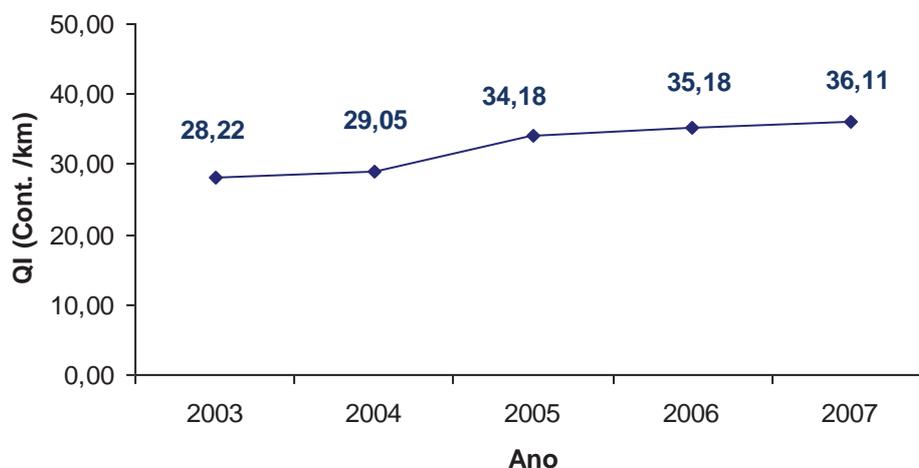


Figura 146 – Evolução QI, “Queiroz B”, Trecho 02

- Cálculo QI por “Queiroz C”, Tabela 65.

Tabela 65 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	SNC	QI calculado
2003	2.237.546,56	1,0	1,0	1,0	63,406	10,036	28,27
2004	4.590.295,29	1,0	1,0	1,0	63,406	10,036	29,71
2005	6.856.769,29	1,0	2,0	1,0	75,858	10,818	36,32
2006	9.061.822,86	1,0	3,0	1,0	75,858	10,818	37,50
2007	11.431.114,79	1,0	4,0	1,0	75,858	10,818	38,56

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 147.

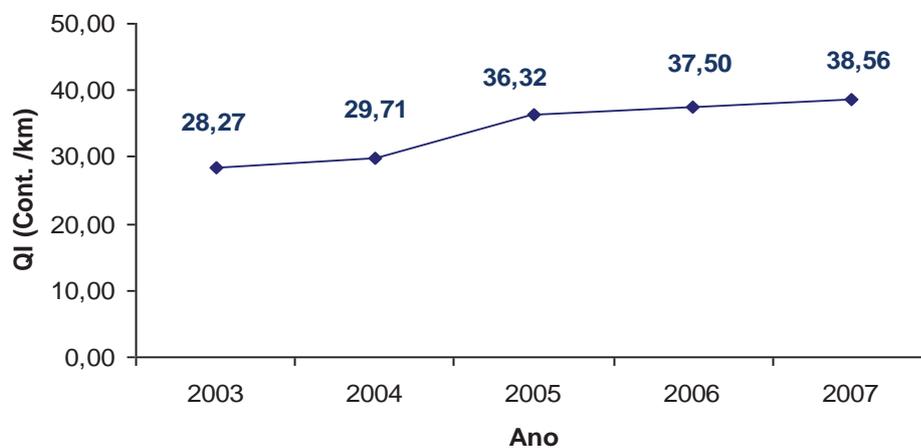


Figura 147 – Evolução QI, “Queiroz C”, Trecho 02

Trecho 03

- Cálculo QI por “Queiroz A”, Tabela 66.

Tabela 66 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	SNC	A	ER	Log QI	QI calculado
2003	2237546,56	9,6	1,0	1,0	1,351	22,42
2004	4590295,29	9,6	2,0	1,0	1,352	22,51
2005	6856769,29	10,2	1,0	1,0	1,351	22,43
2006	9061822,86	10,2	2,0	1,0	1,352	22,49
2007	11431114,79	11,0	1,0	1,0	1,350	22,39

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 148.

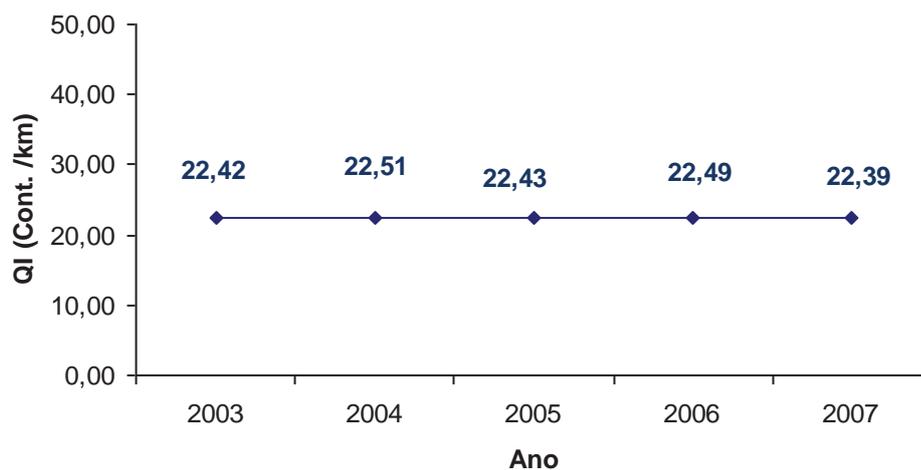


Figura 148 – Evolução QI, “Queiroz A”, Trecho 03

- Cálculo QI por “Queiroz B”, Tabela 67.

Tabela 67 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	QI calculado
2003	2237546,56	1,0	1,0	1,0	56,852	26,60
2004	4590295,29	1,0	2,0	1,0	56,852	27,78
2005	6856769,29	1,0	1,0	1,0	65,700	30,24
2006	9061822,86	1,0	2,0	1,0	65,700	31,12
2007	11431114,79	1,0	1,0	1,0	78,152	35,46

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 149.**

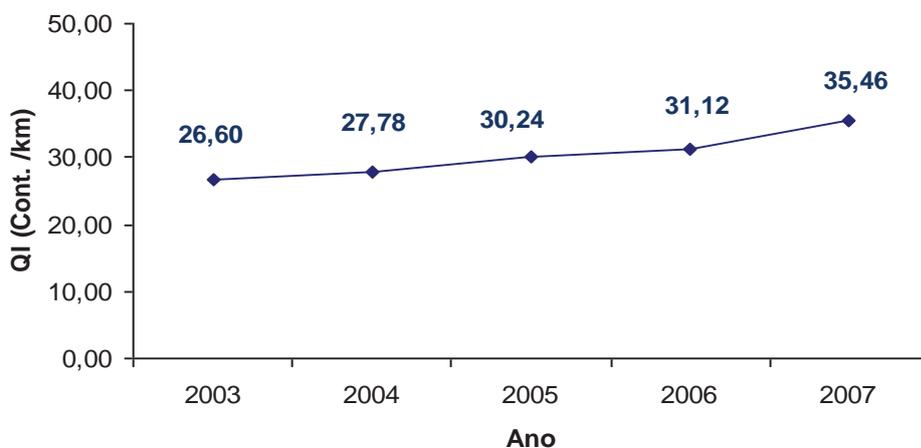


Figura 149 – Evolução QI, “Queiroz B”, Trecho 03

- **Cálculo QI por “Queiroz C”, Tabela 68.**

Tabela 68 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D0 Viga	SNC	QI calculado
2003	2.237.546,56	1,0	1,0	1,0	56,852	9,584	26,25
2004	4.590.295,29	1,0	2,0	1,0	56,852	9,584	27,87
2005	6.856.769,29	1,0	1,0	1,0	65,700	10,187	31,45
2006	9.061.822,86	1,0	2,0	1,0	65,700	10,187	32,46
2007	11.431.114,79	1,0	1,0	1,0	78,152	10,953	38,57

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 150.**

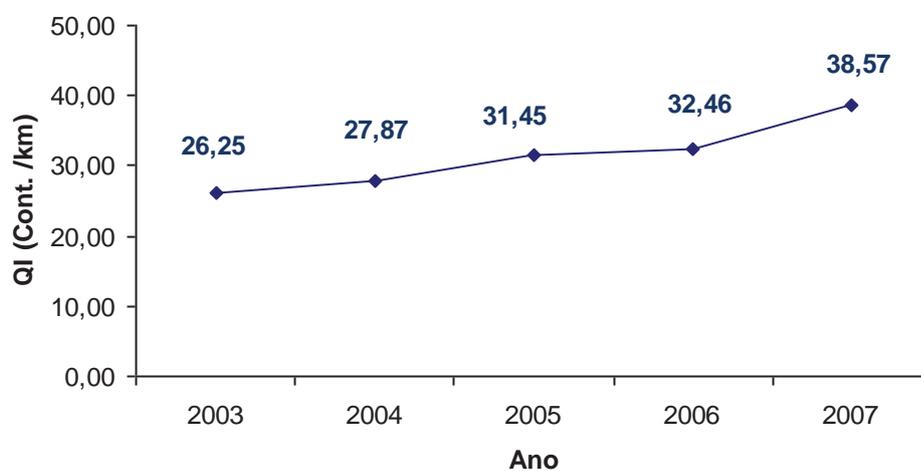


Figura 150 – Evolução QI, “Queiroz C”, Trecho 03

Trecho 04

- Cálculo QI por “Queiroz A”, Tabela 69.

Tabela 69 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	SNC	A	ER	Log QI	QI calculado
2003	2237546,56	10,0	1,0	1,0	1,350	22,38
2004	4590295,29	10,0	2,0	1,0	1,352	22,47
2005	6856769,29	10,0	3,0	1,0	1,353	22,54
2006	9061822,86	10,0	1,0	1,0	1,352	22,47
2007	11431114,79	8,0	2,0	1,0	1,359	22,85

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 151.

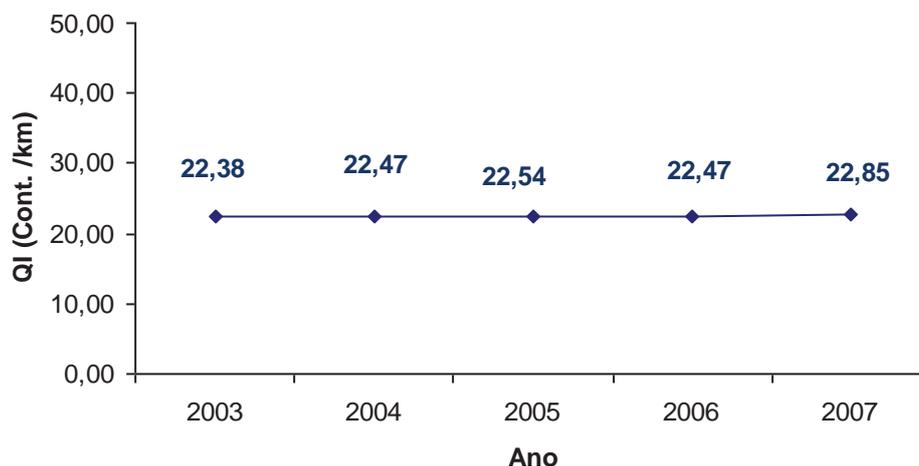


Figura 151 – Evolução QI, “Queiroz A”, Trecho 04

- Cálculo QI por “Queiroz B”, Tabela 70.

Tabela 70 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	QI calculado
2003	2237546,56	1,0	1,0	1,0	62,751	28,05
2004	4590295,29	1,0	2,0	1,0	62,751	29,38
2005	6856769,29	1,0	3,0	1,0	62,587	30,32
2006	9061822,86	1,0	1,0	1,0	62,587	29,62
2007	11431114,79	1,0	2,0	1,0	37,683	24,08

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 152.**

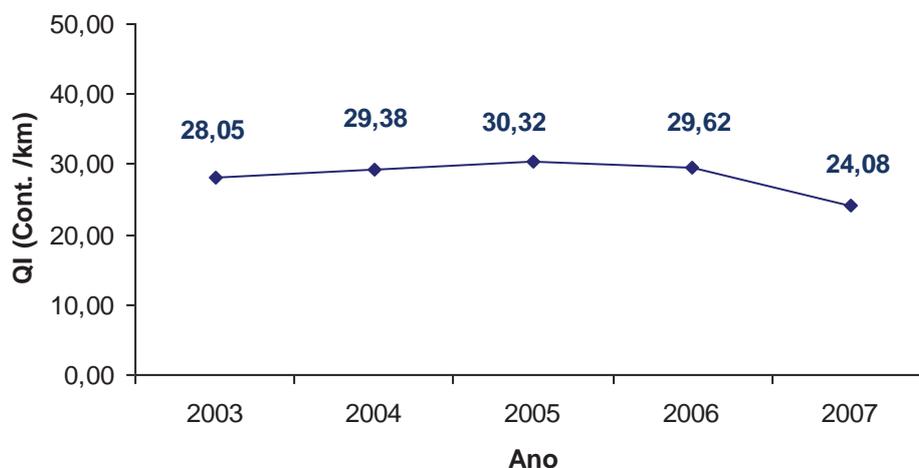


Figura 152 – Evolução QI, “Queiroz B”, Trecho 04

- **Cálculo QI por “Queiroz C”, Tabela 71.**

Tabela 71 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	SNC	QI calculado
2003	2.237.546,56	0,0	1,0	1,0	62,751	9,992	24,75
2004	4.590.295,29	0,0	2,0	1,0	62,751	9,992	26,56
2005	6.856.769,29	0,0	3,0	1,0	62,587	9,981	27,71
2006	9.061.822,86	0,0	1,0	1,0	62,587	9,981	27,49
2007	11.431.114,79	0,0	2,0	1,0	37,683	8,027	20,94

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 153.**

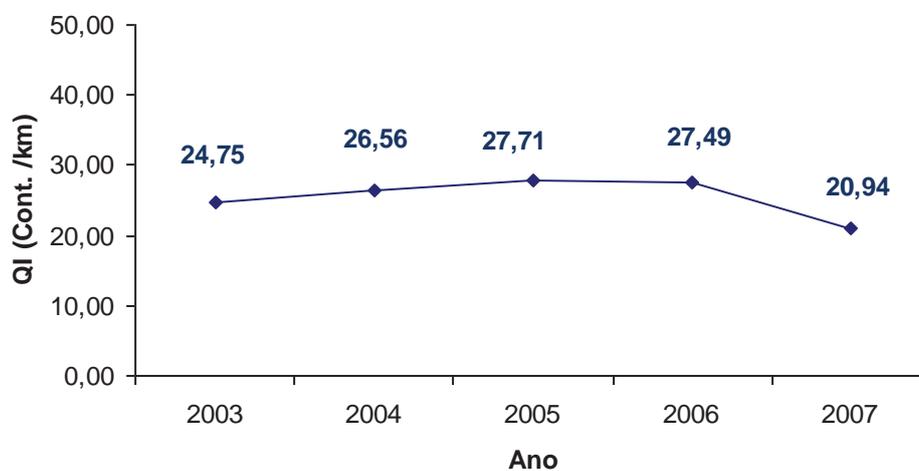


Figura 153 – Evolução QI, “Queiroz C”, Trecho 04

Trecho 05

- Cálculo QI por “Queiroz A”, Tabela 72.

Tabela 72 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	SNC	A	ER	Log QI	QI calculado
2003	2237546,56	8,9	1,0	1,0	1,352	22,51
2004	4590295,29	8,9	2,0	1,0	1,354	22,61
2005	6856769,29	9,5	1,0	1,0	1,352	22,51
2006	9061822,86	9,5	2,0	1,0	1,354	22,58
2007	11431114,79	8,8	3,0	1,0	1,357	22,74

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 154.

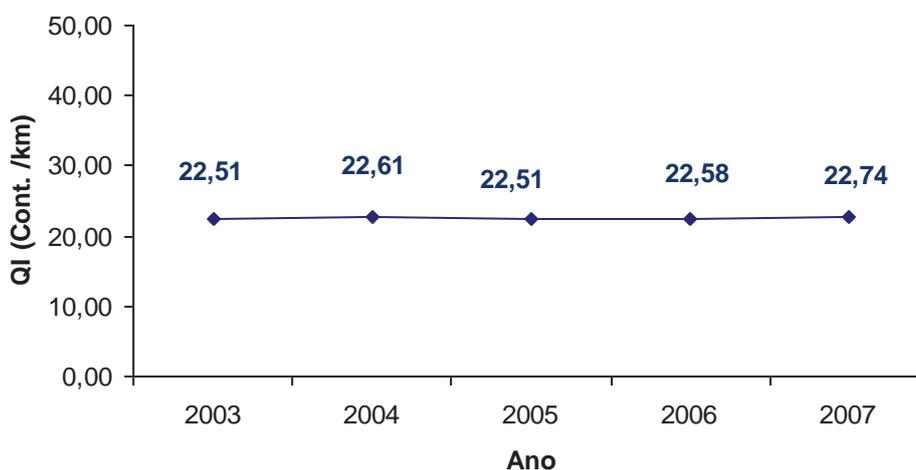


Figura 154 – Evolução QI, “Queiroz A”, Trecho 05

- Cálculo QI por “Queiroz B”, Tabela 73.

Tabela 73 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	QI calculado
2003	2237546,56	1,0	1,0	1,0	47,186	24,53
2004	4590295,29	1,0	2,0	1,0	47,186	25,51
2005	6856769,29	1,0	1,0	1,0	55,542	27,30
2006	9061822,86	1,0	2,0	1,0	55,542	28,08
2007	11431114,79	1,0	3,0	1,0	63,082	31,09

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 155.**

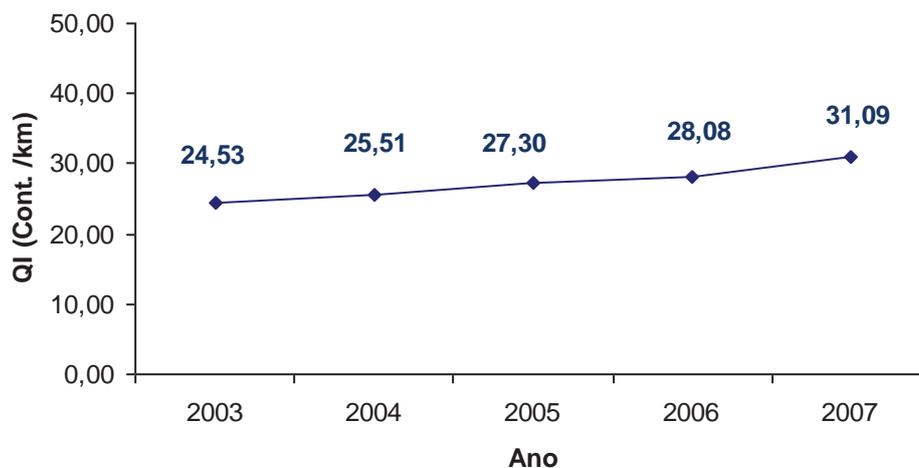


Figura 155 – Evolução QI, “Queiroz B”, Trecho 05

- **Cálculo QI por “Queiroz C”, Tabela 74.**

Tabela 74 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	SNC	QI calculado
2003	2.237.546,56	1,0	1,0	1,0	47,186	8,851	23,82
2004	4.590.295,29	1,0	2,0	1,0	47,186	8,851	25,17
2005	6.856.769,29	1,0	1,0	1,0	55,542	9,489	27,75
2006	9.061.822,86	1,0	2,0	1,0	55,542	9,489	28,62
2007	11.431.114,79	1,0	3,0	1,0	63,082	10,014	32,28

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 156.**

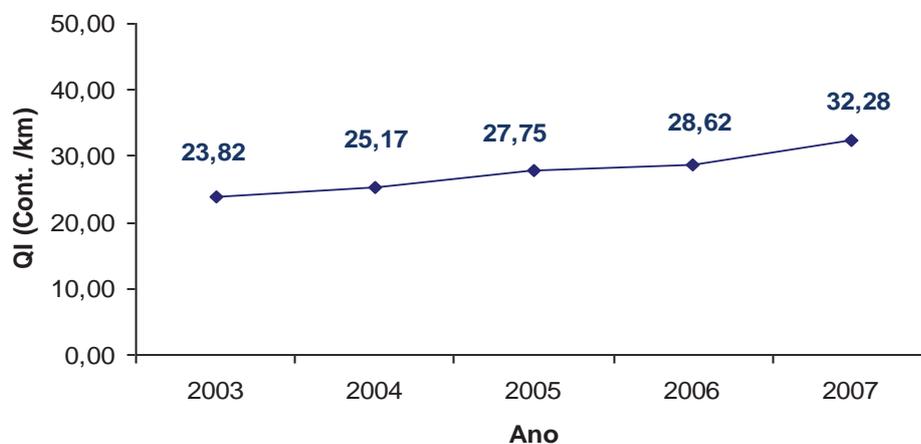


Figura 156 – Evolução QI, “Queiroz C”, Trecho 05

Trecho 06

- Cálculo QI por “Queiroz A”, Tabela 75.

Tabela 75 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	SNC	A	ER	Log QI	QI calculado
2003	2237546,56	8,5	1,0	1,0	1,353	22,56
2004	4590295,29	8,5	2,0	1,0	1,355	22,67
2005	6856769,29	8,1	1,0	1,0	1,357	22,74
2006	9061822,86	8,1	2,0	1,0	1,358	22,81
2007	11431114,79	8,5	1,0	1,0	1,356	22,71

- Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 157.

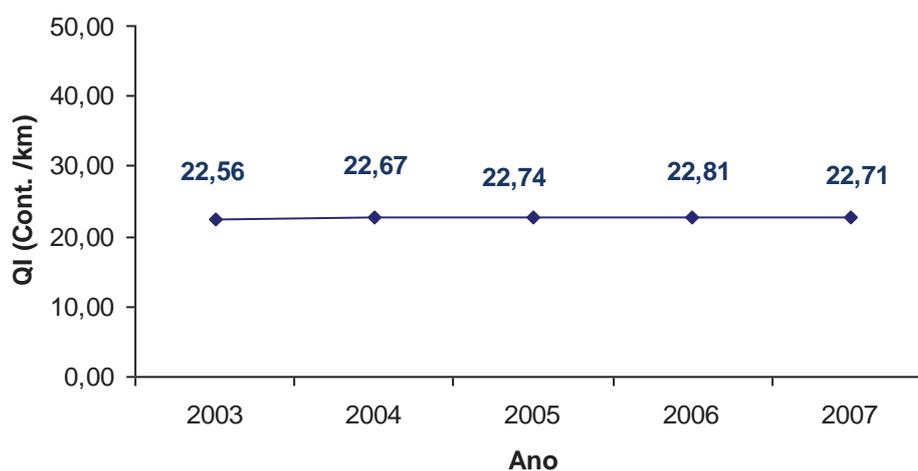


Figura 157 – Evolução QI, “Queiroz A”, Trecho 06

- Cálculo QI por “Queiroz B”, Tabela 76.

Tabela 76 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	QI calculado
2003	2237546,56	1,0	1,0	1,0	42,762	23,71
2004	4590295,29	1,0	2,0	1,0	42,762	24,61
2005	6856769,29	1,0	1,0	1,0	38,339	23,46
2006	9061822,86	1,0	2,0	1,0	38,339	24,10
2007	11431114,79	1,0	1,0	1,0	43,237	24,70

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 158.**

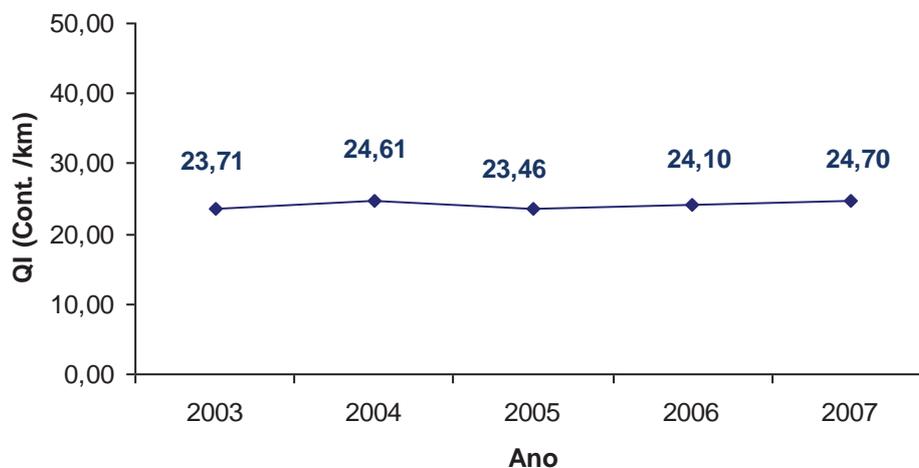


Figura 158 – Evolução QI, “Queiroz B”, Trecho 06

- **Cálculo QI por “Queiroz C”, Tabela 77.**

Tabela 77 - Resultado QI para o modelo

Ano	N	TR	A	ER	D ₀ Viga	SNC	QI calculado
2003	2.237.546,56	1,0	1,0	1,0	42,762	8,483	22,94
2004	4.590.295,29	1,0	2,0	1,0	42,762	8,483	24,19
2005	6.856.769,29	1,0	1,0	1,0	38,339	8,088	23,42
2006	9.061.822,86	1,0	2,0	1,0	38,339	8,088	24,12
2007	11.431.114,79	0,0	1,0	1,0	43,237	8,523	21,71

- **Evolução da irregularidade prevista pelo modelo, Figura 159.**

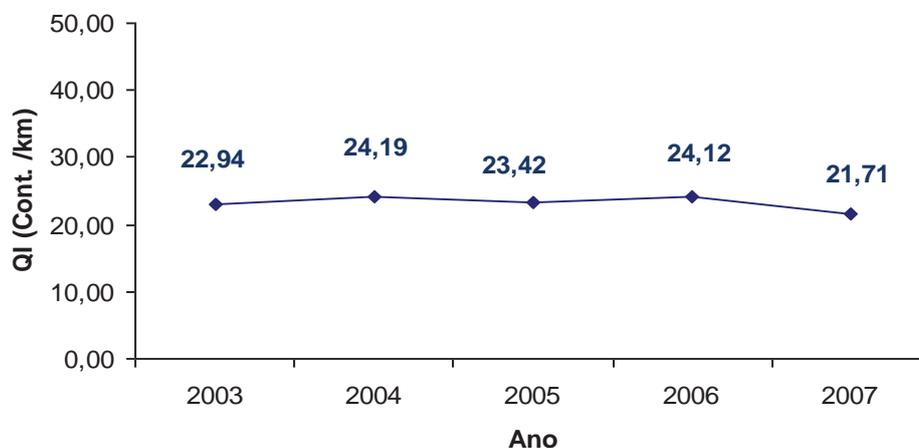


Figura 159 - Evolução QI, “Queiroz C”, Trecho 06

- Comportamento da irregularidade após intervenção DNER 159/85.

Trecho 01

- Cálculo QI, conforme DNER – PRO 159/1985, Tabela 78.

Tabela 78 - Resultado QI para o modelo

Intervenção	HR	QI Antes	QI Previsto
TSD	2,0	22,6	20,6
LAMA	0,7	35,2	30,4

- QI após a intervenção prevista pelo modelo, Figura 160.

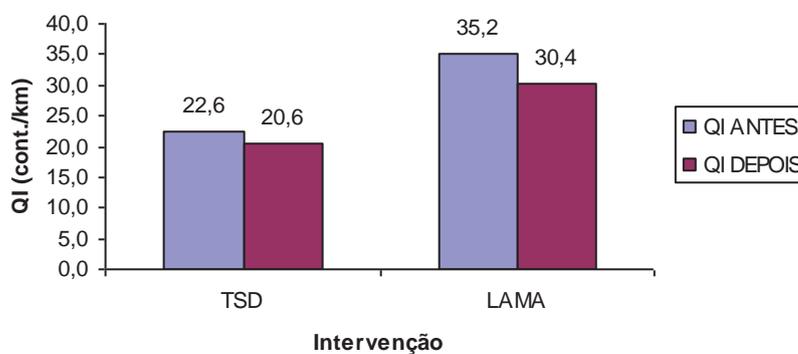


Figura 160 – QI após intervenção, Trecho 01

Trecho 02

- Cálculo QI, conforme DNER – PRO 159/1985, Tabela 79.

Tabela 79 - Resultado QI para o modelo

Intervenção	HR	QI Antes	QI Previsto
Micro	0,7	12,4	14,4

- **QI após a intervenção prevista pelo modelo, Figura 161.**

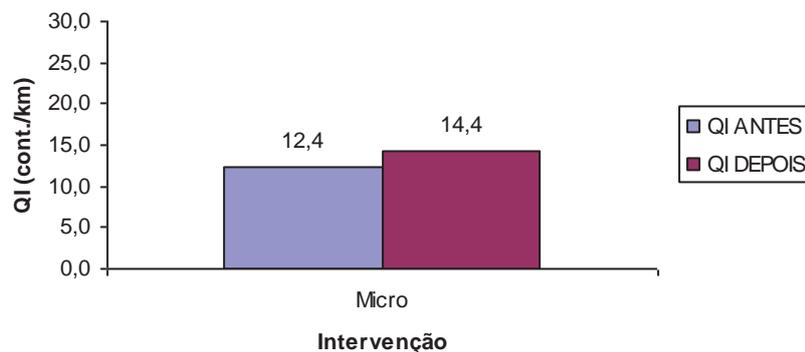


Figura 161 – QI após intervenção, Trecho 02

Trecho 03

- **Cálculo QI, conforme DNER – PRO 159/1985, Tabela 80.**

Tabela 80 - Resultado QI para o modelo

Intervenção	HR	QI Antes	QI Previsto
Micro	0,7	22,8	21,7
Micro	0,7	28,5	25,7

- **QI após a intervenção prevista pelo modelo, Figura 162.**

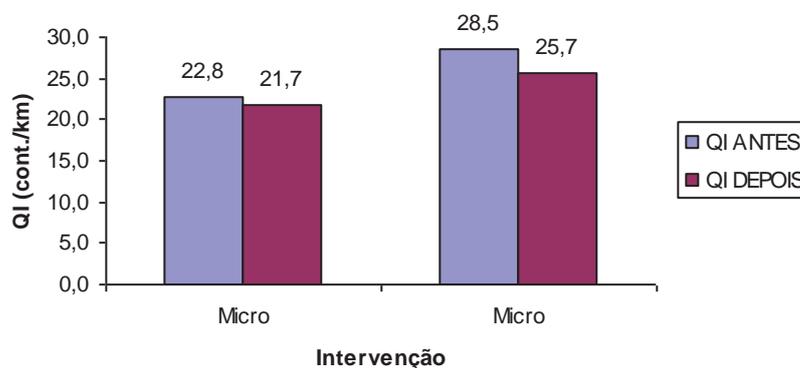


Figura 162 – QI após intervenção, Trecho 03

Trecho 04

- **Cálculo QI, conforme DNER – PRO 159/1985, Tabela 81.**

Tabela 81 - Resultado QI para o modelo

Intervenção	HR	QI Antes	QI Previsto
CBUQ	4,0	19,8	19,2

- QI após a intervenção prevista pelo modelo, Figura 163.

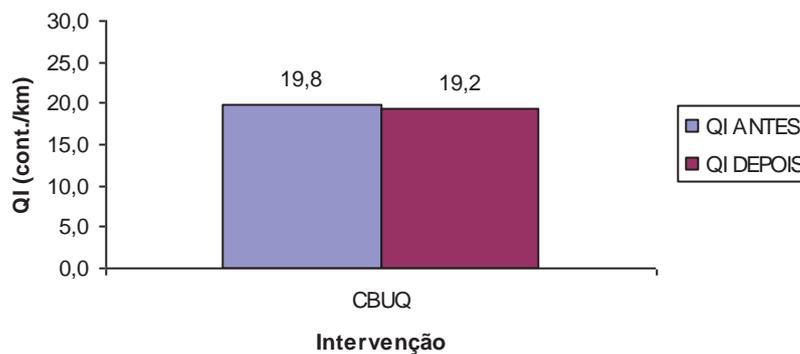


Figura 163 – QI após intervenção, Trecho 04

Trecho 05

- Cálculo QI, conforme DNER – PRO 159/1985, Tabela 82.

Tabela 82 - Resultado QI para o modelo

Intervenção	HR	QI Antes	QI Previsto
Micro	0,7	35,9	30,9

- QI após a intervenção prevista pelo modelo, Figura 164.

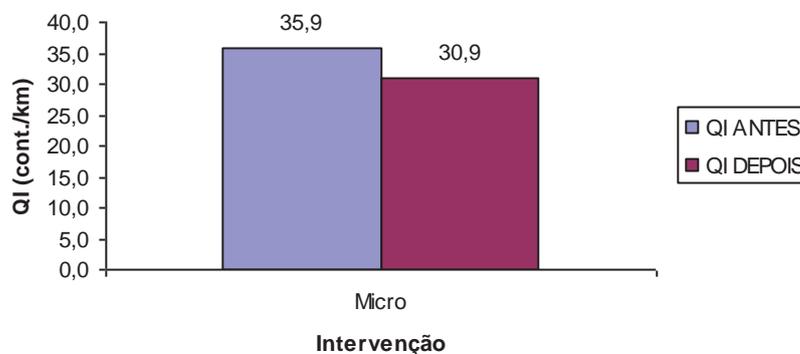


Figura 164 – QI após intervenção, Trecho 05

Trecho 06

- Cálculo QI, conforme DNER – PRO 159/1985, Tabela 83.

Tabela 83 - Resultado QI para o modelo

Intervenção	HR	QI Antes	QI Previsto
Micro	0,7	39,3	33,3
CBUQ	4,0	46,3	27,0

- QI após a intervenção prevista pelo modelo, Figura 165.

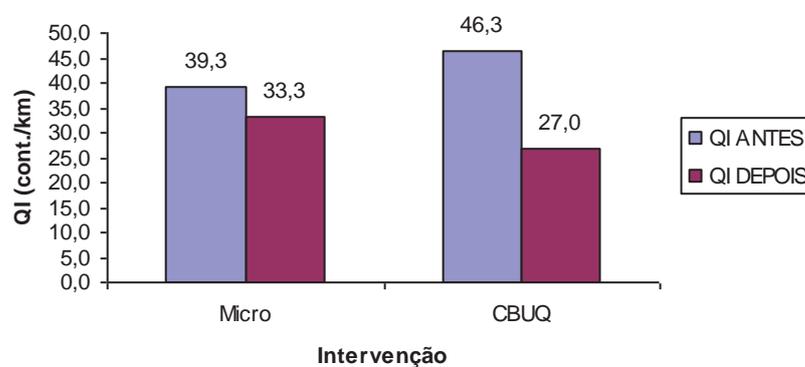


Figura 165 – QI após intervenção, Trecho 06

ANEXO VI

- **Evolução irregularidade longitudinal em pavimentos sem intervenções.**

Trecho 02

- **Cálculo SNC, Tabela 84.**

Tabela 84 – Trecho 02 – Cálculo SNC

Ano	DFWD	DVIGA	DVB	SNC est	SNC
2003	38,7	49,5	62,26	0,16	10,04
2004	38,7	49,5	62,26	0,16	10,04
2005	46,3	59,3	75,23	0,14	10,82
2006	46,3	59,3	75,23	0,14	10,82
2007	46,3	59,3	75,23	0,14	10,82

- **Previsão da evolução da irregularidade, Tabela 85.**

Tabela 85 – Trecho 02 – Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI Previsto	IRI Campo	QI calculado
2003							
2004							
2005	0,8	10,8	2,3	1,0	0,8	0,8	10,3
2006	0,8	10,8	4,5	2,0	0,8	0,8	10,6
2007	0,8	10,8	6,9	3,0	0,9		11,1

Trecho 04

- **Cálculo SNC, Tabela 86.**

Tabela 86 – Trecho 04 – Cálculo SNC

Ano	DFWD	DVIGA	DVB	SNC est	SNC
2003	38,3	49,0	61,58	0,16	9,99
2004	38,3	49,0	61,58	0,16	9,99
2005	38,2	48,9	61,41	0,16	9,98
2006	38,2	48,9	61,41	0,16	9,98
2007	23,0	29,4	35,47	0,23	8,03

- **Previsão da evolução da irregularidade, Tabela 87.**

Tabela 87 – Trecho 04 – Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI Previsto	IRI Campo	QI calculado
2003							
2004							
2005	1,5	10,0	2,3	1,0	1,5	1,5	20,1
2006	1,5	0,0	4,5	2,0	338,0	338,0	4393,8
2007	338,0	0,0	6,9	3,0	877,6		11408,9

Trecho 06

- **Cálculo SNC, Tabela 88.**

Tabela 88 – Trecho 06 – Cálculo SNC

Ano	DFWD	DVIGA	DVB	SNC est	SNC
2003	26,1	33,4	40,76	0,21	8,48
2004	26,1	33,4	40,76	0,21	8,48
2005	23,4	30,0	36,16	0,23	8,09
2006	23,4	30,0	36,16	0,23	8,09
2007	26,4	33,8	41,26	0,21	8,52

- **Previsão da evolução da irregularidade, Tabela 89.**

Tabela 89 – Trecho 06 – Paterson (1987)

Ano	IRI 0	SNC	N	AGE	IRI Previsto	IRI Campo	QI calculado
2003							
2004							
2005	3,2	8,1	2,3	1,0	3,3	3,3	42,4
2006	3,3	8,1	4,5	2,0	3,4	3,4	43,8
2007	3,4	8,5	6,9	3,0	3,5		45,9