RODRIGO MALUF BARELLA

Engenheiro Civil, FEI, 1997
Mestre em Engenharia, EPUSP, 2001

CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE
LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS COM
PERFILÔMETROS INERCIAIS

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. José Tadeu Balbo

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de janeiro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Barella, Rodrigo Maluf

**Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais / R.M. Barella. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.
362 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Avaliação de irregularidade 2. Rodovias 3. Gerência de pavimentos 4. Perfilômetro inercial I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

À Desirée e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor **José Tadeu Balbo** pela aceitação do desafio, confiança, orientação ao longo do caminho e pela amizade.

À minha amada esposa **Desirée** pela dedicação, suporte e compreensão nas minhas ausências e ainda pelo auxílio na revisão do texto.

Aos **meus pais** queridos, **Luiz** e **Ivone**, que sempre com amor tanto fizeram pela minha formação cultural e humana e aos meus irmãos que sempre auxiliaram no que puderam para me ajudar nesse objetivo.

Ao meu melhor amigo, sócio, confidente, crítico, revisor, sempre disponível quando precisei, sem o qual esse trabalho seria simplesmente impossível **Sergio Massara Filho**.

À **CAPES** pela concessão de bolsa de estudos pelo período de 1 ano.

Ao professor **Felippe Domingues** pelos primeiros ensinamentos a respeito da irregularidade de pavimentos.

Ao professor **José Alberto Quintanilha** pelo auxílio na análise estatística da correlação entre os índices IRI e QI.

Aos engenheiros **Wilson França** e **Severino Garrido**, primeiras pessoas do meio técnico que acreditaram e auxiliaram nas pesquisas iniciais de funcionamento do perfilômetro desenvolvido, assim como aos engenheiros **Alexandre Campos** e **Paula Moreira**, todos do grupo CCR, pela ajuda nos momentos finais.

Às diversas amizades do meio técnico público e privado que fiz ou cultivei durante essa pesquisa e que de alguma maneira colaboraram com ela, das seguintes instituições e empresas: USP, UFRGS, UFC, UFBA, UFRJ, UFSC, Mackenzie, ARTESP, DER-SP, DAER-RS, DAER-CE, DNIT, IPT, IBQP, Petrobrás, Infraero, Pavesys, Engefoto, Copavel, Planservi, Prosul, Tecpav, Panway, MRS, Autoban, Viaoeste, Nova Dutra, Renovias, Colinas, Ecovias, Univias, Ecosul, Concepa, Caminhos do Paraná entre outras.

À professora **Liedi Bernucci** e aos colegas **Edson de Moura** e **Oswaldo Sansone**, pelos trabalhos desenvolvidos em conjunto.

Ao amigo **Sergio Benevides** e à Profa. **Laura Motta** que não só acreditaram, como utilizaram o equipamento desenvolvido em suas pesquisas.

Ao professor **Steven Karamihas**, da Universidade de Michigan pelas explicações e troca de idéias a respeito da verificação de perfilômetros inerciais.

Ao Dr. **César Queiroz**, do Banco Mundial, pelos esclarecimentos e conversas mantidas.

Aos componentes da minha banca de qualificação, Prof. **Régis Martins Rodrigues** e Prof. **Edvaldo Simões da Fonseca Junior**, pelas oportunas críticas e correções que muito colaboraram para a melhoria desta pesquisa.

À Solotest, na pessoa do querido amigo Dr. **Waldemar Donadio** (*in memorian*) que sempre me incentivou a implantar metas altas e a persegui-las com dedicação.

À minha querida amiga **Anne Lis Silveira** pela disponibilidade em revisar parte do texto desta pesquisa.

Aos funcionários da secretaria do Departamento de Transportes da EPUSP, **Conceição, Edson, Simone e Sarah**, e também aos funcionários da Biblioteca de Engenharia Civil e Biblioteca Central de Escola Politécnica, Maria de Fátima, Leonor Madalena e Silvia Torre, por todo o suporte que tive durante esta pesquisa.

Aos amigos de infância, de colégio, das faculdades e das pós-graduações que muitas vezes não pude ver por causa da dedicação a esta pesquisa.

À **Deus** pela vida.

Ao contrário dos pavimentos, os melhores caminhos da vida apresentam seus desconfortos. A sabedoria está tanto em enfrentá-los com trabalho e dedicação, quanto na escolha dos rumos certos, já que os caminhos muito confortáveis podem ser os mais perigosos.

RESUMO

A presente pesquisa engloba a análise de diversos aspectos a respeito da avaliação de irregularidade longitudinal de pavimentos, tratando mais detidamente das situações em que tal avaliação é executada a partir de perfis longitudinais medidos com perfilômetros inerciais, tipo de equipamento que também é objeto de exame.

A análise é iniciada com o entendimento da evolução histórica deste tipo de avaliação funcional que abrange não só os equipamentos, como também os métodos de avaliação e os índices de irregularidade utilizados no Brasil.

O trabalho relata as principais etapas do desenvolvimento do perfilômetro inercial que foi usado nesta pesquisa, seus aspectos técnicos e operacionais, além dos resultados dos testes que evidenciaram seu funcionamento e também uma comparação com os resultados obtidos por um medidor de irregularidade do tipo resposta.

A pesquisa é completada com uma série de análises a respeito do método mais adequado para a verificação do funcionamento de perfilômetros inerciais, abarcando importantes recomendações para a escolha e medição de perfis de referência indispensáveis em tais verificações. São discutidos importantes aspectos do processamento de perfis para a determinação do QI que concluíram pela indicação da redução do espaçamento entre pontos do perfil para 25 cm. As incertezas dos índices QI e IRI obtidos a partir de perfilômetros inerciais são também abordadas, sendo que se constatou que o índice QI é afetado por grandes comprimentos de onda que normalmente não são considerados como irregularidade.

A correlação entre os índices QI e IRI é amplamente avaliada através de dados reais de perfis de centenas de quilômetros de rodovias, que evidenciaram a existência de grande dispersão em tal correlação indicando que o melhor é não correlacioná-los.

Por fim, a pesquisa deixa como legado a proposta de um anteprojeto de norma brasileira para este tipo de avaliação que abarca os julgamentos de todo o trabalho.

Palavras-chave: irregularidade; pavimento; avaliação funcional; perfilômetro inercial.

ABSTRACT

This research includes the analysis of several aspects regarding longitudinal pavement roughness evaluation, more specifically when these evaluations are done using an inertial profiler – kind of equipment that is also an object of this study.

The analysis is initiated with the comprehension of the historical evolution of this type of functional evaluation that not only encloses equipment, but also the methods and the roughness indexes more common in Brazil.

The main stages throughout of the development of the inertial profiler used on this research, its technical and operational features, the results of the tests that proved its good functionality and also the comparison of the results obtained with a response type roughness meter were incorporated.

The research is completed with a series of analysis regarding the methods more appropriate for the verification of inertial profilers functioning, including important recommendations for the choice and measurement of reference profiles, indispensable in such verifications. Important aspects concerning profiles processing for the QI determination were verified and concluded for reduction of the displacement between the profile elevations for 25 cm. The uncertainties of QI and IRI indexes obtained from inertial profiles measurements were also researched and at this opportunity it was verified that value of QI is affected by long wavelengths that usually are not considered roughness.

The correlation between QI and IRI indexes were widely evaluated using real data of hundreds of kilometers of highways profiles, and evidenced the existence of a great dispersion in such correlation what indicates that the best recommendation is not to correlate them.

Finally, this research leaves as a legacy the proposal of a first draft for a Brazilian standard for this type of roughness evaluation that accumulates most of the judgments presented here.

Keywords: road roughness; pavement; functional evaluation; inertial profiler.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Perfilômetro inercial desenvolvido como parte dos objetivos deste trabalho.	29
Figura 2.2 – Desenho esquemático do equipamento conhecido como “Viagraph”. Fonte: Gillespie (1992).	32
Figura 2.3 – Desenho esquemático do Perfilógrafo Rainhart. Fonte: Perera e Kohn (2002a).	34
Figura 2.4 – Fotografia do Perfilógrafo Rainhart. Fonte: Perera e Kohn (2002a).	34
Figura 2.5 – Desenho esquemático do BPR <i>Roughometer</i> . Fonte Gillespie (1992).	36
Figura 2.6 – Desenho esquemático do perfilômetro CHLOE. Fonte Gillespie (1992).	39
Figura 2.7 – Esquema de um quarto de carro, com o respectivo gráfico de resposta da suspensão a diferentes frequências. Fonte: Sayers e Karamihas (1998).	44
Figura 2.8 – Desenho original presente no primeiro pedido de patente dos EUA de um perfilômetro inercial, sob o número 3.266.302.	46
Figura 2.9 – Desenho original presente no segundo pedido de patente dos EUA de um perfilômetro inercial, sob o número 4.422.322.	46
Figura 2.10 – Desenho esquemático e fotografia do equipamento APL. Fonte: Caicedo et al. (2003)	47
Figura 2.11 – Fotografia do Dipstick (esq.); desenho esquemático do Dipstick em operação (centro); e fotografia do perfilômetro Walking Profiler (dir.). Fontes: Face Companies (2005) e Arrb Group Ltd (2005).	49
Figura 2.12 – Fotografia do medidor de irregularidade do tipo resposta na versão rebocada – Mirr (esq.); desenho esquemático do painel e do funcionamento do integrador IPR/USP. Fonte: Domingues (2004).	53
Figura 2.13 – Desenho esquemático do equipamento Merlin. Fonte: Cundill (1996).	58
Figura 2.14 – Fotografia de um perfilômetro inercial laser portátil. Fonte: Perera e Kohn (2002a).	60
Figura 2.15 – Fotografias de 3 instalações diferentes do equipamento PPS-2000. Fonte: Phoenix Scientific Inc (2004a).	62

Figura 2.16 – Desenho esquemático de funcionamento de um medidor de irregularidade do tipo resposta. Fonte: Sayers e Karamihas (1998). ...	65
Figura 2.17 – Diagramas de ganho do IRI e QI de acordo com o número de ondas por metro (inverso do comprimento de onda) das inclinações dos perfis. Fonte: Sayers et al. (1986a).	90
Figura 2.18 – Desenho esquemático de um nível e mira ressaltando os elementos principais dos medidores de perfil. Fonte: Sayers e Karamihas (1998).	103
Figura 2.19 – Esquema de funcionamento de um perfilômetro inercial, evidenciando-se os três elementos presentes em medidores de perfil. Fonte: Sayers e Karamihas (1998).	104
Figura 3.1 – Esquema de funcionamento interno de um módulo de medição laser por triangulação.	130
Figura 3.2 – Fotografia da montagem da primeira versão do perfilômetro inercial desenvolvido.	134
Figura 3.3 – Tela de abertura da primeira versão do <i>software</i> Ciberlogger usado para a coleta dos dados do perfilômetro em campo, com destaque para a janela das informações do trecho a ser avaliado.	137
Figura 3.4 – Tela de ensaio da primeira versão do <i>software</i> Ciberlogger usado para a coleta dos dados do perfilômetro em campo. Apenas os módulos 1 e 5 estavam ligados quando a tela foi capturada.	138
Figura 3.5 – Tela inicial do <i>software</i> Cibershell.	141
Figura 3.6 – Tela do <i>software</i> Cibershell com a aba “Obs” selecionada.	142
Figura 3.7 – Tela do <i>software</i> Cibershell, uma vez pressionado o botão “ObsParser”.	142
Figura 3.8 – Tela do <i>software</i> Cibershell, na aba “Nomes”, depois de pressionado o botão “Acerta Nomes”.	143
Figura 3.9 – Tela do <i>software</i> Cibershell, na aba “Cortes”, depois de realizadas 3 extrações de trechos a serem processados com o uso do botão “FixCut”.	144
Figura 3.10 – Tela do <i>software</i> Cibershell, na aba “Cortes”, depois de pressionado o botão “FixCut” visando realizar a extração dos dados entre o km 44 e o km 46.	145

Figura 3.11 – Tela do <i>software</i> Ciphershell, na aba “Relatórios”, selecionada para o cálculo do QI dos módulos L1 e L4 a cada 200 metros.....	145
Figura 3.12 – Tela do <i>software</i> Ciphershell, na aba “Excel”.....	146
Figura 3.13 – Exemplo do relatório final gerado pelo programa Ciphershell para o primeiro dos trechos da figura 3.11.....	147
Figura 3.14 – Gráfico comparativo do perfil obtido estaticamente com o Dipstick, com os perfis obtidos nas velocidades de 40, 50 e 60 km/h.	152
Figura 3.15 – Gráfico comparativo do perfil obtido estaticamente com o Dipstick, com os perfis obtidos nas velocidades de 70, 80, 90 e 100 km/h.....	152
Figura 3.16 – Resultado médio da irregularidade longitudinal (IRI) das bases de cada uma das pistas da Avenida dos Bandeirantes, cidade de São Paulo, avaliadas com o auxílio de diferentes equipamentos.....	162
Figura 3.17 – Correlação existente entre a diferença das medidas de irregularidade de um medidor tipo resposta e de um perfilômetro, em 60 bases de 100 metros de comprimento, em função das medidas obtidas pelo perfilômetro. As medidas utilizadas foram executadas no mês de Setembro-04 e de Dezembro-04/Janeiro-05.	162
Figura 3.18 – Gráfico de áreas evidenciando por cores as diferentes faixas de QI medidas em uma pista de aeródromo.....	167
Figura 3.19 – Fotografia da montagem do perfilômetro inercial utilizada nas medições da pista aeroportuária, cujos resultados estão na figura 3.18.	168
Figura 3.20 – Desenho ilustrativo de um perfilômetro inercial com três módulos visando a determinação do afundamento plástico médio das trilhas de roda.....	169
Figura 3.21 – Tela de versão posterior do <i>software</i> Ciberlogger contemplando uma caixa de visualização da situação instantânea dos afundamentos plásticos nas trilhas de roda.....	171
Figura 3.22 – Exemplo de montagem do perfilômetro laser visando a medição do degrau entre pista e acostamento.....	173
Figura 4.1 – Gráfico que representa o ganho embutido no índice IRI para os diversos comprimentos de onda. Fonte: Karamihas (2002).	194
Figura 4.2 – Gráfico que representa os resultados do teste de balanço estático e dinâmico acompanhado da amplitude de balanço.	198

Figura 4.3 – Diferenças entre valores de QIs (cont/km), calculados sobre as mesmas seções, alterando-se somente a resolução das medidas de elevação do perfil.	201
Figura 4.4 – Diferenças entre valores de IRIs (m/km), calculados sobre as mesmas seções, alterando-se somente a resolução das medidas de elevação do perfil.	201
Figura 4.5 – Fotografias dos pavimentos da Base A – Bandeirantes (à esquerda) mostrando o equipamento tipo Dipstick utilizado e da Base B – USP 1 (à direita).	222
Figura 4.6 – Fotografia do pavimento da Base C – USP 2.	222
Figura 4.7 – Perfis não processados, referentes a medições da “Base USP 1” obtidos com o Dipstick e com o perfilômetro inercial.	224
Figura 4.8 – Os mesmos perfis da figura 4.5 (Base USP 1), processados com o filtro do índice IRI, após o procedimento de correlação cruzada para verificação de exatidão, que produziu $IC_E = 0,95$	224
Figura 4.9 – Extrato com 1 m de comprimento de perfil longitudinal não filtrado com junta de dilatação e o mesmo perfil após a aplicação de média móvel com 150 mm.	228
Figura 4.10 – Extrato com 1 m de comprimento de perfil longitudinal não filtrado com junta de dilatação, o mesmo perfil após a aplicação de média móvel com 150 mm e por fim após a aplicação do método de exclusão de pontos dispersos.	229
Figura 4.11 – Extrato com 1 m de comprimento de perfil longitudinal não filtrado com quatro medições inadequadas ao perfil, o mesmo perfil após a aplicação de média móvel com 150 mm e por fim após a aplicação do método de exclusão de pontos dispersos em dois percentuais distintos.	233
Figura 4.12 – Extrato com 1 m de comprimento de perfil longitudinal não filtrado com junta de dilatação, o mesmo perfil após a aplicação de média móvel com 150 mm antes e depois da aplicação do método de exclusão de pontos dispersos e por fim apenas com média móvel de 250 mm.	235
Figura 4.13 – Representação gráfica dos percentuais de variação do valor do QI para diferentes espaçamentos entre pontos de 12 perfis longitudinais.	240

Figura 4.14 – Gráfico do ganho do quociente de irregularidade (QI), referente a perfis longitudinais em inclinações.	249
Figura 4.15 – IRI (m/km) calculado a partir do perfil e o mesmo índice obtido com base no QI (cont/km) calculado, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil.	258
Figura 4.16 – QI (cont/km) calculado a partir do perfil e o mesmo índice obtido com base no IRI (m/km) calculado, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil.	258
Figura 4.17 – Representação cartesiana de todos os pares de QI x IRI calculados.	261
Figura 4.18 – Representação cartesiana dos pares QI x IRI, uma vez retirados 41 pontos para os quais foram encontradas situações adversas.	262
Figura 4.19 – Distribuição da quantidade de segmentos de 200m em função do QI.	262
Figura 4.20 – Histogramas com a distribuição dos valores do IRI para 3 QI diferentes.	263
Figura 4.21 – Representação gráfica e regressão linear da média dos IRI por valor de QI.	263
Figura 4.22 – Gráfico <i>box plot</i> da variação do IRI em função de cada valor de QI, para $QI < 41$ cont/km.	264
Figura 4.23 – Gráfico <i>box plot</i> da variação do IRI em função de cada valor de QI, para $QI > 40$ cont/km.	265
Figura 4.24 – Representação gráfica da Média X Desvio Padrão dos IRIs para cada valor de QI.	266
Figura 4.25 – Coeficiente de variação do IRI em função dos valores do QI.	266
Figura 4.26 – Representação da distribuição da variação amostral total de IRI em função do QI.	267
Figura 4.27 – Média dos valores de IRI em função de QI e a respectiva regressão linear dos pontos, com a constante arredondada para o valor 10.	268
Figura 4.28 – IRI (m/km) calculado a partir do perfil e o mesmo índice obtido com base no QI (cont/km) calculado, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil e também através do modelo obtido nesta pesquisa.	269

Figura 4.29 – QI (cont/km) calculado a partir do perfil e o mesmo índice obtido com base no IRI (m/km) calculado, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil e também através do modelo obtido nesta pesquisa.....269

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados auxiliares para o cálculo do QI em um trecho de 50 metros.	92
Tabela 2.2 – Resultados auxiliares para o cálculo do IRI em um trecho de 50 metros.	96
Tabela 2.3 – Resultados de uma pesquisa feita em 2001, sobre o tipo de equipamento usado para a avaliação da irregularidade nos estados norte-americanos. Fonte: Ksaibati e Mahmood (2002).....	121
Tabela 3.1 – Índices de irregularidade calculados a partir dos perfis.	154
Tabela 3.2 – Resultados do QI médio obtido com nivelamento e do QI médio obtido com o perfilômetro inercial.	156
Tabela 3.3 – Resultados do QI obtidos em todas as medições do perfilômetro inercial.	157
Tabela 3.4 – Resultados do QI médio obtido com nivelamento e com o perfilômetro inercial com perfis arredondados para milímetros.	158
Tabela 3.5 – Resultado das avaliações de irregularidade longitudinal realizadas com medidor do tipo resposta e com o perfilômetro laser, em 30 bases na Avenida dos Bandeirantes, São Paulo, SP.....	161
Tabela 4.1 – Irregularidade QI (cont/km) das seções utilizadas.	200
Tabela 4.2 – Resultados dos Cálculos de QI e IRI a partir dos perfis originais e arredondados.	202
Tabela 4.3 – Resultados dos cálculos dos índices de irregularidade QI e IRI realizados a partir dos perfis longitudinais obtidos com o Dipstick e com o perfilômetro inercial, ambos considerando medidas a cada 25 cm, apenas no trecho útil de 200 metros de cada uma das bases.	223
Tabela 4.4 – Diferenças percentuais dos resultados dos índices de irregularidade IRI e QI medidos a partir dos dois equipamentos diferentes.	223
Tabela 4.5 – Resultados referentes às correlações cruzadas entre perfis de referência e as 10 medições do perfilômetro, para verificação da exatidão.	225
Tabela 4.6 – Resultados referentes às 45 correlações cruzadas entre perfis obtidos com o perfilômetro em cada base, visando a verificação da repetitividade.....	226

Tabela 4.7 – Resultados finais das correlações cruzadas para as 3 bases nos critérios de exatidão e repetitividade.	226
Tabela 4.8 – Resultados dos cálculos dos índices IRI e QI para 2 perfis com 6 km de comprimento, filtrados de 3 maneiras diferentes.	231
Tabela 4.9 – Resultados dos cálculos dos índices IRI e QI para 2 perfis com 31km de comprimento filtrados de 4 maneiras diferentes.	232
Tabela 4.10 – Valores do QI de 12 trechos de 200 m, calculados a partir de perfis com 50 cm de espaçamento.	238
Tabela 4.11 – Variação percentual do QI, para diferentes espaçamentos entre pontos do perfil, quando comparado com o valor referente ao espaçamento de 20mm.	239
Tabela 4.12 – Relação entre o índice de concordância e a diferença esperada no valor do IRI.	245
Tabela 4.13 – Resultados da estimação de erro que pode conter os índices IRI e QI, quando medidos a partir de um perfilômetro que apresente $IC_E = 0,88$	245
Tabela 4.14 – Resultados dos cálculos do QI e IRI de segmentos de 200 m de um greide teórico, de um perfil medido com perfilômetro e do perfil resultante da soma dos dois perfis anteriores visando a verificação da influência dos grandes comprimentos de onda nos valores de tais índices de irregularidade.	251
Tabela 4.15 – Resultados dos cálculos do QI e IRI do perfil original, somado ao greide idealizado, filtrado com filtro tipo Butterworth para retirar os comprimentos de onda maiores que 60 metros.	253
Tabela 4.16 - Cálculo QI e IRI de acordo com os modelos de correlação mais utilizados.	257

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASTHO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPV	Associação Brasileira de Pavimentação
APL	Analizador de Perfil Longitudinal
ARS	<i>Average Rectified Slope</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento em Trilha de Roda
CCD	Charge-Coupled Device
CHLOE	<i>Carey, Hutckins, Lathers and Other Engineers</i>
CRI	<i>City Roughness Index</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura em Transportes
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
IC	Índice de Concordância (da Correlação Cruzada entre Perfis)
IRI	<i>International Roughness Index</i>
IRRE	<i>International Road Roughness Experiment</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LTPP	<i>Long Term Pavement Performance</i>
MERLIN	<i>Machine for Evaluating Roughness using Lowcost Instrumentation</i>
PICR	Pesquisa sobre o Inter-relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovia
PSD	<i>Position Sensitive Device</i>
PSI	<i>Present Serviceability Index</i>
PSR	<i>Present Serviceability Rating</i>
QI	Quociente de Irregularidade (conhecido também com QI _r)
QI*	A medida de irregularidade obtida dos medidores do tipo resposta usados na PICR
QI verdadeiro	QI determinado por simulação do equipamento <i>BPR Roughometer</i>
RARS ₈₀	<i>“Reference” Average Rectified Slope</i> a 80 km/h
RBC	Rede Brasileira de Calibração
RPUG	Road Profiler User Group
SMA	<i>Stone-Mastic Asphalt</i> ou <i>Stone Matrix Asphalt</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa da pesquisa	21
1.2	Objetivos	23
1.3	Método	24
1.4	Organização da tese	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE CRÍTICA	27
2.1	Conceituação do tema	27
2.2	Histórico das avaliações funcionais e de irregularidade longitudinal de pavimentos	31
2.2.1	Os primeiros passos da história da avaliação da irregularidade	32
2.2.2	O conceito da serventia e o perfilômetro inercial	37
2.2.3	Os anos 80 e os índices de irregularidade atuais	48
2.3	Os equipamentos mais usados atualmente no Brasil na avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos	63
2.4	A influência da irregularidade na vida útil do pavimento e no custo operacional dos veículos	70
2.5	A utilização dos dados de irregularidade e do perfil longitudinal de um pavimento	79
2.6	Os índices que representam a irregularidade de um pavimento	85
2.6.1	O cálculo dos índices de irregularidade QI e IRI a partir de um perfil longitudinal	91
2.7	Os perfilômetros inerciais e suas principais características	101
2.7.1	As características técnicas de perfilômetros inerciais	107
2.7.2	Algumas aplicações e limitações dos perfilômetros inerciais	116
2.7.3	O uso de perfilômetros inerciais no mundo	121
2.8	As principais fontes de erros nas medidas de perfilômetros inerciais	123
3	DESENVOLVIMENTO, FUNCIONAMENTO, OPERAÇÃO E TESTES INICIAIS DO PERFILÔMETRO INERCIAL	128
3.1	Desenvolvimento do perfilômetro inercial usado nesta pesquisa	128
3.2	Operação e funcionamento do perfilômetro inercial	136
3.3	Resultados dos testes operacionais do perfilômetro	150
3.4	Outras possibilidades de um perfilômetro inercial e de seus resultados	164
3.4.1	As posições dos módulos para a medição de perfis e uma proposta de visualização	165
3.4.2	A utilização do perfilômetro para a medida de propriedades ligadas ao perfil transversal	168
3.4.3	O processamento computacional de perfis de pavimentos	174
3.4.4	A possibilidade de medição conjunta da macrotextura	176

4	APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	178
4.1	A verificação do funcionamento de perfilômetros inerciais	178
4.1.1	Análise crítica dos testes de verificação de exatidão e repetitividade das normas norte-americanas de perfilômetros inerciais	179
4.1.2	O teste de balanço e o que pode ser observado com ele	190
4.1.3	As diferenças causadas por medidas de elevação dos perfis com diferentes resoluções	199
4.1.4	A obtenção de perfis longitudinais de referência para verificação de perfilômetros inerciais	204
4.1.5	A verificação da repetitividade e exatidão das medidas de perfilômetros inerciais	213
4.2	O tratamento de dados para evitar a influência indevida de juntas e trincas nos perfis medidos por perfilômetros	227
4.3	O tratamento do perfil longitudinal obtido para o cálculo do QI	234
4.4	A incerteza dos índices de irregularidade e a fiscalização de contratos	243
4.4.1	As incertezas nos índices relativas ao perfilômetro e sua operação	244
4.4.2	Os comprimentos de onda que afetam o quociente de irregularidade QI	248
4.5	A correlação entre os índices IRI e QI – algumas considerações	254
4.5.1	A verificação dos modelos atuais de correlação	255
4.5.2	A proposição de um novo modelo de correlação	259
4.6	Exposição de motivos da proposição do anteprojeto de norma	272
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	275
5.1	Conclusões da pesquisa	275
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	281
5.3	Considerações finais	283
	REFERÊNCIAS	285
	APÊNDICE A	306
	APÊNDICE B	311
	APÊNDICE C	339
	APÊNDICE D	360
	VITA	362

1 INTRODUÇÃO

Uma malha rodoviária bem conservada é um importante fator para o desenvolvimento econômico e social de qualquer nação. A construção e manutenção de uma grande malha rodoviária é, sem dúvida, um grande investimento nacional, pois consome parte considerável do orçamento de qualquer país que leve o tema a sério.

A pena para as nações que não investem o suficiente em transporte é a perda de competitividade internacional que alimenta o subdesenvolvimento, pois o custo operacional do transporte para os usuários representa uma soma maior do que aquela que o Estado deixou de investir. A lógica é bastante simples e clara para qualquer pessoa que observe atentamente as políticas de transporte de diferentes países.

Infelizmente é fácil perceber que há anos nosso país tem investido muito menos do que deveria em transportes, especialmente no modal rodoviário que ainda é o mais usado e mais disponível em nosso país-continente.

É vital iniciar um trabalho destes, realizado em uma universidade mantida pelo Poder Público, expondo claramente a situação atual da área rodoviária do país, para que se possa ao mesmo tempo pontuar, também de forma clara, como ele poderá ser útil para contribuir com a reversão do quadro presente.

Como se poderá perceber ao longo da leitura, o tema desenvolvido é de suma importância para auxiliar na otimização do uso dos recursos disponíveis a qualquer gestor viário, uma vez que a irregularidade longitudinal de um pavimento é a medida que melhor expressa o quão bem ou o quão mal aquele pavimento se presta aos seus fins básicos, além de estar diretamente relacionada aos custos operacionais e à vida útil do pavimento.

Diversas formas de se avaliar a irregularidade longitudinal de um pavimento serão abordadas, naturalmente com dedicação maior para a medida realizada com perfilômetros inerciais, principal objeto desta pesquisa.

1.1 Justificativa da pesquisa

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 considerada um critério importante na aceitação de um pavimento. 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).

A importância atribuída à irregularidade longitudinal de pavimentos cresceu ao longo do tempo. No mundo moderno, foi a invenção do motor à explosão que impulsionou de forma cabal o desenvolvimento rodoviário mundo afora, amparado pelo desenvolvimento concomitante da engenharia rodoviária. Foram estabelecidas técnicas de projeto, dimensionamento e de manutenção de rodovias, assim como conceitos, tais como o da serventia de um pavimento, que mais tarde foi correlacionada com a medida da irregularidade longitudinal.

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.

Conforme o breve relato histórico demonstra, em termos de avaliação funcional de um pavimento, a medida da irregularidade longitudinal é de suma importância para usuários, construtores e gestores de uma malha rodoviária.

Aliada à importância desta medida, o que motivou esta pesquisa foi o fato de, no Brasil, praticamente a totalidade das medidas de irregularidade longitudinal eram realizadas, até o ano de 2002, com os antigos equipamentos do tipo resposta, praticamente aposentados nos países mais desenvolvidos dada a dificuldade em se gerar medidas confiáveis com eles e pela pouca praticidade de uso.

Assim, depois de verificar que a pouca informação, os preços e a manutenção dos equipamentos importados eram os principais entraves à disseminação dos perfilômetros inerciais no Brasil, resolveu-se por estudar o estado da arte em avaliação de irregularidade, desenvolver localmente um perfilômetro inercial, validá-lo com medidas comparativas em campo e terminar por propor um anteprojeto de norma brasileira para a medição com este tipo de equipamento, visando gerar como resultados mediatos da pesquisa um salto qualitativo efetivo nas avaliações funcionais de pavimentos de nosso país.

Como esta pesquisa só foi concluída em 2007, durante seu curso já puderam ser observados parte dos resultados pretendidos, vez que houve uma mudança substancial na avaliação funcional de rodovias, auxiliada pela conscientização que algumas das publicações preliminares dos resultados desta pesquisa em congressos ajudaram a construir. No ano da conclusão da pesquisa, por exemplo, já foi possível notar nos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul, que várias concessionárias de rodovias já não mais aceitavam as medidas de irregularidade feitas com os medidores do tipo resposta.

Outro sinal importante da conscientização nacional a este respeito pôde ser visualizado no edital de concorrência pública do Departamento Nacional e Infra-Estrutura de Transportes (2005), que em seu texto exigiu justificadamente a prestação de serviços de avaliação de irregularidade longitudinal com perfilômetros inerciais e vetou a utilização de equipamentos do tipo resposta.

1.2 Objetivos

Os objetivos imediatos desta pesquisa são cinco:

- Pesquisar as principais diferenças entre as avaliações de irregularidade longitudinal realizadas com os medidores do tipo resposta (normalizadas em nosso país), e aquelas realizadas com os perfilômetros inerciais (ainda não normalizadas no Brasil).
- Discutir, através do estudo bibliográfico e principalmente através do desenvolvimento de um perfilômetro inercial e da validação de suas medidas, sobre: os componentes, o funcionamento, a operação e os fatores que influenciam a avaliação da irregularidade longitudinal de um pavimento realizada com um perfilômetro inercial.
- Discutir os diversos detalhes relacionados à medição de perfis longitudinais e ao cálculo dos índices de irregularidade IRI e QI, assim como as principais normas estrangeiras que tratam do tema.
- Verificar os modelos de correlação mais utilizados entre os índices de irregularidade IRI e QI; propor um novo modelo de correlação.
- Propor um anteprojeto de norma brasileira para a avaliação de irregularidade longitudinal com perfilômetros inerciais que compreenda os requisitos mínimos dos componentes de um perfilômetro, procedimentos para a verificação do funcionamento do equipamento e ainda os procedimentos básicos de operação, visando aumentar a confiabilidade e a reprodutibilidade deste tipo de avaliação e também buscando compatibilizá-la com as normas brasileiras vigentes, ou seja, com o cálculo do QI.

O objetivo mediato da pesquisa, mais amplo, é aumentar o entendimento e os subsídios técnicos sobre a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos e sobre os perfilômetros inerciais.

Esta pesquisa não tem a pretensão de esgotar o tema ou abranger todos os aspectos relacionados à avaliação da irregularidade de pavimentos, pois este tema, como se verá, é bastante amplo.

1.3 Método

Para que fosse possível atingir os objetivos firmados, o trabalho inicial consistiu na realização de um amplo levantamento e estudo bibliográfico para o entendimento claro não só do estado da arte em matéria de avaliação de irregularidade e avaliação funcional de pavimentos, como também da situação brasileira acerca do tema, o que incluiu a coleta de informações escritas nacionais e internacionais, assim como de usuários dos levantamentos de irregularidade, e também de técnicos que realizam tais avaliações. Os estudos realizados contemplaram também a avaliação das normas nacionais e internacionais que regulam o tema.

Concomitantemente foram iniciados os estudos específicos sobre o funcionamento e as peculiaridades dos perfilômetros inerciais, visando determinar quais seriam as características primordiais dos componentes de um equipamento deste tipo. Em seguida foram aplicados os esforços no sentido do desenvolvimento de um protótipo de um perfilômetro inercial, até porque a opção de aquisição de um equipamento importado para o entendimento do assunto inviabilizaria esta pesquisa.

Com o equipamento pronto, seguiram-se testes de funcionamento, medição de muitos trechos de campo, análise de perfis, avaliação de resultados, determinação das limitações e fatores intervenientes neste tipo de medida.

Pelo fato da comparação entre as medidas de perfis longitudinais de pavimentos realizadas com equipamentos estáticos e com perfilômetros inerciais ser de grande importância, foram estudados os fatores intervenientes neste tipo de comparação, visando deixar registrado um legado importante para as futuras comparações deste tipo, que sem dúvida deverão ser mais freqüentes com a popularização deste tipo de equipamento.

Experimentou-se ainda uma comparação de resultados de índices de irregularidade obtidos por medidas efetuadas por equipamentos do tipo resposta, para que se pudesse fazer uma análise comparativa dos resultados dos dois tipos de equipamentos – muito embora se saiba de antemão que tal experimento serviria para verificar a consistência das medidas de um medidor do tipo resposta, e não o contrário.

Utilizando dados de muitos quilômetros de rodovias avaliadas, foi discutida também a questão dos modelos de correlação entre IRI e QI, que teve como resultado a proposição de um novo modelo de correlação e de um alerta em relação à dispersão dos valores na relação entre os dois índices.

Para atingir o objetivo da proposição de um anteprojeto de norma, foi efetuada uma análise crítica das normas internacionais existentes, e nos pontos cabíveis foram realizados experimentos visando embasar as melhorias que poderiam ser incluídas no texto a ser apresentado tendo como objetivo aumentar a confiabilidade das medições de perfis destinados ao cálculo do QI, assim como padronizar um procedimento para o processamento dos perfis longitudinais para tal cálculo.

Por fim, de maneira a consolidar os resultados obtidos por esta pesquisa, foi proposto o texto de um anteprojeto de norma brasileira para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais que buscou aproveitar o que havia de melhor no exterior, completar eventuais lacunas, sem deixar de lado a cultura e as normas brasileiras vigentes sobre o tema.

1.4 Organização da tese

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica a respeito do tema, incluindo informações amplas sobre o histórico das avaliações funcionais de pavimentos com a menção dos equipamentos mais importantes e suas peculiaridades; o impacto econômico da irregularidade nos pavimentos e também aspectos técnicos a respeito dos índices mais conhecidos e a forma de calculá-los a partir dos dados de um perfil

longitudinal. Não se trata de uma revisão bibliográfica passiva, haja vista que há contribuições e opiniões do autor sobre os mais diversos temas abordados.

O Capítulo 3 contempla todo o processo de desenvolvimento do perfilômetro inercial utilizado nesta pesquisa, incluindo um histórico com as principais fases atravessadas, as características operacionais do equipamento e seus softwares, os resultados dos primeiros testes de funcionamento e por fim uma ilustração ampla das utilidades que tal equipamento pode proporcionar, o que inclui a medição do afundamento plástico em trilhas de roda, dependendo de sua configuração.

O Capítulo 4 apresenta estudos aprofundados sobre a verificação de funcionamento de perfilômetros inerciais, incluindo a análise de perfis longitudinais e dos índices de irregularidade, especialmente no que tange ao cálculo e às influências no quociente de irregularidade (QI), com vistas à proposição final de um anteprojeto de norma brasileira sobre o assunto.

O Capítulo 5 sintetiza as principais contribuições desta pesquisa e registra sugestões para sua continuidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE CRÍTICA

2.1 Conceituação do tema

Conceituar o tema deste trabalho é necessariamente conceituar “irregularidade de pavimentos” e também “perfilômetro inercial” para a medida de irregularidade longitudinal de pavimentos.

Embora similares, existem diversas definições de “irregularidade de pavimentos”, dentre elas, as três mais relevantes para o contexto brasileiro são: a da norma brasileira DNER PRO 164/94, a da norma americana ASTM E 867-04 e por fim a de Domingues (2004).

De acordo com DNER PRO 164/94, a irregularidade longitudinal de um pavimento é: “o desvio da superfície da rodovia, em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade do rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via”.

De acordo com a norma ASTM E 867-82: *“is the deviations of a surface from a true planar surface with characteristics dimensions that affect vehicle dynamics, ride quality, dynamic loads and drainage.”*

Segundo o Domingues (2004): “é o conjunto dos desvios de sua superfície, ao longo das trilhas de roda, em relação à superfície ideal projetada, com características tais que afeta o movimento dos veículos, a qualidade do rolamento, as cargas dinâmicas que atuam sobre a via e a drenagem da superfície”.

Conforme pode ser observado, mesmo um pouco diferentes entre si, todas as definições trazem uma idéia bastante similar e que não é muito simples de ser entendida, mesmo por um engenheiro civil que não tenha muito contato com o tema.

Pelo motivo acima exposto, depois de concluídos todos os estudos e reflexões gerados nesta pesquisa, o que sem dúvida, levou o autor a explicar o tema de seu trabalho muitas vezes, para técnicos e leigos, foi elaborada a seguinte definição, mais simples e ao mesmo tempo mais completa que as anteriores: “A irregularidade

longitudinal de um pavimento representa o conjunto dos desvios indesejáveis de sua superfície, que atrapalha o rolamento rápido e suave dos veículos, gera insegurança e onera seus usuários, além de acelerar a degradação do pavimento”.

Em suma, a irregularidade longitudinal vai de encontro à funcionalidade de um pavimento, pois se um pavimento foi feito para proporcionar rolamento rápido, seguro, econômico e confortável a seus usuários, um pavimento com elevada irregularidade longitudinal prejudica todas essas funcionalidades.

A rapidez do rolamento, pois quanto maior a irregularidade, menor a velocidade praticada. A segurança, uma vez que pavimentos irregulares diminuem a dirigibilidade, podem dificultar a drenagem, facilitando a aquaplanagem, aumentam a necessidade de desvios durante o tráfego e reduzem a atenção no trânsito. A economia, pois já está mais do que evidenciado que pavimentos irregulares aumentam o consumo de combustível, além de aumentarem também o custo de manutenção dos veículos. Por fim, o conforto, talvez o mais óbvio dos prejuízos, haja vista ser este o fator mais facilmente sentido pelo usuário e mesmo pelos técnicos, que ao explicarem a leigos o significado da medida de irregularidade, recorrem muitas vezes ao conforto proporcionado pelo pavimento.

Ainda sobre irregularidade, cabe uma consideração sobre a palavra “longitudinal”. Como os veículos trafegam paralelos ao eixo longitudinal de uma pista, é neste sentido que se mede a irregularidade, normalmente sobre os locais onde as rodas passam com mais frequência, ou seja, sobre as trilhas de roda. Em suma, a palavra “longitudinal” foi utilizada para diferenciar o eixo de medição, pois é possível, embora incomum, realizar a avaliação da irregularidade transversal de um pavimento. No eixo transversal, a preocupação maior dos gestores são os afundamentos plásticos nas trilhas de roda, que serão abordados de forma breve neste trabalho.

O conceito de perfilômetro inercial para a medida da irregularidade de pavimentos embora possa parecer complexo é bastante simples de ser explicado, embora não seja um equipamento simples de ser desenvolvido.

Trata-se de um equipamento destinado à medida do perfil longitudinal de um pavimento que possui um componente inercial, destinado à compensação dos

movimentos verticais do veículo. O componente inercial normalmente é um medidor de aceleração vertical (acelerômetro).

Sayers e Karamihas (1998) entre outros, tais como Umtri Research Review (2002), indicam que o perfilômetro inercial para pavimentos foi inventado por Elson Spangler e William Kelly na década de 60, no laboratório de pesquisas da *General Motors*. É no trabalho Spangler e Kelley (1964) que tais pesquisadores revelam detalhes do perfilômetro inercial original, que mais tarde, após sofrer sensíveis modificações, ficou conhecido pelo nome de perfilômetro GMR, acrônimo de *General Motors Research*.

Diferentemente dos perfilômetros modernos que usam, além do sistema inercial, sensores de medição sem contato – geralmente via laser – o equipamento GMR possuía uma roda apalpadora, independente das rodas do veículo, que era mantida em contato com o pavimento e suportada por uma haste inclinada. Toda a movimentação desta haste era registrada, assim como todo o movimento inercial do veículo (aceleração vertical) para que depois fosse possível calcular o perfil longitudinal.

Figura 2.1 – Perfilômetro inercial desenvolvido como parte dos objetivos deste trabalho.

As versões atuais de perfilômetros inerciais, tais como aquela desenvolvida durante este trabalho que é mostrada na figura 2.1, têm em substituição à roda apalpadora um medidor de distância sem contato (com base em laser), que mede de forma quase-contínua a variação da distância da carroceria do veículo até o pavimento. Esta medida, corrigida pela medida do acelerômetro (que é integrada duas vezes) para que se chegue ao deslocamento vertical do veículo, permite o cálculo do perfil longitudinal.

Uma questão inicial recorrente a respeito dos perfilômetros inerciais, cujo esclarecimento é adequado à parte introdutória desta pesquisa, diz respeito à necessidade de um perfilômetro deste tipo possuir tanto um medidor de deslocamento laser, quanto um acelerômetro.

Se fosse usado somente um acelerômetro medindo continuamente a aceleração vertical do veículo durante seu deslocamento, estar-se-ia medindo toda a movimentação vertical da carroceria do veículo. O problema desta medida tomada sozinha é que o movimento da suspensão do veículo não representa bem as imperfeições do pavimento, pois passar com o veículo sobre qualquer obstáculo pequeno faz com que a suspensão continue amortecendo aquela imperfeição do pavimento por vários metros após o veículo ter cruzado sobre ela. Além disso, a carroceria desloca-se de forma diferente dependendo da velocidade com a qual se passa sobre um obstáculo e por fim, podem acontecer movimentos na carroceria do veículo provocados pelo deslocamento de algum objeto ou pessoa dentro do veículo e isso seria computado como imperfeição do pavimento.

A medida sozinha seja da roda apalpadora do perfilômetro GMR original, seja dos módulos laser dos perfilômetros inerciais modernos, também não é capaz de gerar o perfil longitudinal do pavimento por limitações similares. Embora um medidor como estes, medindo continuamente a distância entre o pavimento e a carroceria do veículo consiga captar o formato de um obstáculo ou de uma deformação qualquer no pavimento, pelo fato do veículo ter suspensão e pneus deformáveis, a distância entre carroceria e o pavimento continua variando mesmo depois de vencido o obstáculo, o que falsearia a medição.

Como se pode perceber, a grande idéia de Spangler e Kelley (1964) foi mesmo conciliar as duas medições juntas visando construir um perfilômetro capaz de realizar medidas de perfil longitudinal de uma via, que mais tarde ganhou ainda a flexibilidade de poder realizar suas medições à velocidade normal de tráfego. Simplificando a função de cada uma das partes ter-se-ia: o módulo laser mede variações de elevação no pavimento acrescida das variações da suspensão do veículo enquanto o acelerômetro mede somente as variações da suspensão do veículo. Subtraindo-se o primeiro do segundo, tem-se o perfil longitudinal.

Para que a explicação sobre o título fique completa, falta apenas a conexão entre as duas partes da explicação: “irregularidade” e “perfil longitudinal”. Pois bem, como se pode imaginar, tudo que se conhece como irregularidade longitudinal de um pavimento está contido no perfil longitudinal do pavimento, daí a importância de medir corretamente o perfil para avaliar, posteriormente ou às vezes simultaneamente, a irregularidade longitudinal de um pavimento.

Como as explicações desta parte introdutória tiveram como objetivo aclarar e simplificar o tema a ser desenvolvido, ela pode ter deixado a impressão errada sobre a profundidade, os detalhes e as nuances que o tema envolve, desta maneira, em havendo interesse pelo tema, recomenda-se fortemente a leitura de todo o trabalho.

2.2 Histórico das avaliações funcionais e de irregularidade longitudinal de pavimentos

Diferentemente de outros históricos a respeito de irregularidade longitudinal e da avaliação funcional de pavimentos, que por vezes separam os equipamentos de medição da ciência por trás da medida, este capítulo inclui ambos e segue a melhor ordem cronológica possível levando-se em conta as referências bibliográficas pesquisadas. Mesmo sendo um relato histórico, há conclusões intermediárias que o estudo aprofundado do tema permitiu.

2.2.1 Os primeiros passos da história da avaliação da irregularidade

Dentre toda a bibliografia analisada, são Hveem (1960) e Gillespie (1992) *apud* Hveem (1960) que trazem o relato mais antigo referente à avaliação funcional de pavimentos e conseqüentemente à irregularidade longitudinal de uma via.

Segundo eles, desde quando estradas e rodovias são construídas, as pessoas que as usam têm estado cientes dos graus relativos de conforto ou de desconforto experimentados no rolamento. A evidência que permanece hoje das estradas pavimentadas do Império Romano sugere que a irregularidade possa ter sido uma preocupação para as viagens de carruagem.

Ainda segundo Gillespie (1992), na virada do século XX, com a introdução do motor à gasolina, mais e mais pessoas tiveram acesso a viagens em velocidades mais altas, que facilmente superaram aquelas praticadas com tração animal dos séculos anteriores. Foi justamente o aumento da velocidade que aumentou a necessidade e o “prêmio” pela construção e manutenção de rodovias que proporcionassem rolamento mais suave.

Hveem (1960) relata que um dos primeiros equipamentos desenvolvidos bem no começo do século XX, por volta do ano 1900, para a medida da irregularidade longitudinal foi o Viagraph. Tratava-se de um equipamento bastante rudimentar, que tentava medir a irregularidade através do registro contínuo em papel do desvio medido no ponto central de uma régua de madeira que era apoiada e arrastada longitudinalmente sobre o pavimento, conforme pode ser visualizado na figura 2.2.

Figura 2.2 – Desenho esquemático do equipamento conhecido como “Viagraph”.
Fonte: Gillespie (1992).

A idéia por trás do equipamento não é ruim, pois ele tenta medir continuamente qualquer desvio que exista na superfície do pavimento, mas ele tem uma característica muito peculiar: ele só consegue medir corretamente os comprimentos de onda menores do que o comprimento da régua utilizada, ou seja, para se medir com este tipo de equipamento um desvio na superfície que corresponda a uma onda com 40 metros de comprimento, seria necessário um Viagraph com mais de 40 metros de comprimento, o que torna seu uso muito desajeitado e inconveniente.

É interessante notar que a irregularidade medida com o Viagraph já era registrada em termos de somatório de desvios verticais, em relação à distância deslocada, ou seja, a mesma unidade que se usa atualmente no IRI.

Alguns dos problemas do Viagraph, como por exemplo, o desgaste da régua provocado pelo arraste, foram superados com a adição de duas rodas ao equipamento. O que aconteceu neste caso é que somente com dois pontos de apoio nas extremidades da régua, a resposta do equipamento tornou-se variável de acordo com o seu posicionamento, seu comprimento total e o comprimento de onda por onde ele era passado.

Sendo assim, mais tarde as duas rodas foram substituídas por matrizes de rodas – quanto mais rodas, mais o equipamento respondia de forma próxima ao Viagraph original, só que sem alguns dos inconvenientes anteriores.

Mesmo com tais desenvolvimentos, que deram origem aos ainda esporadicamente utilizados perfilógrafos de rodas (chamados de perfilógrafos por registrarem graficamente os perfis longitudinais), conhecidos também como réguas móveis, eles não são equipamentos práticos de serem transportados ou operados, além de possuírem baixa produtividade, pois a medida neste tipo de equipamento é feita em velocidades muito baixas. É importante registrar que de acordo com Bottura (1998), este tipo de equipamento não se mostra muito adequado para levantamento de perfis, pois eles não podem medir comprimentos de onda harmônicos a seu vão (por exemplo: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ etc.).

São exemplos dos perfilógrafos de rodas mais conhecidos: o perfilógrafo longitudinal *Rainhart* (figuras 2.3 e 2.4), o *Rolling Straightedge*, o equipamento inglês conhecido como perfilógrafo RRL, o perfilógrafo *Ames* e o perfilógrafo *Califórnia*.

Figura 2.3 – Desenho esquemático do Perfilógrafo Rainhart. Fonte: Perera e Kohn (2002a).

Figura 2.4 – Fotografia do Perfilógrafo Rainhart. Fonte: Perera e Kohn (2002a).

O perfilógrafo Califórnia, o mais popular dos perfilógrafos nos EUA segundo Smith et al. (1997), é o único exemplar de um perfilômetro de rodas existente e em funcionamento no Brasil, propriedade da Associação Brasileira de Cimento Portland. A ABCP fez a aquisição do equipamento no final dos anos 90 para usá-lo em pavimentos de concreto de cimento Portland recém-construídos, haja vista que o peso do equipamento é bem distribuído sobre muitas rodas, não marcando a superfície do pavimento que eventualmente poderia ter sua irregularidade superficial corrigida. Carvalho e Silva (2000) trabalharam o equipamento da ABCP. Nos EUA, existe a norma ASTM E 1274-88, publicada originalmente em 1988 que regulamenta a avaliação de irregularidade com este tipo de equipamento.

De volta à ordem cronológica dos desenvolvimentos, após ter aproveitado o ensejo para apresentar os equipamentos que derivaram do Viagraph, é Gillespie (1992)

quem indica que por volta de 1920, os engenheiros rodoviários já haviam reconhecido a importância da irregularidade dos pavimentos como causa da vibração nos veículos motorizados.

O que historicamente evidencia tal conscientização foi o equipamento chamado de Via-log, desenvolvido pelo estado de Nova York. Este equipamento que pode ser considerado o precursor de todos os medidores de irregularidade do tipo resposta, media a variação da suspensão de um veículo de passeio durante seu deslocamento, como indicação do nível de irregularidade.

Os primeiros equipamentos deste tipo registravam o próprio movimento da suspensão, mas logo em seguida foram substituídos por um sistema que somava (acumulava) o deslocamento da suspensão em um contador mecânico, o que permitia que se chegasse a uma medida estatística na unidade de polegadas/milha.

A partir do conceito desenvolvido no Via-log, os esforços em termos de desenvolvimento de equipamentos para a medida da irregularidade longitudinal concentraram-se em tentativas de padronização do veículo, uma vez que era bastante difícil a obtenção de medidas consistentes baseadas neste princípio.

Para situar tais desenvolvimentos dentro da história rodoviária, em 1920 foi construída uma das primeiras pistas de teste de pavimentos do mundo. Chamada de *Bates Road Test*, a experiência realizada no estado americano de Illinois contou com seções de diferentes materiais e fez uso de um medidor de irregularidade desenvolvido para a ocasião, segundo Paterson (1987).

Segundo esta linha, Perera e Kohn (2002b) revelam que em 1925 foi lançado o equipamento que se tornou a evolução do Via-log. Trata-se do equipamento *BPR Roughometer*, que ganhou a configuração mostrada na figura 2.5 em 1941, segundo Gillespie (1992). O acrônimo BPR, que compõe o nome do equipamento, deriva de *Bureau of Public Roads*, órgão que mais tarde tornou-se o *FHWA*, nos EUA.

Segundo Domingues (2004), trata-se de um dos equipamentos mais conhecidos historicamente na indústria rodoviária. A principal inovação trazida pelo *BPR Roughometer* é o fato dele ser um equipamento rebocável. O equipamento simula uma roda de um carro de passeio e é constituído de massa, mola e amortecedor.

Neste equipamento o deslocamento da roda verticalmente em relação à massa é registrado por um integrador acoplado a um contador elétrico. O equipamento deve ser rebocado a 20 mph e uma peculiaridade é que o registro do deslocamento da roda é feito somente em uma direção. O contador eletrônico acumula os deslocamentos em polegadas. O resultado gerado pelo equipamento é chamado de “Roughness Index” e é dado em polegadas por milha.

Segundo Domingues (2004), as principais limitações do *BPR Roughometer* são a baixa velocidade de operação, a atenuação dos comprimentos de onda na faixa de frequência de rolamento, as dificuldades de repetitividade e constância relativa à calibração. Ainda sobre as limitações do equipamento, Paterson (1987) afirma que o *BPR Roughometer* não era um equipamento robusto o bastante para ser usado em rodovias muito irregulares e Perera e Kohn (2002b) afirmam que o *BPR Roughometer* possuía algumas frequências ressonantes próprias, que geravam resultados incorretos.

Figura 2.5 – Desenho esquemático do *BPR Roughometer*. Fonte Gillespie (1992).

Essas não foram as únicas iniciativas da década de 20 em termos de medida de irregularidade dos pavimentos. Um outro exemplo da mesma época foi registrado por Ahlin e Granlund (2001), que trazem em seu trabalho uma fotografia interessante de 1927 de um veículo de testes de pavimentos, que segundo eles registrava em papel as variações da movimentação da suspensão do veículo onde estava instalado. Infelizmente os autores não trazem mais detalhes sobre o equipamento, apenas afirmam que ele era de propriedade do *Highway Washboard*.

2.2.2 O conceito da serventia e o perfilômetro inercial

O próximo grande desenvolvimento, agora já no final dos anos 50, não foi um equipamento e sim um conceito: o conceito da serventia de um pavimento, que foi desenvolvido por Carey e Irick (1960), juntamente com um método para sua avaliação.

Serventia segundo eles é: “a habilidade de um pavimento em servir ao usuário da rodovia”. Além do desenvolvimento deste conceito que sem dúvida é o grande marco mundial da avaliação funcional de pavimentos, segundo Weaver (1979), a maior contribuição de Carey e Irick com relação ao trabalho mencionado, foi justamente o de evidenciar que serventia e desempenho de um pavimento deveriam ser quantificados e por isso eles desenvolveram um sistema de avaliação.

Muitos pesquisadores detalharam mais o conceito de serventia estabelecido por Carey e Irick. Um exemplo brasileiro está em Domingues (2004): “Serventia de um pavimento é a capacidade que um pavimento possui de oferecer rolamento seguro, suave, confortável e econômico”.

O contexto de Carey e Irick para o desenvolvimento deste conceito foi provavelmente o mais conhecido teste rodoviário já realizado no mundo e que foi o ponto de partida para muitos dos conceitos e relações usados ainda hoje: o *AASHO Road Test*.

O estudo concebido e patrocinado pela *American Association of Highway State Officials* visava determinar e entender o desempenho de estruturas de pavimentos com camadas de características conhecidas sob a ação de cargas conhecidas, deslocando-se em frequências controladas. A ação do tráfego sobre a pista experimental teve início em novembro de 1958.

Durante o tempo em que a pista da AASHO ficou submetida à ação do tráfego, ela foi avaliada periodicamente em diversos parâmetros, sendo que dois deles relacionados à irregularidade longitudinal: o índice PSR e o resultado de uma avaliação objetiva de irregularidade determinada pelo perfilômetro CHLOE.

O índice PSR, acrônimo de *Present Serviceability Rating* foi determinado por um painel de avaliadores formado por 12 pessoas que trafegaram sobre a pista e atribuíram uma nota de 0 a 5, sendo que 0 representava a pior situação. Além disto os avaliadores respondiam se aquele pavimento era aceitável ou não, caso eles fossem trafegar por um longo período sobre ele. Com o estabelecimento do PSR por Carey e Irick (1960) fica estabelecida uma forma de avaliação da serventia de um pavimento.

Abrindo parênteses, é importante mencionar que as avaliações subjetivas da irregularidade dos pavimentos, por mais que a tecnologia tenha evoluído desde o PSR, continuaram a existir por muitos anos, e ainda hoje são utilizadas em áreas mais remotas e vias com baixo tráfego, por exemplo: Daroncho (2001) apresenta resultados que confirmam a importância das avaliações subjetivas para a priorização de manutenções de pavimentos, tipo de solução esta que é importante para regiões onde não exista a possibilidade de uma avaliação objetiva de irregularidade. Outro exemplo de aplicação de avaliações subjetivas, desta vez em estradas não pavimentadas, está em Archondo-Callao (1999). Ainda sobre avaliações subjetivas de pavimentos Dahlstedt (2003) e Shafizadeh e Sivanewaran (2003) revelam que a concordância entre uma avaliação subjetiva e uma avaliação objetiva depende também da composição espectral do perfil do pavimento, ou seja, dois trechos que possuam o mesmo IRI podem ser avaliados subjetivamente de forma diferente por possuírem perfis com características diferentes.

O perfilômetro CHLOE desenvolvido para o *AASHO Road Test*, que leva este nome devido às iniciais principais dos engenheiros que trabalharam no seu desenvolvimento: “**C**arey, **H**utckins, **L**athers and **O**ther **E**ngineers” foi derivado de um equipamento anterior conhecido como perfilômetro AASHO, que foi o primeiro equipamento a operar com o princípio de um plano imaginário fixo. A figura 2.6 traz um desenho deste perfilômetro.

Figura 2.6 – Desenho esquemático do perfilômetro CHLOE. Fonte Gillespie (1992).

Bottura (1998), Domingues (2004) e Gillespie (1992) descrevem bem o equipamento. Trata-se de um perfilômetro que usa um pêndulo ou giroscópio para determinar um plano fixo de referência. O CHLOE consistia em uma pequena carreta, rebocada por veículo de passeio à baixa velocidade (3 km/h), que possuía duas rodinhas de medição e um eixo com pneu de apoio. As duas rodinhas, montadas bem próximas uma da outra estavam atreladas ao sistema de medida que registrava continuamente a inclinação entre elas e um plano de referência. O valor estatístico obtido como resultado de uma avaliação pelo equipamento é chamado de “Variância da Declividade Longitudinal”. Além da limitação da velocidade, estes equipamentos não eram precisos para a medida de comprimentos de onda menores que a distância entre as pequenas rodas (23 cm aproximadamente) e também não eram capazes de medir grandes comprimentos de onda.

Com base no resultado da irregularidade proveniente do perfilômetro CHLOE e em outras medidas objetivas realizadas na superfície dos pavimentos, tais como: área trincada, área remendada e valor médio do afundamento em trilhas de roda, Carey e Irick, determinaram uma relação entre as notas que os avaliadores atribuíram a determinado trecho e a condição objetivamente avaliada daquele pavimento, criando assim o valor PSI ou Índice de Serventia Atual, conforme bem descreve FINN (1998).

Portanto, segundo Timm e Mcqueen (2004), o PSI, acrônimo de *Present Serviceability Index* é o PSR estimado levando-se em conta: irregularidade longitudinal, área trincada, área remendada e afundamento plástico médio nas trilhas de roda. Em outras palavras, estava estabelecida uma forma objetiva de se

avaliar um pavimento sem o uso de um painel de avaliadores, ou melhor, havia uma maneira objetiva de se determinar a opinião dos usuários sem sequer consultá-los.

Naturalmente as afirmações tecidas devem ser tomadas com reservas por se tratar do resultado de um estudo realizado há muitos anos e em outro país, mas levando-se em conta outros estudos posteriores, pode-se afirmar que o PSI é um bom índice de avaliação funcional de pavimentos, sendo empregado amplamente, de forma igual ou muito parecida à concepção inicial de Carey e Irick em diversos países e aqui no Brasil também.

Além de determinar o PSR e o PSI, Carey e Irick (1960) fizeram mais uma revelação importante, a partir da qual as atenções voltadas à medida da irregularidade longitudinal de pavimentos foram em muito incrementadas. Com base nos mesmos estudos que determinaram o PSI, realizados com dados do *AASHO Road Test*, eles puderam afirmar que aproximadamente 95% do valor do PSI podia ser explicado somente com o valor da irregularidade longitudinal – todos os outros parâmetros do modelo de correlação respondiam, em geral, por apenas 5% do valor do PSI.

Em outras palavras, a partir de Carey e Irick (1960) foi possível se afirmar que a serventia de um pavimento pode ser avaliada, ainda que com um pequeno erro que tende a superestimá-la, apenas com a medida da irregularidade longitudinal.

Se for levado em conta o fato de que muitos perfilômetros inerciais atuais permitem a medição simultânea do afundamento médio das trilhas de roda, a exatidão da medida do PSI pode ser ainda mais bem explicada do que somente o seria com os valores da irregularidade.

Paterson (1987) ressaltou a importância de se utilizar o dado referente à aceitabilidade ou não daquele pavimento, informação que é pesquisada quando se determina o PSR, visando a determinação da exigência média dos usuários em determinada região juntamente com o tipo ou classe da rodovia.

FINN (1998) afirma que a partir de Carey e Irick (1960), muitas agências rodoviárias dos Estados Unidos passaram a adotar apenas a irregularidade longitudinal como medida estimativa da serventia de seus pavimentos. Não é a toa que dentre todas as variáveis normalmente presentes em sistemas de gerência de pavimentos o valor

da irregularidade longitudinal seja aquele que possui o maior peso na hora das decisões.

Estas são algumas das razões que tornam obrigatória a menção do *AASHO Road Test* e dos trabalhos desenvolvidos por Carey e Irick, sempre que o assunto versar sobre os primeiros passos da avaliação funcional de um pavimento. Isto pode ser confirmado no trabalho francês de autoria de Delanne e Pereira (2000) e em muitos outros das mais diversas nacionalidades, tais como: Brasil, Coréia, Taiwan, Iran, Colômbia, Suécia etc, facilmente acessáveis através da Internet.

Foi também nos anos 60, embora não mais se relacionando diretamente com o *AASHO Road Test*, que os equipamentos do tipo resposta derivados do *Via-log* e do *BPR Roughometer* tornaram-se mais populares e ganharam mais fabricantes. Não é difícil concluir o motivo. Eles eram baratos e fáceis de manter e de operar, se comparados às outras tecnologias disponíveis até então.

Diversos autores, tais como Ksaibati e Al Mahmood (2002), Domingues (2004), Perera e Kohn (2002b), Bottura (1998), Sayers et al. (1986a) mencionam as marcas ou nomes de equipamentos que popularizaram os medidores do tipo resposta, a saber: *Mays Road Meter (Mays Meter)*, *PCA Road Meter* e *Bump Integrator*. Os dois primeiros de origem norte-americana e o último de origem inglesa, Transportation Research Laboratory (1999).

Uma boa fonte de pesquisa em português sobre as características de cada um dos tipos de medidores do tipo resposta é Bottura (1998). Além de possuir tais dados históricos que formam apenas uma pequena parte do trabalho, trata-se de um bom documento acerca da medição e calibração realizada com os medidores de irregularidade do tipo resposta.

Os três equipamentos mencionados funcionam baseados no princípio de medir continuamente o deslocamento do eixo de um veículo ou de um reboque em relação à sua carroceria. Tal deslocamento é somado somente em um sentido: só quando o eixo se afasta da carroceria ou só quando o eixo se aproxima dela.

Até os anos 80 a principal e mais comentada limitação dos medidores do tipo resposta dizia respeito à não haver maneira de serem comparados os valores de

irregularidade medidos com dois equipamentos diferentes. Cada modelo de equipamento tinha sua própria velocidade de uso e suas características quanto à resolução do sensor de deslocamentos. Isto sem contar as variações devidas ao tipo do veículo onde ele estava instalado, o estado de sua suspensão etc. Era difícil até a comparação de resultados entre dois equipamentos iguais, instalados em veículos iguais e operados nas mesmas condições ou mesmo entre medições feitas com o mesmo equipamento em dois momentos diferentes.

Pode-se dizer que tais equipamentos, mesmo quando usados estritamente nas condições estabelecidas pelos seus fabricantes, produziam resultados pobres: pouco exatos, pouco repetíveis e instáveis com o tempo. De qualquer maneira, apesar das limitações e dificuldades de comparação de resultados, esta era a tecnologia disponível naquele período.

Vários autores comentam sobre as limitações dos medidores do tipo resposta, em geral comuns a todos os equipamentos, e motivo pelo qual a partir de meados dos anos 80 eles começaram a ser substituídos nos países mais desenvolvidos por perfilômetros inerciais. As características e limitações deste tipo de equipamento serão detalhadas mais adiante.

Uma informação interessante a respeito do uso dos medidores de irregularidade do tipo resposta nos EUA trazida por Bottura (1998) revela que no ano de 1986 de 43 estados americanos que responderam a uma pesquisa sobre o uso de medidores de irregularidade, 22 usavam o Mays Meter, 5 usavam o PCA Road Meter e 5 já usavam perfilômetros inerciais.

Antes de passar aos anos 70 e 80, onde muito se desenvolveu acerca do tema, é preciso destacar um acontecimento muito importante, ainda nos anos 60, já revelado na parte introdutória deste trabalho. Trata-se do desenvolvimento do conceito do perfilômetro inercial por Spangler e Kelley (1964) e da criação de seu primeiro exemplar, o perfilômetro GMR (acrônimo de *General Motors Research*), também conhecido como perfilômetro dinâmico de superfície.

Trata-se, segundo Sayers e Karamihas (1986), do primeiro perfilômetro inercial de pavimentos, ou seja, a matriz de onde derivaram todos os outros perfilômetros inerciais usados atualmente para a medida do perfil longitudinal de pavimentos.

Segundo Smith et al. (1987), tal desenvolvimento só foi possível graças à disponibilidade de um acelerômetro de boa qualidade usado naquele tempo somente na indústria aeroespacial para guiar inercialmente foguetes, e também, pela disponibilidade de um bom computador analógico.

O princípio de funcionamento é muito similar ao dos perfilômetros inerciais fabricados e usados atualmente, com a diferença principal que o modelo original usava, no veículo de medição, duas rodas apalpadoras para a coleta dos dados referentes à superfície do pavimento, trabalho que atualmente é feito com sensores de medição sem contato, normalmente por feixe de luz (laser). Tais rodas estavam acopladas a hastes que por sua vez estavam ligadas a potenciômetros que mediam seu deslocamento vertical. A referência da posição relativa da carroceria do veículo em relação à superfície do pavimento era obtida através das medidas de aceleração vertical dadas por 2 acelerômetros.

Segundo Sayers et al. (1986b), no modelo original, diferentemente dos equipamentos que sucederam o perfilômetro GMR, o operador devia manter uma velocidade constante durante a medição.

Os valores medidos pelos acelerômetros eram integrados duas vezes para que se chegasse à posição vertical do veículo e este valor era usado para corrigir o valor do deslocamento das rodas apalpadoras, processo que no modelo original era feito de forma analógica e gerava como saída uma fita, também analógica, contendo os perfis longitudinais das trilhas de roda do pavimento.

Revela Sayers et al. (1986b) que inicialmente os perfis gerados pelo equipamento eram processados com um simulador do equipamento *BPR Roughometer*, visando retirar dos perfis resultados estatísticos que revelassem o quão irregular estava a superfície medida.

O simulador usado era uma espécie de quarto de carro, conforme a figura 2.7, pois simulava a passagem de um quarto de um carro contendo basicamente mola, amortecedor, massa e pneu – o *BPR Roughometer* não é diferente disto. Em inglês a literatura chama tal processo pelo acrônimo QCS – “Quarter-Car Simulation”. A figura abaixo elucida os principais componentes do modelo de quarto de carro, assim como demonstra sua resposta em relação às frequências de oscilação.

Figura 2.7 – Esquema de um quarto de carro, com o respectivo gráfico de resposta da suspensão a diferentes frequências. Fonte: Sayers e Karamihas (1998).

Naturalmente, cada modelo de quarto de carro que se possa imaginar, tem determinadas características da mola, dos amortecedores, das massas e do pneu, o que torna um modelo diferente do outro, assim como cada carro responde de maneira diferente a uma determinada imperfeição do pavimento. No caso em tela, o modelo utilizado visava replicar o resultado do *BPR Roughometer*.

É claro também que, por se tratar de um modelo matemático de quarto de carro, a saída gerada pelo GMR depois que o perfil longitudinal era passado pelo simulador não era exatamente igual à medida original que podia ser feita com o próprio BPR, portanto, não se podia chamar o resultado do mesmo nome.

Assim, como explicam Sayers et al. (1986a), convencionou-se chamar de “Quarter-Car Index” os resultados gerados pelo GMR e passados pelo simulador do BPR, produzindo com este processo o que se pode chamar de “QI verdadeiro”.

Foi assim, portanto que surgiu o primeiro dos índices que utilizava o acrônimo “QI”, que é diferente do QI (Quociente de Irregularidade) que usamos hoje no Brasil, conforme o restante da história procurará deixar claro¹.

Embora tenha sido desenvolvido no início dos anos 60, a primeira unidade do perfilômetro inercial de contato foi comercializada somente em 1966 para o *Texas Highway Department*, conforme indica Smith et al. (1997). Como vender este tipo de equipamento não era propriamente o objeto social da General Motors, o invento foi licenciado pela GM para a empresa americana K. J. Law Engineers, Inc, para que ela disponibilizasse o equipamento para o mercado rodoviário, e assim foi feito desde a primeira unidade vendida.

Uma consulta ao *site* do órgão do governo dos Estados Unidos que registra as patentes americanas revelou que o invento de Spangler e Kelley foi patenteado em 29 de agosto de 1966 sob o número 3.266.302, sendo que os inventores deram entrada no pedido no dia 23 de novembro de 1962. A figura 2.8 contém uma cópia do desenho original deste pedido de patente.

Segundo Sayers et al. (1986b), no final dos anos 70, o equipamento sofreu sensíveis melhorias, deixando de lado o processamento analógico. Tudo passou a ser digital, o que permitiu inclusive que a velocidade de medição pudesse variar. Estas melhorias, que incluíram a possibilidade da roda apalpadora ser substituída por um medidor de distância por ultra-som, ensejaram o pedido de uma nova patente requisitada apenas por Spangler em abril de 1982, e concedida em dezembro do ano seguinte, sob o número 4.422.322. A figura 2.9 contém o desenho presente na segunda patente.

Uma vez no final dos anos 70, é preciso retornar um pouco no tempo para tratar do desenvolvimento Francês mais conhecido da área. Segundo o Pavement Tools Consortium (sem data) em 1968 foi desenvolvido um equipamento importante, usado até hoje na França, Bélgica e em ex-colônias Francesas, e que precisa ser

¹ Ao longo do desenvolvimento das avaliações de irregularidade foram utilizados alguns índices um pouco diferentes entre si, que utilizaram o mesmo acrônimo “QI”. Os principais foram: “QI verdadeiro”, o QI (quociente de irregularidade) atualmente normalizado no Brasil, que em alguns trabalhos está descrito como QI_r e por fim o QI* que representa a medida de irregularidade obtida dos medidores tipo resposta usados na PICR, que foram calibrados ou em relação ao “QI verdadeiro” ou em relação ao quociente de irregularidade QI, corrigida de acordo com a velocidade da medição.

mencionado nesse relato histórico sobre irregularidade de pavimentos. Trata-se do APL, acrônimo em francês de Analisador de Perfil Longitudinal.

Figura 2.8 – Desenho original presente no primeiro pedido de patente dos EUA de um perfilômetro inercial, sob o número 3.266.302.

Figura 2.9 – Desenho original presente no segundo pedido de patente dos EUA de um perfilômetro inercial, sob o número 4.422.322.

O APL foi desenvolvido pelo tradicional LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) como um equipamento rebocável de uma roda só, capaz de gerar como resultado a influência do perfil longitudinal do pavimento sobre o equipamento, segundo Sayers et al. (1986a) e Caicedo et al. (2003).

Este equipamento Francês, mostrado na figura 2.10, que pôde ser observado por este autor em uma das unidades regionais do LCPC, na França, deve ser rebocado por um veículo de passeio em velocidade constante. A faixa de frequências das vibrações que o equipamento é capaz de registrar varia de 0,5 a 40 Hz. As medidas realizadas pelo APL são feitas por um dispositivo inercial mecânico adequadamente calibrado nos laboratórios do LCPC através de simuladores de vibração.

Segundo Caicedo et al. (2003), com o passar dos anos o equipamento foi modernizado, passando a utilizar um acelerômetro em substituição ao sistema inercial mecânico. Os índices de irregularidade mais comuns gerados a partir do APL são conhecidos como APL25 e o APL72, sendo que para o primeiro a velocidade de operação é de 21,6 km/h e para o segundo 72 km/h. Normalmente os resultados são gerados a cada 25 metros para o APL25 e a cada 200 metros para o APL72, segundo Sayers et al. (1986a).

Na Bélgica, onde o APL também foi muito difundido, o índice gerado a partir dos dados medidos pelo equipamento é outro. Trata-se do CP, ou coeficiente de planicidade, que representa um modelo matemático baseado em média móvel, que gera resultados em intervalos de 100 metros.

Figura 2.10 – Desenho esquemático e fotografia do equipamento APL. Fonte: Caicedo et al. (2003)

2.2.3 Os anos 80 e os índices de irregularidade atuais

Embora não tenha sido possível determinar exatamente quando foi desenvolvido – há indícios que tenha sido no início dos anos 80 – essa pesquisa tem que mencionar o pequeno equipamento para a determinação de perfis chamado de Dipstick.

Desenvolvido e produzido nos EUA pelo grupo Face Companies (2005), fundado em 1867, este equipamento portátil foi criado para medir a planicidade de pisos de concreto de forma mais prática, visando substituir o uso do nível e mira.

Baseado na medição da inclinação feita por um sensor preciso (inclinômetro), o Dipstick é operado por uma só pessoa, o que já lhe confere uma vantagem substancial em relação ao nível e mira. Não bastasse isso, seu tamanho é reduzido e sua operação simples. Para realizar uma medição basta girar o aparelho cujo corpo principal é ligeiramente menor que o tamanho de uma caixa de sapatos, sobre cada um de seus pés, apoiar novamente ambos os pés do aparelho no pavimento e esperar cerca de 2 segundos entre cada giro, seguindo uma trajetória definida (em rodovias, paralela ao eixo da pista).

No meio rodoviário, o Dipstick foi usado principalmente fora do Brasil, inicialmente como alternativa ao nível e mira para a medição de bases de calibração dos medidores de irregularidade do tipo resposta. A vantagem comparativa entre os dois tipos de medição está na necessidade de pessoal, pois o Dipstick pode ser usado por uma só pessoa, enquanto o nível e mira precisa de duas e também da produtividade, que no Dipstick é um pouco maior.

No Brasil, provavelmente devido ao custo de aquisição do Dipstick, essa forma de se medir o perfil longitudinal das bases de calibração para os equipamentos do tipo resposta não se tornou popular.

Uma vez que se está tratando dos medidores portáteis de perfil, é importante salientar que o Dipstick foi o precursor de uma categoria de equipamentos que se desenvolveu mais intensamente nos anos 90. Houve casos de empresas que simplesmente copiaram o aparelho, mas houve também aquelas que inovaram, criando uma espécie de carrinho leve que é empurrado por um operador, por

exemplo, o *Walking Profiler* da empresa Australiana Arrb Group Ltd (2005), mostrado na figura 2.11, ao lado do Dipstick.

Este tipo de aparelho, que em termos de praticidade pode ser ainda melhor que o Dipstick, é usado em outros países para verificar a execução de pavimentos novos ou restaurados, para que imediatamente já se possa ter uma idéia de como ficou o trecho.

No século XXI, com a substituição já concluída nos países mais desenvolvidos, mas ainda em andamento nos países em desenvolvimento, dos medidores do tipo resposta, pelos perfilômetros inerciais a laser, a utilização que incluiu o Dipstick no meio rodoviário deixou de existir. Em compensação, uma outra necessidade foi gerada: verificar os resultados dos perfilômetros inerciais, atividade que também pode ser feita com nível e mira, embora atualmente o Dipstick e seus congêneres tenham ampla preferência.

Figura 2.11 – Fotografia do Dipstick (esq.); desenho esquemático do Dipstick em operação (centro); e fotografia do perfilômetro Walking Profiler (dir.). Fontes: Face Companies (2005) e Arrb Group Ltd (2005).

Ainda sobre os perfilômetros manuais de baixa produtividade, existe uma solução relativamente recente usada, pelo que se sabe, em pistas de aeroportos, segundo Bennett (2002) e Gerardi (2001 e 2002). Trata-se de um equipamento conhecido como nível e mira automático. Tal equipamento é composto por uma fonte laser que é posicionada sobre um tripé e emite o laser em 360° e uma barra sensora com cerca de 1 metro de comprimento que fica instalada sobre um triciclo, que contém a unidade de processamento do sistema e que é empurrado por um operador. Quando

em operação o equipamento do triciclo recebe a luz laser que está sendo emitida de um referencial fixo e vai registrando conforme o deslocamento do triciclo o perfil real da superfície. Eis mais uma opção criativa para medida de perfis que é mais produtiva que um Dipstick e que o nível e mira tradicional, embora tenha um custo de aquisição bem mais elevado.

Os anos 80 foram muito importantes para o Brasil em termos de avaliação de irregularidade de pavimentos por três razões que serão detalhadas a seguir em ordem cronológica: a primeira diz respeito à grande “Pesquisa sobre o Inter-relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovia – PICR”, realizada pelo Geipot, que embora tenha iniciado em meados dos anos 70, publicou seus resultados no início dos anos 80; o desenvolvimento do Integrador IPR/USP (equipamento do tipo resposta desenvolvido no Brasil) e pela realização do Experimento Internacional de Irregularidade de Pavimentos, que foi realizado com uma grande contribuição Brasileira – é preciso destacar que este experimento foi um marco para boa parte do mundo em termos de avaliação de irregularidade de pavimentos.

Sobre a PICR, que foi sem dúvida o grande marco brasileiro em termos de pesquisa em transporte, citada mundialmente, algumas das publicações mais conhecidas que tratam a respeito da irregularidade dos pavimentos são: Queiroz (1981, 1983).

A PICR foi muito, muito além da medida de irregularidade de pavimentos. Como o próprio nome revela, a pesquisa buscou inter-relacionar os custos relativos à construção, manutenção e uso das rodovias. Entretanto, para se chegar ao ambicioso objetivo da pesquisa, foi necessário estudar e aprender sobre muitos fatores que podiam ter influência nos custos do transporte e um desses fatores que estava relacionado naturalmente com a condição funcional dos pavimentos foi a irregularidade longitudinal dos pavimentos.

Pode-se dizer que o conceito de medida da irregularidade dos pavimentos só tornou-se conhecido no Brasil a partir da estruturação da PICR, em meados dos anos 70, ocasião em que foi pesquisado no exterior o estado da arte em termos de técnicas e tecnologias relativas ao pavimento para que a pesquisa pudesse fazer uso das informações mais atuais sobre o tema. Assim, para a obtenção de parte dos dados

de campo para a PICR, um dos equipamentos trazidos ao Brasil foi o perfilômetro GMR, que como foi revelado anteriormente, podia gerar como resultado o “QI verdadeiro”. Foi a primeira vez que se utilizou um perfilômetro inercial no Brasil. Foi a PICR também que introduziu o QI^* , índice² que representa a medida de irregularidade obtida dos medidores do tipo resposta usados na PICR, que foram calibrados inicialmente em relação ao “QI verdadeiro”, e posteriormente, em relação ao quociente de irregularidade QI, determinado segundo o método descrito a seguir.

Preocupados com a calibração dos medidores do tipo resposta que ainda eram à época o único tipo de equipamento economicamente viável para a medida de irregularidade em grande escala, dado o alto custo do perfilômetro GMR, Queiroz (1981), provavelmente em conjunto ou com base no trabalho de outros pesquisadores que também usaram dados de projetos brasileiros, tais como Mckenzie e Srinarawat (1978), desenvolveu a partir da correlação entre medições do “QI verdadeiro” realizadas com o perfilômetro GMR e medições do mesmo perfil feitas com nível e mira, um método para cálculo daquele índice utilizando para isso o cálculo da aceleração vertical média quadrática de bases 1,0 m e 2,5 m.

O novo índice gerado a partir do modelo publicado por Queiroz (1981) foi batizado de Quociente de Irregularidade ou simplesmente QI (nas publicações iniciais ele é apresentado como QI_r). Trata-se de um índice diferente dos dois anteriores.

A unidade dos três índices QI (contagens/km) é a mesma, até porque, um é apenas uma correlação com o outro que, que foi medido/calculado de forma diferente.

O método e o modelo desenvolvidos por Queiroz (1981) foram normalizados no Brasil para a calibração dos medidores do tipo resposta, dando origem à norma: DNER-164/94, aprovada originalmente em 1989.

Vale mencionar que Sayers et al. (1968a) mencionam que o mesmo QI utilizado no Brasil foi também utilizado na África do Sul e na Bolívia, sendo que o texto menciona trabalhos de autores locais a respeito.

Em se tratando do equipamento brasileiro de medida de irregularidade, segundo Bottura (1998) e Domingues (2004) o passo inicial para seu desenvolvimento foi

² Os dados originais de custos da PICR que envolvem irregularidade longitudinal foram obtidos com base no QI^*

dado em 1982 pelo Núcleo de Desenvolvimento Tecnológico de Transportes da Universidade de São Paulo - USP. Neste ano foi desenvolvido somente um sensor ótico compatível com a parte eletrônica do equipamento americano Mays Road Meter – já disponível em nosso país àquela época.

O apoio do Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e o financiamento do Banco Mundial foram essenciais tanto na primeira parte do projeto, quanto na fase subsequente que foi de 1983 a 1984, quando foi desenvolvido o quantificador de irregularidades de pavimentos rodoviários, que completou o sensor ótico desenvolvido em 1982 e assim, dispensou a eletrônica do equipamento importado.

O equipamento ficou conhecido como Integrador IPR/USP e foi ele o precursor nacional de outros equipamentos destinados à medida da irregularidade. Em síntese, as características funcionais deste equipamento não o distanciavam dos outros medidores do tipo resposta, principalmente na sua versão inicial que era instalada no eixo traseiro de um veículo de passeio. O maior diferencial construtivo deste equipamento em relação aos outros estava realmente no tipo de sensor utilizado, que era uma barra ótica ao invés de um contador de pulsos giratório.

Muito embora para nosso país o desenvolvimento do Integrador IPR/USP tenha significado um importante avanço rodoviário, dados os custos e dificuldades inerentes da simples importação e manutenção de equipamentos estrangeiros, é importante salientar que este equipamento não resolveu em nada as limitações inerentes aos equipamentos tipo resposta.

Mais tarde, o equipamento sofreu aperfeiçoamentos mecânicos e eletrônicos, além de ganhar também uma versão rebocável que tinha algumas vantagens operacionais, como por exemplo, evitar a mobilização de um veículo somente para a medida da irregularidade, poder ser transportado para o local de medição com mais facilidade, além de possibilitar a preservação das características mecânicas da estrutura onde o equipamento estava instalado.

Os nomes comerciais atuais dos descendentes do Integrador IPR/USP são, na versão instalada dentro de um veículo – Integrador SED, e na versão tracionada – Mirr. A figura 2.12 ilustra tais equipamentos.

Figura 2.12 – Fotografia do medidor de irregularidade do tipo resposta na versão rebocada – Mirr (esq.); desenho esquemático do painel e do funcionamento do integrador IPR/USP. Fonte: Domingues (2004).

Assim, depois de desenvolvidos no Brasil tanto um medidor de irregularidade do tipo resposta, quanto um método para calibrá-lo, foi muito mais fácil para qualquer técnico brasileiro avaliar a condição superficial de um pavimento.

Desde os primórdios da avaliação de irregularidade de pavimentos talvez o mais significativo experimento para o entendimento deste tema tenha sido o Experimento Internacional de Avaliação de Pavimentos, coordenado pelo Banco Mundial, no qual o Brasil teve uma ampla participação.

Sayers et al. (1986a) relatam em um texto de 468 páginas todo o projeto que visava estabelecer um padrão para a correlação e a calibração das avaliações de irregularidade longitudinal de pavimentos.

Além do Banco Mundial, o projeto envolveu os seguintes parceiros: a University of Michigan dos Estados Unidos, a Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes – GEIPOT e o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR/DNER do Brasil, o Laboratoire Central des Ponts et Chaussées da França, o Centre de Recherches Routières da Bélgica e o Transport and Road Research Laboratory do Reino Unido.

Embora Sayers et al. (1986a) seja um trabalho essencial para todos que querem entender sobre irregularidade de pavimentos, ele é ao mesmo tempo um trabalho extenso, o que impede uma análise mais profunda de todos os pontos abordados. Sendo assim, serão mencionados principalmente os objetivos e resultados que representam sua importância histórica no meio rodoviário mundial.

Logo no primeiro parágrafo do resumo do texto, Sayers et al. (1986a) relatam que a irregularidade de pavimentos estava ganhando importância crescente como um indicador da condição da rodovia, tanto em termos do desempenho do pavimento, quanto como determinante dos custos operacionais dos usuários.

Ainda segundo eles, foi a necessidade de medir a irregularidade que trouxe uma pluralidade de equipamentos ao mercado, que incluem desde equipamentos muito simples até outros muito complexos, sendo que a principal dificuldade é a correlação das medidas entre os vários equipamentos, assim como a sua calibração para uma escala comum. Tais dificuldades ainda são ampliadas devido a um grande número de fatores que causam variação entre as medidas de equipamentos similares e até entre medidas de um mesmo equipamento em diferentes momentos e diferentes condições. Todos esses fatores levaram ao experimento que foi realizado no Brasil em 1982.

O Experimento Internacional de Irregularidade de Pavimentos, conhecido em inglês pelo acrônimo IRRE, analisou duas categorias de equipamentos: os perfilômetros e os medidores do tipo resposta. Os resultados das medições de campo, realizadas em 49 seções (niveladas a cada 10 cm), que incluíam pavimentos de concreto asfáltico, com tratamento superficial, estradas apenas com cascalho e também rodovias de terra, indicaram que existia uma correlação entre as medidas dos dois tipos de equipamentos e por isso, seria possível que ambas as categorias trabalhassem com uma escala única, sem prejuízo da exatidão das medidas.

Em outras palavras, foi verificado que todos os equipamentos avaliados tinham a possibilidade de gerar um resultado que foi tido como suficientemente exato e reproduzível para uma avaliação comparativa. Desta maneira, faltaria apenas tais medidas serem correlacionadas com uma escala padrão para garantir comparabilidade e consistência das medições ao longo do tempo. Mesmo antes de decidir que escala seria esta, ela já havia sido denominada de IRI, acrônimo de “International Roughness Index”.

De posse da conclusão de que seria possível estabelecer um índice internacional de irregularidade, o estudo seguiu analisando uma gama de possíveis índices candidatos. Foram testados diversos índices: alguns baseados apenas em

características geométricas do perfil, outros baseados em simulação do perfil e também alguns baseados em análise espectral do perfil.

No final, o índice escolhido para ser o IRI foi o índice conhecido em inglês por ARS – “*Average Rectified Slope*”, ou seja, a média retificada da inclinação. Como toda medida de irregularidade de um pavimento é dependente da velocidade que se trafega, seria necessário padronizar para este índice uma velocidade. Por razões práticas e técnicas a velocidade padrão de 80 km/h foi escolhida. Para resolver a questão da calibração, foi preciso estabelecer um modelo matemático de referência o que possibilitou seu cálculo a partir de um perfil longitudinal, o que acrescenta a letra “R” ao acrônimo anterior, ficando, portanto: RARS₈₀.

O modelo matemático desenvolvido não deixa de ser um modelo de quarto de carro, tal qual o modelo usado no perfilômetro GMR original para simular o *BPR Roughometer*. A diferença principal está nos parâmetros do quarto de carro usados em um e em outro modelo. Segundo Sayers et al. (1986b), os parâmetros do modelo de quarto de carro usado no cálculo do RARS₈₀, que foi escolhido para ser o IRI são conhecidos como *Golden Car parameters*.

É importante registrar que os parâmetros conhecidos como *Golden Car parameters* foram determinados por ocasião dos estudos realizados por Gillespie et al. (1980), que incluíram testes com 10 diferentes conjuntos de parâmetros e selecionaram aquele que produziu a melhor correlação com duas mais importantes frequências de ressonância de um veículo.

É preciso ainda frisar que este índice não foi determinado por ocasião do IRRE; nesta oportunidade ele só foi escolhido. Ele já havia sido estudado alguns anos antes justamente como providência para se resolver o problema da calibração dos medidores de irregularidade do tipo resposta utilizando o perfil medido com nível e mira como padrão, conforme discorrem Gillespie et al. (1980) e Sayers et al. (1986d).

Assim surgiu o IRI, hoje aparentemente o mais conhecido e mais usado índice de irregularidade ao redor do mundo, estabelecido a partir dos resultados dos testes realizados em nosso país em 1982, mas que até meados de 2006 ainda não tinha

sido normalizado no Brasil, que preferiu manter o QI – também desenvolvido aqui por ocasião da PICR, como índice oficial.

Vale notar que os próprios autores do relatório final do IRRE, Sayers et al. (1986a), mencionam a simplicidade de correlação entre os resultados obtidos a partir dos índices RARS₈₀ e QI, calculados a partir de um perfil longitudinal. O modelo de correlação apresentado pelos autores, que será objeto de maior discussão no Capítulo 4, está disposto abaixo:

$$QI = (14 \cdot IRI) - 10 \quad (2.1)$$

As maiores inconveniências do QI ficam por conta dele ser um índice que não é usado nos países desenvolvidos, ou seja, atrapalha comparações diretas entre situações de malhas rodoviárias estrangeiras, além do fato de sua escala no modelo de determinação através da aceleração média quadrática não partir do zero e sim do valor -8,54 cont/km.

Como curiosidade, vale informar que dentre os 5 índices verificados pelo IRRE como possíveis candidatos para se tornar o IRI, o QI e o RARS são os únicos que podiam ser calculados a partir das medidas do perfil feitas com nível e mira. Esse é um dos motivos pelos quais se o RARS₈₀ não tivesse sido o índice escolhido, hoje o IRI seria o QI brasileiro.

Com a criação do IRI, os perfilômetros GMR passaram a usar o modelo RARS₈₀ visando obter como saída direta o valor do IRI em substituição ao modelo anterior que gerava como saída o “QI verdadeiro”, proveniente da simulação do BPR, e desta maneira, tanto ele, quanto o QI e o QI*, tenderam ao esquecimento no hemisfério norte que passou a usar como padrão de medida de irregularidade o IRI.

Este experimento foi um marco importantíssimo na consolidação da medida de irregularidade longitudinal de pavimentos e teve impacto mundial, um exemplo disto está em Gorski (1986). As conclusões do IRRE ajudaram e ainda ajudam na formação dos técnicos e pesquisadores atuais sobre o tema.

Para finalizar este relato histórico sobre a avaliação da irregularidade de pavimentos ainda falta mencionar sobre mais dois acrônimos: o RPUG e o MERLIN.

O primeiro deles aconteceu em 1989 nos Estados Unidos. Trata-se da primeira reunião do recém-criado à época (*Road Profiler User Group*), ou grupo dos usuários de perfilômetros. Esta primeira reunião aconteceu no mês de novembro e contou com 35 participantes, que tiveram à disposição no evento 4 perfilômetros inerciais do tipo *South Dakota*. Nesta oportunidade os participantes discutiram principalmente sobre índices de irregularidade. Para se ter uma idéia de quão pioneira foi esta união de usuários, à época, segundo Maurer e Chalman (2003) menos de 6, dentre todos os estados norte-americanos, tinham um perfilômetro inercial.

Desde aquele ano até hoje, reuniões anuais do RPUG aconteceram em diversas cidades dos EUA, sempre com a apresentação de trabalhos e discussão de temas que levaram a muito desenvolvimento sobre este assunto. Os seguintes temas já foram objeto das reuniões do RPUG: equipamentos e suas funcionalidades, redução de dados, repetitividade dos resultados, calibração, análise de dados, organização e publicação do conhecido ‘Little Book of Profiling’ por Sayers e Karamihas (1998), experimentos internacionais, perfilômetros leves voltados para a construção de rodovias, entre outros. O grupo mantém um *site* na Internet que contém muitas informações sobre as últimas reuniões, Road Profiler User Group (2004).

Segundo os mesmos autores citados, a missão do RPUG é ser: “uma organização dedicada à manutenção de um fórum para pessoas se especializarem em serviços voltados à engenharia de transportes, especialmente relacionados a perfis de pavimentos e à coleta e análise de dados dedicadas à avaliação automática da condição de pavimentos”.

O RPUG, como qualquer empresa moderna, tem também sua visão definida, ou seja, como eles pretendem atingir sua missão:

- Promover um encontro informal por ano;
- Trocar idéias e informações de maneira informal;
- Promover treinamentos;
- Ser um fórum tanto para os operadores de perfilômetros, quanto para outros interessados;

- Ser um fórum de discussão para pesquisas em andamento;
- Manter o foco nas últimas iniciativas relacionadas às áreas de interesse do grupo;
- Não requerer ou obrigar a elaboração de trabalhos escritos;
- Criar e manter relações pessoais.

Uma vez bem entendido o importante papel que o grupo de usuários de perfilômetros vem exercendo desde 1989 para a difusão e criação de conhecimento sobre este tema, cabe a este relato incluir informações sobre o equipamento conhecido pelo nome de MERLIN.

Toda a bibliografia pesquisada não revela exatamente quando o MERLIN foi desenvolvido, mas levando-se em conta que o primeiro trabalho publicado sobre ele foi em 1991, pode-se estimar que o equipamento não tenha sido desenvolvido muito antes deste ano, segundo Cundill (1996).

Desenvolvido pelo *Transportation Research Laboratory* TRL da Inglaterra o MERLIN que é o acrônimo de *Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation* foi concebido para ser um equipamento simples e barato, passível de ser construído em qualquer parte do mundo visando possibilitar a avaliação da irregularidade longitudinal, de acordo com Bennett (1996).

Figura 2.13 – Desenho esquemático do equipamento Merlin. Fonte: Cundill (1996).

Com um desenho parecido com o de uma bicicleta, conforme ilustra a figura 2.13, o equipamento de uma roda só pode ser operado por uma só pessoa que vai caminhando e parando para fazer o registro das medidas em intervalos regulares. Não se trata propriamente de um perfilômetro, pois ele não gera o perfil longitudinal do pavimento por onde ele passou. Este equipamento possui uma estatística própria de obtenção de resultados, que gera diretamente o resultado do IRI.

Técnicos de campo brasileiros que já verificaram os resultados de tal equipamento relatam que a exatidão dos resultados obtidos com o Merlin é razoável, especialmente para valores mais altos de irregularidade. Durante a avaliação, o registro da situação da superfície do pavimento é realizado manualmente em um formulário quadriculado com a magnitude das imperfeições entre dois pontos de apoio localizados a 1,80 metros um do outro.

Uma medição normal com o equipamento deve registrar duzentos pontos no formulário e, com este formulário preenchido, existe uma regra desenvolvida a partir de uma estatística específica que correlaciona a posição de alguns pontos do histograma com um valor que depois é convertido para IRI por um modelo.

Ao contrário do que muitos usuários do MERLIN pensam, este equipamento não é apropriado para medir qualquer magnitude de IRI, tampouco produz resultados com grande exatidão. Seu modelo de cálculo funciona apenas para uma faixa de IRI, que não inclui valores muito baixos. Segundo Cundill (1996), o MERLIN é capaz de estimar, com erro de aproximadamente 10%, a irregularidade longitudinal de superfícies pavimentadas ou não, que possuam IRI compreendido entre 2,4 e 15,9 m/km.

É bastante óbvio que este equipamento não supre as necessidades para a realização de um longo levantamento, nem foi para isto que ele foi idealizado. Sua utilização está muito mais ligada a levantamentos de pequenos trechos durante a construção ou recuperação de um pavimento. Embora já tenha acontecido na prática, não é recomendável o uso do Merlin para o estabelecimento de bases de calibração de medidores do tipo resposta. Além de tal equipamento não medir o perfil topográfico, sua estatística permite apenas o cálculo do IRI (m/km) e não do QI (cont/km).

No Brasil o MERLIN é produzido pela empresa Solotest Aparelhos para Mecânica do Solo Ltda, desde o ano 2000, e tem alguns entusiastas, principalmente entre as empresas concessionárias de rodovias, que controlam a irregularidade de pequenas restaurações logo após sua execução. Um dos trabalhos brasileiros publicados a respeito dessa utilização foi escrito por Cassaniga e Machado Filho (2002).

Nos anos 90, não houve nenhuma grande inovação no método de medição dos perfilômetros e na avaliação de irregularidade longitudinal dos pavimentos. O que se intensificou foi a utilização dos perfilômetros inerciais e isto naturalmente incentivou a fabricação deste tipo de equipamento por mais empresas, principalmente nos EUA.

Ainda nos anos 90, intensificou-se o uso de perfilômetros inerciais portáteis, montados em carrinhos elétricos – ver figura 2.14. Este tipo de equipamento tem seu principal uso atrelado ao controle de pavimentos em construção, segundo Choubane e MacNamara (2001) e Fernando (2003). Em geral ele não apresenta novidades tecnológicas.

Figura 2.14 – Fotografia de um perfilômetro inercial laser portátil. Fonte: Perera e Kohn (2002a).

Abrindo parênteses na avaliação de irregularidade de pavimentos prontos, vale mencionar um equipamento bastante diferente, mas que também visa medir a irregularidade. Trata-se do equipamento chamado de LTP, citado por Leichty (2003), que foi desenvolvido para medir a irregularidade de pavimentos de concreto de cimento Portland em construção. O equipamento trabalha fixado na parte traseira da

vibro-acabadora e mede a irregularidade assim que o acabamento foi feito, com o concreto ainda fresco, o que permitiria alguma melhoria imediata no caso de um índice alto ter sido apontado.

Para finalizar este histórico de maneira a deixá-lo atualizado até a data de conclusão do trabalho, é preciso incluir uma grande inovação tecnológica que já é datada do século XXI, trata-se do equipamento *Pavement Profiler Scanner* - PPS-2000, desenvolvido pela empresa Norte-americana, Phoenix Scientific (2004a, 2004b), ilustrado na figura 2.15.

Trata-se de um equipamento, ao que parece sem similares, que utiliza um feixe laser de alta potência, que através de um dispositivo mecânico atrelado a um espelho, faz esse feixe varrer em alta velocidade o perfil transversal do pavimento de uma faixa de rolamento, enquanto o veículo que leva o equipamento desloca-se à velocidade normal da via, Herr (2004).

A grande vantagem está no resultado gerado, pois o equipamento é capaz de ler o perfil transversal em cerca de 1000 pontos a cada passagem do laser. Com isso o equipamento é capaz de gerar um mapa tridimensional da superfície do pavimento, que pode ser útil na identificação de defeitos da superfície e até no tipo de restauração indicado, por exemplo, ajudando a determinar com precisão quantos milímetros fresar para se atenuar a irregularidade de toda a faixa de rolamento.

Na determinação dos perfis longitudinais, embora o método para sua determinação ainda seja o mesmo do perfilômetro GMR, este equipamento possibilita algumas vantagens interessantes a seus usuários, como por exemplo, avaliar a irregularidade longitudinal em praticamente qualquer ponto do perfil transversal. Ou seja, com este equipamento seria possível determinar o perfil longitudinal com o maior valor de IRI, ou mesmo ter certeza de que o IRI está sendo calculado sobre o ponto máximo de afundamento plástico nas trilhas de roda.

Uma outra vantagem em termos de determinação do perfil longitudinal está na possibilidade de se usar não somente um ponto do perfil transversal, mas sim uma média de alguns pontos próximos, o que ajudaria na eliminação de qualquer efeito remanescente da macrotextura do revestimento.

Na determinação dos valores dos afundamentos plásticos em trilhas de roda esse equipamento é muito eficiente, pois com os dados por ele coletados é fácil determinar o ponto máximo de afundamento, independentemente da posição do veículo na faixa de rolamento – o que é uma limitação deste tipo de determinação em perfilômetros inerciais que trabalham com 3 módulos laser, por exemplo.

Um último uso que vale mencionar para este equipamento está na possibilidade de determinação, ainda em um mesmo passe, da condição do degrau entre pista e acostamento, conforme Phoenix Scientific Inc. (2001).

Figura 2.15 – Fotografias de 3 instalações diferentes do equipamento PPS-2000. Fonte: Phoenix Scientific Inc (2004a).

Pelo que pode ser pesquisado, ainda existem poucos equipamentos deste em operação, muito embora eles já estejam funcionando do Japão ao Reino Unido, o que pode indicar para o futuro que este tipo de tecnologia pode vir a substituir os perfilômetros inerciais com módulos laser individuais.

Uma outra iniciativa que visava resultado similar ao equipamento descrito, mas com outro tipo de tecnologia, foi explicada por Bursanescu (1997). Muito embora o equipamento descrito por ele fosse capaz de determinar até a localização e extensão de defeitos superficiais a partir de diversos sensores laser diferenciados, acredita-se que ele não tenha chegado a uma versão comercial.

Em termos de Brasil, aparentemente ainda estamos um pouco longe de ter um equipamento destes rodando em solo nacional. A substituição dos medidores de irregularidade do tipo resposta pelos perfilômetros inerciais ainda está em curso em nosso país. Em um levantamento realizado no final de 2003, o equipamento desenvolvido durante esta pesquisa foi o único perfilômetro inercial encontrado no Brasil. Já no final de 2005, um novo levantamento indicou que já existiam por aqui 3 perfilômetros inerciais.

2.3 Os equipamentos mais usados atualmente no Brasil na avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos

Muito embora o item anterior já tenha mencionado algo sobre os equipamentos que serão abordados nesta parte, o fim aqui é outro, muito mais específico.

Será evidenciado sob este título mais detalhadamente sobre as principais características funcionais (o que incluem as limitações) dos equipamentos usados em nosso país para medir a irregularidade longitudinal, antes da chegada dos perfilômetros inerciais, e que justificam os esforços e os investimentos desta pesquisa.

Basicamente, os quatro equipamentos usados para medir a irregularidade longitudinal de pavimentos em nosso país até o ano de 2002 foram: medidores do tipo resposta, nível e mira (aqui incluídas as estações totais modernas), Dipstick e o Merlin.

Se fosse necessário mencionar apenas um tipo equipamento como o mais usado em nosso país, esse sem dúvida seria o tipo resposta, e é por esse motivo que este item tem um foco mais acentuado nele, embora serão abordados o Dipstick e o Merlin. O nível e mira, por ser de conhecimento geral, será mencionado apenas quando se tratar da calibração dos medidores do tipo resposta.

É possível afirmar que com poucas exceções, cada um dos equipamentos mencionados teve um papel diferente do outro, a saber: o medidor tipo resposta era usado para grandes levantamentos; o nível e mira era usado para a medição de trechos de calibração que seriam usados para os medidores do tipo resposta, e vez por outra, podia ser usado em um levantamento curto, como de uma pista aeroportuária; o Dipstick usado normalmente em pisos industriais, em pavimentos de concreto de pequenas extensões e eventualmente para medir uma base de calibração para os medidores do tipo resposta; e por fim o Merlin, usado para medição de pequenas extensões de trechos pavimentos em execução ou em restauração, e eventualmente para verificar a irregularidade de uma base de calibração dos medidores do tipo resposta.

De todos os quatro equipamentos mencionados existem em nosso país alguns exemplares espalhados por nosso território, não sendo constatada nenhuma diferença regional significativa em termos de tecnologia, até porque, a maioria deles é de propriedade de empresas de projeto e consultoria de pavimentos, que prestam serviço em qualquer ponto do Brasil.

Existe um quinto tipo de equipamento presente no Brasil que não foi mencionado no grupo anterior por não ser de grande conhecimento, nem de grande uso em termos nacionais, mas precisa ser citado por sua especificidade. Trata-se do perfilógrafo da Califórnia, equipamento de propriedade da Associação Brasileira de Cimento Portland, localizada em São Paulo. Este equipamento foi adquirido pela instituição visando aprimorar o controle da execução de pavimentos de concreto de cimento Portland.

Segundo Domingues (2004), o Perfilógrafo da Califórnia é justamente indicado para o controle da suavidade do rolamento de pavimentos rígidos em fase de construção. Este tipo de equipamento é recomendado para esses fins pelo Guia de Construções da AASHTO de 1998.

Embora seja um equipamento grande, pouco prático e de baixa produtividade, este equipamento é normalizado pela American Society of Testing and Materials (1998), e apresenta dois pontos positivos que o tornam adequado aos fins a que se propõe.

O primeiro diz respeito a sua massa, pois embora com dimensões grandes, o equipamento é leve e por isso pode ser usado antes da cura completa do concreto de cimento Portland, o que permite em tese alguma intervenção visando corrigir a irregularidade antes do endurecimento completo.

O segundo ponto positivo está na possibilidade do equipamento indicar de maneira rápida e com pequeno erro em termos de deslocamento longitudinal, quais são os pontos que mais estão colaborando com a irregularidade.

Mesmo levando-se em conta os pontos positivos do equipamento, acredita-se que o seu lado negativo deve em pouco tempo ensejar sua substituição por equipamentos menores, do tipo do *Walking Profiler* da empresa Australiana AARB, citado no item anterior.

Uma vez explicado sobre a exceção em termos de avaliação de irregularidade no Brasil, é momento de voltar aos equipamentos mais comuns, já mencionados.

Aos técnicos da área de pavimentação, é até desnecessário dizer que o equipamento mais comum para a avaliação de irregularidade longitudinal de pavimentos no Brasil é o medidor do tipo resposta, ilustrado na figura 2.16.

É este o único tipo de equipamento específico para essa finalidade normalizado em nosso país. São quatro as normas vigentes que tratam a este respeito: a DNER-PRO 182/94, que discorre sobre a avaliação da irregularidade em si, a DNER-PRO 229/94, que trata sobre a manutenção do equipamento e a DNER-PRO 164/94 que contém o procedimento de calibração para esse tipo de equipamento, onde está prescrito o uso da última norma, a DNER-ES 173/86, onde está o procedimento para a determinação da irregularidade com o nível e mira.

Figura 2.16 – Desenho esquemático de funcionamento de um medidor de irregularidade do tipo resposta. Fonte: Sayers e Karamihas (1998).

Como foi mencionado, os equipamentos do tipo resposta realizam a avaliação da irregularidade dos pavimentos através da acumulação em um sentido, dos deslocamentos entre a carroceria e o eixo traseiro de um veículo de passeio. Como esses deslocamentos são muito sensíveis à velocidade em que o veículo está trafegando, os equipamentos do tipo resposta necessitam de uma calibração, muitas vezes chamada de calibração por correlação, onde objetiva-se estabelecer para uma determinada velocidade de operação a relação entre o valor de um índice de irregularidade e a quantidade de deslocamento vertical por deslocamento horizontal indicada pelo equipamento.

Naturalmente para obter-se uma curva de calibração para uma determinada velocidade de operação do equipamento é necessário efetuar o processo descrito acima em diversos segmentos que representem bem os diferentes valores de irregularidade que poderão ser encontrados na medição real. Isto é previsto na própria norma de calibração.

De posse do modelo de correlação, o equipamento estaria em tese habilitado a realizar medições, que posteriormente serão convertidas pelo modelo para o índice de irregularidade QI.

Em poucas palavras acabou-se de resumir o conteúdo da norma DNER-PRO 164/94. Tal documento indica que a avaliação de irregularidade nos segmentos padrão deve seguir a norma DNER-ES 173/86 que especifica como se calcula a irregularidade a partir de um perfil medido com nível e mira em um trecho de 320 m de comprimento, que é o correspondente a uma base, das 20 necessárias a uma calibração de medidor do tipo resposta, segundo a primeira norma citada.

A norma prevê que o medidor deve passar 5 vezes sobre cada base de calibração em cada uma das velocidades: 80 km/h, 50 km/h e 30 km/h. Desta maneira, obtêm-se uma curva de calibração para cada uma das velocidades.

Além de tratar dos procedimentos de calibração, a norma traz ainda recomendações sobre a verificação periódica no equipamento e em seus resultados.

Embora a norma de calibração e de utilização dos medidores do tipo resposta tenha sido bem elaborada, é possível notar que existem alguns fatores que prejudicam a exatidão e a confiabilidade de avaliações feitas com os equipamentos do tipo resposta, motivo pelo qual, a partir do ano de 2003 elas começaram a ser rejeitadas tanto por empresas privadas, quanto por órgãos públicos.

Os 3 principais fatores que ensejaram essa postura são: dificuldade de garantir que o equipamento foi recentemente e corretamente calibrado e que desde então o veículo foi bem conservado, não tendo rodado muito ou sofrido com impactos danosos à sua suspensão; garantia de que as condições em que o veículo foi calibrado são as mesmas na qual o veículo será utilizado para a medição; a garantia

que o equipamento será usado realmente na velocidade de calibração, nem mais, nem menos, e que os trechos onde a velocidade diferir sejam medidos novamente.

Acerca das limitações mais facilmente observáveis nos medidores do tipo resposta pode-se dizer que elas são bastante conhecidas da maioria de seus usuários mais críticos e conscientes. Vários autores já retrataram sobre elas, a saber: Domingues (2004), Farias e Souza (2002), Pavement Tools Consortium (sem data), Karamihas (sem data), Visser et al. (1998), Sayers et al. (1986a), Sayers et al. (1986b), Gillespie (1992), Kulakowski (1986), entre outros.

Os principais pontos levantados por esses autores dizem respeito à manutenção das condições do veículo onde o equipamento está instalado, visando garantir controle sobre todas as variáveis que afetam a sua dinâmica; à dificuldade em comparar medidas feitas em períodos diferentes ou com equipamentos diferentes; e por fim em assegurar que os procedimentos de operação e calibração sejam rigorosamente observados.

Um outro aspecto que também pode ser levantado diz respeito ao custo da calibração do equipamento. O método de medição com nível e mira preconizado pela norma é custoso, não só pelo pessoal, equipamento e deslocamentos envolvidos, como também tendo em vista a localização dos trechos e o bloqueio temporário das faixas para que os trabalhos com o nível e mira e posteriormente com o equipamento possam ser realizados com a devida segurança.

Em relação à calibração, mesmo com a norma brasileira já mencionada, preconizar o uso de bases com os mais diferentes níveis de irregularidade, embora não se tenha encontrado um trabalho a esse respeito, há pessoas no meio técnico, dentre elas este autor, que acreditam que esse pode não ser o melhor método. Para garantir melhores resultados, pode ser mais adequado que a calibração do equipamento utilize bases que melhor representem o nível de irregularidade que se espera obter no trecho a ser efetivamente medido. Por exemplo, para se medir uma rodovia com irregularidade muito baixa, pode ser mais adequado que a maioria das bases de calibração usadas na elaboração do modelo de correlação para o equipamento tenham irregularidade em nível similar. Há técnicos que vão ainda além nas críticas e defendem o uso de bases em trechos de curva e greide variados.

Para uma empresa privada ou um órgão governamental que contrata determinado prestador de serviços para uma avaliação de irregularidade não é simples nem prático manter um técnico bem treinado no assunto o tempo todo com a equipe contratada para fiscalizar toda a execução do trabalho, desde a calibração até a efetiva medição.

Sobre o equipamento em si as normas não são muito detalhistas, pois focam mais nos resultados a serem produzidos pelo aparelho quando de sua calibração do que em suas características mecânicas. Nesse aspecto caberia provavelmente à norma ser mais específica em relação à resolução do sensor principal do equipamento que efetivamente fará as leituras. Dependendo do nível de irregularidade que se vai medir com um medidor do tipo resposta, essa resolução pode fazer muita diferença, conforme um dos estudos feitos durante este trabalho evidenciará.

A título de ilustração, pode-se imaginar a diferença em se usar um medidor do tipo resposta, um sensor que meça a distância entre eixo e carroceria com resolução de 1 mm, em relação a usar outro com resolução de 10 mm. Só aqui já se terá muita diferença, que deve refletir inclusive na repetitividade do equipamento.

É importante registrar que nos EUA existe uma norma que trata do cálculo do IRI a partir de um perfil longitudinal medido estaticamente, visando a calibração dos medidores do tipo resposta. Trata-se da norma ASTM E 1448-92, publicada originalmente em 1992, e que agora com o predomínio dos perfilômetros laser, já não têm a importância de outrora. Sobre a calibração de medidores do tipo resposta para determinação do IRI, Bennett (1996) traz explicações mais detalhadas.

Comenta-se no meio técnico, principalmente dentre aqueles que já usaram e já refletiram bastante sobre os resultados entregues pelos medidores do tipo resposta, que existiria uma faixa de valores de irregularidade para os quais os medidores do tipo resposta são mais adequados. Não dá para se saber ao certo como se chegou a essa conclusão, mas fato é que realmente tais equipamentos têm dificuldade maior de medir com exatidão e repetitividade os trechos com irregularidade muito baixa ou muito elevada, conforme um outro estudo realizado neste trabalho indicará.

Acerca do Merlin e do Dipstick, não obstante eles terem sido descritos razoavelmente no item anterior, cabe aqui comentar um pouco sobre suas características operacionais.

O grande mérito do Merlin é ser um equipamento simples e barato, que em tese pode ser fabricado pelo próprio usuário com base nas características existentes em documentos diversos emitidos por seus difusores. Operacionalmente é também um equipamento simples, com o qual alguém com mínimo treinamento consegue trabalhar adequadamente.

O equipamento tem ainda a vantagem de poder ser rápida e facilmente verificado, mesmo em campo, o que traz confiabilidade a seus resultados. O uso do Merlin, entretanto, é limitado por duas razões bem diferentes: nível de irregularidade e comprimento do trecho a ser medido.

A limitação em relação ao nível de irregularidade está contemplada no próprio documento de Cundill (1996), pois o modelo que correlaciona o resultado extraído da medida do equipamento só é válido para os valores de IRI compreendidos entre 2,4 e 15,9 m/km. Ou seja, trechos recém construídos com boa qualidade, necessitariam de um estudo de um novo modelo para que o equipamento possa ser utilizado.

A segunda limitação é bastante óbvia pelo tipo do equipamento. Por ser manual, ele serve apenas para medição em trechos curtos, normalmente sem tráfego, pois não é nem prático, nem seguro ou econômico, manter uma pessoa empurrando um Merlin por uma dezena de quilômetros.

Sendo assim, fica a recomendação de uso do equipamento somente em trechos curtos de restauração ou de execução de pavimentos com revestimentos asfálticos ou de cimento Portland, onde não haja tráfego e onde a irregularidade esperada esteja dentro da faixa de atuação do equipamento. Como o Merlin permite a estimativa do IRI (m/km), não se recomenda que tal equipamento seja utilizado para verificar qualquer outro.

Os pontos fortes do Dipstick quando usado no setor rodoviário são: a exatidão de suas medidas e a rapidez com que elas podem ser feitas em relação à medição com

nível e mira. Não há uma limitação técnica para o uso desse equipamento. O seu maior limitante é justamente a produtividade, que é alta em relação ao nível e mira, mas muito baixa em relação aos equipamentos automáticos ou instalados em veículos, assim ele também não se presta a levantamentos longos.

Desta maneira, o uso do Dipstick é uma boa alternativa ao uso do nível e mira para a medição de bases de calibração de medidores do tipo resposta – até porque além de ser mais rápido, necessita de apenas um operador. Naturalmente, devido às suas características e seu tamanho reduzido, este equipamento também pode ser indicado para verificar medições de perfis feitas com perfilômetros inerciais.

2.4 A influência da irregularidade na vida útil do pavimento e no custo operacional dos veículos

Seguindo a ordem natural de um trabalho que trata sobre a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos, vez que já foram evidenciados os principais equipamentos usados neste tipo de avaliação, cabe uma exposição sobre a relação entre o nível de irregularidade de um pavimento e seus principais impactos econômicos, visando trazer à tona a relação entre a irregularidade e os seus custos.

Os dois principais custos com os quais a irregularidade é mais comumente relacionada são: os custos operacionais dos veículos e os custos da infra-estrutura, ou seja, com a vida útil do pavimento.

Como é possível se imaginar, vários são os estudos que visaram estabelecer tais relações. As correlações entre a irregularidade do pavimento e o custo operacional dos veículos são mais antigas que as correlações entre a irregularidade e a vida útil do pavimento.

A primeira ‘equação’ interessa diretamente aos usuários do pavimento e foi objeto de estudos iniciais de grande impacto, realizados a partir da década de 70, segundo Paterson (1987). O mesmo autor afirma que o aumento do custo operacional de todos os veículos que usam determinada rodovia devido ao aumento da irregularidade pode ser de 10 a 20 vezes maior que o custo que teria o gestor

daquela malha se a conservasse adequadamente visando manter a irregularidade dentro dos níveis aceitáveis pelos usuários. Em outras palavras, pode-se dizer que a diminuição nos níveis de irregularidade pode levar a grande economia em termos de custo operacional, principalmente se forem levados em conta valores mais altos de irregularidade.

Já a correlação entre irregularidade e vida útil do pavimento muito interessa a todos os gestores viários, em especial quando se trata de pavimentos novos ou recém-restaurados. Se os gestores soubessem com exatidão o quanto se ganha em vida útil a cada diminuição de 1 cont/km no QI ou de 1 m/km no valor do IRI, seria fácil calcular até quanto determinado gestor pode ou deve pagar além do preço médio de mercado, para um serviço de recuperação ou construção que entregue o pavimento menos irregular.

Obviamente na grande maioria dos países, senão em todos, ambas as preocupações são governamentais e devem ser pensadas em conjunto. Ter pavimentos em melhores condições é bom pelos dois lados. De um lado, aumenta-se a competitividade do país e minimizam-se os desperdícios gerados com o aumento desnecessário do custo operacional dos veículos principalmente nos itens: suspensão, pneus, manutenção geral, consumo de combustível, velocidade de deslocamento e acidentes provocados pela situação do pavimento.

De outro lado, o Estado também deve se preocupar em empregar da melhor maneira possível os recursos provenientes dos impostos, fazendo investimentos que considerem todas as possibilidades técnicas e que levem aos resultados necessários, com a otimização do emprego de capital. Nesta esteira que está a preocupação em se encontrar o melhor balanceamento entre investimento inicial, investimento em manutenção e vida útil, considerando em conjunto o custo operacional.

Os pensamentos demonstrados não mudam em nada caso o país decida por conceder a administração e operação de suas rodovias ou pistas de aeroportos à iniciativa privada. Neste caso, com a fiscalização mais próxima dos investidores diretos daquele negócio a preocupação do melhor emprego do capital é algo para ser pensado diariamente, sendo que a responsabilidade em proporcionar um custo

operacional adequado continua a ser do Estado, pois coube a ele formatar as condições da concessão, onde se determinaram os valores dos pedágios e as condições mínimas que a rodovia deve apresentar durante todo o prazo de duração daquele contrato – pensamento análogo vale para os aeródromos.

Sobre os custos operacionais, vários foram os trabalhos que analisaram sua relação com as características do pavimento, especialmente após os anos 70. Dentre eles, sem dúvida os mais reconhecidos e extensos foram os desenvolvidos sob o patrocínio do Banco Mundial em conjunto com entidades locais, em países subdesenvolvidos, tais como: Quênia, Caribe, Brasil e Índia, que culminaram nos modelos contemplados no *The Highway Design and Maintenance Standards Model*, HDM, segundo Watanatada et al. (1987).

Por uma série de motivos, que contempla naturalmente as próprias dificuldades de quantificação e especificação, os estudos de custos operacionais mencionados não incluem os custos com as alterações no tempo de deslocamento, nem os custos com acidentes, provocados pelas condições do pavimento.

Dentre os quatro estudos, pode-se dizer facilmente que aquele conduzido no Brasil foi o maior e mais importante deles. Realizado entre os anos de 1975 e 1984, teve como resultados notáveis os modelos não lineares para a predição da velocidade e consumo de combustível, baseados em conceitos mecânicos e comportamentais, segundo Watanatada et al. (1987). No campo da influência da irregularidade, os modelos desenvolvidos a partir da pesquisa realizada em nosso país também chegaram a modelos não lineares, mais abrangentes que os demais.

Apenas para dar uma idéia numérica, do que pode representar em termos de aumento de custos o aumento da irregularidade longitudinal, será feita uma citação quantitativa dos modelos ilustrados em Watanatada et al., que se referem aos dados extraídos do estudo brasileiro.

Para uniformizar a informação a ser apresentada a seguir, somente como um exemplo do que consta no estudo brasileiro, os dados a serem informados referem-se aos custos operacionais de um caminhão grande com meia-carga.

Em relação à velocidade média a ser desenvolvida por esse tipo veículo em um segmento pavimentado tangente em nível, o modelo prevê uma redução, apenas por causa da irregularidade, de 70 km/h para 50 km/h, para um aumento da irregularidade (QI) de 25 cont/km para 125 cont/km.

O aumento no consumo de pneus para a mesma variação de irregularidade chega próximo a 15%. O aumento no consumo de combustível para trechos em nível e em tangente não é muito significativo para a variação de QI indicada, mas torna-se significativo se o trecho for em curva, atingindo também o valor de aproximadamente 5%.

O aumento no custo de peças usadas na manutenção deste tipo de veículo, para a mesma variação de irregularidade é de 150%. O percentual de aumento no tempo de mão de obra necessário à manutenção do veículo também aumenta aproximadamente no mesmo percentual: 150%. A depreciação do veículo aumenta em 22%, para as mesmas condições.

Como é possível notar através deste pequeno exemplo, muito específico, extraído dos estudos do HDM, os custos operacionais sofrem aumentos muito importantes e por isso necessitam ser levados em conta em um plano rodoviário nacional.

Passados mais de 30 anos desde quando tais modelos começaram a ser desenvolvidos, é difícil compreender que este mesmo país que foi sede de tais estudos, passava no dia em que esse parágrafo foi escrito, (início do ano de 2006), por uma operação tapa-buracos emergencial em nível nacional, que nem sequer planejamento tinha.

É provável que o montante total de custos operacionais que os usuários de rodovias incorreram em todos esses anos de abandono da malha não caibam no visor de uma calculadora com 12 dígitos.

A abrangência dos estudos e análises que levaram ao HDM não permite que se alongue demais sobre o tema, sob pena de mudar o foco do trabalho. Portanto fica aqui a recomendação de consulta aos diversos volumes que compõem o HDM para aqueles que quiserem se aprofundar na seara da relação entre irregularidade e

custos operacionais rodoviários. Sestini (2000) traz um exemplo de aplicação desta relação.

Ainda sobre o aumento dos custos operacionais, Paterson (1987) cita trabalhos oriundos dos anos 80, que trazem como resultado um aumento estimado de 2 a 4% no custo operacional de veículos para cada unidade de IRI acrescentada. O custo operacional, segundo ele, sofre um aumento de aproximadamente 15% entre um pavimento muito bom e um pavimento em situação muito ruim em termos de irregularidade superficial.

Em pavimentos urbanos também é forte a relação entre a irregularidade longitudinal e os custos operacionais dos veículos segundo Dewan (2002), assim como é boa a correlação entre a irregularidade em vias urbanas e a percepção da qualidade do rolamento pelos usuários segundo La Torre (2002) e Loizos e Plati (2002). Lin et al. (2003) relacionam defeitos superficiais observáveis em pavimentos urbanos com a irregularidade longitudinal.

Sobre o consumo de combustível em pavimentos com maior irregularidade, um estudo mais recente realizado na pista experimental americana chamada de Westrack, localizada no estado de Nevada e patrocinada pelas autoridades rodoviárias dos EUA, indicou que após uma restauração realizada na pista que levou a uma diminuição de no mínimo 10% nos valores do IRI dos trechos em tangente, o consumo de combustível dos caminhões foi reduzido em 4,5% segundo Mitchell (2000). Vale comentar que os caminhões de Westrack são controlados remotamente, dispensando o uso de motoristas, o que elimina possíveis influências humanas no resultado obtido.

Ainda sobre o aumento de consumo de combustíveis, Eapa e Eurobitume (2004) citam um estudo desenvolvido pelo departamento de transportes da Suécia que revelou variações de até 11% no consumo de combustível de veículos de passeio quando se variou somente condição superficial do pavimento.

A respeito dos acidentes, embora não se tenha uma análise em termos de custos, existem trabalhos como Bester (2003) que indicam que as condições de rolamento de um pavimento podem causar um aumento da ordem de 70% no índice de acidentes rodoviários.

Por fim, cabem algumas informações mais detalhadas a respeito da relação entre a irregularidade e a vida útil do pavimento. Esta relação está ligada à ação das cargas dinâmicas sobre o pavimento.

Uma explicação simples para este efeito é que ao se deslocar sobre uma superfície plana e livre de irregularidades um determinado veículo de carga causa um certo dano sobre a estrutura do pavimento, proporcional à carga aplicada por cada um dos seus pneus. Se esta via possuir irregularidades, o dano causado pela carga será maior na medida em que a suspensão do veículo passa a trabalhar e conseqüentemente aplica sobre alguns segmentos do pavimento uma carga superior àquela anterior, causando um desgaste maior da estrutura do pavimento e com isso diminuindo sua vida útil, conforme afirma Saleh et al. (2000).

Lee et al. (2002) trazem informações a respeito do acréscimo possível à vida útil do pavimento que é mantido dentro de determinados níveis de irregularidade. Segundo os autores, que infelizmente não usaram os índices mais conhecidos de irregularidade e sim um índice próprio, de 17% a 51% dos pavimentos de concreto de cimento Portland poderiam ter a sua vida útil aumentada em pelo menos 3 anos. Para os pavimentos asfálticos, 9% a 34% dos pavimentos poderiam contar com o mesmo aumento da vida útil, dependendo dos níveis de irregularidade.

Chatti e Lee (2002) criaram um índice de irregularidade que visa representar com mais exatidão as cargas dinâmicas que serão geradas pelo tráfego de caminhões sobre os pavimentos. O índice foi desenvolvido a partir das características das suspensões de caminhões e suas frequências ressonantes para que se pudesse representar bem o quanto um pavimento com aquele perfil longitudinal poderia causar de cargas dinâmicas. Este seria, por exemplo, um índice que proporcionaria uma correlação ainda maior com a vida útil do pavimento.

Com relação à condição do pavimento e sua vida útil, foi justamente com esse intuito econômico que em muitos países já se estabeleceu há muitos anos os chamados fatores de pagamento. Tratam-se de tabelas, conhecidas previamente pelas partes, que são aplicadas por entidades estatais ou privadas, quando da contratação de serviços de pavimentação.

Tais tabelas relacionam um prêmio ou uma penalidade econômica aos prestadores de serviço de pavimentação (seja para construção, seja para manutenções) de acordo com o nível de irregularidade entregue, conforme menciona Fernando (2002).

Alavi e Tavares (2004), além de trazerem uma tabela com fatores de pagamentos diferenciados para diversos tipos de rodovias, ainda mencionam resultados parciais obtidos depois do início do uso dos fatores de pagamento. Segundo eles, na esmagadora maioria dos casos, a redução da irregularidade foi perceptível.

O Canadian Strategic Highway Research Program (1999) é uma compilação das mais completas, quando se trata de saber quais são os limites aceitos de irregularidade, as unidades de medida usadas e também as penalidades ou prêmios aplicados, não só nas diversas províncias do Canadá, mas também em estados Americanos e países da Europa.

O Arizona Department of Transportation (2004) evidencia os resultados práticos de sua política de incentivos e penalidades às empresas contratadas para os serviços de manutenção e construção de pavimentos. É possível notar sensível diminuição nos níveis de irregularidade observada ano a ano, após o início da aplicação desta política. Este estado americano faz uso de duas equações: uma para bonificar e outra para penalizar economicamente o prestador de serviços.

Ganji (2004) vai ainda um pouco mais longe. Além de comparar os fatores de pagamento de alguns estados americanos, o autor ainda ensaia uma verificação para tornar os fatores de pagamento algo minimamente científico, ou seja, adequados aos custos que o pavimento vai gerar em relação ao que foi projetado.

Ksaibati e Al Mahmood (2002) apresentam a maior compilação que foi encontrada a respeito das políticas dos estados americanos em relação a fatores de pagamento, mas eles ainda foram além. Em uma pesquisa que usou muitos segmentos monitorados pelo LTPP, tais autores evidenciaram a maior durabilidade dos pavimentos construídos com irregularidade mais baixa. Apenas como exemplo das conclusões obtidas, pavimentos asfálticos que depois da construção tiveram IRI de 0,5 m/km, após 10 anos de uso, estavam com IRI de 0,85 m/km, enquanto pavimentos que após a construção já estavam com IRI de 3,0 m/km, passaram a ter depois de 10 anos IRI de 3,85 m/km.

Ou seja, enquanto no primeiro caso a progressão do IRI em 10 anos foi de apenas 0,35 m/km, no segundo caso ela foi de 0,85 m/km, para o mesmo período. Naturalmente, seria teoricamente possível complementar tais estudos para se chegar à redução da vida de um pavimento apenas devido ao fato dele ter sido construído com uma irregularidade maior.

Outros autores que trazem contribuições sobre o tema de fatores de pagamento são: Titi (2001), Sweitzer (2003), Swan e Karamihas (2002) e Siddique (2002).

Não se pode deixar de mencionar um bom trabalho nacional a respeito das cargas dinâmicas sobre os pavimentos rodoviários. Fernandes Junior e Barbosa (2005) calcularam com o auxílio de um simulador computacional o efeito das cargas dinâmicas em diversos tipos de caminhões e relacionaram tal efeito à velocidade e à irregularidade dos pavimentos. As conclusões mostram um aumento de cerca de 200% do fator de equivalência de carga dinâmico de um tandem duplo de rodas duplas, entre uma pista com IRI de 1,4 m/km e outra com IRI de 4,4 m/km, a 110 km/h.

Smith et al. (1997) elaboraram uma pesquisa muito abrangente quando se pensa em termos de irregularidade de pavimentos, diferenciando-se de outros bons documentos sobre o tema justamente com análise econômica mais profunda. O trabalho chega a propor modelos de gráficos tridimensionais, com as variáveis: tempo, irregularidade inicial e irregularidade final, que permitem a visualização clara da importância do nível de irregularidade inicial para a durabilidade do pavimento.

Sobre este aumento da vida útil relacionada à irregularidade, os autores concluem que na grande maioria dos pavimentos, a irregularidade inicial do pavimento influi na sua irregularidade futura. O trabalho considera diversas variáveis, como o tipo de revestimento, pavimentos novos e restaurações, entre outras, e revela por fim que, em geral, é esperado um aumento na vida útil do pavimento entre 9 e 15%, para uma redução da irregularidade entre 25 e 50% (a partir de um determinado nível).

Um último trabalho que merece menção a respeito do aumento da vida útil do pavimento menos irregular está presente em Hawaii Asphalt Paving Industry (sem data). O trabalho traz o resultado de uma pesquisa que acompanhou a evolução de irregularidade durante 2 anos, em aproximadamente 3000 km de faixas de

rolamento. Mesmo em pouco tempo de observação já foi nítida a menor evolução da irregularidade nos pavimentos com irregularidade inicial menor. Por exemplo, um pavimento inicialmente com $IRI = 0,5 \text{ m/km}$, ao fim de 2 anos estava com IRI aproximadamente igual a $0,55 \text{ m/km}$, enquanto um pavimento com IRI inicial de $2,0 \text{ m/km}$, já possuía ao final de 2 anos, $IRI = 2,45 \text{ m/km}$.

Muito embora existam todas as pesquisas citadas e muitas outras que tratem de relacionar a irregularidade dos pavimentos com seus custos, Perera e Kohn (2002b), afirmam que não existia ao tempo da pesquisa deles dados sólidos que permitissem afirmar qual seria o ponto em que o custo de construção de um pavimento menos irregular seria maior que os benefícios gerados em termos de prolongamento da vida útil e redução dos custos operacionais. É importante ressaltar que construir um pavimento menos irregular pode, muitas vezes, não incrementar os custos de construção.

Embora seja difícil discordar da afirmação de Perera e Kohn (2002b), não se pode negar que está suficientemente comprovado que há benefícios grandes tanto em termos de custo operacional, quanto em termos de vida remanescente do pavimento, o fato de se construir e de se conservar os pavimentos dentro de níveis no mínimo confortáveis de irregularidade. Tal afirmação é válida, mesmo sem levar em conta os incalculáveis custos com vidas perdidas ou limitadas que os acidentes provocados pela condição ruim do pavimento causam, principalmente nos países subdesenvolvidos, onde os governantes muitas vezes não sabem e em outras não querem melhorar as condições de seu país.

A assertiva que inicia o parágrafo anterior é muito importante, uma vez que executar um pavimento focando-se na obtenção uma baixa irregularidade e incentivando o empreiteiro a preocupar-se com ela, pode não custar mais caro e em geral é muito melhor para o país, motivo pelo qual as tabelas com fatores de pagamentos que incentivem a qualidade da pavimentação devem ser usadas aqui também, mesmo que inicialmente, os valores aplicados como multa ou prêmio não sejam a tradução exata dos custos que cada nível de irregularidade represente.

Por fim, é triste afirmar que o nível de conservação médio de nossas rodovias é tão ruim que, infelizmente, a pergunta que se faz nos países mais desenvolvidos

visando chegar à conclusão de qual deve ser a irregularidade inicial de um pavimento para que ele gere o maior benefício social por unidade monetária investida está longe de ser um assunto que preocupe nossos técnicos ou gestores públicos, que ainda precisam tapar buracos, muitos buracos.

2.5 A utilização dos dados de irregularidade e do perfil longitudinal de um pavimento

Este item é dedicado a explorar e elucidar as diferentes utilizações que podem ter os dados provenientes de uma avaliação de irregularidade longitudinal de um pavimento qualquer, especialmente quando realizada com um perfilômetro inercial. A intenção aqui é revelar como e para que podem ser usados os dados referentes à condição superficial de um pavimento que afetam normalmente o rolamento dos veículos.

Os usos mais importantes e mais comuns para os dados de irregularidade longitudinal, gerados a partir de um perfil longitudinal de um pavimento são:

- a) Visualizar de forma sintética a condição de rolamento de uma pista ou faixa de rolamento;
- b) Ter indícios da condição de segurança no rolamento e da drenagem superficial;
- c) Fazer parte de um banco de dados usado na gerência do pavimento, ou mesmo mais abrangente usado na gerência da infra-estrutura, conforme Hudson (1997);
- d) Auxiliar na escolha dos trechos que necessitam de investimentos mais iminentes ou, sabendo qual o orçamento disponível e qual o custo aproximado das restaurações que serão necessárias, determinar em quais trechos será possível intervir, seja corretivamente, seja preventivamente, conforme menciona Lee (2001) e Espinal e Alvarenga (2005);

- e) Auxiliar na seleção dos tipos de intervenção que podem ser empregadas para determinada correção de irregularidade;
- f) Indicar quais as características de fresagem ou de outros tipos de manutenção podem ser mais eficazes para a redução da irregularidade, como ensinam Richter (1998) e Hall et al. (2002);
- g) Obter indiretamente a opinião dos usuários a respeito das condições de rolamento daquele pavimento, assim como ter indícios dos custos operacionais dos usuários;
- h) Servir de parâmetro contratual em concessões de rodovias, obras de construção e de restauração de pavimentos;
- i) Fiscalizar o cumprimento de um contrato e permitir a aplicação de multas ou bônus, conforme estabelecido entre as partes;
- j) Prever o desempenho do pavimento, conforme Nair e Hudson (1986);
- k) Permitir reparos bem localizados no pavimento, visando sanar algum problema pontual;
- l) Permitir o cálculo de índices específicos que relacionam as características do perfil longitudinal do pavimento com: o conforto sentido por ocupantes de caminhões, o custo operacional de caminhões e também com as cargas dinâmicas aplicadas pelo tráfego de caminhões nos pavimentos, segundo Karamihas (2005a).

Citados os usos mais comuns que uma avaliação de irregularidade de pavimentos que gere também o perfil longitudinal do pavimento, cabe tecer alguns comentários esclarecedores.

Embora para efeito de pontuar bem as diferentes utilidades do objeto final deste trabalho tenha-se optado por dividi-los em 11 itens, há autores como Sayers e Karamihas (1998), citados em diversas publicações como em Umtri Research Review (2002), que dividem em quatro as principais utilizações dos dados da irregularidade e perfil longitudinal, a saber: monitorar a condição dos pavimentos

para sistemas de gerência, avaliar a qualidade de execuções e restaurações de pavimentos, diagnosticar as condições e estabelecer as soluções adequadas de reparos, e por fim, estudar as condições de trechos com o fim de pesquisa.

Trabalhos renomados e um pouco anteriores como Sayers et al. (1986a), reforçam principalmente a idéia de utilização da irregularidade em sistemas 'avançados' de gerência de pavimentos, visando auxiliar na tomada de decisões e na determinação dos custos operacionais dos usuários.

Paterson (1987) por sua vez, inicia o primeiro capítulo de seu extenso trabalho sobre deterioração e manutenção de pavimentos com a idéia da necessidade de prever o desempenho dos pavimentos, haja vista o custo da manutenção operacional dos pavimentos ser cerca de 8 vezes menor que o custo com a manutenção puramente corretiva. O item seguinte deste trabalho é dedicado mais longamente à avaliação da irregularidade dos pavimentos.

De volta à lista que foi proposta acima, o item 'a' é algo recorrente no meio rodoviário. Usa-se o dado de uma avaliação de irregularidade para se saber o estado geral de um pavimento, se ele efetivamente está servindo para o que se propõe. Seria como tirar uma radiografia funcional de um trecho de rodovia em apenas uma folha de papel. Um exemplo deste tipo de utilização acontece, por exemplo, quando uma empresa ou um consórcio de empresas deseja verificar a viabilidade econômica de participação em uma licitação que concederá a rodovia para a administração privada.

O segundo item da lista não é muito comum em nosso país, mas é uma possibilidade das mais interessantes, já utilizada em outros países freqüentemente. A irregularidade mais acentuada de um pavimento pode aumentar os acidentes, por vários motivos: maior dificuldade de frear, possibilidade de acúmulo de água que leve a aquaplanagem, desvio de atenção do usuário que por vezes tem que fazer manobras bruscas para desviar de alguma deformidade na pista etc. Um exemplo desta relação entre irregularidade e acidentes rodoviários está em Bester (2003).

Os itens 'c' e 'd' são talvez os mais óbvios na atualidade rodoviária. Os sistemas de gerência de pavimentos estão se tornando mais comuns em órgãos rodoviários e empresas concessionárias de rodovias, que buscam a administração cada vez mais

racional dos recursos disponíveis. Naturalmente existe grande diversidade de programas de computador destinados a auxiliar a gestão de malhas viárias; tais sistemas vão desde uma simples planilha eletrônica, passando por *softwares* caseiros e chegam a sistemas com modelagem de desempenho sofisticada e formulação econômica abrangente que permite ao gestor a tomada de decisão rápida, pautada em dados de avaliações, projeções de desempenho e custos de diversas alternativas de restauração, como é o caso do sistema desenvolvido pela empresa Pavesys.

Desta maneira, pela importância que tem a informação da característica funcional do pavimento, é imprescindível a um banco de dados deste tipo, a presença dos dados da irregularidade, que permitem decisões mais acertadas sobre os investimentos. Não é outra a opinião Uddin e George (1993), United States General Accounting Office (1999) e Rodriguez (2004).

Para uso em bancos de dados de gerência de pavimentos, salvo exceções, a melhor recomendação é a avaliação individualizada de todas as faixas de rolamento de pistas rodoviárias. Mais detalhes sobre variações de irregularidade entre faixas de rolamento adjacentes podem ser encontradas em Dougan (2003).

O item 'e' está ligado aos dois anteriores, pois sabendo o nível de irregularidade, o perfil longitudinal do pavimento e de posse de outras informações estruturais e funcionais, é possível a adequação do tipo de restauração a ser empregado.

De 2003 em diante, quando se começou a usar efetivamente no Brasil os perfilômetros inerciais, a utilização mencionada na letra 'f' já foi levada a cabo. Foi na Rodovia dos Bandeirantes, estado de São Paulo, que provavelmente pela primeira vez no Brasil mediu-se o perfil longitudinal apenas de obras de arte especiais, calculou-se a irregularidade em intervalos pequenos de espaço, e analisando as duas variáveis juntas, buscou-se a adequação da microfresagem que seria empregada em sua correção. Este mesmo tipo de serviço é passível de ser executado por *softwares* específicos que analisam o perfil de um pavimento e simulam os resultados de sua fresagem em termos de irregularidade. Um trabalho que aborda essa possibilidade é Swan e Karamihas (2003).

A utilização do item 'g' é mais freqüente em rodovias concedidas à iniciativa privada do que naquelas conservadas pelo poder público em nosso país, mas nem por isso é menos importante nessas últimas. Os usuários de rodovias (normalmente consideradas bens de uso comum do povo), têm direito de cobrar de seus governantes a prestação de serviços públicos de qualidade. Desta maneira, este índice, que poderia até ser de divulgação obrigatória pelo Estado, poderia ajudar os usuários a fiscalizar o cumprimento das obrigações estatais. Além disto, como já é pacífico o fato de que o aumento da irregularidade representa custos operacionais que chegam a ser algumas vezes maiores que os custos de manutenção do pavimento, não pode ser outra a postura popular, a não ser a de exigir a conservação como meio de garantir o emprego otimizado dos recursos públicos.

Parte dos itens 'h' e 'i' já está em uso no Brasil desde quando as concessões de rodovias à iniciativa privada começaram. Todos os contratos de concessão do Brasil, salvo melhor juízo, têm limites de índices de irregularidade que o concessionário não pode ultrapassar sob pena de ser multado. A segunda parte do item 'h', está sendo usada, mais recentemente, pelas próprias concessionárias brasileiras na contratação dos serviços de restauração de pavimentos, mas deveria, em breve, ser utilizada em todas as esferas do setor público em suas contratações.

Em termos de concessão de rodovias, atualmente em muitas delas, duas avaliações de irregularidade são feitas: uma pela própria concessionária, que além de ser obrigada contratualmente a fazê-la, ainda usa esses dados no seu sistema de gestão, e outra, pelos órgãos fiscalizadores da concessão, que fazem a avaliação no sentido de fiscalizar o cumprimento do contrato. Um exemplo de edital de concessão de rodovias de nosso país é: Governo do Estado de São Paulo (1997); outro exemplo de contrato, desta vez de "terceirização de manutenção" é Ministério dos Transportes (2000).

O item 'j' da relação diz respeito à previsão de desempenho dos pavimentos, que está ligado aos itens relativos à gerência de pavimentos e também ao item que trata dos custos operacionais dos usuários dos pavimentos. Prever o desempenho é planejar o futuro dos pavimentos com base em dados presentes e passados daquele próprio pavimento e de outros similares, naturalmente com o auxílio de modelos matemáticos desenvolvidos para este fim. Dois trabalhos brasileiros que tratam do

tema e testam alguns modelos para rodovias paulistas são Paiva e Campos (2002) e Fabricio et al. (2002).

Com base na previsão de desempenho de um pavimento pode-se estimar quando e que tipo de intervenções devem ser necessárias para mantê-lo dentro de determinados padrões. Planejar os investimentos futuros significa preparar-se para eles e com isso reduzir o seu custo.

O item 'k' da lista apresentada pode ou não estar relacionado ao item 'f'. Trata-se de uma utilização que se tornou importante para este trabalho justamente por não ter sido encontrada na literatura, ou seja, foi desenvolvida no âmbito do trabalho e foi bem aceita pelos técnicos. Seu uso experimental foi em uma pista aeroportuária, mas que também pode ser útil em outras situações que necessitem de um mapeamento detalhado da irregularidade de um pavimento para posterior análise conjunta com outras variáveis e correção localizada dos problemas. Outro ponto de vista deste mesmo item pode incluir a localização de defeitos isolados em um perfil longitudinal a partir de sua análise, conforme exemplificam Devore (2004); e Pont e Scott (2001).

Essa utilização, originalmente desenvolvida no âmbito deste trabalho, consiste na medição dos perfis longitudinais em diversas linhas paralelas igualmente espaçadas ao longo de uma pista, o que pode ser feito com vários passes de um perfilômetro inercial. Posteriormente, a partir de todos os perfis é calculado um mesmo índice de irregularidade em um espaçamento normalmente menor que os 200 ou 320 m tradicionais. Esses dados são colocados em colunas em uma planilha eletrônica e em seguida gera-se um gráfico mostrando em uma planta do pavimento as áreas coloridas com os diferentes níveis de irregularidade, como se fossem curvas de nível.

Com esse gráfico, fica mais fácil localizar e projetar alguma intervenção localizada não só na longitudinal, mas na transversal também, além de ser possível a realização de outras medidas exatamente nas áreas com maior irregularidade. No item 3.4.1, este exemplo de utilização é detalhado e os resultados são evidenciados.

Ainda sobre o item 'k' da relação, existem trabalhos como Fernando e Bertrand (2002), que exploram detidamente sobre a localização de pequenos segmentos da

superfície do pavimento que mais contribuem para o aumento da irregularidade em um determinado trecho.

O último item da relação apresentada apresenta usos, ainda incomuns no Brasil, que os perfis longitudinais medidos com perfilômetros inerciais já estão tendo nos Estados Unidos, por exemplo. Trata-se do desenvolvimento de índices específicos que relacionam determinadas características do perfil longitudinal dos pavimentos com outras variáveis, tais como, custo operacional, conforto para ocupantes de caminhões e também a aplicação de cargas dinâmicas por veículos pesados.

Enfim, procurou-se especificar bem neste item cada uma das diferentes possibilidades de aplicação dos dados provenientes de um bom perfilômetro. A lista provavelmente não está completa, mas com ela é possível perceber de forma clara e objetiva a importância da medida da irregularidade para diferentes públicos: gestores, usuários, empreiteiros, fiscais etc.

2.6 Os índices que representam a irregularidade de um pavimento

Ao longo dos anos que se seguiram desde os primórdios da preocupação com a condição superficial dos pavimentos, a partir do início do século XX, muitos índices foram criados para representar de forma resumida o quão regular ou irregular estava determinado trecho de pavimento.

Alguns destes índices eram bastante objetivos e procuraram realmente medir os desvios da superfície em relação a uma superfície ideal imaginária. Outros buscaram avaliar objetivamente o sentimento de desconforto causado durante o rolamento em determinado pavimento. Outros ainda criaram métodos de avaliação subjetiva que são realizadas por técnicos ou pessoas comuns que simplesmente atribuíam notas à condição do pavimento. Awasthi et al. (2003) trata de alguns dos índices de irregularidades mais usados atualmente nos EUA, enquanto Karamihas (2005a) menciona a existência de índices específicos para representar determinado efeito do perfil longitudinal do pavimento em caminhões, conforme explicitado no item anterior.

Certos índices são específicos de determinados tipos de equipamentos medidores, o que ao longo do tempo, foi se mostrando um problema, uma vez que isto complicava a comparação entre as avaliações.

Justamente para resolver os problemas de comparação, de subjetividade e de separar a medida do medidor, foi estabelecido o índice internacional de irregularidade, conhecido internacionalmente pelo acrônimo IRI.

Embora não se tenha tido acesso a uma pesquisa mundial a respeito, é possível se dizer, a partir de menções sobre irregularidade em trabalhos de diversas nacionalidades, que o IRI seja atualmente o índice de irregularidade usado pelo maior número de países.

Mesmo nos EUA, cujos departamentos de estradas estaduais já possuíam uma boa cultura a respeito da irregularidade de pavimentos e mediam diversos índices quando o IRI foi estabelecido, já houve boa migração para o IRI, conforme menciona Federal Highway Administration (2002), que trata da relação entre o IRI e outros índices usados nos EUA, visando facilitar a migração.

Aqui no Brasil, embora o IRI seja também utilizado, ele não é o mais popular, nem é índice normalizado. O índice de irregularidade recomendado pelas normas nacionais é o QI (quociente de irregularidade), que provavelmente ainda não foi substituído pelo IRI, por toda cultura já disseminada no país em torno do QI e também por ser um índice com origem muito similar ao próprio IRI: o conceito de quarto de carro. Balbo (1997) traz uma tabela adaptada de uma publicação norte-americana que contém uma relação entre os diversos valores de IRI e a condição típica do pavimento, assim como a velocidade de tráfego esperada de um pavimento naquelas condições.

Conforme foi mencionado no histórico sobre a avaliação de irregularidade, a origem do QI que medimos hoje no Brasil, foi o “QI verdadeiro”, conhecido como *Quarter-Car Index*, que era calculado usando-se o perfil gerado pelo perfilômetro GMR, que posteriormente era passado por um simulador de quarto de carro, que buscava reproduzir o resultado que um *BPR Roughometer* geraria ao avaliar aquele pavimento. Portanto, o “QI verdadeiro” era um índice estatístico que guardava boa correlação com o resultado medido pelo *BPR Roughometer*.

Por ter sido um equipamento muito caro, tal perfilômetro GMR não se popularizou tão rápido como os medidores do tipo resposta, o que gerou a necessidade do desenvolvimento de um método que permitisse a partir de um perfil longitudinal medido com nível e mira, a estimação do "QI verdadeiro" para fins de calibração dos medidores do tipo resposta. Assim surgiu o quociente de irregularidade (QI), na versão que usamos hoje, um índice que pode ser calculado a partir do perfil longitudinal de um pavimento, cujo valor é próximo, mas não igual ao valor que seria obtido se tal pavimento fosse submetido a uma avaliação do *BPR Roughometer*.

O método de cálculo do QI a partir do nível e mira utiliza a aceleração média quadrática de bases 1 m e 2,5 m. O modelo desenvolvido por Queiroz (1981) para cálculo do QI, além dos dados das duas acelerações verticais médias quadráticas, possui uma constante negativa igual a -8,54, ou seja, um pavimento completamente livre de irregularidade não tem um QI igual a zero e sim um $QI = -8,54 \text{ cont/km}$.

Tal informação embora presente de forma bem clara na norma DNER-ES 173/86, não é de conhecimento de grande parte dos técnicos que trabalham com os dados da irregularidade, conforme pesquisa informal realizada com os engenheiros de algumas concessionárias de rodovias de São Paulo, que têm metas de quociente de irregularidade para cumprir.

Provavelmente esse desconhecimento seja derivado de dois motivos principais: o primeiro diz respeito ao fato de que até pouco tempo não se usava ainda perfilômetros laser, e como se sabe e ficará evidenciado mais adiante nesta pesquisa, não é fácil obter medidas de irregularidade baixas com medidores do tipo resposta, mesmo trafegando em trechos de baixíssima irregularidade; o segundo motivo é pelo fato de ter-se no Brasil poucos trechos de rodovias que possuam um QI próximo de zero ou negativo. Vale salientar que durante a realização deste trabalho, pôde-se medir perfis no trecho do prolongamento da Rodovia dos Bandeirantes (SP), que em lances de 200 metros, apresentaram QI igual a zero.

Embora as estatísticas aplicadas ao IRI e ao QI guardem semelhança, pois, de uma forma ou de outra, ambas têm o conceito de quarto de carro por trás, no IRI este conceito é aplicado diretamente ao perfil longitudinal, enquanto o QI usado hoje, este conceito é estimado, ou em outras palavras é uma correlação com o "QI

verdadeiro”, sendo que este último é que fazia uso do conceito de quarto de carro diretamente de forma mecânica pois tal índice estava associado a um equipamento.

De forma mais simplificada, pode se dizer que o IRI possui uma forma de cálculo direta em cima de um modelo de quarto de carro e isso minimiza erros presentes em qualquer correlação, o que evidencia a vantagem principal do IRI sobre o QI. Além disto, o IRI ainda possui escala que parte do zero, o que faz mais sentido para um índice de irregularidade. Outra vantagem do IRI é que sua unidade de medida é objetiva, em m/km, enquanto no QI a escala não é direta. Duas normas americanas trazem em seus textos algoritmos para o cálculo do IRI, são elas: ASTM E 1926-98 e ASTM E 1364-95.

Tratando-se da escala do QI, vale a pena registrar como se chegou à unidade de contagens por quilômetro. Sayers et al. (1986a) relatam que a escala original dos resultados obtidos com *BPR Roughometer* era polegadas/milha, sendo que o equipamento efetuava as contagens em décimos de polegada e que o tamanho do segmento padrão era em décimos de milha. Como a contagem era uma característica do equipamento, preferiu-se à época converter somente a unidade do denominador, assim multiplicou-se o valor em polegadas/milha por 0,6214 e a nova unidade no sistema métrico ficou em contagens/km.

Mesmo com essas diferenças, em termos estatísticos os dois índices aparentemente correlacionam-se bem, muito embora os modelos de correlação mais usados entre eles índices possam não ser os melhores. Por este motivo, a correlação entre IRI e QI também foi objeto de investigação desta pesquisa.

Ainda a respeito das peculiaridades dos índices de irregularidade IRI e QI, é importante notar que ambos têm respostas aparentemente similares aos diversos comprimentos de onda presentes em um perfil de pavimento. Entretanto, o IRI por se tratar da representação direta de um modelo de quarto de carro pode ser considerado diretamente um filtro de sinal, que neste caso é o próprio perfil do pavimento. Assim, quando se passa o perfil pelo filtro do IRI, ter-se-á como resultado um novo sinal que só contém os comprimentos de onda que o filtro deixou passar.

Existe uma infinidade de tipos de filtros diferentes para as mais variadas aplicações, sendo que para a grande maioria deles – senão para todos, é possível se traçar um

diagrama com a resposta do filtro, visando representar quais comprimentos de onda ou frequências serão amplificadas pelo filtro (ganho maior que 1), quais comprimentos de onda serão atenuados (ganho menor que 1) e quais simplesmente serão eliminadas (ganho igual a zero).

Sayers et al. (1986a) apresentam o diagrama com as características do filtro presente no IRI (figura 2.17), de onde se pode verificar a faixa de comprimentos de onda que realmente é levada em conta no cálculo deste índice de irregularidade.

Embora o QI atual não possa ser considerado propriamente um filtro, tal qual o IRI, os mesmos autores determinaram um diagrama similar que representa o impacto dos diferentes comprimentos de onda no resultado do QI, em cont/km.

Diagramas de ganho de filtros, conforme evidencia a figura 2.7, não são traçados normalmente em termos de frequência e amplitude das ondas, pois se tornaria um gráfico ou incompleto por contemplar somente uma amplitude ou um gráfico muito carregado se fosse incluir um grande número de amplitudes.

Por isso, é muito comum nesses casos que tais diagramas sejam feitos em função das inclinações possíveis para um determinado perfil de pavimentos, já que uma inclinação representa mais de uma combinação de frequência e amplitude.

Apenas como informação, para se transformar um perfil longitudinal que esteja em elevações para inclinações, basta refazer o diagrama substituindo ponto a ponto, o valor da elevação, pela diferença entre os valores de cada duas elevações sucessivas.

Verificando os dois diagramas da figura 2.17 em conjunto, é possível verificar que as faixas de comprimentos de onda de inclinações mais importantes para ambos os índices não são idênticas, embora guardem semelhanças, o que permite em tese que os valores entre os tais índices possam ser correlacionados.

De qualquer maneira, assim como a correlação entre tais índices será investigada no Capítulo 4 com o uso de cálculos dos dois índices em um número grande de segmentos de rodovias, também será investigado de forma teórica o efeito que os grandes comprimentos de onda podem causar em termos de irregularidade nos índices IRI e QI, uma vez que os gráficos de ganho disponíveis na bibliografia

chegam apenas até o comprimento de onda de 50 metros, que não por acaso é o comprimento de onda normalmente tido como o limite do que se considera irregularidade longitudinal.

Figura 2.17 – Diagramas de ganho do IRI e QI de acordo com o número de ondas por metro (inverso do comprimento de onda) das inclinações dos perfis. Fonte: Sayers et al. (1986a).

Sobre a avaliação de irregularidade em pistas de aeroportos, embora muitas vezes seja feito o uso dos índices rodoviários pela facilidade de medição e disponibilidade de equipamentos, existem estudos específicos que trazem métodos e descrevem equipamentos para este tipo de medição, como Debord (1995). Para este tipo de avaliação usa-se também – principalmente no exterior – os perfis longitudinais das pistas processados por *softwares* que contêm as características dos trens de pouso de muitas aeronaves. Tais *softwares* simulam a passagem daqueles trens de pouso a diversas velocidades e verificam se aquele perfil pode apresentar risco aos pousos e decolagens.

2.6.1 O cálculo dos índices de irregularidade QI e IRI a partir de um perfil longitudinal

Uma vez determinado o perfil longitudinal de qualquer trecho pavimento – seja por meio de nível e mira, do Dipstick ou com o auxílio de um perfilômetro inercial, podem ser calculados com base nas normas citadas no item anterior, os índices de irregularidade QI e IRI, que sintetizarão em um número apenas a condição de rolamento de determinado trecho de pavimento.

O objetivo deste item, portanto, é exemplificar com um cálculo real como chegar ao resultado dos índices QI e IRI, partindo-se de um perfil longitudinal. Como se trata somente de um exemplo, tomar-se-á um trecho de pavimento com 50 metros de comprimento, cujo perfil foi medido de 50 em 50 centímetros. O espaçamento de 50 centímetros entre as medidas foi escolhido por atender o que está preconizado pela norma nacional para o cálculo do quociente de irregularidade (QI).

O método de cálculo do QI está previsto na norma brasileira DNER ES-173/86, sendo que seu cálculo final é dado pela fórmula:

$$QI = -8,54 + 6,17.VA_{1,0} + 19,38.VA_{2,5} \quad (2.2)$$

Onde $VA_{1,0}$ e $VA_{2,5}$ são os valores das acelerações verticais médias quadráticas para cada um dos comprimentos de base b, que podem ser obtidos pela fórmula abaixo:

$$VA_b = \left[\sum_{i=k+1}^{n-k} \frac{(S_{i-k})^2}{n-2k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

Sendo:

$$SB_i = \frac{Y_{i+k} - 2Y_i + Y_{i-k}}{(kS)^2} \quad (2.4)$$

Y_i = quota de um ponto qualquer

$$k = \frac{b}{S} \quad (2.5)$$

b = comprimento da base (m)

S = distância entre duas cotas consecutivas (neste caso 0,5 m)

N = número de cotas levantadas

Utilizando-se as fórmulas acima em uma planilha de cálculo, pode-se facilmente determinar o valor do QI para o segmento de pavimento que teve seu perfil longitudinal determinado.

Para os cálculos, foram usados os seguintes dados:

$S = 0,5$ m

$b = 1,00$ m e $b = 2,50$ m

A tabela 2.1 traz os resultados da aplicação da equação 2.4, para as elevações de um perfil com 50 metros de comprimento.

Tabela 2.1 – Resultados auxiliares para o cálculo do QI em um trecho de 50 metros.

nº ordem	Y (mm)	SBI (mm/m ²)			nº ordem	Y (mm)	SBI (mm/m ²)	
		K = 2	k = 5				k = 2	k = 5
1	7,0	0,00	0,00		52	104,0	-1,00	-0,32
2	8,0	0,00	0,00		53	106,0	-2,00	-0,48
3	11,0	0,00	0,00		54	108,0	-1,00	-0,80
4	14,0	-2,00	0,00		55	110,0	-2,00	-0,48
5	15,0	3,00	0,00		56	111,0	1,00	-0,80
6	18,0	2,00	0,32		57	112,0	0,00	-0,16
7	22,0	-3,00	-0,80		58	115,0	-1,00	-0,80
8	24,0	-1,00	-0,32		59	114,0	1,00	0,00
9	26,0	1,00	0,00		60	118,0	-2,00	-0,64
10	29,0	-3,00	-0,48		61	117,0	-1,00	-0,16
11	31,0	-1,00	-0,48		62	119,0	0,00	-0,80
12	31,0	5,00	0,32		63	119,0	1,00	-0,16
13	35,0	1,00	-0,64		64	120,0	1,00	-0,64
14	38,0	-4,00	-0,64		65	122,0	-4,00	-0,48
15	40,0	-3,00	-0,80		66	122,0	-2,00	-0,16
16	41,0	-2,00	-0,48		67	121,0	2,00	0,48
17	42,0	2,00	-0,48		68	122,0	1,00	0,32
18	42,0	3,00	0,32		69	122,0	3,00	0,80
19	46,0	-2,00	0,00		70	123,0	2,00	0,96
20	46,0	0,00	0,48		71	126,0	-3,00	0,16
21	48,0	1,00	0,48		72	126,0	0,00	0,16

22	50,0	0,00	0,32	73	127,0	2,00	0,00
23	51,0	1,00	0,48	74	129,0	-1,00	-0,48
24	54,0	0,00	0,32	75	130,0	-1,00	-0,64
25	55,0	1,00	0,48	76	131,0	-1,00	-0,16
26	58,0	1,00	0,00	77	132,0	-1,00	-0,48
27	60,0	-1,00	0,16	78	132,0	0,00	0,00
28	63,0	-1,00	-0,48	79	133,0	1,00	0,16
29	64,0	0,00	0,16	80	133,0	1,00	0,32
30	67,0	0,00	-0,32	81	135,0	0,00	0,16
31	68,0	0,00	-0,16	82	135,0	1,00	0,48
32	71,0	0,00	-0,48	83	137,0	-1,00	0,32
33	72,0	1,00	0,16	84	138,0	-1,00	0,48
34	75,0	-2,00	-0,48	85	138,0	2,00	0,96
35	77,0	-3,00	-0,16	86	140,0	2,00	0,96
36	77,0	3,00	0,00	87	141,0	2,00	0,96
37	79,0	2,00	0,16	88	144,0	1,00	0,48
38	82,0	-1,00	-0,80	89	146,0	0,00	0,48
39	83,0	-1,00	-0,64	90	149,0	-1,00	-0,32
40	86,0	-2,00	-0,80	91	151,0	-2,00	-0,32
41	86,0	-2,00	-0,64	92	153,0	0,00	-0,64
42	88,0	-3,00	-0,48	93	154,0	1,00	-0,16
43	87,0	2,00	0,32	94	157,0	-1,00	-0,48
44	87,0	5,00	0,96	95	158,0	-1,00	0,00
45	90,0	1,00	0,80	96	160,0	0,00	0,00
46	91,0	-1,00	0,64	97	161,0	1,00	0,00
47	94,0	-1,00	0,64	98	163,0	1,00	0,00
48	94,0	2,00	0,80	99	165,0	0,00	0,00
49	97,0	0,00	0,16	100	167,0	0,00	0,00
50	99,0	0,00	0,32	101	169,0	0,00	0,00
51	100,0	3,00	0,32				

Aplicando-se a equação 2.3, chega-se aos valores:

$$VA_{1,0} = 1,79 \text{ mm/m}^2$$

$$VA_{2,5} = 0,50 \text{ mm/m}^2$$

Por fim, basta aplicar a equação 2.2 para chegar ao resultado do QI:

$$QI = 12,26 \sim 12 \text{ cont/km}$$

Como se pode perceber o cálculo do QI a partir de um perfil longitudinal não é muito complexo, o que sem dúvida facilitou sua disseminação e utilização no Brasil – principalmente para o cálculo do QI nas bases de calibração dos medidores do tipo resposta, sem contar o fato de que a norma do DNER mencionada é muito didática e apresenta inclusive um exemplo de cálculo.

O mesmo não é verdade para o cálculo do IRI. As duas normas americanas (ASTM E 1926-98 e ASTM E 1364-95) que tratam sobre o cálculo deste índice de irregularidade não apresentam exemplos para o cálculo manual do IRI, tampouco demonstram suas fórmulas. Tais normas ASTM trazem apenas algoritmos de cálculo para serem implementados em *softwares*.

Há dois documentos, entretanto, que são inclusive citados como base da norma ASTM E 1926-98, que tornam o método de cálculo do IRI mais fácil de ser compreendido e explicado, são eles: Sayers et al. (1986a, 1986b).

Antes de propriamente descrever o cálculo do IRI é importante lembrar que tal índice representa a passagem de um modelo de quarto de carro com parâmetros pré-concebidos por um perfil longitudinal. Pode-se dizer que tal modelo mecânico funciona como filtro passa-banda, ou seja, um filtro que retira do “sinal” determinados comprimentos de onda menores que um determinado valor e maiores que outro valor.

Desta maneira, segundo Sayers et al. (1986a) existe mais de uma maneira de se calcular o IRI de um determinado perfil, são elas: usando-se um computador analógico e um perfil contínuo; por integração numérica computacional; por correlação com outros índices e por fim, através do uso de uma matriz de transição de estado.

A maneira mais comum de cálculo, que é aquela prevista nos algoritmos das normas norte-americanas mencionadas, faz o uso do último método citado: a matriz de transição de estado.

O cálculo por este método é realizado através de 4 variáveis que são função do perfil medido. Tais variáveis simulam a resposta dinâmica do veículo de referência, simulando seu tráfego sobre o perfil. As equações das quatro variáveis são resolvidas para cada ponto do perfil, com exceção do primeiro ponto. A inclinação média dos primeiros 11 metros do perfil é usada para iniciar as variáveis com os seguintes valores:

$$Z_1' = Z_3' = (Y_a - Y_1) / 11 \quad (2.6)$$

$$Z_2' = Z_4' = 0 \quad (2.7)$$

$$a = 11 / dx + 1 \quad (2.8)$$

Onde:

Y_a = elevação do ponto a do perfil (mm)

Y_1 = elevação do primeiro ponto do perfil (mm)

dx = intervalo entre os pontos do perfil (m)

Sendo assim, para o caso de $dx = 0,50$ m, $a = 23$

O próximo passo é resolver as quatro equações recursivas abaixo para cada ponto do perfil, partindo do segundo ponto até o último.

$$Z_1 = S_{11} \times Z_1' + S_{12} \times Z_2' + S_{13} \times Z_3' + S_{14} \times Z_4' + P_1 \times Y' \quad (2.9)$$

$$Z_2 = S_{21} \times Z_1' + S_{22} \times Z_2' + S_{23} \times Z_3' + S_{24} \times Z_4' + P_2 \times Y' \quad (2.10)$$

$$Z_3 = S_{31} \times Z_1' + S_{32} \times Z_2' + S_{33} \times Z_3' + S_{34} \times Z_4' + P_3 \times Y' \quad (2.11)$$

$$Z_4 = S_{41} \times Z_1' + S_{42} \times Z_2' + S_{43} \times Z_3' + S_{44} \times Z_4' + P_4 \times Y' \quad (2.12)$$

Onde:

$$Y' = (Y_i - Y_{i-1}) / dx \quad (2.13)$$

$$Z_j' = Z_j \text{ da posição anterior } j = 1 \text{ a } 4 \quad (2.14)$$

S_{ij} e P_j são coeficientes fixados para um determinado intervalo dx . Tais coeficientes estão disponíveis em Sayers et al. (1986b) na forma de matrizes para os espaçamentos mais comuns e podem também ser calculados para outros espaçamentos.

As equações numeradas de (2.9) a (2.12) devem ser resolvidas para cada posição do perfil. Depois de resolvida para um determinado ponto do perfil, a equação (2.14) é usada para atualizar os valores de Z_1' , Z_2' , Z_3' e Z_4' para o próximo ponto do perfil.

Para cada posição também a inclinação retificada (RS) do perfil filtrado é computada pela equação abaixo:

$$RS_i = | Z_3 - Z_1 | \quad (2.15)$$

O IRI enfim é a média da variável RS por todo o comprimento do trecho. Assim, após a equação (2.15) ter sido resolvida para todos os pontos do perfil, o IRI é calculado com a equação abaixo:

$$IRI = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=2}^n RS_i \quad (2.16)$$

A tabela 2.2 é proveniente de uma planilha eletrônica construída com base nas equações acima para calcular o IRI a partir do mesmo perfil para o qual o QI foi calculado.

Foram usados como dados de entrada para o cálculo do IRI as duas matrizes S e P abaixo, levando-se em conta $dx = 0,5$ m.

S =	0,9881727	0,0212839	-0,025209	0,00099232
	-0,928516	0,9001616	-3,391369	0,06280167
	0,06386326	0,0066154	0,2402896	0,00986269
	3,743294	0,4186779	-46,67883	-0,1145251

P =	0,03703847
	4,319885
	0,6958473
	42,93555

Tabela 2.2 – Resultados auxiliares para o cálculo do IRI em um trecho de 50 metros.

Y (m)	Perfil (mm)	Z1'	Z2'	Z3'	Z4'	Y'	Z1	Z2	Z3	Z4	Soma do RS	IRI m/km
0,0	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	-
0,5	8,0	4,00	0,00	4,00	0,00	2,0	3,93	-8,64	2,61	-85,87	1,32	1,32
1,0	11,0	3,93	-8,64	2,61	-85,87	6,0	3,77	0,26	4,15	156,77	1,70	0,85
1,5	14,0	3,77	0,26	4,15	156,77	6,0	4,00	18,43	6,96	60,22	4,66	1,55
2,0	15,0	4,00	18,43	6,96	60,22	2,0	4,30	1,69	4,04	-223,24	4,93	1,23
2,5	18,0	4,30	1,69	4,04	-223,24	6,0	4,19	-4,26	3,23	111,62	5,89	1,18
3,0	22,0	4,19	-4,26	3,23	111,62	8,0	4,37	22,89	7,68	193,86	9,20	1,53
3,5	24,0	4,37	22,89	7,68	193,86	4,0	4,96	19,95	6,97	-183,13	11,21	1,60
4,0	26,0	4,96	19,95	6,97	-183,13	4,0	5,11	-4,51	3,10	-105,84	13,22	1,65
4,5	29,0	5,11	-4,51	3,10	-105,84	6,0	5,00	-0,06	4,17	142,23	14,05	1,56
5,0	31,0	5,00	-0,06	4,17	142,23	4,0	5,12	7,37	5,51	-20,66	14,43	1,44
5,5	31,0	5,12	7,37	5,51	-20,66	0,0	5,06	-18,09	1,50	-232,47	18,00	1,64
6,0	35,0	5,06	-18,09	1,50	-232,47	8,0	4,64	-6,09	3,84	311,66	18,80	1,57
6,5	38,0	4,64	-6,09	3,84	311,66	6,0	4,89	22,69	8,43	57,65	22,34	1,72
7,0	40,0	4,89	22,69	8,43	57,65	4,0	5,31	8,21	5,84	-200,41	22,87	1,63
7,5	41,0	5,31	8,21	5,84	-200,41	2,0	5,15	-21,29	1,21	-140,44	26,80	1,79
8,0	42,0	5,15	-21,29	1,21	-140,44	2,0	4,54	-28,23	0,49	55,76	30,85	1,93
8,5	42,0	4,54	-28,23	0,49	55,76	0,0	3,93	-27,77	0,77	-23,89	34,01	2,00
9,0	46,0	3,93	-27,77	0,77	-23,89	8,0	3,54	1,80	5,58	313,36	36,05	2,00
9,5	46,0	3,54	1,80	5,58	313,36	0,0	3,71	-0,92	4,67	-282,49	37,01	1,95
10,0	48,0	3,71	-0,92	4,67	-282,49	4,0	3,39	-20,57	1,35	-0,41	39,06	1,95

Y (m)	Perfil (mm)	Z1'	Z2'	Z3'	Z4'	Y'	Z1	Z2	Z3	Z4	Soma do RS	IRI m/km
10,5	50,0	3,39	-20,57	1,35	-0,41	4,0	3,03	-8,99	3,18	112,86	39,21	1,87
11,0	51,0	3,03	-8,99	3,18	112,86	2,0	2,91	-5,98	3,40	-68,12	39,71	1,80
11,5	54,0	2,91	-5,98	3,40	-68,12	6,0	2,82	2,01	4,47	114,90	41,36	1,80
12,0	55,0	2,82	2,01	4,47	114,90	2,0	2,90	-0,10	3,79	-124,44	42,25	1,76
12,5	58,0	2,90	-0,10	3,79	-124,44	6,0	2,87	2,46	4,04	105,70	43,42	1,74
13,0	60,0	2,87	2,46	4,04	105,70	4,0	3,04	9,76	5,00	-17,34	45,38	1,75
13,5	63,0	3,04	9,76	5,00	-17,34	6,0	3,29	13,85	5,46	41,81	47,56	1,76
14,0	64,0	3,29	13,85	5,46	41,81	2,0	3,52	2,15	3,42	-155,83	47,66	1,70
14,5	67,0	3,52	2,15	3,42	-155,83	6,0	3,51	3,20	3,70	129,98	47,85	1,65
15,0	68,0	3,51	3,20	3,70	129,98	2,0	3,64	3,89	3,81	-87,20	48,02	1,60
15,5	71,0	3,64	3,89	3,81	-87,20	6,0	3,72	7,64	4,49	105,13	48,78	1,57
16,0	72,0	3,72	7,64	4,49	105,13	2,0	3,91	3,44	3,80	-118,55	48,89	1,53
16,5	75,0	3,91	3,44	3,80	-118,55	6,0	3,94	5,08	4,19	110,09	49,14	1,49
17,0	77,0	3,94	5,08	4,19	110,09	4,0	4,16	10,89	5,16	-19,58	50,15	1,47
17,5	77,0	4,16	10,89	5,16	-19,58	0,0	4,19	-12,79	1,38	-218,57	52,95	1,51
18,0	79,0	4,19	-12,79	1,38	-218,57	4,0	3,76	-16,55	1,14	142,47	55,57	1,54
18,5	82,0	3,76	-16,55	1,14	142,47	6,0	3,70	12,60	5,99	195,09	57,86	1,56
19,0	83,0	3,70	12,60	5,99	195,09	2,0	4,04	8,50	5,07	-196,75	58,89	1,55
19,5	86,0	4,04	8,50	5,07	-196,75	6,0	4,08	0,25	3,77	61,99	59,19	1,52
20,0	86,0	4,08	0,25	3,77	61,99	0,0	4,00	-12,45	1,78	-167,64	61,41	1,54
20,5	88,0	4,00	-12,45	1,78	-167,64	4,0	3,62	-14,20	1,73	117,67	63,31	1,54
21,0	87,0	3,62	-14,20	1,73	117,67	-2,0	3,28	-23,26	0,32	-172,51	66,26	1,58
21,5	87,0	3,28	-23,26	0,32	-172,51	0,0	2,56	-35,91	-1,57	7,25	70,40	1,64
22,0	90,0	2,56	-35,91	-1,57	7,25	6,0	2,04	-3,01	3,80	324,56	72,15	1,64
22,5	91,0	2,04	-3,01	3,80	324,56	2,0	2,25	11,54	5,62	-122,12	75,52	1,68
23,0	94,0	2,25	11,54	5,62	-122,12	6,0	2,43	7,51	4,54	22,75	77,63	1,69
23,5	94,0	2,43	7,51	4,54	22,75	0,0	2,47	-9,47	1,52	-202,29	78,58	1,67
24,0	97,0	2,47	-9,47	1,52	-202,29	6,0	2,22	-2,75	2,64	215,10	78,99	1,65
24,5	99,0	2,22	-2,75	2,64	215,10	4,0	2,43	17,29	5,66	31,03	82,23	1,68
25,0	100,0	2,43	17,29	5,66	31,03	2,0	2,73	4,69	3,33	-165,68	82,82	1,66
25,5	104,0	2,73	4,69	3,33	-165,68	8,0	2,85	14,55	4,94	219,30	84,91	1,66
26,0	106,0	2,85	14,55	4,94	219,30	4,0	3,37	24,76	6,41	-67,12	87,96	1,69
26,5	108,0	3,37	24,76	6,41	-67,12	4,0	3,77	10,49	4,04	-96,86	88,22	1,66
27,0	110,0	3,77	10,49	4,04	-96,86	4,0	3,90	3,43	3,11	12,73	89,02	1,65
27,5	111,0	3,90	3,43	3,11	12,73	2,0	3,94	-1,64	2,54	-44,69	90,42	1,64
28,0	112,0	3,94	-1,64	2,54	-44,69	2,0	3,82	-7,90	1,80	-13,35	92,44	1,65
28,5	115,0	3,82	-7,90	1,80	-13,35	6,0	3,77	8,31	4,67	186,07	93,33	1,64
29,0	114,0	3,77	8,31	4,67	186,07	-2,0	3,90	-8,80	1,86	-307,48	95,37	1,64
29,5	118,0	3,90	-8,80	1,86	-307,48	8,0	3,61	-2,61	3,17	302,73	95,80	1,62
30,0	117,0	3,61	-2,61	3,17	302,73	-2,0	3,66	-6,08	2,57	-256,19	96,89	1,61
30,5	119,0	3,66	-6,08	2,57	-256,19	4,0	3,31	-16,39	1,07	92,29	99,14	1,63
31,0	119,0	3,31	-16,39	1,07	92,29	0,0	2,99	-15,65	1,27	-54,85	100,85	1,63
31,5	120,0	2,99	-15,65	1,27	-54,85	2,0	2,61	-15,98	1,24	37,52	102,22	1,62
32,0	122,0	2,61	-15,98	1,24	37,52	4,0	2,39	-1,38	3,51	112,49	103,34	1,61
32,5	122,0	2,39	-1,38	3,51	112,49	0,0	2,36	-8,31	2,10	-168,49	103,60	1,59
33,0	121,0	2,36	-8,31	2,10	-168,49	-2,0	1,86	-36,01	-2,45	-159,13	107,91	1,64
33,5	122,0	1,86	-36,01	-2,45	-159,13	2,0	1,05	-27,17	-0,89	210,53	109,85	1,64
34,0	122,0	1,05	-27,17	-0,89	210,53	0,0	0,69	-9,20	1,75	9,84	110,91	1,63
34,5	123,0	0,69	-9,20	1,75	9,84	2,0	0,52	-5,60	1,89	1,76	112,28	1,63
35,0	126,0	0,52	-5,60	1,89	1,76	6,0	0,57	14,09	4,64	168,69	116,35	1,66
35,5	126,0	0,57	14,09	4,64	168,69	0,0	0,92	6,99	2,91	-228,03	118,34	1,67
36,0	127,0	0,92	6,99	2,91	-228,03	2,0	0,83	-10,10	-0,05	-17,46	119,22	1,66
36,5	129,0	0,83	-10,10	-0,05	-17,46	4,0	0,74	6,50	2,58	175,11	121,07	1,66

Y (m)	Perfil (mm)	Z1'	Z2'	Z3'	Z4'	Y'	Z1	Z2	Z3	Z4	Soma do RS	IRI m/km
37,0	130,0	0,74	6,50	2,58	175,11	2,0	1,05	16,04	3,83	-49,35	123,85	1,67
37,5	131,0	1,05	16,04	3,83	-49,35	2,0	1,31	6,01	2,00	-76,61	124,54	1,66
38,0	132,0	1,31	6,01	2,00	-76,61	2,0	1,37	1,25	1,24	8,77	124,67	1,64
38,5	132,0	1,37	1,25	1,24	8,77	0,0	1,36	-3,80	0,48	-53,23	125,54	1,63
39,0	133,0	1,36	-3,80	0,48	-53,23	2,0	1,27	-1,01	1,04	73,05	125,77	1,61
39,5	133,0	1,27	-1,01	1,04	73,05	0,0	1,28	-1,04	1,05	-52,75	126,00	1,59
40,0	135,0	1,28	-1,04	1,05	-52,75	4,0	1,31	8,30	2,59	133,33	127,28	1,59
40,5	135,0	1,31	8,30	2,59	133,33	0,0	1,54	5,85	2,08	-127,74	127,82	1,58
41,0	137,0	1,54	5,85	2,08	-127,74	4,0	1,61	6,06	2,16	97,69	128,36	1,57
41,5	138,0	1,61	6,06	2,16	97,69	2,0	1,84	11,41	3,02	-17,53	129,54	1,56
42,0	138,0	1,84	11,41	3,02	-17,53	0,0	1,97	-2,77	0,75	-127,16	130,76	1,56
42,5	140,0	1,97	-2,77	0,75	-127,16	4,0	1,89	2,44	1,82	157,73	130,83	1,54
43,0	141,0	1,89	2,44	1,82	157,73	2,0	2,10	12,83	3,52	-8,85	132,25	1,54
43,5	144,0	2,10	12,83	3,52	-8,85	6,0	2,48	23,03	5,15	107,55	134,93	1,55
44,0	146,0	2,48	23,03	5,15	107,55	4,0	3,06	24,99	5,39	-62,20	137,26	1,56
44,5	149,0	3,06	24,99	5,39	-62,20	6,0	3,58	23,37	5,22	34,93	138,90	1,56
45,0	151,0	3,58	23,37	5,22	34,93	4,0	4,09	19,49	4,77	-52,65	139,57	1,55
45,5	153,0	4,09	19,49	4,77	-52,65	4,0	4,43	11,56	3,80	-21,20	140,21	1,54
46,0	154,0	4,43	11,56	3,80	-21,20	2,0	4,58	0,72	2,45	-67,62	142,33	1,55
46,5	157,0	4,58	0,72	2,45	-67,62	6,0	4,64	9,74	4,40	168,21	142,57	1,53
47,0	158,0	4,64	9,74	4,40	168,21	2,0	4,92	8,76	4,47	-117,14	143,02	1,52
47,5	160,0	4,92	8,76	4,47	-117,14	4,0	4,97	-1,91	3,07	-1,30	144,91	1,53
48,0	161,0	4,97	-1,91	3,07	-1,30	2,0	4,86	-8,19	2,42	-39,66	147,35	1,53
48,5	163,0	4,86	-8,19	2,42	-39,66	4,0	4,68	-5,31	3,23	78,00	148,80	1,53
49,0	165,0	4,68	-5,31	3,23	78,00	4,0	4,65	2,09	4,59	27,30	148,86	1,52
49,5	167,0	4,65	2,09	4,59	27,30	4,0	4,70	0,98	4,47	-27,46	149,10	1,51
50,0	169,0	4,70	0,98	4,47	-27,46	4,0	4,68	-3,07	3,89	-15,62	149,88	1,50

Na tabela 2.2, para facilitar a visualização, preferiu-se por acumular na penúltima coluna o valor da variável RS, de maneira que pudessem ser mostrados ao longo de todo o cálculo, na última coluna, os resultados parciais do IRI. Sendo assim, o valor do IRI para o perfil de 50 m é o último valor da coluna mais à direita da tabela 2.2:

IRI = 1,50 m/km

Vale ressaltar que para a determinação do resultado do IRI de um subtrecho intermediário de qualquer comprimento, basta fazer uso das equações 2.15 e 2.16.

Pelo fato de tratar-se do cálculo do IRI, é muito importante revelar uma constatação que pôde ser feita ao longo desta pesquisa sobre este índice de irregularidade, que o torna um pouco diferente do QI. Essa constatação está justamente ligada ao método de cálculo do IRI explicado por Sayers et al. (1986b), segundo o qual, o cálculo das variáveis Z1, Z2, Z3 e Z4 para uma rodovia longa deveria ser realizado

de forma contínua, sendo que o cálculo do resultado do IRI em espaçamentos regulares deveria ser realizado justamente com o auxílio das equações 2.11 e 2.12. Com o cálculo realizado desta maneira, constata-se que a irregularidade do subtrecho anterior pode influir no valor da irregularidade do trecho posterior.

Naturalmente, não é possível se estabelecer um percentual para corrigir tal influência, pois ela varia de trecho para trecho. Esta influência ocorre pelo fato de estarmos diante de um modelo de quarto de carro. Seria como se o veículo passasse de um trecho de 200 metros para o trecho seguinte balançando pelo fato de seu sistema de suspensão ter ressonado com a irregularidade do trecho anterior.

Não é complicada a tarefa de quantificar tal influência para um caso prático qualquer. Basta se construir uma planilha eletrônica similar àquela da tabela 2.2 para um perfil de 400 metros, por exemplo, e em seguida calcular o IRI, de acordo com as equações 2.15 e 2.16 para o trecho que vai de 200 a 400 metros, ou seja, o IRI será calculado com a influência do trecho imediatamente anterior. Em seguida, basta tomar o perfil deste mesmo trecho de 200 a 400 metros e colocá-lo no início da planilha, visando calcular o IRI de forma completamente do trecho de 0 a 200 metros.

O resultado de tal experimento vai depender do perfil utilizado, mas em geral deverá ser observada alguma diferença pequena entre os valores do IRI calculados das duas formas diferentes, para o mesmo trecho.

Embora não seja possível generalizar de modo algum o valor de tais diferenças, algumas experiências exemplificativas que foram realizadas no âmbito dessa pesquisa, em trechos de 200 metros, revelaram diferenças de até 7% no valor do IRI apenas mudando-se a forma de cálculo, muito embora, tais diferenças mais altas não tenham sido observadas com freqüência. Houve inclusive muitos trechos onde não houve diferença alguma, sendo que na maior parte dos trechos testados as diferenças foram menores do que 3%.

Sobre esta diferença no método de cálculo, é mister mencionar que as normas norte-americanas que tratam do cálculo IRI (ASTM E 1926-98 e ASTM E 1364-95), nada mencionam de forma direta sobre o caso. Ambas apenas exemplificam com algoritmos o cálculo do IRI para um perfil simples, ou seja, sem subdivisões internas,

para o qual realmente não há diferença alguma de resultado. Por sua vez, os 2 programas de computador norte-americanos mais disseminados para o cálculo do IRI a partir de perfis longitudinais (ProVal e RoadRuf) calculam o IRI de forma contínua, ou seja, igual ao preconizado pelo trabalho de Sayers et al. (1986b). Esta confirmação com os softwares colabora para o entendimento de que o cálculo normalizado do IRI deve ser feito de forma contínua, até porque, como já foi mencionado, a norma foi baseada nos resultados dos trabalhos de Sayers et al. (1986a; 1986b).

Este efeito que acontece no cálculo do IRI não existe no cálculo do QI, que é sempre independente entre trechos consecutivos.

Enfim, apesar da nuance referente às duas formas cálculo, como se pode perceber, o cálculo do IRI também não é muito complexo. O que se precisa ter em mente no caso do IRI é que o algoritmo – quando o cálculo do IRI é começado a partir do zero – não funciona para trechos com comprimento inferior a 11 metros, pois esse é o espaço que o algoritmo leva para ajustar as variáveis usadas no cálculo. O IRI apenas pode ser calculado em trechos muito curtos (menores que 11 metros) quando o resultado é extraído do meio de um ‘cálculo maior’ de IRI, muito embora neste caso existirá a influência da irregularidade do trecho anterior, conforme foi evidenciado. O método de cálculo do QI não tem esta limitação.

Sobre o espaçamento entre os pontos do perfil, é importante lembrar que tanto o método de cálculo do IRI, quanto o método de cálculo do QI, podem ser utilizados para espaçamentos diferentes. O QI apresenta uma limitação maior na escolha do espaçamento entre pontos, pois como o método de cálculo utiliza bases com 1 m e 2,5 m, o espaçamento entre pontos fica limitado aos divisores comuns das duas bases, ou seja: 0,5 m, 0,25 m, 0,125 m, 0,0625 m etc.

Embora o IRI não tenha a limitação de espaçamentos do QI, para o cálculo do IRI é preciso sempre usar a matriz com os coeficientes de cálculo ajustados ao espaçamento entre pontos do perfil utilizado.

Os dois trabalhos de Sayers et al. mencionados neste item são boas fontes de referência sobre o detalhamento dos cálculos destes e de outros índices de irregularidade de pavimentos.

2.7 Os perfilômetros inerciais e suas principais características

Conforme revelou o histórico sobre a avaliação de irregularidade longitudinal de pavimentos, os perfilômetros inerciais foram inventados por Spangler e Kelly no início na década de 60 e tiveram sua primeira patente em 1966 nos EUA.

Os perfilômetros inerciais atuais não guardam muita semelhança com o desenho da primeira patente dos inventores citados, mas já são mais parecidos com o projeto da segunda patente, registrada somente em nome de Spangler, em 1983.

Antes, porém, de detalhar as características e utilidades de um perfilômetro inercial moderno, é importante pontuar alguns conceitos sobre o perfil longitudinal dos pavimentos.

A medida do perfil longitudinal de um pavimento pode ser feita sobre qualquer linha imaginária paralela ao eixo da pista. É correto afirmar que só existe um perfil verdadeiro em cada linha imaginária que se escolha, e que por isso, normalmente, duas medições de perfil longitudinal só serão iguais se forem realizadas exatamente sobre a mesma linha imaginária, a menos que se esteja diante de uma pista perfeitamente plana.

O perfil longitudinal pode incluir a medida do greide, da irregularidade e até da textura do pavimento, dependendo de como e para que ele é mensurado. Assim, pode-se dizer que em tese, seria muito difícil medir o perfil verdadeiro, pois representar bem a realidade do campo é uma questão de resolução e exatidão dos equipamentos usados para medi-lo, tanto no deslocamento horizontal, quanto na medida vertical. Quanto mais exato e sensível o equipamento, mais próximo do perfil verdadeiro se estaria.

Por outro lado, é importante registrar que é justamente a utilidade que o perfil longitudinal terá que deve indicar o tipo de medida ou de equipamento a ser empregado. Não tem significado algum medir um perfil de pavimento a cada décimo de milímetro, com resolução vertical de centésimo de milímetro para calcular a irregularidade longitudinal.

Por exemplo, para quem está preocupado com a macrotextura de um pavimento, o perfil deve incluir medidas de centésimos de milímetros, realizadas muito próximas umas das outras (a cada décimo de milímetro, por exemplo). Para outras utilidades, como por exemplo, para conferir o greide da pista, medidas a cada metro, com resolução de milímetros podem ser mais do que suficientes.

Assim, pode-se concluir que os perfis que normalmente são medidos em um pavimento não representam exatamente o perfil verdadeiro, mas somente se relacionam melhor ou pior com ele, dependendo do método e equipamento usados para medi-lo.

O mesmo vale quando se aborda a necessidade do perfil medido ter visualmente a mesma forma do perfil de campo (medido com um equipamento estático do tipo do nível e mira, por exemplo). Nem sempre é necessário ter-se em mãos um perfil que possua exatamente toda a conformação do perfil verdadeiro. Muitas vezes, basta ter um perfil bem correlacionado com o perfil verdadeiro para determinados comprimentos de onda. Este é justamente o caso de um perfil usado para se avaliar a irregularidade. Conforme será evidenciado numericamente em item subsequente deste trabalho, perfis visualmente diferentes, obtidos do mesmo pavimento, podem apresentar valores iguais de irregularidade, desde que possuam determinadas características semelhantes.

Em geral, os índices de conforto e de irregularidade longitudinal de um pavimento não precisam de um perfil com a mesma forma do perfil real para serem calculados corretamente, pois não são todos os comprimentos de onda nele contidos que importam na determinação de tais índices.

Isto acontece porque tais índices só estão preocupados com a parte do perfil que causa oscilações nos veículos (desconforto), o que já deixaria de fora normalmente os dados da textura e do greide da pista. Basta para este tipo de determinação um perfil que tenha uma boa relação com o perfil verdadeiro, e que contenha especialmente as características (comprimentos de onda) que dizem respeito ao que se quer medir, até porque, como já foi explicado anteriormente, os índices de irregularidade são como filtros que vão retirar os comprimentos de onda que não interessam.

Existem diversas maneiras de medir o perfil longitudinal de um pavimento, seja ele o perfil verdadeiro ou um perfil relacionado com o perfil verdadeiro.

Normalmente denominam-se os medidores de perfil por perfilômetros ou perfilógrafos. Este tipo de aparelho pode ser definido como um equipamento que passado sobre uma determinada superfície gera uma saída digital ou analógica relacionada com o perfil dela.

Ou seja, engana-se quem pensa que um bom perfilômetro ou perfilógrafo meça necessariamente as elevações reais de uma superfície. Um bom equipamento deste tipo deve gerar como saída um perfil que seja relacionado ao perfil real, e que contenha as características procuradas naquela medição.

Medidores de perfil, em geral, trabalham com 3 elementos: ponto de referência, altura em relação ao ponto de referência e deslocamento longitudinal.

Estes três elementos estão presentes desde os equipamentos mais simples e comuns para a determinação do perfil de um pavimento, como o “nível e mira”, que dispensa maiores apresentações, conforme ilustra a figura 2.18.

Figura 2.18 – Desenho esquemático de um nível e mira ressaltando os elementos principais dos medidores de perfil. Fonte: Sayers e Karamihas (1998).

Os mesmos elementos são encontrados em outros aparelhos, como o Dipstick, que assim como o nível e mira, é capaz de medir um perfil com a conformação muito similar ao perfil de campo, guardadas as suas características de exatidão e resolução.

Os perfilômetros inerciais por sua vez, também possuem os 3 elementos (figura 2.19), só que sua grande diferença em relação aos anteriores está na produtividade. Por ser um equipamento dinâmico que opera instalado em um veículo que trafega na velocidade normal da rodovia, um perfilômetro inercial consegue medir algumas centenas de quilômetros de faixas de rolamento em um dia, enquanto um Dipstick ou o Nível e Mira, não passariam de poucas dezenas.

Figura 2.19 – Esquema de funcionamento de um perfilômetro inercial, evidenciando-se os três elementos presentes em medidores de perfil. Fonte: Sayers e Karamihas (1998).

O elemento que diferencia este tipo de perfilômetro dos demais é justamente o seu sistema inercial de referência. Se o veículo se mantivesse a uma distância constante do pavimento o problema seria muito simples de ser resolvido, mas como os veículos têm molas, amortecedores e pneus, a solução é monitorar este deslocamento da carroceria do veículo.

É este monitoramento, portanto, realizado por meio de sensores de aceleração vertical, que dá ao sistema a altura de referência.

O funcionamento deste que foi precursor dos perfilômetros inerciais não é muito complicado de se explicar, muito embora o desenvolvimento de um sistema desses não seja fácil, pois depende do trabalho harmônico e simultâneo de todos os sensores, a uma frequência relativamente alta.

Tipicamente, um perfilômetro inercial é composto das seguintes partes:

- Um ou mais módulos de medição da distância entre o veículo e o pavimento, sem contato, que funcionam a altas frequências. (Atualmente quase a totalidade dos equipamentos deste tipo em uso possui módulos de medição a laser).
- Um ou mais sensores de aceleração vertical, que normalmente são instalados dentro dos módulos de medição laser, devendo estar em perfeito alinhamento com o sistema de medição laser, que podem gerar informação na mesma frequência deles.
- Um hodômetro de precisão, normalmente ótico, instalado em uma das rodas.
- Um sistema eletrônico ao qual todos os sensores são conectados, que gerencia a coleta dos dados simultânea de cada um dos sensores e o envio de todos os dados para um computador.
- *Software* capaz de gerenciar toda a coleta de dados e de verificar o funcionamento dos componentes do sistema.
- Alguns sistemas possuem um segundo *software* apenas para o processamento dos dados e a geração dos relatórios e de perfis.

De maneira simplificada tais perfilômetros funcionam da seguinte maneira: em um momento inicial, o veículo contendo o equipamento trafega sobre o pavimento e o computador registra simultaneamente: o deslocamento longitudinal, a altura do veículo até o pavimento e a aceleração vertical do veículo. Dependendo do sistema, tais dados podem ser processados gerando o valor de algum índice de irregularidade no mesmo momento em que são coletados, enquanto outros deixam esta função para ser executada somente após a coleta de dados.

No processamento as acelerações verticais registradas são transformadas em deslocamento vertical do veículo, uma vez que diferentemente dos outros métodos, neste, a altura de referência está se movimentando. A “transformação” da medida da aceleração em deslocamento vertical é feita através de duas integrações sucessivas. Com o valor do deslocamento calculado, basta corrigir todas as medidas de altura feitas pelos sensores laser e obter-se-á um perfil que tem boa relação com o perfil verdadeiro da faixa de rolamento avaliada.

A partir do perfil longitudinal é possível calcular os índices de irregularidade mais comuns, no intervalo que for adequado.

Os perfis gerados por perfilômetros inerciais nem sempre se parecem visualmente com os perfis obtidos com um equipamento estático, mas mesmo assim, os valores de índices de irregularidade mais comuns são iguais quando obtidos a partir dos dois tipos de perfis.

Isto acontece pelo fato dos acelerômetros dos perfilômetros inerciais não terem, em alguns casos, e dependendo da velocidade do veículo, sensibilidade suficiente para registrar os maiores comprimentos de onda do perfil, acima de 50 metros, por exemplo.

Quanto mais rápido um perfilômetro inercial passa sobre um pavimento, maiores são os comprimentos de onda que ele consegue incluir no perfil. Justamente por este motivo que não se recomenda que este tipo de equipamento realize medições em velocidades menores do que 30 km/h, pois se a velocidade for muito baixa, pode haver diferença nos valores dos índices de irregularidade calculados. Isto acontece, pois os acelerômetros usados neste tipo de equipamento podem não sentir, a uma baixa velocidade, as irregularidades com maiores comprimentos de onda, que seriam facilmente sentidas em uma velocidade maior, e desta maneira, o sistema deixaria de computá-la. Este efeito acontece de forma similar nos ocupantes de um veículo que podem deixar de sentir determinadas irregularidades a velocidades muito baixas; seria como se o carro contornasse por cima da irregularidade, sem que ela causasse desconforto aos ocupantes.

Para velocidades acima de 30 km/h, a maioria dos perfilômetros inerciais fabricados atualmente consegue obter perfis bons o suficiente para se calcular os índices de

irregularidade com boa exatidão, quando comparados a cálculos feitos com base em um perfil obtido estaticamente.

Em outras palavras, mesmo obtendo perfis visualmente diferentes dos obtidos estaticamente, os perfilômetros inerciais medindo a velocidades acima de 30 km/h, geram perfis que contém os comprimentos de onda que efetivamente causam a irregularidade no rolamento, e por isso podem ser usados para esta finalidade sem problemas.

2.7.1 As características técnicas de perfilômetros inerciais

Uma pergunta recorrente sobre os perfilômetros inerciais é a respeito de calibração. Tal preocupação, embora plenamente justificável, deve-se ao estigma que sempre sondou os medidores de irregularidade do tipo resposta, que têm um processo de calibração moroso e por isto dispendioso.

A calibração de um perfilômetro inercial é muito diferente da calibração de um medidor do tipo resposta. Enquanto em um medidor do tipo resposta a calibração é uma correlação entre a medida gerada pelo equipamento e o resultado da irregularidade obtida por um método estático, em um perfilômetro inercial isto não faz sentido algum.

Como o próprio nome diz, um perfilômetro inercial é um medidor de perfil, enquanto um medidor do tipo resposta não é. Isto faz toda a diferença no aspecto calibração. Outro aspecto que faz muita diferença e não permite uma calibração por correlação, nem que seja uma correlação do perfil, diz respeito às diferenças que existem entre os perfis medidos com este tipo de perfilômetro e os perfis obtidos estaticamente – simplesmente não é possível obter um modelo de correlação para corrigir um perfil obtido por um perfilômetro.

É justamente por isto que se costuma dizer que ou um perfilômetro inercial funciona e gera perfis bons o bastante para se calcular os índices de irregularidade corretamente, ou simplesmente ele não funciona. Corrigir valores medidos por um perfilômetro é algo praticamente inexecutável.

Isto tudo não quer dizer que um perfilômetro inercial não possa ser calibrado. Em um perfilômetro o que pode ser calibrado, individualmente, são seus componentes: módulos laser, acelerômetros e hodômetro.

Os módulos laser (sensores de distância entre o veículo e o pavimento) podem ser calibrados como qualquer outro instrumento dimensional, ou seja, pela comparação com outro instrumento calibrado. Um paquímetro digital acoplado a um dispositivo específico pode ser uma boa escolha para calibrar um medidor a laser com resolução de 0,1 mm.

Os sensores de aceleração podem ter uma parte do seu curso facilmente verificada com o uso de um inclinômetro/transferidor, uma vez que quando apontado perpendicularmente para baixo, um sensor de aceleração vertical deve marcar a força gravitacional; quando apontado perpendicularmente para cima, deve registrar um valor negativo da força gravitacional, sendo que os valores intermediários são naturalmente relacionados ao seu ângulo de inclinação. Outras possibilidades de calibração mais complexas para os acelerômetros, dependem de simuladores que possuam acelerômetros calibrados.

Finalmente, a calibração do sensor de deslocamento é realizada trafegando-se com o veículo por um trecho de comprimento conhecido.

Com todos os sensores calibrados e funcionando corretamente, o que se pode fazer para verificar o funcionamento do perfilômetro como um todo é uma correlação entre um perfil gerado por ele e uma outra medição do mesmo perfil realizada por outro equipamento padrão. Tal comparação deve ser executada dentro de um processo padronizado, que possui nuances que podem afetar bastante os resultados, por isso um item todo do Capítulo 4 será dedicado a este assunto, sendo que na mesma oportunidade se abordará também a verificação de perfilômetros quanto à repetitividade de seus resultados.

Embora seja possível uma verificação inicial de perfilômetros inerciais através da simples comparação dos resultados de algum índice de irregularidade medido com equipamentos diferentes, tal qual a comparação efetuada em bases na Rodovia Anhangüera (item 3.3), estudos posteriores evidenciaram que a correlação entre perfis é um tipo de verificação muito mais completa, na medida em que perfis com

conformações diferentes podem apresentar eventualmente os mesmos resultados de determinado índice de irregularidade.

É importante frisar que índices de irregularidade obtidos a partir do perfil medido por um perfilômetro inercial não podem e não devem ser corrigidos, sob pena de piorar ou falsear os resultados. Esta impossibilidade de correção dos perfis se deve ao fato de que cada ponto do perfil medido depende da medição efetuada por pelo menos dois sensores diferentes e da resposta desses sensores a determinada condição instantânea do pavimento no momento em que os dados foram capturados. Se um perfilômetro foi verificado quanto a seu funcionamento geral e também quanto à exatidão das medidas de seus sensores, e tudo estava adequado, não há nada que possa ser feito depois que um perfil foi medido para corrigi-lo. Em caso de dúvida, o recomendável seria verificar o equipamento outra vez e medir o trecho novamente.

Há registros também da utilização de simuladores de vibrações visando verificar o funcionamento de perfilômetros inerciais, como explica Schwartz et al. (2002). Naturalmente este tipo de verificação é mais complexo e demanda equipamentos especiais de simulação, sendo aplicável somente em estudos específicos.

Os resultados finais de um bom perfilômetro inercial quando verificados, devem se mostrar repetitivos e sem tendência pronunciada em relação a um perfil medido com equipamento padrão ou ao valor da irregularidade resultante de tal perfil. Se isto acontecer, quer dizer que se trata provavelmente de um bom equipamento.

Normalmente, além dos tipos de calibração e verificação informados, que podem ser feitos em espaços mais largos de tempo, ou quando houver alguma dúvida em relação ao bom funcionamento do equipamento, um perfilômetro inercial geralmente permite pequenas verificações dos sensores que podem ser feitas mais freqüentemente, ou mesmo antes de cada avaliação.

Este tipo de checagem normalmente pode ser feita em cada um dos módulos laser do equipamento de forma independente, com o uso de blocos padrão de dimensões conhecidas, que podem ser colocados sob cada laser, para verificar a exatidão das medidas geradas.

Além disso, perfilômetros inerciais em geral permitem nos *softwares* de coleta de dados que um operador bem treinado possa observar qualquer anomalia imediatamente durante o levantamento, acompanhando as medições e eventuais erros de todos os sensores, além de ser possível verificar a velocidade de deslocamento e o valor de algum índice de irregularidade. Todas estas informações diminuem a possibilidade de erros do equipamento passarem despercebidos.

Ainda em comparação com os medidores do tipo resposta, os componentes de um perfilômetro inercial levam vantagem por não possuírem partes móveis, ou seja, a menos que sofram algum impacto ou mau uso, dificilmente perdem a calibração ou se desgastam facilmente.

Por fim, é importante mencionar um método de verificação do funcionamento de boa parte de um perfilômetro inercial que está presente na norma ASTM E 950-98, no item que trata dos procedimentos a serem adotados antes de qualquer medição – trata-se do “teste de balanço”.

Este teste é feito com o veículo parado e consiste em ativar uma função especial do *software* de coleta de dados, que passa a simular internamente as leituras do hodômetro como se o veículo estivesse trafegando a determinada velocidade, por exemplo, 80 km/h. Normalmente coloca-se uma superfície plana e lisa sob o laser dos sensores e o sistema passa a registrar a medida de todos eles como em um levantamento normal, enquanto um dos operadores balança o máximo possível a parte do veículo onde estão instalados os módulos laser e acelerômetros.

Isso deve ser feito por alguns segundos e em seguida o teste deve ser finalizado e o *software* deve mostrar o resultado. Como o veículo estava parado e o laser estava apontando para uma superfície lisa, o correto seria que o perfil gerado pelo equipamento para este trecho simulado fosse uma linha reta, ou seja, todo o deslocamento medido pelos sensores laser seria descontado pelos acelerômetros. Entretanto, como podem existir pequenos desvios devido a arredondamentos, a norma mencionada prevê como bom o resultado em que as amplitudes do perfil gerado sejam menores do que 1% das amplitudes nas quais o veículo foi balançado.

Como se pode perceber trata-se de um teste rápido que é capaz de verificar todos os módulos laser e todos os acelerômetros de um perfilômetro em uma situação

dinâmica, próxima da realidade, além de verificar também toda a parte de registro e cálculo do equipamento.

Ao invés de comparar amplitudes, como diz a norma ASTM, alguns equipamentos para facilitar a avaliação dos resultados, calculam um determinado índice de irregularidade. É esta inclusive a recomendação da norma AASHTO PP 49-03, que estabelece como limite do IRI calculado com o veículo parado sendo balançado valor de 6 polegadas por milha, ou seja, 0,095 m/km.

O IRI ou QI, por exemplo, poderiam ser calculados para duas situações, dentro deste teste de balanço: em uma situação inicial sem o veículo balançar e depois com o veículo balançando. Ambos os resultados têm significado, pois no primeiro se está medindo somente a estabilidade de todo o sistema, a presença de ruídos etc; na segunda parte do teste, a medida é de todo o mecanismo de compensação do sistema em funcionamento. No Capítulo 4 o teste de balanço será abordado experimentalmente.

Se em termos de facilidade de calibração e de exatidão dos resultados as vantagens dos perfilômetros inerciais já são grandes, em termos operacionais são maiores ainda. Enquanto em um medidor do tipo resposta o operador deve trafegar em uma velocidade fixa, na qual o equipamento foi calibrado, no perfilômetro inercial essa necessidade não existe. Desde que se trafegue acima de 30 km/h (ou outra velocidade limite informada pelo fabricante), a velocidade de passagem do perfilômetro pode variar na medida do necessário, sem prejuízo na qualidade dos dados, conforme já publicado por Barella et al. (2004).

O ponto operacional levantado é também uma vantagem do ponto de vista da segurança da operação de avaliação da irregularidade longitudinal quando se usa um perfilômetro inercial, pois em determinadas rodovias mais rápidas, pode ser bastante perigoso trafegar à velocidade fixa de 60 ou 80 km/h, que são normalmente as velocidades mais usadas com os medidores do tipo resposta.

Ainda pontuando as vantagens de um perfilômetro inercial em relação a um medidor do tipo resposta, vale registrar que em um perfilômetro inercial não existe a preocupação na natural mudança das características do veículo com o uso, tampouco existe problema em instalar o equipamento em outro veículo. Estes

procedimentos, desde que feitos de acordo com as prescrições do fabricante não alteram a calibração do equipamento, pois ela é totalmente independente do veículo onde o perfilômetro está instalado. Apenas pela variação no perímetro dos pneus, o único sensor que realmente precisaria de uma nova calibração se houvesse uma mudança do veículo seria o hodômetro. Em um medidor do tipo resposta, qualquer mudança nas características do veículo (peso, uso da suspensão, uso dos pneus), pode afetar o resultado da medição, e por isso requerer uma nova calibração.

Sobre as características técnicas que deve possuir um perfilômetro inercial, como o Brasil não possui nenhuma referência normativa nacional, é preciso recorrer mais uma vez à norma norte-americana ASTM E 950-98, que foi publicada pela primeira vez em 1983 e serviu de base para a maioria das normas posteriores que trataram deste tema, como por exemplo, a norma AASTHO MP 11, entre outras.

A norma ASTM E 950-98, embora não seja muito extensa, é bastante abrangente quando trata das características mínimas esperadas em um perfilômetro inercial. A seguir as principais características dos componentes de um perfilômetro serão descritas, sendo que os testes de repetitividade e exatidão que também estão presentes na norma, serão descritos em seguida.

Após descrever de forma genérica os componentes de um perfilômetro, conforme já foi feito neste item, a norma prescreve que quando se estiver usando 2 módulos laser, eles devem estar fixados entre 1,5 e 1,8 m distantes um do outro, visando capturar as informações do perfil de cada trilha de roda. Embora não pareça, esta já é uma informação importante, pois aqui no Brasil, pela falta de norma, muitos preferem que os módulos fiquem apenas a 1,4 m um do outro, visando manter as condições anteriores de medição de um equipamento do tipo resposta.

A respeito dos acelerômetros utilizados, não há uma especificação clara de suas características. A norma menciona que devem ser de boa qualidade. Preferiu-se adotar termos mais subjetivos para classificá-los, mas menciona-se neste item que os acelerômetros devem ser bons o bastante para atender os requisitos de repetitividade e exatidão para as diferentes classes de perfilômetros estabelecidas na norma.

Sobre os módulos de medição da distância entre o veículo e o pavimento, a norma não menciona qual curso eles devem ter, nem qual deve ser sua tecnologia (laser, ultra-som, contato etc). Por outro lado ela fixa a frequência na qual eles devem medir e também sua resolução. Isto é feito na forma de classes, que são numeradas de 1 a 4, sendo que a mais exigente é a classe 1.

Por se tratar de uma norma relativamente antiga, atualmente não se vê no mercado internacional nenhum equipamento destes que não seja anunciado pelo fabricante como sendo classe 1, por este motivo, serão informados apenas os requisitos para esta classe de equipamento, sabendo-se de antemão que as demais classes são menos exigentes.

A frequência mínima de medição da distância entre veículo e pavimento prescrita pela norma é de uma medida a cada 25 mm de deslocamento do veículo e a resolução da medida deve ser menor ou igual a 0,1 mm.

Sobre o hodômetro do equipamento a norma estabelece apenas que ele deve ser suficientemente bom para gerar sinais referentes ao deslocamento do veículo na velocidade de uso do equipamento, com erro de medição longitudinal menor do que 0,1%.

Como se pode notar a norma não foi muito específica nas características dos componentes do equipamento, entretanto, ela foi bastante restrita nos resultados finais que um perfilômetro deve gerar para poder ser classificado como pertencente à classe 1. Essa postura adotada pela norma é realmente a mais correta para este caso, pois não limita a criatividade nem a tecnologia a ser adotada pelos possíveis interessados em fabricar este tipo de equipamento, desde que eles gerem resultados bons o bastante.

Ainda segundo a norma ASTM E 950-98, os perfis medidos pelos perfilômetros inerciais devem ser filtrados para retirada dos grandes comprimentos de onda desde que tal filtragem não altere os comprimentos menores que 60 metros, antes de serem utilizados para os cálculos do IRI. A norma não justifica tal procedimento, mas possivelmente ele foi incluído visando tornar visualmente mais similares os perfis obtidos a diferentes velocidades. É importante salientar que o uso desse filtro não deve produzir mudança apreciável no valor do IRI.

Conhecidas as características dos principais componentes de um perfilômetro inercial de acordo com a norma norte-americana, deve-se conhecer também como tal norma prescreve a verificação dos perfilômetros nos quesitos repetitividade e exatidão, para que eles possam ser classificados como pertencentes à classe 1.

Segundo a norma, a repetitividade das medidas de elevações de um perfil de pavimento está relacionada à concordância dos resultados entre diversas medições de um mesmo perfil. Ela está relacionada, portanto, ao desvio padrão da média dos valores de elevação observados em certos pontos ao longo do perfil.

No final, o que se obtém para a classificação do equipamento em termos de repetitividade é um valor que representa a média de múltiplos desvios padrão de elevações obtidas através da repetição de medidas em um mesmo trecho.

Parece mais complicado do que realmente é. O método prescrito prevê que se meça com o perfilômetro em análise, o perfil longitudinal em um segmento de 1056 pés, sendo que o número de medidas efetuadas deve ser igual a 1057, ou seja, uma medida a cada pé (~30 cm). Tal segmento deve ser medido pelo menos 10 vezes.

Para diminuir a influência da variação de posicionamento transversal do veículo, que naturalmente pode variar entre uma passagem e outra do perfilômetro, deve-se escolher um segmento com o mínimo de variação transversal de irregularidade, podendo-se ainda, para auxiliar o motorista, marcar bem a rota que ele deve seguir.

É preciso também tomar bastante cuidado com a marcação correta do trecho no sentido longitudinal, o início e o fim dos 320 m. Para isto, pode ser usado algum dispositivo de disparo automático do equipamento quando ele passar por uma marcação especial, ou, pode ser usado um pequeno obstáculo no meio da faixa de rolamento, por onde um módulo laser central que não estará participando dos testes passará. Com isto, na posterior verificação dos perfis fica fácil fazer os cortes no mesmo ponto.

Feitas todas as medidas, deve ser calculado o desvio padrão das 10 medições, para cada um dos 1057 pontos do perfil. Por fim, tira-se a média dos 1057 desvios padrão e para ser classificado como classe 1, este valor obtido deve ser menor do que 0,38 mm.

O segundo teste, chamado de teste de exatidão, visa comparar as elevações de um perfil médio medido após algumas passadas de um perfilômetro, com o mesmo perfil medido com um equipamento de referência, como por exemplo, o nível e mira, visando verificar se o perfilômetro produz resultados com alguma tendência.

Neste caso a recomendação sobre o tamanho do trecho é a mesma: 320 m, medidos a cada 30 cm, ou seja, pode ser usado o mesmo trecho do teste de exatidão.

Para que se obtenha um perfil de referência muito confiável, a norma recomenda que ele seja medido algumas vezes, visando obter uma média e um desvio padrão de cada ponto de medição. Há a recomendação ainda para que este perfil estático seja processado da mesma maneira que o perfilômetro sob análise o fará.

Caso se deseje, é possível utilizar os mesmos 10 perfis medidos para o teste de exatidão. Basta calcular um único perfil médio a partir da média de cada uma das elevações dos 10 perfis usados no teste de repetitividade.

O perfil médio determinado pelo perfilômetro deve ser comparado com o perfil médio de referência, também ponto a ponto. O resultado do teste de tendência será a somatória do valor das 1057 diferenças absolutas entre as elevações do perfil médio e do perfil de referência, dividido pelo número de pontos (1057). Portanto, o que se calcula é a média das diferenças absolutas.

Este resultado deve ser menor do que 1,25 mm para que o equipamento seja classificado como pertencente à classe 1.

Muito embora tais limites de repetitividade e exatidão sejam aparentemente bastante exigentes, o procedimento prescrito por esta norma é falho e inadequado, conforme evidenciam alguns autores como Karamihas (2002, 2005a), Perera et al. (2006), Wang (2006) e Li e Delton (2003). No Capítulo 4 a inadequação desta e de outras normas será analisada em detalhes.

Finalizados os pontos principais da norma que, ao que tudo indica, é uma das mais utilizadas pelos fabricantes de perfilômetros, é ainda importante discorrer um pouco sobre as possibilidades da utilização de um perfilômetro inercial, que não eram possíveis com um medidor do tipo resposta.

2.7.2 Algumas aplicações e limitações dos perfilômetros inerciais

Em termos de aplicação que se tornou possível com o uso de perfilômetros inerciais, merece destaque a utilização em vias urbanas. Há boas experiências no exterior, como por exemplo, na cidade de Nova Iorque, no estudo: Center on Municipal Government Performance (1998 e 2003), assim como em outros experimentos relacionados a vias urbanas, como Shafizadeh et al. (2002) e Shafizadeh e Mannering (2003).

Pelo fato de poderem conviver com a mudança de velocidade sem problemas, os perfilômetros inerciais tornam possível a avaliação das principais vias de uma cidade, principalmente no período noturno – para se evitar o tráfego excessivo, visando a montagem de um banco de dados que auxilie na gerência da malha urbana.

O índice de irregularidade utilizado nos levantamentos realizados em Nova Iorque foi batizado de *City Roughness Index*, ou simplesmente CRI. Embora todo o método de cálculo seja o mesmo do IRI, o novo nome foi adotado, pois em uma malha urbana nem sempre é possível se manter a velocidade do perfilômetro acima do limite mínimo estabelecido na norma de medição do IRI a partir de um perfilômetro inercial.

Além do índice CRI, o método de avaliação dos pavimentos urbanos com perfilômetro inercial utilizado nos trabalhos executados na cidade de Nova Iorque também computava uma contagem de “solavancos fortes” sofridos pelo veículo, por milha trafegada. A utilização destas duas medidas foi bastante adequada aos propósitos, segundo os autores.

A respeito dos tipos de superfícies que podem ser avaliadas com um perfilômetro inercial, é possível afirmar que em tese, não existe um tipo específico de pavimento que não possa ter seu perfil medido com ele, desde que suas condições de uso sejam atendidas. Naturalmente, um bom perfilômetro inercial pode ser usado em quaisquer tipos de revestimentos secos que possuam uma superfície na qual o pneu de um veículo possa tocar a grande maioria de seus pontos. Isto incluiria até, por exemplo, uma estrada de terra em condições razoáveis de trafegabilidade ou tratada com antipó.

Foi verificado por Wang (2006) que em geral os perfilômetros inerciais apresentam menor repetitividade e maiores erros de exatidão em superfícies com texturas mais proeminentes, o que é de se esperar, dado que existem alguns tipos de textura no qual os pneus, ainda que deformáveis, deixam de tocar em boa parte da superfície, enquanto um medidor laser é capaz de medi-la.

A restrição em relação a pavimentos molhados deve-se ao fato dos módulos laser realizarem suas leituras por reflexão, que se torna instável e difusa quando o laser é apontado para água, não gerando resultados exatos na medição. Outra dificuldade trazida pela presença de água é o aumento do acúmulo de sujeira sob os módulos laser.

Usuários mais avançados, que possam efetuar um tratamento estatístico adequado às medidas de um perfilômetro inercial, podem ser capazes de medir outros tipos de revestimento que possuam, por exemplo, ranhuras transversais ou longitudinais, como por exemplo, o “grooving”, bastante usado em pistas de aeroportos; ou ainda misturas muito abertas (ou com macrotextura muito pronunciada), como é o caso de um SMA *stone-mastic asphalt* ou *stone matrix asphalt*.

Para a utilização de perfilômetros inerciais em pavimentos de concreto de cimento Portland, embora não existam restrições, é preciso salientar que os resultados podem ser afetados pela presença de juntas transversais não seladas no mesmo nível da superfície, que eventualmente seriam medidas e computadas como parte do perfil. Nestes casos, para maior exatidão nos resultados, pode ser necessária uma pré-filtragem dos dados para evitar influências indevidas de fatores que não causam distúrbio ao rolamento, como é o caso da profundidade das juntas transversais de dilatação. Sobre as juntas longitudinais, os operadores devem ter ciência que não se deve tráfegar com nenhum dos módulos sobre elas, sob pena de se incrementar falsamente o valor da irregularidade. Este tema também será objeto de análise no Capítulo 4.

Dependendo do número de módulos laser que um perfilômetro possui, pode ser possível a medição simultânea do afundamento nas trilhas de roda de uma faixa de rolamento, ou seja, neste caso se está medindo além do perfil longitudinal, alguns pontos do perfil transversal do pavimento.

Por exemplo, quando se usa três módulos laser, sendo dois deles posicionados sobre as trilhas de roda e o terceiro posicionado no meio, entre os anteriores, normalmente é possível a medição de um valor médio de afundamento plástico de ambas as trilhas de roda (ATR).

Antes mesmo de se explicar como tal medição é feita é preciso salientar que normalmente esta não é uma maneira exata de se medir o afundamento nas trilhas de roda. Isto acontece porque normalmente o número de pontos de medição (ou módulos laser) utilizados é muito limitado, ou seja, o valor dos afundamentos é estimado com base em um perfil transversal incompleto, formado geralmente por 3 ou 5 pontos.

Sendo assim, se a posição de tais pontos em relação ao perfil transversal não for perfeita, ou seja, se dois desses pontos não estiverem bem no ponto de afundamento máximo, e o outro ou os outros estiverem fora da zona de afundamento, a medida pode não representar a verdade em termos de ATR.

Assim, é possível afirmar que uma medida de ATR feita com um perfilômetro laser com 3 ou 5 módulos laser, ainda que bem posicionados ao longo de sua barra de suporte, só pode garantir que as medidas efetuadas representam o afundamento mínimo naquele ponto, não o máximo, pois o veículo onde o perfilômetro está instalado tem deslocamentos transversais na faixa, por mais cuidadoso que seja o motorista.

Por outro lado, apesar do alerta, não se pode deixar de reconhecer que o método de medida do ATR normalizado no Brasil pela norma DNIT 006/2003–PRO (2003c), que faz uso de uma treliça, é muito rudimentar, pouco preciso, pouco produtivo e perigoso para o técnico de campo, que muitas vezes se vê obrigado a realizar as medições com a treliça sem o fechamento do tráfego. Por todos esses problemas, quando esta medida com a treliça é realizada, ela é feita com intervalos muito grandes de espaço, 40 m, 100 m, às vezes até 200 m.

Assim sendo, como o método tradicional têm pontos negativos bastante evidentes, não é má escolha optar pela avaliação com o perfilômetro, seja pela segurança, seja pela economia, seja ainda pelas milhares de medidas que seriam possíveis nos mesmos 40 m em que a norma preconiza que seja feita uma medida em cada trilha.

Para que a determinação do ATR seja possível com um perfilômetro, é preciso garantir que os 3 ou mais módulos laser utilizados estejam zerados em um mesmo nível, ou seja, que os zeros deles estejam alinhados depois que os módulos estiverem devidamente fixados no veículo. Esta rotina de zeragem ou nivelamento pode ser feita de forma bem rápida, logo antes do levantamento, utilizando-se, por exemplo, uma régua plana como referência. Pode acontecer também que o equipamento já tenha sido zerado de fábrica, quando foi montado e que não tenha sido desinstalado do veículo desde então, o que pode dispensar tal necessidade. A necessidade ou não deste procedimento depende do equipamento e da forma de instalação.

O importante é que com três módulos, só se consegue medir a média do afundamento das duas trilhas. Não é possível individualizar a medição de cada uma das trilhas, uma vez que não se tem a informação da inclinação transversal do pavimento. Para se calcular o afundamento, supondo que se esteja trabalhando com 3 módulos laser chamados de L1, L2 e L3, com o L1 e L3 posicionados sobre as trilhas, ter-se-á o afundamento médio das trilhas subtraindo-se do valor medido por L2, a média dos valores medidos por L1 e L3.

Para a medida individualizada dos afundamentos nas duas trilhas de roda, é necessária a utilização de pelo menos 5 módulos laser, sendo que a barra que suporta os módulos pode ter largura somente um pouco menor que a largura da faixa de rolamento, pois nas pontas, fora dos limites do veículo ficam instalados os dois módulos adicionais que coletam as referências de altura das extremidades da faixa. O cálculo para esta situação é similar e deve ser feito duas vezes, uma para cada trilha de roda, usando-se os módulos 3 a 3. No item 3.4.2 a medição de ATR, assim como a possibilidade de medição do degrau entre pista e acostamento são ilustrados.

Vale registrar que existem outros tipos de equipamentos embarcados em veículos que são capazes de medir rápida e corretamente o afundamento em ambas as trilhas de roda, tais como os mencionados por Laurent e Hébert (2004), e também por Phoenix Scientific Inc (2004a).

Como este item do trabalho pretende ser bastante abrangente na abordagem dos perfilômetros inerciais, é preciso deixar registrado que a teoria subjacente a este tipo de equipamento, não prevê a necessidade de serem usados módulos de medição de distância sem contato com a superfície, a laser por exemplo. Pelo contrário, a norma norte-americana citada não veta nem indica nenhuma tecnologia, apenas fixa o tipo de resultado e as características da medição, que podem em tese ser obtidas inclusive com uma roda apalpadora.

Naturalmente pelo desenvolvimento tecnológico atual, o método de medição da distância sem contato, utilizando laser como fonte de luz e sensores apropriados, permite medições de distância muito precisas e muito rápidas, o que levou a maioria, senão a totalidade dos fabricantes de perfilômetros inerciais a adotarem a medição a laser como padrão, por exemplo, Dynatest (2004), mas nem sempre foi assim.

Os perfilômetros inerciais dos anos oitenta por causa do custo de um sistema de medição a laser, quando utilizaram medidores de distância sem contato, optaram pelo uso de sensores de ultra-som pela disponibilidade da tecnologia a um preço razoável.

Entretanto, o uso de sensores de distância que utilizavam o ultra-som esbarra em certas limitações, mencionadas por diversos autores, tais como, Ningyuan et al. (2001), Sayers e Karamihas (1998), Choubane et al. (2002), Ksaibati et al. (1998a). Tais limitações levaram à substituição dos sensores de ultra-som, principalmente para a medida do perfil longitudinal, pois na medida no perfil transversal eles resistiram um pouco mais, uma vez que chegaram a ser usados em grande número para uma medição mais representativa, porém em velocidades menores.

Apenas para que fique registrado, considerando que a pergunta pelos sensores de ultra-som é recorrente quando se apresenta a tecnologia com laser, os principais problemas apontados nos perfilômetros inerciais com sensores de ultra-som são: a resolução típica é menor, por volta de 0,25 mm, o que leva a problemas na medição de pavimentos com irregularidade mais baixa; as medidas são afetadas por ventos; as medidas são afetadas pela umidade relativa do ar; as medidas podem ser mais afetadas por sujeira na pista ou nos sensores; existe uma limitação da velocidade de tráfego do veículo, que está correlacionada com a frequência das medições; a

distância entre medições sucessivas não é tão boa – pela própria velocidade do som; por fim, este tipo de sensor não funciona bem em superfícies com macrotextura muito proeminente.

2.7.3 O uso de perfilômetros inerciais no mundo

É interessante indicar que há hoje em boa parte do mundo uma grande tendência de uso dos perfilômetros inerciais para avaliação de pavimentos.

A título de informação, de como essa mudança de tecnologia já aconteceu em países como os EUA, a tabela 2.3, extraída de Ksaibati e Al Mahmood (2002), indica o tipo de equipamento usado nos estados norte-americanos que responderam a uma pesquisa sobre o tema no ano de 2001, ou seja, já desatualizada.

Tabela 2.3 – Resultados de uma pesquisa feita em 2001, sobre o tipo de equipamento usado para a avaliação da irregularidade nos estados norte-americanos. Fonte: Ksaibati e Mahmood (2002).

Equipamento	Estados norte-americanos que utilizam	Número de estados norte-americanos
ISS Profiler	AK, FL, GA, IA, KS, MT, NE, NV, OH, SD, PA, UT, WA	13
K.J. Law Profiler	AZ, KY, NH, OH	4
Roadware Profiler	AR, CO, CT, IA, ME, MD, MA, MO, NJ, NM, SD	11
Não especificado	MI, MS, RI, VA	4
DOT Profiler	CA, TX	2*
Pathway Profiler	MN, ND, WY	3*
Pavetech Profiler	MN, WI	2*
Mays Meter	VT	1*

* Alguns estados possuem mais de um tipo de equipamento.

Uma observação atenta da tabela 2.3, mostra que dos 36 estados diferentes citados, 4 não especificaram o tipo de medidor usado e apenas 1 informou utilizar um medidor do tipo resposta. Sendo assim, 31 dos estados que responderam a pesquisa já utilizavam à época perfilômetros, sendo que destes, 4 já possuíam mais de um modelo, dentre os 6 mencionados.

Alguns estados americanos inclusive possuem recomendações técnicas próprias sobre o uso de perfilômetros inerciais para a medida de irregularidade, como, por exemplo, Florida State (2001), Michigan Department OF Transportation (2007) e Texas Department of Transportation (1999). Tais documentos, em geral, não tem a intenção de concorrer com as normas ASTM ou AASTHO, e sim complementar tais normas, seja em nível operacional, seja fixando parâmetros mais restritivos.

Não é fácil encontrar o mesmo tipo de informação consolidada atualizada para os países europeus, muito embora após a efetivação da União Européia tenham se formado comissões de cooperação científica e tecnológica para estudar diversos assuntos que interessam aos seus membros.

Não foi diferente no setor de transportes. Especificamente sobre os temas de avaliação de pavimentos podem ser mencionadas as publicações Directorate General Transport (1997a e 1997b). A primeira publicação possui os dados da pesquisa que foi finalizada em 1996, e buscava descobrir qual equipamento estava sendo utilizado à época em 15 países membros para a avaliação da irregularidade. Os resultados revelaram que 10 já utilizavam perfilômetros inerciais, 2 utilizavam apenas medidores do tipo resposta e 3 utilizavam apenas o equipamento francês APL.

Não é a toa que mesmo durante o desenvolvimento desta pesquisa, já se pôde verificar que dentre as maiores concessionárias de rodovias do estado de São Paulo e Rio Grande do Sul, Severo et al. (2004) por exemplo, a avaliação de irregularidade com perfilômetro laser já tinha se tornado um padrão, mesmo com a cultura dos perfilômetros ainda estando pouco disseminada em nosso país.

Com base nos dados acima, acredita-se que dentro de alguns anos, especialmente se o Brasil dispuser de uma norma nacional para a avaliação de irregularidade com perfilômetros inerciais, deve se tornar raro também por aqui, o uso dos medidores do tipo resposta.

2.8 As principais fontes de erros nas medidas de perfilômetros inerciais

A literatura internacional já abordou diversos fatores que podem causar alguma forma de erro na medição do perfil longitudinal de um pavimento e conseqüentemente alterar o resultado do índice de irregularidade calculado a partir deste perfil. Os principais trabalhos que tratam sobre os erros e as influências nas medidas realizadas com perfilômetros são: Mcghee (2000); Dougan et al. (2002); Fernando (2000); Perera e WISER (2004); Perera e Kohn (2002a); Sayers e Karamihas (1996); Karamihas et al. (2001); Mehta et al. (2001); Sayers e Karamihas (1998); Karamihas (2004a e 2004b); Karamihas (2005a); Wang (2006); Federal Highway Administration (1999); Kohn e Perera (1999).

Embora a literatura não trate desta forma, acredita-se que seja possível para um melhor entendimento, agrupar os fatores que podem causar erros nas medidas dos perfis longitudinais em 3 grupos, de acordo com suas características principais, muito embora em alguns casos tais fatores possam se encaixar em mais de um grupo. Os grupos propostos de fatores são:

- inerentes à tecnologia ou ao equipamento;
- operacionais;
- climáticos.

Os fatores inerentes à tecnologia dos perfilômetros inerciais ou ao equipamento utilizado dizem respeito às eventuais erros aos quais todos os equipamentos deste tipo estão sujeitos de alguma forma, porém em diferentes níveis; e também, às características individuais de cada equipamento, que precisam ser observadas para que os dados possam ser corretamente coletados, processados e interpretados.

Os operacionais dizem respeito aos erros de medição provocados pelos operadores do perfilômetro, por desconhecerem os procedimentos adequados à sua operação, ou simplesmente por não exercerem a atividade de medição com o zelo e cuidado que deveriam – de acordo com o prescrito pelas normas e pelo fabricante do equipamento.

Por fim, os fatores climáticos, que podem ou não estar relacionados com os operacionais, pois por vezes o equipamento pode estar sendo utilizado em condições climáticas inadequadas, ou em outras, mesmo com o equipamento sendo usado dentro das especificações é o pavimento que pode ter seu perfil alterado por causa das condições climáticas e isto pode interferir na avaliação, como será detalhado mais adiante.

Os fatores mais comuns que podem ocasionar em erros da medição de perfis, que podem ser classificados como inerentes à tecnologia ou ao equipamento usado são:

- Funcionamento inadequado de algum dos sensores do equipamento;
- Instalação indevida do equipamento, por exemplo, posicionamento errado dos módulos em relação ao pavimento;
- Presença de sujeira na parte inferior dos módulos laser que impeça ou atrapalhe tanto a emissão do laser, quanto sua recepção pelo sensor. (devem ser feitas limpezas periódicas dos módulos laser, sempre com o sistema desligado para não haja riscos de o laser ser refletido para os olhos);
- Uso do equipamento em circunstâncias em que o curso dos sensores ou sua resistência mecânica aos solavancos não seja adequado. Em outras palavras, devido ao uso do equipamento em pavimentos cuja irregularidade supera o máximo recomendável pelo fabricante. Seria como medir uma rodovia pavimentada em péssimo estado ou uma rodovia não pavimentada, com um equipamento desenvolvido para medir as rodovias da Suécia;
- Dificuldade de se medir o perfil exatamente nas trilhas de roda (a distância de fixação entre os módulos de medição no veículo que deveriam estar sobre as trilhas de roda);
- A medida possuir pouca representatividade no perfil transversal do pavimento, já que normalmente mede-se um ponto pequeno onde o laser é apontado;
- A inadequação da frequência de medição do equipamento ao tipo de superfície do pavimento. Por exemplo, efetuar a medição de um pavimento

com macrotextura muito pronunciada, com um equipamento que faça medidas muito espaçadas;

- Diferenças causadas por freadas ou acelerações muito bruscas que possam inclinar e desincluir subitamente o veículo na longitudinal, fazendo com que haja registro de alterações na aceleração vertical que não foram provocadas pelo pavimento.
- Erro de *aliasing*, que neste contexto, consiste na inadequação da frequência de medição do equipamento em relação a determinados comprimentos de onda encontrados na superfície do pavimento. Em um perfil que será usado para cálculo de IRI ou QI, este efeito no perfil medido pode induzir algum erro nos índices, especialmente quando o perfilômetro que fez a medição possuir baixa frequência de coleta de dados, por exemplo, efetuar medições com distância acima de 7 cm entre pontos consecutivos. Este tipo de erro é mais comum em medições realizadas com nível e mira e Dipstick.

Os fatores mais comuns que podem levar a erros nas medições e que podem ser classificados como operacionais são:

- Não executar na frequência indicada pelo fabricante ou pela norma as verificações do equipamento antes de dar início a um levantamento;
- Não respeitar a velocidade mínima de uso do equipamento;
- Não respeitar o trecho de “aquecimento” dos filtros necessário (em alguns equipamentos), antes de efetivamente se iniciar o trecho a ser avaliado;
- Não registrar durante a coleta de dados: paradas do veículo, desvios da faixa, desvios da trilha de roda, sujeira ou objetos na pista – fatores que podem alterar substancialmente as medidas;
- Medir um tipo de revestimento não recomendado pelo fabricante, por exemplo, pavimentos com “grooving” ou misturas muito abertas, sem o tratamento adequado na fase de processamento;

- Não observar os sinais enviados pelo equipamento quando algum de seus componentes não estiver funcionando adequadamente;
- Não observar durante o processamento dos perfis características especiais do pavimento que possam alterar os resultados e que por isso precisem de um tratamento diferenciado na fase de processamento dos dados, como é o caso dos pavimentos de concreto de cimento Portland com juntas transversais.

Os fatores climáticos mais comuns que podem causar erros nas medidas são:

- Realizar medições em condições climáticas não recomendadas pelo fabricante: sol intenso, temperatura do ambiente fora da faixa especificada pelo fabricante, umidade fora da faixa especificada pelo fabricante, presença de neblina ou névoa;
- Realizar as medições mesmo com a pista úmida;
- Realizar medições em pavimentos de concreto de cimento Portland com juntas, sem levar em conta a hora do dia e a incidência solar, o que pode causar empenamento das placas e com isso gerar perfis diferentes em medidas sucessivas, conforme ressaltado por Kohn (2003), Hossain (2002), Kohn e Perera (2004), Rasmussen (2004), Ksaibati (1998b), Karamihas e Cable (2004), Perera e Kohn (2001);
- Embora aqui no Brasil não estejamos sujeitos ao congelamento, é sabido também que a expansão da água subterrânea quando congelada pode causar deformações temporárias no revestimento, ou seja, trata-se de mais um fator que deve ser levado em conta nos locais sujeitos a climas frios, Doré (2001) e National Cooperative Highway Research Program (2002).

A grande maioria dos fatores de variabilidade mencionados é citada por mais de um autor quando tratam sobre o tema dos erros que podem estar incluídos em medições de perfis que tenham por finalidade a determinação de índices de irregularidade dos pavimentos.

Naturalmente alguns fatores são mais citados do que outros pela bibliografia, entretanto, todos os fatores mencionados devem ser levados em conta visando a obtenção de melhores resultados com perfilômetros inerciais.

Com base nos fatores evidenciados já é possível ter uma idéia de quão treinados têm que ser os operadores de um perfilômetro inercial, especialmente quando se deseja obter um perfil que vai ser comparado com o mesmo perfil obtido a partir de um equipamento estático.

No caso deste tipo de comparação a lista de fatores mencionados ainda não fica completa, pois para a obtenção de resultados muito próximos, além de bons equipamentos é necessária uma análise mais profunda dos métodos de cálculo e amostragem de cada um deles. Isso será tratado mais adiante. Por hora, deve ficar registrado que existem vários pontos aos quais todas as pessoas envolvidas em um levantamento de perfis com perfilômetros devem estar atentas para que possam realmente obter resultados bem próximos de representar a realidade do pavimento.

Por fim, embora seja difícil prever a freqüência de ocorrência de cada um dos possíveis erros descritos neste item, é possível afirmar que sua ocorrência é uma exceção para levantamentos realizados com um perfilômetro devidamente verificado, operando em condições normais com uma equipe treinada e comprometida com o serviço.

3 DESENVOLVIMENTO, FUNCIONAMENTO, OPERAÇÃO E TESTES INICIAIS DO PERFILÔMETRO INERCIAL

3.1 Desenvolvimento do perfilômetro inercial usado nesta pesquisa

A idéia inicial desta pesquisa, surgida quando ainda nem a dissertação de mestrado do autor estava defendida, no ano de 2001, passou por uma pesquisa inicial bastante longa para que se pudesse de antemão determinar se o sonho de desenvolver um perfilômetro laser no Brasil seria possível.

As primeiras análises mostraram que não seria um sonho impossível, mas causava estranheza o fato de que ninguém no Brasil ou na América Latina tivesse até aquele momento feito algo parecido, muito embora já existissem fabricantes e usuários nos Estados Unidos, Europa, Japão e Austrália.

O desafio foi aceito logo após o final do mestrado e desde então se começou a coletar informações, importar componentes e enfim testar aquele, que no final de 2003, viria a ser o primeiro protótipo funcional de um perfilômetro inercial de pavimentos feito no Brasil.

Dada a pluralidade de ramos da ciência envolvidos em um projeto como este, naturalmente ele não foi realizado sozinho por um engenheiro civil afeto à área rodoviária que embora tenha noções de eletrônica, informática e instrumentação, não é um especialista no assunto.

Tampouco foi necessário um grande time para sua realização, até porque não haveria nem como remunerar um time em uma pesquisa de doutorado. Enfim, dada a complementaridade de conhecimentos e a amizade, neste caso o projeto de desenvolvimento do perfilômetro inercial foi realizado em conjunto com apenas mais uma pessoa, um grande amigo afeto à física, informática e eletrônica.

Os passos iniciais do desenvolvimento englobaram um bom estudo do que havia na Internet a respeito deste tipo de equipamento, seus fabricantes, as características dos equipamentos fabricados, aqueles que eram mais usados, os custos etc.

Em seguida passou-se às descobertas a respeito de fornecedores desses fabricantes de perfilômetros, uma vez que a maioria deles não fabricava o módulo de medição sem contato, apenas integrava componentes, desenvolvia a comunicação entre eles e os *softwares* necessários ao seu funcionamento.

Mesmo tendo chegado a estes fabricantes de módulos de medição laser, verificou-se que o custo de sua importação seria muito alto e inviabilizaria o desenvolvimento do protótipo e conseqüentemente a pesquisa.

Assim, os estudos foram voltados à fabricação de um módulo de medição laser que tivesse capacidade suficiente para realizar as medições conforme estabelecia a norma ASTM E 950-98, que foi percebida como a norma mais usada no mundo para os perfilômetros inerciais.

Tal decisão demandou estudos de ótica, lasers, detectores de laser, além de estudos focados de eletrônica e *software*. Após tais estudos, optou-se por usar um emissor de laser de baixa potência, visando minimizar os riscos para os olhos, lentes com características especiais foram encomendadas e dentre as duas tecnologias mais conhecidas para sensores rápidos e capazes de emitir um sinal proporcional à posição de um feixe laser refletido sobre ele, optou-se pela tecnologia digital de um sensor CCD.

Várias pequenas importações pelo correio foram feitas, até que se chegou a um módulo de medição laser que funcionava. Em sua primeira versão tal módulo possuía 20 cm de curso, resolução de 0,1 mm e realizava cerca de 1700 medidas por segundo.

Os módulos de medição a laser desenvolvidos, assim como boa parte dos módulos usados em sistemas fabricados no exterior, funcionam por triangulação, ou seja, um feixe laser de média potência que é apontado perpendicularmente ao pavimento, tem sua posição registrada por um sensor especial, para o qual o reflexo do laser no pavimento é direcionado. Na figura 3.1 é possível entender o funcionamento deste tipo de medidor. Os pontos 1, 2 e 3 na parte inferior da figura representam distâncias possíveis do veículo até o pavimento, com suas respectivas representações no sensor especial.

Figura 3.1 – Esquema de funcionamento interno de um módulo de medição laser por triangulação.

Cada um dos módulos de distância laser tem internamente um sistema eletrônico microcontrolado que controla as medições e a transmissão dos dados de cada medida, de acordo com as solicitações de um gerenciador. É justamente este microcontrolador que verifica a altas frequências todos os pontos do sensor CCD e determina o ponto de maior intensidade da luz refletida pelo laser na superfície do pavimento, gerando assim o resultado da medida. Naturalmente, cada módulo laser deve sofrer uma calibração de fábrica, que nada mais é do que uma correlação entre a distância do módulo a um anteparo e a posição do laser refletido no sensor CCD.

O curso útil de cada módulo de medição laser foi projetado para 200 mm, mas como os módulos devem ficar a uma certa distância do pavimento, até pela segurança do próprio equipamento, tal curso útil não se inicia na base do próprio módulo. Há um espaçamento de aproximadamente 20 cm entre a base do módulo e o ponto em que ele começa a medir, fazendo com que sua distância de instalação do pavimento seja de aproximadamente 30 cm. Desta maneira, com o veículo parado existirá 10 cm de curso útil para cima e também 10 cm para baixo, visando assim acomodar as variações de distância entre o veículo e o pavimento durante seu rolamento.

Simultaneamente com o desenvolvimento da primeira versão do módulo, pesquisou-se também sobre as outras partes do equipamento, como os acelerômetros, o hodômetro e também a arquitetura final do sistema. Decidiu-se que seriam montados 5 módulos laser, visando tornar o equipamento apto não só para a medição de 5 perfis longitudinais – o que podia ser útil em pistas com grande largura, como no

caso de aeroportos, mas também para a medição dos afundamentos plásticos em cada trilha de roda de forma independente.

Sobre os acelerômetros, decidiu-se por usar apenas 2, independentemente do número de módulos que seria usado em cada medição. A única condição para que o sistema funcionasse bem com dois acelerômetros é que tais módulos sempre deveriam estar presentes nas partes mais externas da barra de suporte. Fazendo-se desta maneira, quando se fosse utilizar mais de dois módulos, os outros ficariam fixados entre aqueles que possuíam os acelerômetros e se informaria no *software* a distância entre os módulos para que posteriormente a correção dos valores das medidas dos módulos intermediários pudesse ser feita proporcionalmente com base na posição instantânea da barra em relação ao pavimento, que por sua vez é obtida através de duas integrações sucessivas dos acelerômetros.

Como já se pôde perceber em itens anteriores deste trabalho, a concepção do sistema de se compensar os movimentos verticais do veículo com o uso de um sistema inercial não é novidade alguma, nem se tratou de um ponto de inovação no sistema concebido.

Os sistemas inerciais para medição de perfis longitudinais de pavimentos podem variar em número de medidores de distância e em número de acelerômetros, mas a concepção de seu funcionamento é basicamente a mesma.

Toda a base está em se efetuar as medições dos sensores de aceleração, dos sensores de deslocamento e do hodômetro de forma rápida e simultânea, sendo que os acelerômetros devem estar alinhados ao feixe laser dos módulos em que estiverem instalados. Tanto a simultaneidade das medições, quanto o alinhamento dos acelerômetros com o eixo de medição do módulo laser são condições para o bom funcionamento deste tipo de perfilômetro.

Os dados medidos por todos os sensores podem ser gravados em um computador para posterior processamento ou tal processamento pode ser feito simultaneamente com a coleta de dados.

O processamento de tais dados consiste inicialmente em duas integrações sucessivas dos valores registrados pelos acelerômetros. Tais integrações resultarão

no posicionamento instantâneo vertical de cada um dos módulos que contêm os acelerômetros, ou seja, verificar-se-á a posição vertical instantânea relativa da carroceria do veículo e conseqüentemente dos módulos laser, para que se saiba se tais módulos estavam naquele instante acima ou abaixo da sua posição normal com o veículo parado.

Para se calcular os perfis longitudinais com base nos dados de deslocamentos medidos pelo laser e com base nos dados deslocamentos calculados nas integrações das acelerações verticais, basta portanto somar ou subtrair uma medida da outra, de cada um dos módulos, conforme a posição instantânea revelada pelos acelerômetros.

Para os módulos que não possuem acelerômetros e que por recomendação devem ser fixados entre os módulos que possuem os acelerômetros, o cálculo do perfil requer apenas um cálculo a mais.

Levando-se em conta que os módulos com acelerômetros estão fixados em uma mesma barra rígida, é bastante simples calcular o posicionamento instantâneo da barra toda. Com base nessa informação e na posição de instalação dos demais módulos, basta fazer o mesmo tipo de correção, somando ou subtraindo o deslocamento da barra aos valores de deslocamentos registrados pelos módulos.

Entre as diversas decisões tomadas durante o planejamento do sistema, optou-se por um sistema modular onde um mesmo cabo conectaria até 14 módulos de medição sem contato, cada um com um microprocessador programável, e que podia ou não possuir internamente um acelerômetro. Este cabo seria ligado a uma central de coleta de dados, onde também seria ligado o hodômetro e de onde sairia o cabo para conexão com o computador através de uma porta USB.

A comunicação muito rápida entre todas as partes do sistema foi um desafio à parte, pois como foi ressaltado, em um perfilômetro inercial a leitura de todos os sensores deve ser feita simultaneamente, ou seja, em um mesmo momento cada módulo laser deve fazer sua leitura com ou sem a leitura do acelerômetro associado e neste mesmo momento deve ser guardado o número de pulsos contados pelo hodômetro. Logo a seguir, cada módulo deve enviar essa informação à central de processamento (concentrador), que consolida os dados e envia ao computador.

Ao final do desenvolvimento da primeira versão do equipamento, no final do ano de 2003, todo este sistema funcionava bem e fazia a leitura de 5 módulos laser, sendo 2 deles com acelerômetros, além do hodômetro, na velocidade de 1700 vezes por segundo.

A única limitação que esta primeira versão do equipamento tinha em relação a outros equipamentos importados era que seu funcionamento dependia do pôr do sol. Em outras palavras, o equipamento só funcionava quando não havia luz solar incidindo.

Esta limitação tornou-se conhecida apenas durante o projeto, mas como o funcionamento diurno não era um objetivo essencial, o protótipo inicial foi concluído com esta limitação. Para superar tal limitação seria necessária ou a mudança da tecnologia do sensor por um que não saturasse com o infravermelho contido na luz solar, ou a utilização um laser mais forte com uma combinação de filtros que limitasse o acesso da luz ambiente ao sensor.

Uma vez concluído o primeiro protótipo foi realizada uma calibração dos módulos e em seguida realizados os primeiros testes de funcionamento, simultaneamente com os ajustes finais no *software* que controlava a coleta de dados.

Nesse estágio, o sistema ficou formado por dois *softwares*, um que era usado durante o levantamento para coletar os dados dos sensores, registrar as observações de campo, realizar as integrações dos acelerômetros e gravar tais informações em arquivos no computador; e um segundo *software* usado apenas para processar tais dados visando filtrar o efeito da macrotextura, determinar o perfil longitudinal no espaçamento requerido e por fim calcular o índice de irregularidade desejado, IRI ou QI.

Os testes iniciais tiveram resultados muito positivos conforme os resultados evidenciados no item seguinte mostrarão, e em pouco tempo o equipamento passou por um importante teste feito em parceria com a concessionária de rodovias paulista Autoban, que determinou com base em topografia os perfis longitudinais de alguns segmentos de faixa de rolamento ao longo das rodovias Anhanguera e Bandeirantes, que posteriormente foram medidos com o perfilômetro. A fotografia da figura 3.2 ilustra a montagem da primeira versão do perfilômetro desenvolvido.

Figura 3.2 – Fotografia da montagem da primeira versão do perfilômetro inercial desenvolvido.

O sistema continuou a ser aprimorado, principalmente na parte de *software*, visando torná-lo mais amigável ao uso, uma vez que pela necessidade das concessionárias de rodovias que passaram a conhecer um pouco mais sobre o assunto, ele passou a ser usado esporadicamente em avaliações de rodovias a partir de 2004, sempre apresentando resultados consistentes e com isso comprovando seu bom desempenho.

No ano de 2005 houve mais inovações importantes. O *hardware* do sistema foi aprimorado e com isso foi possível aumentar a frequência de coleta de dados para 2000 vezes por segundo em cada um dos sensores. Foi incluída ainda a possibilidade de execução das medidas diurnas, embora com algumas limitações. Para tanto, foi usada uma combinação de laser e filtros que possibilitaram um isolamento do efeito da iluminação solar.

Foi neste ano também que os *softwares* de processamento dos dados coletados ficaram ainda mais amigáveis e integrados, possibilitando uma grande flexibilidade na hora de processar as informações de pequenos ou grandes trechos de pavimentos.

No final do ano de 2005, visando aumentar ainda mais a freqüência de coleta de dados, a sensibilidade nas medidas e a estabilidade à luz solar – tudo de uma vez só, houve a tentativa de mudança da tecnologia do sensor que faz a leitura da posição do laser. Ao invés de um sensor do tipo CCD (*charge-coupled device*), pesquisou-se e desenvolveu-se a capacidade de usar sensores do tipo PSD (*position sensitive device*). Enquanto o primeiro era digital, este segundo é analógico, o que possibilitaria uma velocidade maior de leitura quando ele estivesse funcionando em conjunto com conversores de sinal (A/D) muito rápidos.

Toda a placa eletrônica de controle do módulo foi desenvolvida novamente visando a melhor adequação possível a esta nova tecnologia, entretanto, os resultados ficaram aquém do esperado, pois embora o objetivo da alta freqüência de medição diurna tenha sido conseguido, a resolução de medição do sistema deixou a desejar nas situações onde o laser penetrava nas saliências da macrotextura dos revestimentos testados.

De posse de resultados pouco animadores com os sensores PSD, voltaram-se os esforços para a melhoria dos módulos de medição, só que usando os já conhecidos sensores CCD em uma configuração que proporcionasse: boa resolução, boa estabilidade das medições em qualquer condição de luminosidade ambiente, além de uma maior freqüência de medição.

Para atingir tais objetivos usando-se os sensores CCD, resolveu-se pelo desenvolvimento de um novo sistema eletrônico de processamento das informações do CCD dentro de cada módulo. Tal sistema ao invés de simplesmente localizar o pico do laser refletido no sensor CCD processaria todas as informações registradas pelo CCD visando realizar uma regressão deles a uma curva conhecida e com base nesta curva sim localizar o valor máximo; além disto foram ainda usados filtros especiais para diminuir o impacto da luminosidade externa no CCD.

Alguns meses de trabalho foram consumidos com este novo intento e finalmente em setembro de 2006, chegou-se à tecnologia pretendida. O sistema final ficou com a medição estável sob qualquer condição de luminosidade ambiente e qualquer cor de superfície de revestimento; a resolução das medições ficou melhor que 0,1 mm; a

freqüência de medição atingiu 2100 medidas por segundo – sendo que melhorar tal freqüência em próximas versões tornou-se mais simples.

No início de 2007, otimizações de *hardware* e *software*, possibilitaram ao equipamento superar a marca de 4000 medições por segundo em cada um dos sensores, o que significa que trafegando a 100 km/h o perfilômetro conseguiu registrar uma medida a cada 7 mm deslocados pelo veículo. Esta nova freqüência de medição possibilita medidas mais exatas mesmo em superfícies muito abertas.

3.2 Operação e funcionamento do perfilômetro inercial

Antes de iniciar a operação de levantamentos com qualquer perfilômetro inercial é sempre recomendável seguir os procedimentos normativos, complementados pelas instruções do fabricante para que o funcionamento de todos os componentes do equipamento possa ser verificado de forma breve.

Tais procedimentos preliminares, que integram o anteprojeto de norma apresentado no Apêndice B, visam aumentar a confiabilidade dos dados coletados e também evitar perdas de tempo e de recursos com levantamentos que precisem ser refeitos por algum problema que poderia ter sido identificado preventivamente e por qualquer motivo, foi identificado apenas durante os trabalhos de campo, ou pior, durante o processamento dos dados.

A equipe necessária para a operação segura de campo de um perfilômetro inercial deve ser composta por um motorista e um técnico treinado na operação do equipamento. Eventualmente, quando a largura da barra de suporte dos módulos laser passar da largura do veículo, pode ser necessária ainda a presença de veículos batedores visando garantir a segurança da operação. Vale registrar que o equipamento foi testado operacionalmente com barra de suporte possuindo 3,2 m de largura e apresentou bons resultados.

Todo o processo de coleta de dados deve ser gerenciado pelo técnico, que deve orientar o motorista sobre os trechos a serem avaliados e também sobre o que ele deve e não deve fazer durante os levantamentos.

Partir-se-á do pressuposto que o perfilômetro foi devidamente verificado e está pronto para ser usado em campo.

A partir do momento que se esteja com o veículo onde o perfilômetro está montado, próximo do trecho que será avaliado, já se pode ligar o equipamento e o computador. Carrega-se o *software* de coleta de dados e mesmo antes de dar início à gravação dos dados, o técnico pode observar se tudo está funcionando como o esperado.

Ao ser iniciado, o *software* pede para que seja digitada a distância entre os módulos laser que se está utilizando. Esta pergunta além de ser um registro para aquele levantamento, tem realmente importância para quando se está utilizando mais do que 2 módulos laser, ou seja, normalmente quando além dos resultados da irregularidade longitudinal, se está buscando o afundamento plástico nas trilhas de roda. Este caso será abordado no item 3.4.2.

Algumas dezenas de metros antes de se chegar ao ponto de início do levantamento, o técnico deve pressionar no *software* o botão “gravar”. O trecho é identificado pelo técnico, conforme ilustra a figura 3.3, e a partir daí as informações de cada um dos sensores passam a ser gravadas em alta frequência.

Figura 3.3 – Tela de abertura da primeira versão do *software* Ciberlogger usado para a coleta dos dados do perfilômetro em campo, com destaque para a janela das informações do trecho a ser avaliado.

Figura 3.4 – Tela de ensaio da primeira versão do *software* Ciberlogger usado para a coleta dos dados do perfilômetro em campo. Apenas os módulos 1 e 5 estavam ligados quando a tela foi capturada.

Durante a gravação dos dados, o operador técnico deve-se manter atento não só à faixa de rolamento que está avaliando, mas também à tela do computador, onde poderá observar todos os sinais enviados pelo sistema. A figura 3.4 ilustra a tela visualizada pelo operador durante a operação do sistema, no caso, estavam sendo usados apenas 2 módulos laser.

Qualquer ocorrência que fuja da situação normal de avaliação, que seria, trafegar na faixa de rolamento sob avaliação à velocidade igual ou maior que 30 km/h, sob um pavimento seco que não possua objetos ou sujeiras sobre sua superfície, deve ser registrada no campo de observações.

O *software* de coleta de dados referencia qualquer digitação no campo de observações pelo pulso do hodômetro no momento em que a primeira letra da observação foi digitada. Alguns exemplos de observações comuns, que devem sempre ser digitadas para que posteriormente os resultados referentes àqueles trechos sejam analisados com mais cautela são: “lombada”, “sujeira na pista”, “desvio na faixa de rolamento”, “praça de pedágio”, “animal morto na pista”, “ponte”, “viaduto”, “túnel”, “mudança de tipo de revestimento”, “parada do veículo”, “problemas no equipamento”, “pavimento úmido”, “velocidade muito baixa” etc.

Visando conferir ou, em alguns casos excepcionais, executar a calibração do hodômetro (composto por um gerador de pulsos que vai atrelado a uma das rodas do veículo), além de permitir maior controle sobre o trecho trafegado, o *software* interpreta de maneira diferenciada observações referentes aos marcos quilométricos da rodovia, se elas forem digitadas no formato apropriado, por exemplo: “km25”, “km7” etc. Esta função é útil principalmente em rodovias com sinalização bem conservada e razoavelmente bem posicionada ao longo da pista.

Conforme o técnico vai digitando os marcos quilométricos na forma adequada, o *software* já vai fazendo uma regressão linear entre os pulsos do hodômetro e o valor indicado nas placas, além de passar a indicar no computador um hodômetro parcial que acompanha a rodovia. Quanto mais placas digitadas melhor. A observação importante que se faz a respeito da digitação das placas de quilômetro é que o técnico deve digitá-las com a maior exatidão possível quando o veículo passar por elas. Ou seja, a letra “k” deve ser digitada sempre no mesmo momento em todas as placas para garantir a melhor constante possível do hodômetro.

É preciso sempre lembrar que muitas vezes os marcos quilométricos são fixados a partir da distância longitudinal em planta da rodovia, ou seja, eles não levam em conta o greide da pista. Por esse motivo, o método proposto de digitação de placas funciona melhor em pistas que possuam pequena variação vertical.

A tela do *software* de coleta de dados permite a visualização da medida instantânea de todos os sensores em uso, o que auxilia o operador na verificação contínua do bom funcionamento do sistema. Para os sensores laser, podem ainda ser observados o número de medidas executadas fora do curso útil do sensor. Não há prejuízo se acontecerem algumas medidas fora do curso, elas podem ser atribuídas a trincas muito abertas, painelas, juntas de dilatação etc. O operador deve, entretanto, sempre acompanhar tais números, pois se eles acontecerem em um percentual grande (maior que 5%, por exemplo), podem ser um indicador de mau funcionamento do equipamento.

Tanto para os módulos laser quanto para os acelerômetros existe ainda um outro indicador que visa mostrar se houve erros na transmissão de dados entre o sensor e o concentrador “hub”. Este tipo de erro pode ser grave e deve ser observado com

atenção pelo operador. Caso ocorra, o veículo deve ser parado e todas as conexões verificadas. Caso ainda continue a ocorrer após a verificação, o levantamento deve ser suspenso.

A verificação do hodômetro pode ser feita de maneira diferente dos demais sensores, mas também através do acompanhamento na tela do programa. O hodômetro estará funcionando corretamente se a velocidade atual indicada na tela do veículo for coerente com a velocidade praticada. Outra verificação possível é através do hodômetro parcial indicado na tela, em função das placas de quilômetro da rodovia. A verificação periódica da velocidade e a comparação das placas com o hodômetro parcial indicado permitem que qualquer anomalia no sistema gerador de pulsos seja facilmente detectada.

A tela do *software* de coleta de dados ainda apresenta uma janela com o cálculo quase instantâneo do QI (quociente de irregularidade) de cada um dos módulos. Tais valores, embora preliminares, pois a constante de calibração do hodômetro para o levantamento em questão pode ainda não ter sido calculada, já dão uma idéia ao operador técnico sobre o estado do pavimento em análise. Para operadores mais acostumados a este tipo de avaliação, os valores servem também como uma conferência a mais do funcionamento do equipamento, na medida em que devem corresponder ao estado do pavimento.

Finalizado o tráfego sobre o trecho a ser avaliado, basta o operador encerrar a coleta de dados pressionando o botão “parar” da tela do *software*.

O trabalho de coleta dos dados no campo deve ser repetido abrindo e encerrando novos arquivos a cada trecho ou faixa a ser avaliado.

Finalizado o trabalho de campo, os arquivos gerados para cada trecho levantado devem ser processados para que o perfil longitudinal e/ou um índice de irregularidade seja calculado convenientemente.

O programa de coleta de dados cria dois arquivos para cada trecho avaliado. O mesmo nome escolhido pelo operador no início da gravação dos dados é usado na identificação de ambos os arquivos. O que varia são somente as extensões deles, são elas: “obs” e “fix”. Os conteúdos de cada um deles são:

- “obs”: armazena todas as observações digitadas pelo usuário durante o levantamento. Todas as observações são arquivadas junto ao valor do pulso do hodômetro presente no momento que se digitou a primeira letra na caixa de observações do logger.
- “fix”: contém as medições feitas por cada um dos módulos, ao lado do pulso do hodômetro e ao lado também das medições dos dois acelerômetros já integradas duas vezes (ou seja, este arquivo já contém a posição instantânea da altura da carroceria do veículo). É este o arquivo usado posteriormente para cálculo do perfil longitudinal, IRI ou QI.

De posse dos arquivos obtidos na coleta de dados, deve-se usar o segundo *software* especialmente desenvolvido para o processamento dos dados, chamado de Cibershell.

Figura 3.5 – Tela inicial do *software* Cibershell.

O procedimento a ser seguido até a obtenção dos resultados finais é bastante rápido e lógico. Basta seguir as abas do programa na ordem. A primeira aba, chamada de “pasta”, é somente para que se escolha o diretório onde os dados coletados se encontram, conforme ilustra a figura 3.5.

A segunda pasta, chamada de “obs”, permite que se verifique todas as observações digitadas para aquele trecho do levantamento e mais do que isso, é nessa pasta que se inclui manualmente ou se calcula automaticamente o coeficiente de calibração do

odômetro. Em suma, a constante que converte os pulsos do odômetro em unidade de distância, conforme se pode visualizar nas figura 3.6 e 3.7.

Figura 3.6 – Tela do *software* Cibershell com a aba “Obs” selecionada.

A opção de incluir a constante manualmente é muito simples, basta digitá-la no campo apropriado, ou se uma constante adequada já tiver sido gravada em um levantamento anterior, e ela puder ser usada, basta carregá-la no campo. Esse juízo de valor da adequação ou não de uma constante de calibração deve ser feito pelo técnico que está processando os dados.

Figura 3.7 – Tela do *software* Cibershell, uma vez pressionado o botão “ObsParser”.

Para o caso de rodovias que tenham boa sinalização, pouca variação de greide, e cujos marcos quilométricos tenham sido digitados adequadamente durante a coleta de dados, é neste estágio do processamento que se pode calcular o coeficiente de calibração para verificação, com base em uma regressão linear entre a distância percorrida e os pulsos. Naturalmente, podem ter ocorrido erros na digitação das placas e também podem ter sido digitadas posições de placas muito mal instaladas. Por isso, o programa permite que se verifique os resíduos da regressão em relação a cada marco quilométrico e de acordo com o juízo do operador permite também que se suprima marco(s) com resíduo(s) muito grande(s). A cada marco excluído, o programa refaz a regressão e já apresenta os novos resíduos ao lado de cada marco quilométrico restante e também o novo coeficiente calculado.

Uma última função desta parte do programa é permitir um ajuste de *offset*. Ou seja, subtrair ou somar um valor fixo de todos os valores em unidade de distância, visando simular um “zerar” de hodômetro em uma determinada posição, que pode ser uma placa de quilômetro ou uma observação de início, por exemplo.

Figura 3.8 – Tela do *software* CiberShell, na aba “Nomes”, depois de pressionado o botão “Acerta Nomes”.

Feitos tais ajustes, basta fechar a janela. O programa criará um terceiro arquivo para aquele trecho, com a extensão “cfg”. Este arquivo possui as mesmas observações existentes no arquivo “obs”, só que referenciadas à distância, não mais aos pulsos do hodômetro. Essa distância foi justamente o resultado do coeficiente de calibração usado e de algum *offset*, caso ele tenha sido escolhido.

A próxima aba do programa, chamada de “nomes”, permite que os arquivos sejam todos renomeados para que o início e o final dos trechos, em termos de distância, representem exatamente o conteúdo do arquivo, de acordo com a calibração e *offset*. Esta etapa é muito simples, basta selecionar os arquivos e apertar o botão de acertar nomes para que o programa faça o restante. A figura 3.8 ilustra essa etapa.

Em seguida vem a aba “cortes”, mostrada nas figuras 3.9 e 3.10, que é usada para se extrair de um determinado arquivo, subtrechos com começo e final que interessam à avaliação. Por exemplo, se a gravação dos dados começou muito antes do ponto onde realmente deveria se iniciar, é neste momento que o técnico pode simplesmente eliminar aqueles dados a mais, selecionando, por exemplo, os trechos entre as observações de “início” e “fim” que podem ter sido digitadas ou valores absolutos a partir da medição calibrada do hodômetro.

Figura 3.9 – Tela do *software* CiberShell, na aba “Cortes”, depois de realizadas 3 extrações de trechos a serem processados com o uso do botão “FixCut”.

Não há limites para o número de subtrechos que podem ser extraídos de um único arquivo. Para cada subtrecho extraído, o programa cria um novo arquivo, com o mesmo nome, só que iniciado pelo símbolo “_”.

Figura 3.10 – Tela do *software* Cibershell, na aba “Cortes”, depois de pressionado o botão “FixCut” visando realizar a extração dos dados entre o km 44 e o km 46.

Finalizada a etapa de cortes, a aba ‘Relatórios’ permite que sejam gerados os relatórios finais, conforme ilustra a figura 3.11. Para isso o programa solicita a marcação dos módulos a partir dos quais se quer calcular a irregularidade, o intervalo em metros entre os cálculos de irregularidade, a necessidade ou não de geração de um arquivo com os perfis longitudinais em um formato internacional que tem a extensão “erd”, e por fim permite ainda a configuração do cálculo de afundamento nas trilhas de roda. O programa cria um arquivo para cada resultado: irregularidade, perfil e afundamento em trilha de roda (quando for o caso).

Figura 3.11 – Tela do *software* Cibershell, na aba “Relatórios”, selecionada para o cálculo do QI dos módulos L1 e L4 a cada 200 metros.

A última aba do programa, da figura 3.12, não coincidentemente chamada de “Excel”, permite a digitação de alguns dados de cabeçalho para que o sistema exporte os dados gerados na aba anterior para uma planilha no formato do Microsoft Excel visando facilitar a visualização e o trabalho posterior com os dados.

Figura 3.12 – Tela do *software* CiberShell, na aba “Excel”.

O programa então gera as planilhas eletrônicas, de acordo com cada trecho cortado e com isto está finalizado o processo de processamento dos dados e conseqüentemente a avaliação de irregularidade com o perfilômetro laser desenvolvido. A figura 3.13 demonstra um exemplo de relatório em planilha Excel criado pelo programa.

Como se pode ver, o *software* de processamento segue um processo lógico e contínuo que em poucos minutos pode processar muitos quilômetros de faixas de rolamento.

Para o usuário que está operando os *softwares* a tarefa é bastante simples, resta deixar mais claro, como são feitos os cálculos dos índices de irregularidade no programa de processamento.

Resultados de Levantamento de Irregularidade

Realização:		Rodrigo Barella		
Data:		25/8/2005		
Contratantes:				
Equipamento:		Perfilômetro CiberLaser		
Localização:		SP348		
Sentido:		Norte		
Faixa:		2		
Trecho:		km 40.00 ate km 43.00		
Posição dos Sensores:		Sobre as Trilhas de Roda		
Distância entre Sensores:		140 cm		

Trecho		Valores do QI (cont/km)		
Início (km)	Fim (km)	Trilha Esquerda	Trilha Direita	Média das Trilhas
40.00	40.20	20	28	24
40.20	40.40	23	25	24
40.40	40.60	18	22	20
40.60	40.80	24	21	22
40.80	41.00	13	12	13
41.00	41.20	10	11	10
41.20	41.40	24	19	22
41.40	41.60	11	9	10
41.60	41.80	23	23	23
41.80	42.00	17	21	19
42.00	42.20	19	18	19
42.20	42.40	14	9	11
42.40	42.60	40	41	40
42.60	42.80	13	14	14
42.80	43.00	19	18	19

Figura 3.13 – Exemplo do relatório final gerado pelo programa CiberShell para o primeiro dos trechos da figura 3.11.

Já se sabe que o *software* de processamento vai processar os dados já pré-processados que foram gravados pelo programa de coleta de dados e estão no arquivo de extensão “fix” e que naturalmente usará o arquivo “cfg” que contém a conversão de pulsos para distância. Pois bem, sabe-se que no arquivo “fix” há muitas medidas por segundo gravadas de todos os sensores e que os resultados dos acelerômetros já sofreram duas integrações e estão gravados em unidade de espaço (mm).

A primeira tarefa que o programa de cálculo de qualquer índice de irregularidade deve fazer, tendo como fonte de dados os arquivos mencionados, é calcular os perfis longitudinais, o que não é uma tarefa complicada. Para calcular o perfil de um levantamento onde foram usados dois módulos laser, um sobre cada trilha de roda e

ambos com acelerômetros internos, basta descontar o deslocamento de cada acelerômetro da medida do sensor laser correspondente.

Exemplificativamente, como o sensor do acelerômetro mede a posição vertical instantânea da barra que suporta os lasers, em relação à posição da barra com o carro verticalmente parado, se o valor calculado via o acelerômetro em termos de distância for igual +10 mm, isso significa, por exemplo, que a barra que suporta os lasers estava 10 mm acima do nível zero dela. Se o pavimento não tinha nenhuma deformação naquele instante que tenha sido medida pelo laser, o módulo laser também mediu 10mm a mais, por isso é que se deve subtrair valor em distância do acelerômetro do valor do módulo laser correspondente, no caso $10\text{ mm} - 10\text{ mm} = 0$. Do mesmo modo, se a barra estivesse mais para baixo que seu nível zero, o valor da distância no acelerômetro seria negativo e a medida do módulo laser seria menor. Portanto, subtrair o valor medido pelo acelerômetro do valor da distância do laser cancela a oscilação da barra. Por exemplo, $-10\text{ mm} - (-10\text{ mm}) = 0$.

Em havendo mais módulos laser no equipamento, visando por exemplo captar informações suficientes do perfil longitudinal para a determinação do afundamento plástico em trilhas de roda, recomenda-se que os acelerômetros sejam instalados nos módulos laser das extremidades da barra rígida de suporte. Em assim sendo, caso tais módulos não sejam os módulos que estão sobre as trilhas de roda, é possível determinar uma linha imaginária que liga a posição vertical dos dois acelerômetros, e a partir da posição relativa dos módulos na barra (que é solicitada no *software* de coleta de dados, logo na abertura) basta fazer a correção proporcional, chegando-se ao mesmo resultado da situação anterior.

A partir dessa fonte de dados (o perfil longitudinal incluindo todas as medidas executadas), visando compatibilizar os resultados produzidos com a norma nacional de medida de irregularidade, resolveu-se para os fins dessa pesquisa gerar novos perfis longitudinais com pontos de 50 em 50 cm. Este espaçamento está na norma de construção de bases de calibração para medidores do tipo resposta usando-se o nível e mira (DNER-ES 173/86).

Essa opção está ligada ao fato do QI ser a unidade padrão de irregularidade longitudinal em nosso país, sendo que tal medida normalmente é conferida com equipamentos estáticos obedecendo ao espaçamento da norma nacional.

Não se poderia simplesmente pegar um ponto a cada cinquenta centímetros e abandonar todos os demais pontos do perfil coletado, não faria sentido por mais de um motivo, sendo que o mais importante deles está na necessidade de se tirar o efeito da textura do pavimento dos dados. Por isso, assim como sugerido em normas e outros trabalhos que tratam do tema, resolveu-se por caracterizar um ponto do perfil a ser usado no cálculo do índice, como sendo a média de todos os pontos coletados pelo equipamento 7,5 cm antes e 7,5 cm depois do ponto do novo perfil. Um estudo interessante do efeito da textura no perfil foi publicado por Byrum (2003).

Portanto, visando padronizar o procedimento de cálculo, usou-se em todos os testes realizados neste trabalho (a menos quando especificado em contrário), perfil longitudinal definido por um ponto a cada 50 cm, sendo que a elevação de cada ponto foi obtida pela média das elevações de todos os pontos do perfil extraído do perfilômetro dentro de um raio de 7,5 cm ao redor dele, ou seja, 15 cm lineares.

Este procedimento, além de eliminar o efeito da textura do pavimento, buscando um plano médio ao longo de 15 cm de medições, gera medidas muito mais próximas (mais comparáveis) das medidas obtidas com nível e mira, pois as miras normalmente usadas em nivelamentos, possuem também uma base de apoio maior que um ponto, que neste caso, posa sobre os picos da textura. Em outras palavras, tal procedimento funciona como um filtro do tipo passa baixa frequência, ou seja, ele retira a alta frequência do sinal do perfil que é trazida pela textura.

Enfim, com o perfil longitudinal determinado, o *software* de cálculo utiliza o método de cálculo presente na norma DNER-ES 173/86 e faz o cálculo do quociente de irregularidade – QI, em contagens/km. Com isto, usando-se um perfilômetro que funcione adequadamente, há uma aproximação muito grande entre os resultados obtidos através dele e os resultados obtidos por um nivelamento tradicional, como será possível concluir no próximo item.

Sobre o cálculo do índice internacional de irregularidade, conhecido pelo acrônimo IRI, visando manter o padrão de perfil longitudinal utilizado nesta pesquisa, quando

foi calculado tal índice, usou-se como dado de entrada o mesmo perfil com elevações a cada 50 cm.

Para calcular o IRI foi usado o algoritmo presente nas normas ASTM E 1364-95 e ASTM E 1926-98, devidamente adaptado para os perfis com espaçamento de 50 cm e unidades no sistema métrico. Outra opção para o cálculo do IRI seria usar o perfil longitudinal no formato padrão “erd” e efetuar o cálculo com algum dos programas norte-americanos, que efetuam o cálculo do IRI a partir de um perfil longitudinal. Os programas de computador mais comuns para esse fim são: ProVAL e o RoadRuf.

Para o cálculo do IRI, o perfil longitudinal obtido deve ser antes filtrado por um filtro do tipo passa alta, segundo a ASTM E 950-98, que não altere os comprimentos de onda menores do que 60 m. Como o IRI já é praticamente insensível a comprimentos de onda maiores que 60 m, tal procedimento não altera o resultado do IRI.

No Capítulo 4 há mais informações sobre a filtragem de perfis. Dyer (2004) e Karamihas (2005a) discutem e exemplificam sobre este tema também.

Na fase final desta pesquisa houve uma atualização relevante nos *softwares* apresentados. As novas telas de tais *softwares* encontram-se no Apêndice A.

3.3 Resultados dos testes operacionais do perfilômetro

Os testes de funcionamento do perfilômetro laser desenvolvido começaram muito antes da primeira versão ficar pronta. Inicialmente foram testes menores e que buscavam avaliar o comportamento de cada um dos componentes do sistema individualmente.

Assim que se chegou ao primeiro protótipo funcional do sistema como um todo, foram iniciados os testes que visaram avaliar o desempenho da unidade inteira e isto foi feito inicialmente com um teste de campo que possuiu os seguintes objetivos: comparar os perfis obtidos com o equipamento a diversas velocidades com um perfil obtido estaticamente; comparar os resultados dos índices de irregularidade

calculados a partir dos perfis obtidos em cada situação; e verificar, ao final, se o equipamento funcionaria a contento e produziria resultados repetíveis a diversas velocidades possíveis em um levantamento de campo.

Este ensaio de comparação de perfis foi realizado no final do mês de outubro de 2003, dentro do campus da Cidade Universitária em São Paulo e teve seus resultados parcialmente publicados em Barella et al. (2004). Para tanto se escolheu um trecho de uma faixa de rolamento da Avenida da Raia Olímpica com 200 metros de comprimento.

Tal trecho foi demarcado convenientemente em uma de suas trilhas de roda e em seguida foi medido o seu perfil topográfico com o auxílio de um equipamento Dipstick, regulado especialmente para executar uma medição a cada 50 cm, tal como preconiza a norma DNER-ES 173/86 que trata da medição dos perfis de bases indispensáveis à calibração dos medidores do tipo resposta.

Em seguida, o veículo, contendo apenas um módulo laser, com acelerômetro interno, foi passado por diversas vezes, a diversas velocidades, sempre objetivando que o laser do medidor fosse passado sobre a linha onde o perfil havia sido medido com o Dipstick.

Naturalmente, a dificuldade de se manter o curso do veículo aumentou com a velocidade, mas tentou-se minimizar tal efeito com a ajuda de pessoa externa ao veículo que verificava a adequação do curso do veículo à trajetória pretendida.

Ao todo foram realizadas 11 passagens do veículo em velocidades que variaram entre 40 e 100 km/h, sendo que em algumas velocidades foram feitas mais de uma medição propositalmente para se verificar a repetitividade.

Visando facilitar a comparação, os perfis obtidos nesse teste foram dispostos em dois gráficos, o primeiro com as passagens do perfilômetro efetuadas nas velocidades de 40, 50 e 60 km/h e o segundo com as passagens do perfilômetro realizadas a 70, 80, 90 e 100 km/h. Ambos os gráficos, entretanto, incluem o perfil de referência, obtido com o Dipstick (linha vermelha das figuras 3.14 e 3.15).

Figura 3.14 – Gráfico comparativo do perfil obtido estaticamente com o Dipstick, com os perfis obtidos nas velocidades de 40, 50 e 60 km/h.

Figura 3.15 – Gráfico comparativo do perfil obtido estaticamente com o Dipstick, com os perfis obtidos nas velocidades de 70, 80, 90 e 100 km/h.

No gráfico da figura 3.14 é possível notar boa semelhança entre as medidas feitas com o perfilômetro, muito embora tais medidas sejam visualmente diferentes do perfil medido com o Dipstick (linha vermelha).

Na figura 3.15, que contém as avaliações realizadas a velocidades mais altas, é visível uma aproximação maior entre os resultados do perfilômetro e o Dipstick. Em

uma comparação pontual entre a linha que representa o perfil do Dipstick (vermelha) e a linha que representa o perfil obtido a 100 km/h (linha azul clara), é possível perceber uma boa correlação.

A análise conjunta de todos os perfis obtidos revela justamente o esperado. Os perfis gerados em diversas velocidades têm semelhanças e diferenças uns com os outros. É possível também extrair a informação de que os perfis do perfilômetro tornam-se mais parecidos com o perfil do Dipstick à medida que a velocidade do perfilômetro aumentou. Não é à toa que o perfil obtido a 100 km/h é aquele que mais se aproxima do perfil obtido com o Dipstick.

Duas reflexões decorrem da análise dos gráficos, uma com relação à explicação da diferença entre os perfis, e outra com relação ao efeito prático de tal diferença no cálculo dos índices de irregularidade.

A diferença entre os perfis pode ser explicada com base no sistema de referência inercial do equipamento, ou seja, o(s) acelerômetro(s). Para entender este efeito, basta se imaginar em um veículo que está em um trecho plano e em tangente e que vai passar por uma seção que tem um auge com 50 metros de comprimento a 1% de inclinação, seguido de um declive do mesmo comprimento e inclinação. Se o veículo trafegar a 30 km/h, provavelmente os ocupantes não sentirão que se iniciou um auge seguido de um declive (especialmente se o raio de concordância entre o auge e o declive for grande). Porém, se o tráfego for realizado a 120 km/h, será possível sentir o auge e o declive desde o começo.

Com o acelerômetro acontece a mesma situação. Em velocidades baixas não é possível captar os maiores comprimentos de onda presentes no perfil, muito embora os pequenos comprimentos de onda estejam muito bem registrados. Nas velocidades mais altas, entretanto, o perfil tende a se parecer mais com o perfil topográfico, pois ele passa a incluir os comprimentos de onda maiores.

Para se analisar o efeito das diferenças visuais dos perfis nos índices de irregularidade, foi necessário efetuar o cálculo dos índices QI e IRI de cada um dos perfis, usando para isto o método preconizado nas normas brasileira e norte-americana, respectivamente. Os resultados de tais cálculos estão dispostos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Índices de irregularidade calculados a partir dos perfis.

Identificação do Perfil	IRI (m/km)	QI (cont/km)
40 km/h – “a”	4,54	56,1
40 km/h – “b”	4,55	59,6
50 km/h	4,48	57,5
60 km/h – “a”	4,52	55,3
60 km/h – “b”	4,57	57,1
60 km/h – “c”	4,55	56,7
70 km/h	4,51	61,1
80 km/h – “a”	4,54	57,4
80 km/h – “b”	4,38	54,6
90 km/h	4,48	55,9
100 km/h	4,54	58,7
Média	4,51	57,3
Desvio Padrão	0,05	1,94
Coeficiente de Variação	1,11%	3,38%
Resultado do Dipstick	4,50	57,2

Os resultados da tabela são bastante reveladores e não só evidenciam o funcionamento do perfilômetro desenvolvido para todas as velocidades testadas, como também demonstram que mesmo os perfis, aparentemente diferentes continham todos os comprimentos de onda que interessavam e importavam ao cálculo dos índices de irregularidade mostrados.

Desta maneira, seria possível afirmar que, de acordo com os conceitos de irregularidade longitudinal presentes nos índices IRI e QI, aqueles longos comprimentos de onda que podem ser vistos no perfil obtido com o Dipstick não causam efeito que gere incômodo ao usuário e/ou diminua sua serventia. Em outras palavras, pode-se afirmar que um usuário médio daquele trecho de 200 m que foi avaliado, provavelmente nem sinta durante o tráfego sobre ele, que está passando inicialmente em um declive, depois em um aclave e em seguida em um declive maior. Analisados em relação à distância longitudinal, tais aclives e declives passam despercebidos.

É justamente por isso que se costuma dizer que um perfilômetro inercial adequado para a avaliação de irregularidade de pavimentos pode desempenhar muito bem sua função, mesmo gerando perfis que possam parecer visualmente diferentes de um perfil topográfico. Tudo depende de uma avaliação clara e sistemática em relação aos objetivos que tal perfil pretende atender.

As diferenças dos valores médios do QI e IRI em relação aos valores obtidos a partir do perfil medido com o Dipstick foram muito pequenas. Mesmo em comparações individuais entre os pontos, a variação também foi pequena e pode ser atribuída à dificuldade de se realizar medições com o perfilômetro sobre a mesma linha em que o perfil de referência foi medido. Em síntese, tanto a exatidão quanto a repetitividade dos resultados dos índices IRI e QI determinados mostram-se muito boas.

Um segundo teste, mais amplo e em situação mais próxima da realidade de campo de uma rodovia, foi realizado com o apoio da Concessionária do Sistema Anhangüera Bandeirantes S/A – Autoban, entre os meses de dezembro de 2003 e fevereiro de 2004, e também teve seus resultados parcialmente publicados em Barella et al. (2004).

Foram demarcadas 5 bases, sendo 4 delas com 320 m de comprimento cada e uma com 200 m de comprimento, localizadas na SP-330 (Rodovia Anhangüera). Cada uma dessas bases foi nivelada e contra-nivelada nas duas trilhas de roda, sendo que o equipamento utilizado no nivelamento gerou os valores das cotas em milímetros. A geometria de todas as bases era similar. Todos os trechos eram em tangente e os greides variaram entre reto e com pequenas inclinações. Nenhuma das bases foi locada sobre curvas verticais.

Com os serviços topográficos concluídos, procedeu-se a medição do perfil com o perfilômetro laser desenvolvido. Para buscar mais exatidão nas medidas, foram feitas 3 medições do perfilômetro em cada uma das bases, sendo que a velocidade do veículo medidor foi propositalmente variada entre as medições e também dentro de cada uma delas com acelerações e desacelerações.

Como as bases topográficas foram medidas de 50 em 50 cm, os perfis obtidos com o perfilômetro também foram processados neste mesmo intervalo.

Os resultados médios finais do quociente de irregularidade (QI) estão na tabela abaixo, ao lado dos resultados obtidos pelo nivelamento, que só foram informados pela concessionária depois da entrega dos resultados do perfilômetro, conforme publicado por BARELLA et al. (2005).

Tabela 3.2 – Resultados do QI médio obtido com nivelamento e do QI médio obtido com o perfilômetro inercial.

Irregularidade SP-330	QI (cont/km) Nivelamento		QI (cont/km) Perfilômetro Laser	
	Lado Esquerdo	Lado Direito	Lado Esquerdo	Lado Direito
Base 1	17,0	21,2	16,2	18,8
Base 2	20,1	18,4	18,3	18,0
Base 3	16,4	22,3	16,3	19,8
Base 4	20,8	21,0	20,6	19,5
Base 5	17,0	19,2	17,0	18,8

Para possibilitar uma análise global desse teste, foi calculado, com base nos dados da tabela, o módulo médio das diferenças (erros) entre o nivelamento e a medição com Perfilômetro laser para os 10 segmentos apresentados. Segundo este cálculo, o erro médio do QI obtido com o equipamento foi de +1,01 cont/km. Dentre os trechos medidos o erro máximo foi de +2,5 cont/km.

Embora não existam parâmetros objetivos para se julgar qual é o erro aceitável neste tipo de comparação, acredita-se que os resultados obtidos são positivos, pois demonstram consistência em diferentes trechos de pavimentos.

Esta segunda bateria de testes foi realizada com o mesmo equipamento dos primeiros testes na cidade universitária, e pode ser considerada complementar à primeira, no sentido de se verificar o equipamento em trechos com valores que QI bastante diferentes.

A tabela 3.3 contém todos os resultados do levantamento realizado com o perfilômetro neste teste. Enquanto a tabela anterior permite a comparação direta entre os resultados obtidos pelos dois métodos, esta tabela visa registrar todas as medições de campo realizadas, o que permitiu o cálculo do desvio padrão do QI de cada trilha de roda medida.

Tabela 3.3 – Resultados do QI obtidos em todas as medições do perfilômetro inercial.

Base 1 (Pista Norte) km 25+600 ao km 25+920		
	Esquerda - QI (cont/km)	Direita - QI (cont/km)
Passe 1	16,3	19,1
Passe 2	16,1	18,7
Passe 3	16,1	18,6
Média	16,2	18,8
Desvio padrão	0,1	0,3
Base 2 (Pista Norte) km 37+000 ao km 37+320		
	Esquerda - QI (cont/km)	Direita - QI (cont/km)
Passe 1	17,8	18,1
Passe 2	18,5	18,3
Passe 3	18,7	17,4
Média	18,3	18,0
Desvio padrão	0,5	0,5
Base 3 (Pista Norte) km 40+400 ao km 40+720		
	Esquerda - QI (cont/km)	Direita - QI (cont/km)
Passe 1	16,2	20,2
Passe 2	16,8	19,7
Passe 3	15,8	19,4
Média	16,3	19,8
Desvio padrão	0,5	0,4
Base 4 (Pista Sul) km 48+000 ao km 47+800		
	Esquerda - QI (cont/km)	Direita - QI (cont/km)
Passe 1	20,6	19,5
Passe 2	20,2	19,8
Passe 3	21,2	19,1
Média	20,6	19,5
Desvio padrão	0,5	0,4
Base 5 (Pista Sul) km 40+400 ao km 40+080		
	Esquerda - QI (cont/km)	Direita - QI (cont/km)
Passe 1	16,8	19,0
Passe 2	16,8	19,2
Passe 3	17,4	18,3
Média	17,0	18,8
Desvio padrão	0,3	0,4

Da análise da tabela pode-se notar uma boa repetitividade entre os diferentes passes do equipamento sobre cada base. Isto se torna bastante evidente pelos valores dos desvios padrão das medidas, que não ultrapassaram 0,5 cont/km, o que sem dúvida corrobora com a conclusão que foi colocada em relação à tabela que comparou os resultados entre nivelamento e perfilômetro.

Mesmo de posse de resultados que podem ser considerados bons, em relação à primeira comparação entre Dipstick e perfilômetro, o resultado foi um pouco inferior. Assim, refletiu-se por algum tempo no intento de buscar alguma razão que não estivesse permitindo resultados melhores. Uma análise atenta da tabela que compara os resultados dos dois equipamentos revela que existiu uma pequena tendência dos resultados do QI obtidos com o perfilômetro serem menores do que os resultados obtidos com o nivelamento.

Depois de analisar novamente os cálculos e de se concluir que não havia problema neles, voltou-se à análise para os perfis e uma diferença sutil foi percebida: a diferença entre a resolução dos instrumentos usados. Enquanto o nível e mira utilizado mediu os perfis em milímetros, o perfilômetro laser mediu em décimos de milímetros. Tal diferença não aconteceu no primeiro teste, pois o Dipstick usado media também em décimos de milímetros.

Sendo assim, visando aproximar mais um método de medição do outro, arredondou-se cada uma das elevações de cada perfil obtido com o perfilômetro para milímetros e calculou-se novamente os quocientes de irregularidade para as medições do perfilômetro. Os resultados médios estão dispostos na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados do QI médio obtido com nivelamento e com o perfilômetro inercial com perfis arredondados para milímetros.

Irregularidade SP-330	QI (cont/km) Nivelamento		QI (cont/km) Perfilômetro Laser (Perfil Arredondado p/ mm)	
	Lado Esquerdo	Lado Direito	Lado Esquerdo	Lado Direito
Base 1	17,0	21,2	17,4	19,6
Base 2	20,1	18,4	18,9	18,9
Base 3	16,4	22,3	17,2	20,5
Base 4	20,8	21,0	21,4	20,4
Base 5	17,0	19,2	17,9	19,7

Como era esperado, as diferenças entre os valores baixaram quando se uniformizou a resolução da medida das elevações do perfil. O erro máximo que era de 2,5 cont/km baixou para 1,8 cont/km, e o erro médio que era de 1,01 cont/km também diminuiu para 0,89 cont/km.

Foi esta análise preliminar que levou a um estudo mais detalhado deste fator de diferença entre os resultados dos índices de irregularidade em uma comparação a partir de perfis com diferentes resoluções. Os resultados desta avaliação estão no Capítulo 4.

Assumindo-se que os testes que haviam sido realizados até este momento da pesquisa conseguiram verificar o perfilômetro desenvolvido, realizou-se uma pesquisa de comparação entre os resultados obtidos com o perfilômetro e os resultados obtidos por um medidor do tipo resposta. Os trabalhos de campo desse estudo se iniciaram em março de 2004 e duraram quase 1 ano. Deve ficar claro que nesta pesquisa os resultados do perfilômetro foram usados como referência.

Como os trechos usados nesse levantamento eram em uma avenida muito movimentada da cidade de São Paulo, não foi possível obter os perfis por métodos estáticos. Sendo assim, esta comparação assumiu, com base nas verificações anteriores, que o perfilômetro inercial usado gera resultados exatos o bastante para serem tomados como referência na comparação com o medidor tipo resposta.

O objetivo principal desta terceira avaliação foi o de tentar responder aos questionamentos que surgiram após informações obtidas com técnicos que fizeram bastante uso dos medidores do tipo resposta ou dos resultados obtidos com tal tipo de medidor de irregularidade.

As observações davam conta de que os medidores do tipo resposta poderiam ser tendenciosos, apesar de sua calibração. Imaginava-se que tais medidores tendiam a sobreestimar os valores baixos de irregularidade e a subestimar os valores altos de irregularidade.

A partir da dúvida surgida, verificou-se que seria importante a comparação não só para saná-la, mas para deixar registrado um histórico que poderá ser usado no futuro, quando algum usuário de medidor do tipo resposta migrar para um perfilômetro inercial e quiser entender melhor o que pode acontecer entre as medidas de um e de outro. Isto é muito importante, pois até meados do ano de 2006, quando este parágrafo foi escrito, só existia uma norma brasileira para a avaliação de irregularidade longitudinal em pavimentos rodoviários, e ela, como já foi revelado, previa o uso dos medidores do tipo resposta.

O local onde este estudo comparativo foi realizado é a Avenida dos Bandeirantes, na cidade de São Paulo, onde estavam em curso medições periódicas da irregularidade em 30 bases de 100 metros de comprimento cada, com o uso de um medidor de irregularidade do tipo resposta (Bump Integrator) montado em uma VW Saveiro (sem feixe de molas). Os dados destinavam-se à tese de doutorado de Nakahara (2005).

Assim, foram utilizados parcialmente os dados levantados e 3 medições com o perfilômetro laser foram feitas em datas próximas. As medidas foram realizadas em ambos os sentidos da avenida, nas faixas direita (FD) e central-direita (FCD).

Deve ser apontado que, pelo fato de as medidas terem sido feitas em uma avenida bastante movimentada, mesmo no período noturno, não foi possível garantir exatamente a igualdade dos pontos de início e fim das bases. Em ambos os equipamentos foi registrado no computador o ponto de início das bases com o veículo em movimento. O ponto final foi calculado utilizando-se o hodômetro do equipamento, com a informação da extensão da base.

As medidas com os dois equipamentos foram realizadas na mesma época, mas não nos mesmos dias. De acordo com a tabela 3.5, as diferenças entre as medidas individuais dos dois equipamentos e também das médias das bases em cada um dos sentidos da pista avaliada são evidentes. Entretanto, para o propósito pretendido os dados foram analisados em conjunto. A figura 3.16 ilustra o IRI médio das seções em cada uma das pistas da avenida analisada, com ambos os equipamentos. É possível notar que os valores medidos por ambos os métodos em geral aumentaram com o decorrer do tempo, dado que não houve intervenções no período. Diminuições ocasionais podem ser devidas a falhas de locação das bases.

Para que fosse possível verificar se havia alguma tendência nos resultados de irregularidade determinados com o equipamento do tipo resposta usado, selecionaram-se as medições do mês de setembro de 2004 de ambos os equipamentos, e também as medições de dezembro de 2004 do perfilômetro e as medições de janeiro de 2005 do medidor do tipo resposta. Desprezou-se a diferença de pouco mais de um mês entre as últimas medidas e, assim, apuraram-se 60 pares de pontos. Para normalizar os resultados em função da medição do perfilômetro, foi calculada a diferença ponto a ponto das medições entre os dois equipamentos e

elaborou-se o gráfico da figura 3.17, onde tal diferença foi apontada em função do valor da irregularidade do perfilômetro.

Tabela 3.5 – Resultado das avaliações de irregularidade longitudinal realizadas com medidor do tipo resposta e com o perfilômetro laser, em 30 bases na Avenida dos Bandeirantes, São Paulo, SP.

Sentido	Seção	Ext. (m)	IRI (m/km) <i>Bump 1</i>	IRI (m/km) <i>Bump 2</i>	IRI (m/km) <i>Bump 3</i>	IRI (m/km) <i>Bump 4</i>	IRI (m/km) Laser 1	IRI (m/km) Laser 2	IRI (m/km) Laser 3
			Março 2004	Julho 2004	Setembro 2004	Janeiro 2005	Maio 2004	Setembro 2004	Dezembro 2004
Rodovia dos Imigrantes	1FD	100	2,91	3,51	4,00	4,53	4,35	4,23	4,96
	1FCD	100	2,26	2,41	2,43	2,60	2,46	1,92	2,12
	2FD	100	2,29	2,82	2,84	3,74	2,85	2,27	1,77
	2 FCD	100	2,13	2,00	2,26	2,31	1,19	1,85	1,27
	3 FD	100	2,13	2,37	2,30	2,78	2,15	2,00	1,96
	3 FCD	100	1,91	2,00	2,08	2,51	1,77	1,65	1,73
	5 FD	100	2,53	2,70	2,61	2,99	1,92	2,65	3,38
	5 FCD	100	2,52	2,53	2,29	2,46	2,27	2,77	4,65
	5b FD	100	2,32	2,49	2,71	2,84	1,65	2,62	2,38
	5b FCD	100	2,32	2,25	2,18	2,21	1,31	1,42	1,42
	6 FD	100	2,44	2,53	2,40	2,89	2,38	2,46	2,58
	6 FCD	100	2,23	2,22	2,15	2,44	1,35	1,27	1,23
	6b FD	100	2,19	2,09	2,27	2,38	1,81	1,62	1,69
	6b FCD	100	2,32	2,34	2,30	2,41	1,73	1,77	1,77
Média			2,32	2,45	2,49	2,79	2,09	2,18	2,35
Marginal Pinheiros	7 FD	100	2,69	2,06	3,04	3,39	3,50	2,50	3,23
	7 FCD	100	1,96	2,60	2,54	2,72	1,27	1,65	1,62
	7B FD	100	3,27	3,57	3,08	3,75	4,88	4,65	6,31
	7B FCD	100	2,30	2,65	2,82	2,91	2,08	3,12	2,77
	7Bb FD	100	2,44	3,47	3,37	4,02	3,88	3,96	7,31
	7Bb FCD	100	2,31	2,23	2,15	2,30	1,54	1,58	1,38
	7Bc FD	100	2,02	2,34	2,42	2,87	2,92	2,62	6,31
	7Bc FCD	100	-	2,34	2,39	2,49	1,77	1,73	1,85
	7Bd FD	100	-	2,47	2,52	2,93	3,08	2,88	2,85
	7Bd FCD	100	-	3,17	2,82	3,29	3,23	4,27	2,85
	8 FD	100	4,65	4,31	4,30	4,98	6,08	5,46	8,38
	8 FCD	100	2,48	2,85	2,82	2,70	2,35	3,12	2,85
	9 FD	100	2,59	3,05	3,01	3,33	3,31	2,69	3,38
	9 FCD	100	2,22	2,26	2,33	2,92	2,62	3,12	3,69
	10 FD	100	2,03	2,00	2,02	2,12	1,69	1,12	1,38
	10 FCD	100	2,06	2,08	2,03	2,20	1,27	1,58	1,00
Média			2,54	2,72	2,73	3,06	2,84	2,88	3,57

Figura 3.16 – Resultado médio da irregularidade longitudinal (IRI) das bases de cada uma das pistas da Avenida dos Bandeirantes, cidade de São Paulo, avaliadas com o auxílio de diferentes equipamentos.

Figura 3.17 – Correlação existente entre a diferença das medidas de irregularidade de um medidor tipo resposta e de um perfilômetro, em 60 bases de 100 metros de comprimento, em função das medidas obtidas pelo perfilômetro. As medidas utilizadas foram executadas no mês de Setembro-04 e de Dezembro-04/Janeiro-05.

A figura 3.17 evidencia que para os equipamentos estudados existiu uma correlação significativa entre o valor da irregularidade medido pelo perfilômetro e a diferença apurada entre as medidas dos dois equipamentos. Em outras palavras, com base nos dados, assumindo-se que ambos os equipamentos foram calibrados e usados de acordo com as especificações de seus fabricantes, fica evidenciado que o medidor do tipo resposta usado (tipo Bump Integrator), tendeu a sobreestimar suas medições quando a irregularidade existente era menor do 2 m/km (IRI), chegando a sobreestimá-las em 100%, quando a irregularidade existente foi da ordem de 1 m/km (IRI). Quanto menor o valor da irregularidade, maior tendeu a ser a diferença entre as medidas resultantes através da avaliação feita com os dois equipamentos.

O comportamento evidenciado mudou para valores altos, $IRI > 3,5$ m/km. Para estes valores de irregularidade houve uma subestimação da irregularidade quando ela foi avaliada com o Bump Integrator, tal subestimação cresceu com o valor da irregularidade. O efeito pode explicar os motivos pelos quais técnicos experientes às vezes se surpreendem com valores baixos de irregularidade medidos com perfilômetros inerciais, pois, se os resultados obtidos nesta comparação realmente espelharem a realidade dos medidores do tipo resposta, seria realmente muito difícil a obtenção de medidas de irregularidade muito baixas com estes equipamentos.

Naturalmente, não é possível fazer uma afirmação conclusiva a respeito dos resultados encontrados, pois parte deles pode ser também derivada de uma calibração deficiente do medidor do tipo resposta usado na pesquisa, por exemplo, sem a inclusão de bases de referência que tivessem índices de irregularidade muito altos ou muito baixos.

Desta maneira, além de uma recomendação para que tal tipo de estudo comparativo seja ampliado para outros medidores do tipo resposta, ficam aqui registrados os indícios encontrados que reforçam as opiniões de técnicos experientes em matéria dos resultados produzidos por medidores do tipo resposta.

Recomenda-se, portanto, que as medidas de IRI feitas com medidores tipo resposta sejam tomadas com mais cautela quando estiverem fora da faixa entre 2 e 3,5 m/km, e no mesmo sentido, recomenda-se cautela quando forem comparados resultados de avaliações de irregularidade medidos com equipamentos de tipos diferentes,

principalmente em se tratando de medidores do tipo resposta e perfilômetros inerciais, cujos valores de IRI fiquem fora da faixa indicada.

3.4 Outras possibilidades de um perfilômetro inercial e de seus resultados

Além da utilização mais comum de um perfilômetro inercial que é sem dúvida a avaliação da irregularidade longitudinal de um pavimento – descrita anteriormente, é muito importante mencionar também as outras funcionalidades ou utilidades que o perfilômetro desenvolvido e/ou outros perfilômetros inerciais proporcionam ou podem vir a proporcionar a seus usuários.

As principais funcionalidades acessórias que um perfilômetro inercial e/ou os resultados gerados por ele estão mencionados abaixo e são em seguida elucidados em subitens.

- Medir os perfis longitudinais em posições diferentes da faixa de rolamento, de acordo com o posicionamento dos módulos laser ao longo da barra de suporte;
- Proporcionar através da medição com vários módulos laser e/ou várias medições em posições diferentes do mesmo pavimento, a criação de um gráfico que facilita a visualização do estado da superfície;
- Medir o afundamento plástico nas trilhas de roda e/ou o degrau entre pista e acostamento;
- Auxiliar, através da análise computacional do perfil longitudinal obtido, a identificar os locais que devem ter sua superfície recuperada e ainda, prever os resultados de uma fresagem em termos da redução da irregularidade longitudinal;
- Facultar a medição conjunta de algum índice relacionado à situação da macrotextura do pavimento.

3.4.1 As posições dos módulos para a medição de perfis e uma proposta de visualização

Os dois primeiros itens citados na lista anterior fazem referência a uma das funcionalidades interessantes, presente no perfilômetro desenvolvido, que diz respeito à possibilidade do livre posicionamento dos módulos de medição laser na barra de suporte onde eles são fixados.

O primeiro item chama mais atenção para o fato de alguns perfilômetros laser permitirem a avaliação da irregularidade longitudinal da faixa de rolamento nas trilhas de roda daquele pavimento. Isso é possível porque antes do levantamento o técnico pode verificar a pista para então decidir e ajustar o melhor espaçamento dos sensores laser buscando adequá-lo à característica daquele pavimento. Poderá haver ocasiões em que o técnico terá que optar entre o melhor espaçamento possível e a segurança do levantamento, haja vista que, dependendo da largura do veículo usado na medição, os maiores espaçamentos podem deixar os módulos laser fora dos limites laterais do veículo.

A própria norma americana que trata deste tipo de levantamento não fixa uma distância entre os 2 sensores normalmente usados para se medir a irregularidade longitudinal sobre cada trilha de roda. Tal norma, a ASTM E 950-98, prevê que se ambas as trilhas de roda estiverem sendo avaliadas, a distância entre os sensores deve estar no intervalo entre 1,5 m e 1,8 m.

Aqui no Brasil, dado o fato da única norma de avaliação de irregularidade longitudinal dizer respeito somente à medida com equipamento do tipo resposta, alguns técnicos têm entendido que ainda se devem fazer as medições de irregularidade com os sensores posicionados a 1,4 m um do outro, para, pelo menos neste aspecto, seguir a regra da norma vigente.

Extrapolando um pouco a idéia de avaliação da irregularidade nas trilhas de roda, tanto o equipamento desenvolvido como também alguns outros fabricados mundo afora permitem o uso de mais de dois sensores, o que gera a possibilidade da medição do perfil longitudinal em vários pontos do perfil transversal de uma faixa de rolamento e conseqüentemente permite o cálculo dos índices de irregularidade em

mais de dois pontos também. É justamente este ponto que foi descrito no segundo item relacionado no item 3.4.

Para ilustrar este tipo de utilização, foi realizada uma medição de perfis longitudinais experimental na pista principal do Aeroporto de Congonhas em São Paulo. Pelo fato de a pista possuir 45 metros de largura, fez-se o uso de 5 módulos laser igualmente espaçados ao longo de uma barra de suporte com 3 metros de largura, que saía dos limites do carro – o que não causou problema algum neste caso. Além disso, para cobrir a parte da pista na qual havia interesse estudar, foram feitas diversas passagens do equipamento, começando pelo eixo e depois passando uma vez próxima de cada extremidade.

Mesmo com o cálculo dos índices de irregularidade feito a cada 50 metros, a quantidade de informação gerada foi tanta que ficava difícil tirar conclusões apenas observando os números, pois mesmo não cobrindo a pista inteira, foram realizadas 8 passadas do equipamento em diferentes posições, o que gerou 40 perfis longitudinais medidos. Sendo assim, inseriram-se todos os dados em uma planilha eletrônica, e buscou-se uma forma de sumarizar ainda mais a informação.

A forma encontrada foi a geração de um gráfico de superfície em duas dimensões, onde a área do gráfico representava a pista avaliada e as cores representavam os diferentes níveis do quociente de irregularidade calculados. O resultado pode ser visualizado na figura 3.18, que não precisa ocupar mais do que uma página. Fica bastante claro que a forma de disposição dos dados permite enxergar e, conseqüentemente, utilizar muito mais facilmente os resultados, do que seria possível em uma planilha que possuísse a mesma informação disposta em 1540 células.

O gráfico da figura 3.18 demonstra um caso real de medição de uma pista de pousos e decolagens, onde foram realizadas 8 passagens do perfilômetro inercial desenvolvido, usando-se 5 módulos laser igualmente espaçados ao longo de uma barra de suporte com 3 metros de comprimento. As duas faixas brancas, próximas às bordas da pista não foram medidas.

Acredita-se que esta forma inovadora de representação da irregularidade longitudinal para uma pista de grandes dimensões possa ser de grande utilidade

para os seus gestores, que poderiam focar mais facilmente seus esforços corretivos e preventivos nas áreas mais irregulares, onde a probabilidade de problemas com aderência e drenagem são maiores. A figura 3.19 registra a montagem do equipamento no dia em que a medição da pista aeroportuária foi realizada.

Figura 3.18 – Gráfico de áreas evidenciando por cores as diferentes faixas de QI medidas em uma pista de aeródromo.

Figura 3.19 – Fotografia da montagem do perfilômetro inercial utilizada nas medições da pista aeroportuária, cujos resultados estão na figura 3.18.

3.4.2 A utilização do perfilômetro para a medida de propriedades ligadas ao perfil transversal

A terceira utilização citada na lista do item 3.4, embora já tenha sido parcialmente mencionada em partes anteriores desse trabalho, ainda não foi descrita detalhadamente para que não fosse mudado o foco principal da discussão, que é, sem dúvida, a avaliação da irregularidade. Este item, entretanto, contém o detalhamento de como é possível medir duas variáveis ligadas ao perfil transversal de um pavimento a partir de um perfilômetro inercial, são elas: o afundamento plástico nas trilhas de roda e o degrau entre pista e acostamento.

Enquanto que para medir os perfis longitudinais de um pavimento para fins de avaliação de irregularidade bastam normalmente dois módulos laser com seus acelerômetros, cada um posicionado sobre uma trilha de roda, para a medição do afundamento plástico nas trilhas de roda (conhecido pelo acrônimo ATR) são necessários no mínimo 3 módulos. Tal necessidade é bastante lógica, pois é preciso

alguma referência do perfil transversal não deformado plasticamente para se definir o quanto as medidas realizadas nas trilhas de roda estão afundadas. A figura 3.20 ilustra essa montagem.

Entretanto, uma primeira explicação, que já não é tão óbvia, é que com 3 módulos, sendo dois deles posicionados sobre as trilhas de roda e o terceiro posicionado, no meio, entre os dois anteriores, só se consegue medir o afundamento médio das duas trilhas. Isso acontece porque não se tem controle durante a avaliação dos nivelamentos transversais do veículo e da superfície do pavimento. Assim, quando se usam 3 módulos, o cálculo do ATR é realizado através da subtração entre a média dos valores medidos pelos módulos das trilhas e o valor medido pelo módulo posicionado no meio. Desta maneira, não importa se o veículo está inclinado para algum lado, ou mesmo se o pavimento está inclinado para outro. A única certeza que se pode obter é o valor médio dos afundamentos plásticos, levando-se em conta a posição do veículo naquele momento.

Para esta medida, é inclusive desnecessário levar em conta os dados provenientes dos acelerômetros, pois tendo como premissas que a barra do suporte dos módulos é rígida e que os módulos estão zerados em um mesmo nível, quaisquer três medidas que sejam tomadas simultaneamente, após o cálculo revelado, geram o valor do afundamento médio dos módulos das trilhas em relação ao módulo do meio.

Figura 3.20 – Desenho ilustrativo de um perfilômetro inercial com três módulos visando a determinação do afundamento plástico médio das trilhas de roda.

Quando se deseja obter os valores dos afundamentos individualizados por trilha de roda, são necessários mais módulos, pelo menos 5, sendo que os 2 módulos

adicionados ficam posicionados nas extremidades de uma barra de suporte que possua algo em torno de 3 metros de comprimento (o suficiente para que a medida deles seja tomada fora da parte afundada das trilhas de roda) – muito maior portanto que na opção anterior, onde 1,6 m pode ser o suficiente.

Fazendo desta maneira, é possível o cálculo individualizado dos afundamentos nas trilhas de roda, através de dois cálculos similares ao anterior, um primeiro, levando em conta os módulos 1, 2 e 3; e um segundo levando em conta os módulos 3, 4 e 5; sendo que os módulos 2 e 4 são os que estão posicionados sobre as trilhas de roda, o módulo 3 posicionado no meio da barra e os módulos 1 e 5, nas extremidades.

Teoricamente, partindo dos pressupostos já salientados – barra de suporte rígida e módulos zerados em um mesmo nível – a medição do ATR é perfeitamente possível seja com 3 ou 5 módulos. O único ponto complicador é o posicionamento do veículo na faixa de rolamento. Se o veículo não estiver corretamente posicionado na faixa, o valor calculado de ATR não será correto, o que é bastante fácil de perceber.

Para minimizar tal problema, algumas soluções já foram pensadas: aumentar o número de módulos laser e/ou facilitar o controle do posicionamento do veículo para auxiliar o motorista.

A primeira solução é sem dúvida mais eficaz, muito embora esbarre na limitação de custo, pois se a mudança dos medidores do tipo resposta para perfilômetros inerciais com 2 ou 3 módulos já esbarra em limitações orçamentárias por parte dos consultores e órgãos governamentais, pode-se imaginar qual não seria a dificuldade em se investir em um perfilômetro com mais de 10 módulos laser, por exemplo.

Aumentando-se o número de módulos laser, diminui-se o erro relativo à posição do veículo, pois se torna possível, com mais módulos posicionados na região das trilhas de roda, usar somente os maiores valores, visando captar o afundamento máximo.

A outra solução, paliativa, foi experimentada e mostrou-se útil especialmente em tangentes horizontais. Visando auxiliar o motorista do veículo com o perfilômetro, foi desenvolvido um sistema simples de mira laser. Posicionada em um suporte que vai sobre o veículo e regulada para mostrar um ponto vermelho sobre a sinalização horizontal que divide as faixas de rolamento, este simples indicador ajuda o

motorista a manter o veículo posicionado corretamente sobre a faixa de rolamento, o que sem dúvida permite a obtenção de resultados mais consistentes para o ATR.

Uma outra melhoria, desta vez no *software*, que também foi feita para auxiliar na obtenção de melhores resultados na medida do ATR, foi a inclusão, na tela do *software* de coleta de dados, de um quadro que indica a posição relativa dos sensores. Com ela, o técnico também pode acompanhar se há algo de errado com o posicionamento do veículo e neste caso ajudar a orientar o motorista. A figura 3.21 ilustra a tela do software já com esta modificação.

Figura 3.21 – Tela de versão posterior do *software* Ciberlogger contemplando uma caixa de visualização da situação instantânea dos afundamentos plásticos nas trilhas de roda.

A conclusão que se pode chegar a respeito da medição de ATR com perfilômetros laser é que não é possível garantir, principalmente com um número reduzido de módulos laser, que se esteja medindo realmente o afundamento máximo das trilhas de roda. Isto não quer dizer que não se deva usar este tipo de medida de ATR, pelo contrário. Mesmo com esta limitação, ela ainda pode ser melhor, mais econômica e mais segura do que uma medida feita com trelça a cada 100 metros, especialmente

para levantamentos em nível de rede, ou seja, levantamentos em que se procura ter uma avaliação geral de toda uma rodovia ou de um sistema viário.

Nas medidas de ATR feitas com perfilômetro, deve-se ter a noção clara de que, embora não haja nada de errado com a técnica de medição ou com o equipamento, os resultados apresentados por um perfilômetro de 3 ou 5 módulos laser, dificilmente representam de forma contínua o valor máximo do(s) afundamento(s).

Há na bibliografia estudada um trabalho bastante interessante publicado por MEHTA et al. (2001), que trata exatamente sobre os resultados que podem ser esperados da medição de ATR com perfilômetros laser. As conclusões dos autores revelam que o posicionamento entre os sensores tem uma grande influência neste tipo de medida, e que com base nos segmentos por ele estudados, a melhor distância entre sensores seria de 1,05 m, ou seja, 2,10 m entre os sensores das pontas.

O trabalho ainda revelou que as medidas de ATR realizadas com 3 módulos laser foram na média, de 2 a 3 vezes menores do que as medidas reais obtidas em campo por meio de um perfilômetro transversal. Tais resultados eram devidos às variações laterais do perfilômetro na faixa de rolamento, que chegaram ao máximo de 57 cm, em relação à posição planejada. Vale notar que os autores não mencionam nada sobre a utilização de sistemas que auxiliem o motorista e/ou o técnico sobre o posicionamento correto do veículo durante o levantamento.

Embora os dados apresentados no trabalho mencionado passem uma noção objetiva do que aconteceu nas avaliações por eles realizadas, acredita-se que os resultados variem de acordo com o trecho avaliado, pois tanto a posição das trilhas, quanto o comportamento do motorista podem variar de um levantamento para outro, em função de uma série de razões, o que impede que sejam usados simples fatores de correção para as medidas de ATR obtidas.

Concluindo, é possível a medição do ATR com perfilômetros inerciais embora eles tendam a subestimar o valor medido em função do deslocamento lateral do veículo e do espaçamento entre os módulos laser. As melhores estratégias para a minimização de tais variações são: o posicionamento dos módulos laser de acordo com o espaçamento médio entre os afundamentos máximos das trilhas de roda do trecho a ser avaliado; o uso de dispositivos que auxiliem na manutenção da posição

do veículo durante o levantamento (por exemplo, com a mira laser); e para aqueles com mais recursos, o uso de um número maior de módulos laser no perfilômetro.

Foi mencionada também a possibilidade de medição do degrau entre a pista e o acostamento. Trata-se de uma possibilidade também importante, mas ainda pouco explorada em nosso país.

Para realizá-la, sugere-se o uso de 5 módulos laser, que devem ser fixados na barra de suporte bem próximos um do outro, por exemplo a 15 cm, sendo que todos eles devem ficar do lado do acostamento, em um prolongamento da barra de suporte, conforme indica a figura 3.22.

Figura 3.22 – Exemplo de montagem do perfilômetro laser visando a medição do degrau entre pista e acostamento.

Essa configuração é boa, uma vez que permite ao motorista pequenas variações transversais de posicionamento do veículo durante a medição, sem prejuízo aos resultados, pois basta que pelo menos um módulo esteja posicionado sobre a pista e também que exista pelo menos um módulo posicionado sobre o acostamento.

A determinação do degrau entre pista e acostamento deve então ser feita com base na subtração das medições dos lasers mais próximos ao degrau. Pelo fato de os módulos laser estarem posicionados muito próximos uns dos outros, a eventual inclinação da pista ou do veículo na pista causa um erro pequeno no resultado da medição, que, para fins de avaliação do degrau, poderia, em tese, ser desprezado.

3.4.3 O processamento computacional de perfis de pavimentos

O penúltimo item mencionado na lista do item 3.4, trata do processamento computacional dos perfis longitudinais obtidos em levantamentos realizados com perfilômetros inerciais, visando a obtenção de informações que vão além dos simples valores dos índices de irregularidade.

É de se imaginar que não seja muito difícil nos dias atuais o desenvolvimento de *softwares* específicos que pudessem, por exemplo, a partir dos perfis longitudinais de um pavimento, simular o que aconteceria com os índices de irregularidade, se aquele perfil sofresse uma fresagem com determinadas características. Pois bem, isso já foi feito, Rasmussen e Wilde (2001).

O responsável pela maior iniciativa de que se tem notícia feita no sentido de melhorar o aproveitamento dos dados coletados por perfilômetros inerciais foi justamente um órgão federal da administração rodoviária dos EUA, o *Federal Highway Administration*, conhecido pelo acrônimo FHWA.

O *software* desenvolvido por uma empresa privada, às custas do FHWA, foi apelidado de ProVal, que é a forma reduzida de "*Profile Viewing and Analysis*". Trata-se de um *software* para Windows bem elaborado, que em meados do ano de 2006 estava na versão 2.6, Chang et al. (2006).

O programa é distribuído pela Internet, possui manual em PDF e tem um *site* próprio (www.roadprofile.com) onde é possível trocar informações sobre perfis, irregularidade de pavimentos e inclusive manter acesso com o grupo que desenvolveu o sistema.

Pela popularidade que goza, principalmente na América do Norte, é possível arriscar o palpite de que o ProVal seja mesmo um dos *softwares* mais usados para a análise de perfis longitudinais de pavimentos. Certamente, o fato de estar sempre atualizado e disponível ajuda muito nesta popularidade, que é bastante justa.

Em rápidas palavras, o sistema aceita como dado de entrada o perfil longitudinal de um pavimento em diversos formatos e a partir desse perfil permite a visualização e o processamento dos dados, facultando o uso de diversos filtros diferentes,

possibilitando o cálculo de índices de irregularidade diferentes, tendo em vista que nos EUA usam-se diferentes índices de acordo com o estado, entre outras funções.

Para os brasileiros, que usam como índices de irregularidade o IRI e QI (que o programa não contempla), o programa é útil para o cálculo do IRI a partir do perfil longitudinal em quaisquer espaçamentos desejados, para o cálculo do IRI de forma contínua e principalmente para o motivo que foi salientado no quarto item da relação inicial deste tópico: para a simulação do perfil resultante de uma fresagem.

Para explicar sobre a função da fresagem, é importante antes comentar sobre o cálculo do IRI de forma contínua, que é uma possibilidade importante de saída do *software*, usada na parte da sugestão de trechos para a fresagem.

Neste caso, ao invés de calcular o índice em segmentos de 200 m como se faz comumente, primeiro do 0 ao 200 m, depois de 200 a 400 m e assim por diante, como é comum, o programa calcula o índice continuamente, por exemplo, se os dados do perfil estão de 0,5 m em 0,5 m, o programa calcula o índice inicialmente da posição 0 até 200 m, depois calcula de 0,5 a 200,5 m, depois de 1 a 201 m, e assim por diante. Dessa maneira, o programa consegue traçar uma curva com o valor de cada IRI calculado posicionado no ponto médio do trecho abrangido e com isso, sugerir intervalos pequenos de espaço, que possuem o IRI médio acima de determinado valor, o que pode ser bastante interessante para uma correção funcional localizada.

São justamente os trechos determinados pelo método acima que podem ser demarcados pelo programa para a simulação de fresagem. Para simular a fresagem o usuário deve escolher as características da fresadora utilizada e também a espessura a ser fresada. Em seguida basta pedir para o programa simular a fresagem naquele perfil longitudinal. O programa gera internamente como resultado o perfil fresado e recalcula o IRI, tanto no modo contínuo, quanto no modo normal, com intervalos.

Dessa maneira, o usuário pode tentar antever os resultados daquela fresagem e depois pode refinar, trecho a trecho se quiser, a altura de corte da fresadora visando minimizar a fresagem, de forma a ainda manter em todos os trechos, os índices de irregularidade dentro dos limites desejados.

Como se pode perceber, o uso de programas como este, pode ser de grande auxílio para economizar em processos de fresagem e melhorar o emprego de recursos em recuperações funcionais dos pavimentos. Um dos pontos negativos é que o programa não contempla o QI, que ainda é o índice normalizado em nosso país.

3.4.4 A possibilidade de medição conjunta da macrotextura

O último dos itens mencionados, diz respeito à possibilidade de medição conjunta da macrotextura do pavimento, com fins de sua caracterização, como medida representativa da segurança que pode ser oferecida por aquele pavimento para tráfego em altas velocidades com pista molhada.

Tal função é relativamente rara entre os módulos laser normalmente usados para se medir o perfil longitudinal visando a determinação de índices de irregularidade, pois as características requeridas do medidor laser para fins de caracterização da macrotextura são diferentes das características requeridas para a medição de perfil longitudinal. No sistema desenvolvido, por exemplo, não é possível sua medição conjunta. Um exemplo de equipamento norte-americano que é capaz de medir tanto a macrotextura quanto a irregularidade é conhecido pelo nome ROSAN, segundo Budras (2001).

As principais diferenças ficam por conta do tamanho do ponto laser que deve ser projetado no pavimento, menor no caso da macrotextura e da frequência de medição e exatidão das medidas, que devem ser maiores no caso da macrotextura.

Evidentemente, a evolução tecnológica permitirá a mais fabricantes desenvolverem equipamentos em que ambas as medidas sejam tomadas a partir de um mesmo módulo laser que concilie as duas necessidades.

É importante deixar registrado que a medição do perfil médio da macrotextura de um revestimento é normalizada pela ASTM E 1845-96 que, além de estabelecer todas as características do equipamento necessário para se efetuar este tipo de medição e de padronizar os cálculos e a apresentação de resultados, ainda contém um modelo de correlação dessas medidas, com as medidas da macrotextura através do ensaio

de mancha de areia, bastante disseminado em nosso país, e que segue a norma ASTM E 965-96.

4 APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

4.1 A verificação do funcionamento de perfilômetros inerciais

Tendo como base os testes efetuados durante o desenvolvimento do perfilômetro inercial, cujos resultados foram discutidos no Capítulo 3, e a análise da bibliografia estudada, verificou-se a oportunidade e a necessidade de complementar o assunto, abordando, desta vez, o modo de realização de testes de verificação de funcionamento de um perfilômetro e os resultados que podem ser extraídos deles.

Em outras palavras, a intenção foi pesquisar um rol de recomendações de como devem ser realizados testes de funcionamento de um perfilômetro inercial, para que ao final desta pesquisa fosse possível apresentar um anteprojeto de norma brasileira que contivesse tais recomendações atualizadas.

Para esta discussão foram realizados experimentos que visaram aclarar os principais pontos de interferência que podem prejudicar a correta realização dos testes e a análise de resultados.

Antes de formatar alguns dos testes realizados, foi realizada uma análise crítica das principais normas norte-americanas que tratam das características dos perfilômetros inerciais, notadamente nos pontos em que elas especificam como devem ser feitos os testes que visam estabelecer quão bem determinado perfilômetro funciona ou produz resultados adequados. Tal análise levou em conta não só a percepção deste pesquisador, como também as conclusões de estudos recentes que também criticam tais normas.

Ainda dentro da esfera dos testes de verificação de perfilômetros inerciais, os subitens seguintes abordam: o teste de balanço; a influência da resolução das elevações dos perfis no cálculo dos índices de irregularidade; a obtenção de perfis longitudinais de referência para verificação de perfilômetros; e por fim, os testes sugeridos para a verificação da repetitividade e exatidão de perfilômetros inerciais.

4.1.1 Análise crítica dos testes de verificação de exatidão e repetitividade das normas norte-americanas de perfilômetros inerciais

Em toda a bibliografia analisada para elaboração desta pesquisa ficou bastante claro que as normas mundialmente mais citadas quando se trata de avaliar a irregularidade de um pavimento com um perfilômetro inercial e especialmente quando se trata de avaliar e classificar os perfilômetros inerciais, são as normas norte-americanas: ASTM E 950-98, AASHTO PP 49-03 e AASHTO PP 50-03.

Alguns estados norte-americanos e mesmo as próprias ASTM e AASHTO possuem outras normas relacionadas ao tema, como por exemplo: ASTM E 1926-98, ASTM E 1364-95, AASHTO MP 11-03, AASHTO PP 37M-99, MTN 730-02 – Michigan Department of Transportation (2007) e Tex-1001-S – Texas Department of Transportation (1999), apenas para citar as mais conhecidas.

Neste item, entretanto, a análise será restrita aos itens das normas que tratam especificamente dos testes de verificação de exatidão e repetitividade de perfilômetros inerciais.

A ASTM E 950-98, pioneira no ramo, vez que foi publicada originalmente em 1983, marcou a consolidação de anos de estudo em torno da avaliação de irregularidade com perfilômetros inerciais, e por isso é a norma citada por todos os fabricantes de perfilômetros inerciais que essa pesquisa conseguiu encontrar, que fazem uso dela para classificar seu equipamento como pertencente à ‘classe 1’.

Embora ela tenha sido um marco para todos que fazem uso dessa tecnologia, ficará demonstrado abaixo que, pelo menos em relação aos critérios de verificação dos resultados emanados de perfilômetros inerciais, a ASTM E 950-98, assim como outras que foram nela balizadas, está eivada de aberturas que retiram dela a credibilidade que muitos atribuem.

Como o detalhamento das verificações de repetitividade e exatidão, contidas na norma ASTM E 950-98 já foi descrito no item 2.7.1 desta pesquisa, nesta análise tais procedimentos serão resumidos.

Em síntese, de acordo com a norma ASTM E 950-98, a verificação da repetitividade das medições de um perfilômetro, chamada na norma de “*precision*”, é realizada através da escolha de um trecho de pavimento com 1056 pés (aproximadamente 320 metros) de comprimento e da medição de tal perfil em espaçamentos de 1 pé (aproximadamente 30 cm), por pelo menos 10 vezes, com o perfilômetro sob análise. A norma prescreve que seja calculado o desvio padrão para cada uma das 1057 elevações do perfil levando em conta as 10 medições e, por fim, estabelece a classe do perfilômetro com base na média dos 1057 desvios padrão.

Com a sensibilidade que foi adquirida ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, aliada à conclusão de publicações mais recentes de outros pesquisadores como Karamihas (2002; 2005a) e Wang (2006), pode-se afirmar que tal procedimento é inadequado, incompleto e por isso inconclusivo.

Da maneira proposta pela norma é possível se fazer com que vários perfilômetros de diferentes fabricantes sejam verificados como ‘classe 1’ em determinadas condições e não o sejam em outras condições. Vamos à análise.

O primeiro fator, de suma importância, para que tal teste tivesse validade seria o estabelecimento de um nível de irregularidade da base de 320 m usada na verificação. É muito mais fácil para qualquer perfilômetro ser aprovado como ‘Classe 1’ em uma base com irregularidade baixa, digamos com $IRI = 0,8$ m/km, do que o mesmo perfilômetro ser aprovado pelo mesmo critério em uma base com $IRI = 4,0$ m/km.

A irregularidade alta por si só, aliada ao espaçamento entre medidas consecutivas de qualquer perfilômetro inercial, já causa discordâncias que aumentariam em muito os desvios padrão das elevações e que, por fim, classificaria de forma diferente o perfilômetro.

O segundo fator diz respeito à textura da superfície. A norma também é omissa quanto a isto. Levando em conta trechos com irregularidades semelhantes, é muito mais fácil um perfilômetro ser aprovado em um teste realizado em uma superfície bem fechada, ou seja, bastante lisa e sem reentrâncias, do que em uma superfície aberta com macrotextura bastante pronunciada. American Concrete Pavement Association (2006), Perera et al. (2006) e Wang (2006) abordam este tema.

O terceiro fator diz respeito à velocidade da medição. A norma nada prescreve em relação à velocidade em que as 10 medições devem ser feitas. Pode ser mais fácil para um perfilômetro passar em um teste deste tipo fazendo as 10 medições em uma mesma velocidade, do que fazer as 10 medições em 10 velocidades diferentes.

O quarto fator está de certa forma ligado ao terceiro e diz respeito à inadequação do teste para os fins em que normalmente se utilizarão os perfis longitudinais, ou seja, para o cálculo de irregularidade longitudinal, IRI ou QI, por exemplo. Quando prescreve esta verificação a norma não menciona a necessidade de se filtrar de maneira específica os perfis para os comprimentos de onda que realmente afetam o resultado do IRI, ou seja, do jeito que está prescrito, esse teste pode condenar um bom perfilômetro pelo fato dele não registrar bem comprimentos de onda que simplesmente não interessam e pode aceitar como 'classe 1' um perfilômetro que não meça bem comprimentos de onda que realmente interessam.

A conexão deste ponto com o terceiro fator está justamente ligada à velocidade de ensaio com o perfilômetro, pois, conforme demonstram os perfis das figuras 3.14 e 3.15 em conjunto com os dados da tabela 3.1, perfis obtidos em velocidades diferentes incluem comprimentos de onda diferentes, que no caso testado, não alteraram o resultado do IRI ou QI.

Muito embora os perfis das figuras citadas acima não estivessem filtrados para os comprimentos de onda acima de 60 metros, como pede a norma ASTM E 950-98, a ilustração se mantém cabível neste caso, haja vista que existiriam comprimentos de onda de 50 metros não filtrados, por exemplo, que poderiam mostrar perfis um pouco diferentes.

O que se quer ilustrar é que este tipo de teste, mesmo com o filtro da norma, se preocupa muito mais com os grandes comprimentos de onda do que com os pequenos comprimentos de onda, pois pequenas diferenças nos grandes comprimentos de onda causam um aumento grande dos desvios padrão que classificam o perfilômetro, enquanto que as diferenças nos menores comprimentos de onda, por terem magnitude menor, não causam grandes problemas para a classificação. O mais importante é revelar que no caso do IRI, por exemplo, a faixa

de comprimentos de onda do perfil que mais influi no resultado varia de 1,2 m a 3 m, segundo demonstra Karamihas (2002).

Por causa da grande diferença de importância atribuída pela norma aos diferentes comprimentos de onda do perfil, o trabalho citado acima incluiu ainda um exercício teórico que visou simular o quanto de erro se poderia incluir em um perfil longitudinal completamente reto, de modo a manter um perfilômetro classificado na primeira categoria de classe e chegou ao espantoso valor de 1,52 m/km para o IRI. Ou seja, o autor foi capaz de incluir em um perfil plano uma senóide que gera um erro no IRI de 1,52 m/km, sem alterar a classificação do equipamento, tudo porque a classificação da norma neste teste é muito permissiva aos pequenos comprimentos de onda. Vale citar que para o valor médio dos desvios padrão tolerado para a classe 2 da norma, este erro seria maior do que 3 m/km.

Há ainda mais dois fatores que poderiam ser melhorados neste teste da norma. O quinto fator que pode atrapalhar indevidamente os bons resultados de um perfilômetro é que a norma não menciona tratamento algum para que o técnico que estiver conduzindo os testes possa acertar manualmente um *offset* para as elevações iniciais de cada uma das 10 medições. Como se sabe, em perfilômetros inerciais o valor das elevações dos perfis é sempre relativo, o que faz com que em 10 medições o perfil, ainda que iniciando exatamente no mesmo ponto, possa ter-se 10 resultados diferentes para a primeira elevação.

Se não for feito este acerto de *offset* antes de se calcular os desvios padrão ponto a ponto, certamente será induzido um erro em tais desvios padrão que poderá prejudicar indevidamente o perfilômetro sob análise. Esse fator não é tão grave quanto os anteriores. Trata-se de uma omissão da norma que um técnico com conhecimento e bom senso poderia superar, sendo cabível aqui sua menção por se tratar de uma análise aprofundada do tema.

O sexto e último fator diz respeito ao alinhamento longitudinal dos perfis antes da comparação, outro ponto em que o teste da norma é omissivo. Qualquer desalinhamento longitudinal de 1 ou 2 cm entre os perfis medidos causará também um aumento indevido dos desvios padrão, que prejudicaria o perfilômetro. Vale lembrar que para boa parte dos perfilômetros 1 ou 2 cm significa apenas 1 ponto no

perfil coletado, o que seria um erro muito comum para o início de uma seção. Tal qual o quinto fator, este último também é de menor gravidade, pois pode ser superado por um técnico preparado, mas também merece menção.

Em síntese, fica demonstrado cabalmente que este tipo de verificação da repetitividade de perfilômetros da maneira como está proposto pela norma ASTM E 950-98 é muito ruim, por conter aberturas que permitiriam em tese que os mesmos equipamentos sejam classificados de modo totalmente diferente, dependendo de como for realizado o teste. Portanto quando se lê que um perfilômetro é 'classe 1' segundo a ASTM E 950-98, deve-se ter em mente que em relação à repetitividade de suas medidas, essa classificação não é conclusiva.

O segundo teste de verificação de um perfilômetro, também presente na norma ASTM E 950-98, chamado por ela de "*bias*", é na realidade um teste de exatidão do perfil medido com o perfilômetro em relação a um perfil de referência, visando verificar se há alguma tendência nos resultados apresentados pelo perfilômetro.

Para este teste pode ser usado o perfil médio dos 10 perfis medidos para o ensaio de repetitividade. Em relação ao perfil padrão, a norma sugere que ele pode ser medido com nível e mira, seguindo os preceitos da norma ASTM E 1364-95.

A norma ainda sugere que o perfil padrão seja medido mais de uma vez para que possa ser estabelecido um perfil padrão médio que seria usado na comparação. Há ainda previsão para que o perfil padrão sofra o mesmo tipo de processamento (filtragem), que o perfil medido pelo perfilômetro.

De posse dos dois perfis que devem contar com 1057 pontos cada um, basta determinar as diferenças absolutas entre cada ponto dos dois perfis e por fim determinar a média de todas as 1057 diferenças. O perfilômetro em análise será classificado como 'classe 1', se o valor da média determinada for menor que 1,25 mm.

Com base nas informações acima e nos problemas relatados para o teste de repetitividade, fica fácil concluir que todos os 6 fatores descritos como problemáticos para o teste anterior, também afetam o teste de exatidão, por isso, os comentários desta vez serão mais sucintos.

Primeiro fator: a irregularidade do trecho escolhido. É bastante óbvio que quanto mais irregular o trecho, menor a chance de o equipamento ser classificado na primeira classe do teste de exatidão. Em última análise, em uma pista perfeitamente plana a grande maioria dos perfilômetros provavelmente seria aprovada com certa facilidade.

O segundo fator levantado, a textura superficial do trecho escolhido, é ainda mais problemático neste teste que no anterior, haja vista que aqui o perfil está sendo medido com equipamentos bastante diferentes, que normalmente são afetados pela textura de forma diferente. Basta imaginar, por exemplo, uma mira apoiada sobre uma superfície com SMA e a medição feita na mesma superfície com um perfilômetro laser.

O fator velocidade de medição do perfilômetro, terceiro na lista anterior, também é muito importante, pois como foi revelado, a norma não prevê um tratamento especial do perfil para os comprimentos de onda que interessam ao cálculo da irregularidade. Sendo assim, se o trecho escolhido contiver grandes comprimentos de onda e o perfilômetro for passado a uma velocidade mais baixa, mesmo filtrando-se os dois perfis de acordo com a norma, eles ainda poderão apresentar diferenças visuais que classificariam o perfilômetro de maneira muito pior.

O quarto fator, também conexo ao terceiro, é um dos maiores problemas de ambos os testes, haja vista que da maneira como é executada a comparação, grande peso é colocado sobre os grandes comprimentos de onda, que importam muito menos na prática para a irregularidade, do que os pequenos comprimentos de onda, que são por este método renegados. Conclui-se que este teste também pode aprovar como classe 1, perfilômetros que podem gerar valores diferentes de irregularidade em um mesmo trecho, justamente pelos pesos diferentes que tacitamente atribui aos diferentes comprimentos de onda. Não é outra a comprovação de Karamihas (2002), que experimentou a adição de ruídos de curtos comprimentos de onda em determinado perfil e verificou que tais ruídos, embora alterassem significativamente o IRI, mantinham o perfilômetro na classe 1.

O quinto fator, que trata do *offset* vertical dos perfis a serem comparados, é muito importante quando os perfis comparados foram produzidos por equipamentos

diferentes. Como se sabe, o resultado de um nível e mira, por exemplo, pode muito bem atribuir ao primeiro ponto do perfil o nível zero de elevação, como também pode usar qualquer outra referência externa de nível para iniciar o levantamento. Como isso não é possível nos resultados do perfilômetro inercial, é imprescindível que seja realizada uma compatibilização da elevação inicial dos perfis, sob pena de se inviabilizar a classificação do perfilômetro neste quesito.

O sexto e último fator, que trata do alinhamento longitudinal dos perfis levantados, também exerce grande influência neste teste. Qualquer desalinhamento nos perfis, por menor que seja, pode adicionar falsas diferenças na comparação que afetariam sobremaneira os resultados.

Aqui também, o quinto e sexto fatores apresentados poderiam ser supridos com um conhecimento técnico do assunto, ficando registrada a recomendação para que haja menção expressa em futuros instrumentos normativos para que todo o procedimento seja padronizado.

A maior parte das críticas enumeradas acima também é encontrada, em geral de forma isolada, em outros trabalhos recentes a respeito do tema, tendo sido devidamente evidenciadas em pesquisas norte-americanas realizadas com perfilômetros de diversos fabricantes. Alguns dos trabalhos mais relevantes nesta seara são: Wang (2006), Li e Delton (2003), FHWA-LTPP Technical Support Services Contractor (2004), Karamihas (2002; 2005a; 2005b), Perera et al. (2006) e American Concrete Pavement Association (2006).

Enfim, como se pode perceber, ambos os testes abordados pela norma ASTM E 950-98 têm muito mais problemas do que virtudes e por isso não são recomendados para a verificação conclusiva de um perfilômetro quanto à sua repetitividade ou exatidão.

A próxima norma a ser abordada em relação aos testes de verificação da capacidade de um perfilômetro produzir bons resultados é a AASHTO PP 49-03. Essa norma, bem mais recente que a ASTM E 950-98, embora contenha testes de certa maneira similares, inclui verificações complementares e diminui as margens deixadas nas verificações mencionadas anteriormente.

As melhorias introduzidas na norma AASHTO PP 49-03 se iniciam nas instruções para a escolha dos perfis que serão usados nas verificações. Para começar, a norma prevê que os testes devam ser feitos em pelo menos duas seções, uma com baixa irregularidade (0,47 a 1,18 m/km de IRI) e outra com média irregularidade (1,50 a 2,13 m/km de IRI), ou seja, essa determinação já preenche uma grande falha da norma ASTM.

Os perfis para as verificações desta norma devem possuir pelo menos 160 m de comprimento e suas medidas devem ser efetuadas pelo menos a cada 12 cm.

Logo depois de tratar dos requisitos acima mencionados para a obtenção de perfis longitudinais, a norma PP 49, em seu item 8.3.1 menciona que perfilômetros inerciais de alta velocidade devem ser testados nas velocidades limites informadas pelo fabricante, o que também é uma inovação importante, pois visa verificar se o equipamento realmente produz bons resultados nas velocidades nas quais ele pode ser operado. O ponto fraco deste item da norma é que ele não é tão claro quanto poderia ser. Nem mesmo um pedido de esclarecimento ao professor Steve Karamihas da Universidade de Michigan, nos EUA, conseguiu dar sentido para tal provisão.

Para a verificação de repetitividade, devem ser usadas 10 medições de cada perfil, obtidas conforme as instruções acima. A média dos desvios padrão ponto a ponto do perfil deve ser menor que 0,889 mm, o que é um limite maior do que o da norma ASTM.

Para o teste de exatidão essa norma prevê perfis com os mesmos comprimento e espaçamento indicados acima. Ela expressamente permite o uso de perfilômetros como o Dipstick e o *Walking Profiler*, desde que tais medidas sejam verificadas com nível e mira. Recomenda que o perfil de referência seja o perfil médio de três medições. Quanto ao perfil a ser verificado, recomenda o perfil médio de dez medições com o perfilômetro. A norma trata de sincronização de perfis para ajustar o espaçamento entre os pontos, recomenda a filtragem de ambos os perfis com os mesmos parâmetros e introduz uma inovação.

Para a comparação entre perfil padrão e perfil do perfilômetro, solicita que seja feita a média tanto das diferenças relativas ponto a ponto, como também das diferenças

absolutas, o que representa uma inovação em relação a ASTM. Os limites para tais médias são: $\pm 0,508$ mm para a média das diferenças relativas e 1,525 mm para a média das diferenças absolutas. Na comparação com a norma ASTM, que só tem o critério da média das diferenças absolutas, esta norma AASTHO também é um pouco menos exigente.

A utilidade da média das diferenças relativas, segundo a própria norma, está na determinação da tendência das medidas do perfilômetro em análise. Como essa medida pode ser negativa ou positiva, o avaliador terá como resultado desta média a tendência do perfilômetro em subestimar ou sobreestimar os valores das elevações do perfil.

Complementarmente, a norma AASTHO ainda inclui uma verificação da repetitividade e exatidão do equipamento quanto ao valor do IRI medido. Para verificar esta repetitividade, deve ser calculado o IRI para os mesmos dez perfis medidos com o perfilômetro em cada seção, e em seguida determinado o desvio padrão. Tal desvio deve ser menor que 0,047 m/km.

Para o teste de exatidão do IRI, deve ser comparada a média dos IRIs determinada a partir dos perfis de referência não filtrados, com a média do IRI das 10 medições com o perfilômetro. A diferença absoluta deve ser menor que 0,095 m/km.

Como se pode perceber, a norma AASHTO PP 49-03, tem melhorias importantes em relação à ASTM no que concerne à verificação de perfilômetros, melhorias estas que diminuem a chance de perfilômetros que produzam resultados muito diferentes entre si, ou até errados, de serem classificados como bons.

Os principais pontos positivos dela são: determinar o uso de dois segmentos com IRIs dentro de faixas pré-estabelecidas; a menção de testes em mais de uma velocidade; a verificação adicional das diferenças relativas no teste de exatidão dos perfis; e a comparação tanto dos resultados de perfis quanto do IRI.

Uma crítica que pode ser feita sobre a comparação somente de um índice de irregularidade para a verificação de perfilômetros diz respeito a eventuais erros na determinação dos perfis que podem eventualmente ser compensados com outros erros em sentido oposto. Isso pode levar, em tese, a um valor de índice de

irregularidade coincidentemente próximo ao valor determinado, a partir de um perfil de referência – não é o caso aqui, pois a norma também compara perfis.

Enfim, muito embora ainda existam alguns dos graves problemas mencionados para a ASTM, como por exemplo, a preocupação desbalanceada com grandes comprimentos de onda em detrimento dos pequenos comprimentos de onda em ambas as comparações que envolvem os perfis, a norma AASHTO PP 49-03 é melhor que a norma ASTM E 950-98.

Para finalizar a análise crítica das normas que tratam da verificação do desempenho de perfilômetros inerciais, serão mencionadas ainda as principais características de duas normas estaduais norte-americanas.

A primeira é a norma MTN 730-02, elaborada pelo departamento de transportes do estado de Michigan (EUA). Esta norma estabelece dois métodos de verificação de repetitividade e exatidão, um que leva em conta o perfil e outro que leva em conta o resultado do IRI.

O primeiro, bastante criativo e pouco usual, estabelece que sejam medidos 10 perfis com 160 metros de comprimento cada um. Depois, solicita que os resultados dos perfis obtidos sejam convertidos para perfis que saíam de medições com um Perfilógrafo Califórnia. Em um dos novos perfis devem ser identificadas 15 saliências ou reentrâncias. O método prescreve que sejam medidas as alturas dessas mesmas saliências ou reentrâncias em todos os 10 perfis. Calcula-se então o desvio padrão de todas as alturas e determina-se a média de todos os desvios. Esta média deve ser menor que 2,5 mm – este é o teste de repetitividade.

Para o teste de exatidão, as mesmas 15 saliências ou reentrâncias devem ser medidas em um perfil de referência determinado com nível e mira, que foi convertido para um perfil do Perfilógrafo Califórnia. Determinam-se então as diferenças absolutas entre as alturas das saliências ou reentrâncias entre o perfil de referência e o perfil médio das 10 medições. A média das diferenças absolutas deve ser menor que 2,5 mm.

Em relação aos resultados do IRI, o teste é similar ao estabelecido pela AASHTO, já descrito. Para a repetitividade, determina-se o IRI das 10 medições e em seguida a

média e o desvio padrão dos IRIs. O desvio padrão deve ser menor que 0,05 m/km. Para a exatidão, determina-se a diferença absoluta entre o IRI médio das 10 medições e o IRI do perfil medido com nível e mira. Essa diferença deve ser menor do que 0,2 m/km. O primeiro parâmetro é praticamente o mesmo da AASHTO, enquanto que o parâmetro de exatidão é duas vezes mais tolerante nesta norma de Michigan.

Embora a verificação dos perfis determinada por essa norma seja criativa, ela não parece adequada aos fins a que se propõe, pois além de necessitar de uma conversão de perfil – que pode ser entendida neste caso como uma filtragem para padronizar os perfis, ela tem um forte fator subjetivo, pois é o executante que escolhe as saliências ou reentrâncias no perfil para proceder as comparações.

Quanto à verificação em relação ao IRI, embora a norma não descreva um procedimento detalhado para a obtenção do perfil padrão, os parâmetros são parecidos com aqueles da norma AASHTO.

A segunda norma estadual norte-americana a ser analisada é a do departamento de transporte do Texas. Trata-se da norma Tex-1001-S. Os procedimentos de verificação de exatidão e repetitividade previstos por essa norma são muito parecidos com aqueles da norma AASHTO PP 49-03, sendo assim, para evitar a repetição, serão salientadas apenas as diferenças entre elas.

O comprimento dos trechos a serem usados nas verificações é o mesmo, cerca de 160 metros, mas o espaçamento mínimo entre medidas do perfil é maior na norma do Texas: 150 mm, aproximadamente. A norma do Texas também estabelece que os testes devam ser executados em 2 seções diferentes, uma com baixa e outra com irregularidade média, tal qual a AASHTO. A diferença entre as duas normas neste aspecto é que a norma do Texas não estabelece explicitamente uma faixa de valores de IRI para os dois tipos de seção.

No que diz respeito à filtragem dos perfis, há uma diferença também. Enquanto a norma AASHTO determina a filtragem dos comprimentos de onda maiores que 91,4 m, a norma do Texas determina a filtragem a partir dos comprimentos de onda de 61 m.

Os parâmetros e método para a comparação de perfis tanto para repetitividade quanto para exatidão são os mesmos que aqueles da norma AASHTO.

Quanto à verificação em relação ao IRI, o método é o mesmo da norma AASHTO, assim como o valor limite para a classificação do perfilômetro no teste de repetitividade, que é de 0,047 m/km. Por sua vez, o valor máximo de referência para o teste de exatidão do IRI é o dobro na norma do Texas, ou seja, nesta são aceitos como bons os resultados menores que 0,19 m/km.

A conclusão geral que pode ser extraída da análise do quesito verificação de perfilômetros nestas quatro normas é que mesmo a melhor delas, a AASHTO PP 49-03, apresenta falhas importantes que podem ser melhoradas para que se evite condenar erroneamente algum equipamento que funcione adequadamente.

Felizmente já foi desenvolvido um método alternativo de comparação de perfis que não incorre nos inconvenientes dos métodos das normas ASTM, AASHTO, de Michigan e do Texas. Esse método, chamado de “*cross correlation*”, foi explorado e justificado por Karamihas (2002).

Tal método é explicado e testado experimentalmente no item 4.1.5.

4.1.2 O teste de balanço e o que pode ser observado com ele

Como foi descrito no Capítulo 2, o teste de balanço de um perfilômetro, conhecido nas normas em inglês por “*bounce test*”, é uma maneira simples e rápida de se testar o funcionamento de algumas partes do equipamento de uma só vez e por isso, sua execução é recomendada, antes de levantamentos com perfilômetros.

O teste de balanço é realizado com o equipamento devidamente montado no veículo, que deve estar parado. Sob os lasers normalmente coloca-se uma superfície lisa para evitar qualquer efeito da textura do pavimento e para realizá-lo normalmente ativa-se um *software* específico ou uma função determinada no *software* de coleta de dados, que permite o funcionamento do sistema com o veículo parado.

Passa-se então a balançar verticalmente o veículo, fazendo sua suspensão trabalhar por alguns segundos, enquanto o sistema grava os dados normalmente, como se o veículo estivesse deslocando-se.

Em outras palavras, trata-se de uma coleta de dados normal em que é feita uma simulação eletrônica do hodômetro do equipamento, ou seja, simula-se que o veículo esteja realmente se deslocando a uma certa velocidade e a partir daí a coleta de dados é realizada como em uma situação normal de levantamento.

Este teste permite que se verifique de uma só vez o funcionamento dos módulos laser, dos acelerômetros e do *software* que controla o sistema, pois um teste de balanço correto não gerará resultados bons se algum destes três componentes estiver com seu funcionamento ou calibração comprometidos.

Este teste não sofre a influência relativa à limitação de velocidade de operação de perfilômetros, pois o software simula internamente uma velocidade adequada a seu uso, enquanto o balanço forçado do veículo representa eventuais irregularidades no pavimento.

Dentre as quatro normas analisadas no item anterior, apenas a norma do estado do Texas não inclui o teste de balanço entre os procedimentos para verificação rápida de um perfilômetro. Abaixo estão dispostas as especificações desse teste para as outras três normas e para uma pesquisa que tratou do tema.

De acordo com a norma ASTM E 950-98, um perfilômetro estaria validado se as diferenças entre as amplitudes do perfil gerado durante o processo de balanço forem menores que 1% das amplitudes nas quais o veículo foi balançado. Por exemplo, para um balanço que moveu o veículo 40 mm para baixo e 40 mm para cima, seria aceitável no perfil gerado pelo perfilômetro amplitudes menores do que 0,4 mm.

Normalmente, antes da execução de um teste de balanço, os módulos laser devem ter sido checados com blocos de altura padrão. Sendo assim, poder-se-ia partir do princípio de que os próprios módulos laser estariam medindo as amplitudes corretas do deslocamento do veículo durante o teste de balanço, assim, para se executar a verificação da norma bastaria subtrair, ponto a ponto coletado, o valor registrado pelo módulo laser do valor do deslocamento vertical obtido pelas integrações

sucessivas da aceleração vertical. Esta diferença absoluta deve ser menor do que 1% do valor medido pelo módulo laser.

A norma do estado do Michigan, MTN 730-02, estabelece exatamente o mesmo critério da ASTM, ou seja, a diferença máxima de 1% entre as amplitudes do balanço e o perfil registrado pelo perfilômetro. Adicionalmente essa norma solicita que a amplitude do balanço do veículo seja registrada em papel, ou seja, com algum dispositivo mecânico ligado à carroceria do veículo que possa marcar independentemente do perfilômetro qual foi a amplitude dos movimentos desenvolvidos pela carroceria. Esta norma ainda menciona que deve ser executado também o teste de balanço previsto pelo fabricante do equipamento e que o perfilômetro deve passar em ambos os testes.

A norma AASHTO PP 49-03 usa um critério diferente das anteriores. Ao invés de comparar as amplitudes, essa norma prescreve a verificação através do cálculo do IRI. O veículo deve ser balançado, como nos demais procedimentos, enquanto o sistema deve registrar o perfil que, em tese, deveria ser um perfil plano ou muito próximo disso, como se pode perceber pelo limite de 1% estabelecido pelas normas anteriores.

Neste caso, a norma prevê que deve ser calculado o IRI do perfil coletado durante o período em que o veículo tinha sido balançado. O valor do IRI deve ser muito próximo de zero, levando em conta que a superfície para onde o laser está apontado é lisa e não está se movimentando. Como naturalmente existem alguns ruídos de medição, é aceito como bom um IRI máximo de 0,095 m/km.

A pesquisa do FHWA-LTPP Technical Support Services Contractor (2004) apresenta um critério próprio para o teste de balanço que é bastante interessante. Além de prescrever o teste de balanço nos moldes dos anteriores, essa pesquisa prescreve também um teste estático.

Em síntese, o operador deve registrar um perfil com o veículo totalmente parado – de preferência inclusive com o motor desligado e em ambiente fechado para evitar efeito de ventos, e em seguida registrar outro perfil com o veículo sendo balançado.

Em ambos os casos o documento estabelece que seja calculado o IRI tal qual a norma da AASHTO. Os limites estabelecidos de IRI são: 0,08 m/km para o teste estático e 0,10 m/km para a diferença entre os valores de IRI determinados pelos testes dinâmico e estático. Trata-se de um critério mais permissível que aquele da norma AASHTO, entretanto, com a verificação estática ele aumenta o nível de informação a respeito do equipamento, o que pode ser útil na identificação de problemas.

O teste estático, se realizado sem qualquer movimento no veículo, representa apenas os ruídos internos das medições dos sensores do sistema e a eficácia dos filtros incluídos no *software*, enquanto o teste dinâmico verifica se realmente está havendo a compensação correta dos acelerômetros para o movimento da carroceria, levando-se em conta já ter sido executado um teste prévio de verificação dos medidores laser.

A conclusão parcial a que se pode chegar a respeito do teste de balanço é que ele realmente é uma ferramenta simples e útil para diagnóstico da capacidade básica de um perfilômetro em realizar medições, sendo que existem pelo menos duas formas comuns de executá-lo: através do cálculo de um índice ou através da simples comparação entre amplitude movimentada e amplitude gerada no perfil resultante.

Cabe uma análise a respeito dos diferentes métodos de execução deste método de verificação rápida de perfilômetros.

Os dois últimos procedimentos relatados, que apregoam o cálculo do IRI ao invés de uma comparação entre a amplitude do balanço e a amplitude do perfil gerado, são aparentemente mais práticos que os anteriores, mas podem ser considerados um pouco pior que eles, pois nem sempre os resultados de um perfilômetro serão usados para o cálculo de um índice específico de irregularidade longitudinal. Como o IRI é um filtro para o perfil, seu cálculo pode eventualmente deixar de perceber alguma deficiência do sistema.

Um ponto que é de suma importância para quando essa verificação for realizada mediante o cálculo de um índice de irregularidade, como prescrevem as duas últimas fontes citadas, diz respeito à velocidade de simulação do veículo durante a execução do balanço. Conforme foi mencionado no início deste item, um teste de

balanço implica necessariamente em simular via software ou mesmo girando-se o hodômetro em algum sistema motorizado, o deslocamento do veículo.

É fácil perceber a importância da velocidade simulada para o teste de balanço no caso da verificação do resultado através de algum índice de irregularidade. Levando-se em conta que ao balançar um veículo uma pessoa média não consegue mudar muito a frequência de oscilação normal dele, pois ela é limitada pelas características da suspensão, se a velocidade de deslocamento simulada no equipamento for lenta, digamos 35 km/h, a oscilação provocada representará apenas comprimentos de onda mais curtos de um perfil real; enquanto que se a velocidade simulada no veículo for muito rápida, digamos 110 km/h, a mesma oscilação representará apenas comprimentos de onda mais longos.

Dependendo das condições e das características do equipamento, seria possível em tese, que ele fosse aprovado em uma velocidade de simulação e reprovado em outra. Para o IRI, levando-se em conta as diversas informações bibliográficas existentes, um exemplo numérico desse efeito pode ser pensado de forma rápida.

Figura 4.1 – Gráfico que representa o ganho embutido no índice IRI para os diversos comprimentos de onda. Fonte: Karamihas (2002).

Considerando uma frequência comum para a oscilação de uma suspensão veicular seja 1,5 Hz e verificando no gráfico da figura 4.1 que o maior ganho para do cálculo

do IRI seja para os comprimentos de onda de 2 metros, a velocidade mais crítica para simulação no teste de balanço seria: $2 / (1 / 1,5) \times 3,6 = 10,8 \text{ km/h}$.

Supondo que em um determinado teste de balanço o veículo tenha sido movimentado 50 mm para cima e 50 mm para baixo e tenha gerado como saída do perfilômetro um perfil com 1% dessa elevação, ou seja, 0,5 mm para cima e para baixo, de modo que ele fosse aprovado no limite do teste de balanço da ASTM. O valor do IRI determinado para tal perfil de saída, com velocidade de simulação igual a 10,8 km/h, seria dado pelo ganho máximo (4,8), multiplicado pela amplitude do perfil de saída (0,5 mm), multiplicado por (0,64), que representa a amplitude média de uma senóide, segundo Karamihas (2002). O resultado do IRI é 1,536 m/km, ou seja, muito, mas muito maior, que o limite estabelecido pela norma AASHTO.

Suponha-se agora que a velocidade simulada no teste seja 120 km/h. Neste caso o cálculo revela que o comprimento de onda provocado pelo balanço de 1,5 Hz será de 22,2 m. Pelo gráfico, fica até difícil estimar qual é o ganho para esse comprimento de onda, mas vamos supor que seja 0,21. O resultado do IRI seria então $0,5 \times 0,64 \times 0,21 = 0,0672 \text{ m/km}$.

Ou seja, com esse resultado o equipamento seria aprovado com tranquilidade pelo critério da norma da AASHTO. Fica evidente assim a deficiência das normas que se baseiam no resultado de um índice, sem apresentar uma velocidade definida de simulação.

Caso realmente se deseje basear um teste de balanço em um índice de irregularidade, o melhor a se fazer é determinar qual a faixa de velocidade mais adequada para a simulação do deslocamento do veículo, tendo em vista a sensibilidade do índice de irregularidade e a frequência de oscilação da suspensão do veículo – tarefa esta que não é muito prática.

Vale frisar que a velocidade de simulação do veículo só importa quando o resultado do teste de balanço é calculado por meio de algum índice de irregularidade. Quando o teste é feito com base na comparação de amplitudes, como especificam as normas ASTM E 950-98 e MTN 730-02, a velocidade simulada não importa, desde que ela esteja dentro da velocidade operacional indicada pelo fabricante do equipamento.

Uma última crítica em relação aos documentos analisados diz respeito à falta de parâmetros para a execução desse teste. Nenhum dos documentos mencionados estabeleceu um tempo mínimo para o teste, o número de balançadas, tampouco uma amplitude mínima para os balanços. A falta de tal parametrização, embora não inviabilize o teste, pode diminuir seu significado na medida em que poderia ser possível “facilitar” a aprovação de um equipamento.

Por fim, falta ao teste prescrito pela norma ASTM a fixação de um valor fixo de ruído aceito pelo teste, pois se o veículo for balançado apenas 5 mm, o próprio ruído do sistema será provavelmente maior que 1%, o que poderia causar uma reprovação indevida do equipamento.

Com base na análise acima, conclui-se que são preferíveis testes de balanço validados pelo critério da amplitude, por serem mais abrangentes do que àqueles realizados mediante o cálculo de algum índice de irregularidade.

Visando elaborar e verificar no equipamento desenvolvido um teste padronizado de balanço que fosse ao mesmo tempo prático, rápido e representativo para poder compor uma norma, foram imaginadas as seguintes condições:

- Veículo desligado, estacionado em superfície plana, livre de vibrações, de preferência sem ocupantes, posicionado em ambiente livre de ventos.
- Sensores laser apontados para uma superfície lisa, não reflexiva, não brilhante, de preferência com tonalidade similar ao pavimento que se irá medir.
- Teste estático (opcional) com duração aproximada de 30 segundos.
- Teste dinâmico também com duração aproximada de 30 segundos, tempo em que o veículo deve ser pressionado para baixo em pelo menos uma de suas extremidades mais próxima a um módulo laser com acelerômetro, por pelo menos 10 vezes, sendo que a amplitude sugerida para cada balançada deve ser de 30 mm.
- Caso o equipamento a ser testado não possua previsão via *software* para a realização dos testes, o hodômetro pode normalmente ser girado

manualmente. Isso pode ser feito levantando-se a roda do veículo que tem o hodômetro instalado e girando-se tal roda, ou mediante a retirada do hodômetro e o giro de seu eixo com a mão ou com o auxílio de uma furadeira manual, por exemplo.

- O perfil de saída usado na validação dos resultados do perfilômetro, deve ser aquele já com o cálculo da média móvel efetuada. Sugere-se o uso de média móvel com 150 mm de comprimento.
- Critérios de validação:
 - Para o teste estático, o perfil resultante deve ter amplitudes menores ou iguais a 0,1 mm, ou seja, a própria resolução dos módulos laser.
 - Para o teste dinâmico, o perfil resultante deve ter amplitudes menores ou iguais a 1% da amplitude em que o veículo foi balançado ou a 0,1 mm, o que for maior.

No gráfico da figura 4.2 estão dispostos os resultados de um teste de balanço realizado com a última versão do equipamento desenvolvido no âmbito desta pesquisa.

No mencionado gráfico são apresentadas quatro informações diferentes. As linhas de cor azul escuro e magenta, representam a oscilação do veículo efetivamente medida via acelerômetro e através do módulo laser, com base na escala à esquerda do gráfico. Praticamente não se vê a linha azul escuro, pois a linha magenta está sobreposta a ela, o que demonstra a boa capacidade do equipamento em compensar as oscilações da suspensão.

A linha vermelha, representa justamente a diferença entre os valores do acelerômetro e do módulo laser. Como este valor é de magnitude muito menor que o valor da oscilação, ele é representado no gráfico com a escala que está do lado direito do gráfico. Essa linha representa portanto o perfil longitudinal medido pelo perfilômetro durante o teste de balanço.

Ainda com base na escala à direita do gráfico existe a linha azul clara, que representa o perfil longitudinal obtido resultante do teste estático, que no caso, foi

realizado em um local onde houve a incidência de vento, que mesmo assim, não prejudicou o resultado.

Figura 4.2 – Gráfico que representa os resultados do teste de balanço estático e dinâmico acompanhado da amplitude de balanço.

A análise da figura 4.2 evidencia que o perfilômetro atende os critérios da norma ASTM e também o critério proposto nesta pesquisa, que é um pouco mais completo.

Quando o equipamento apresentar resultados de teste de balanço muito diferentes do esperado, provavelmente existe alguma parte do equipamento que não está funcionando bem. Nesses caso pode ser útil uma limpeza nas lentes dos módulos laser a verificação da fixação do equipamento como um todo e a realização de um teste estático para ver se mesmo no teste estático o equipamento está sendo reprovado. Caso seja aprovado no teste estático, o teste dinâmico deve ser feito para verificar se os procedimentos de limpeza e verificação surtiram efeito positivo.

Quando o equipamento for aprovado no teste de balanço, o teste estático não precisa necessariamente ser executado.

Pequenas diferenças no teste de balanço podem ser devidas à calibração dos acelerômetros, à calibração dos módulos laser ou ao fato da fixação de tais sensores

não estar bem nivelada em relação ao pavimento. Caso tais diferenças pequenas ocorram, é importante verificar todas essas possibilidades e testar novamente.

4.1.3 As diferenças causadas por medidas de elevação dos perfis com diferentes resoluções

De acordo com as observações registradas no item 3.3 deste trabalho, verificou-se, ainda que preliminarmente, a influência que exerce a resolução do perfilômetro utilizado no valor do quociente de irregularidade (QI).

Dada a diferença que tal influência pode representar em uma verificação de perfilômetro inercial, procurou-se investigar mais a fundo esta relação, não só para o QI, mas também para o IRI, desta vez levando em conta uma faixa de valores de irregularidade abrangente. Antes da experiência, entretanto, cabe deixar registrada uma pergunta a ser respondida mais adiante.

A norma brasileira DNER-ES 173/86 que trata da calibração dos medidores de irregularidade do tipo resposta através de bases cujas medidas do perfil são obtidas por nível e mira, preconiza o uso de perfis com elevações aproximadas para milímetros.

Seguramente, para os medidores do tipo resposta o método preconizado pelo antigo DNER, hoje DNIT, é suficientemente bom, pois os medidores do tipo resposta têm limitações muito mais sérias que esta. Tendo em vista a recente conscientização brasileira de que os medidores do tipo resposta podem não gerar medidas confiáveis e repetíveis o bastante, motivo este que tem levado tanto concessionárias de rodovias, quanto departamentos de estradas de rodagem a utilizar cada vez mais os perfilômetros inerciais, a questão que se coloca é se a resolução do nível e mira presente na norma do DNER é adequada para se verificar uma medida obtida com um perfilômetro inercial.

Para responder à pergunta é preciso determinar qual é a influência no resultado da irregularidade determinado a partir de perfis com resolução de 0,1 mm e também determinado a partir dos mesmos perfis com medidas de elevação arredondadas

para milímetros. É importante se alertar que para este estudo não importa muito se tais perfis espelham exatamente o perfil de campo, pois a irregularidade de cada perfil será comparada com a irregularidade do mesmo perfil, apenas com as elevações “arredondadas” – trata-se, portanto, de uma análise relativa.

Para essa verificação, selecionaram-se 37 segmentos de rodovias paulistas diversas com 200 metros de comprimento cada um. Todos os segmentos tiveram seus perfis determinados com o perfilômetro inercial em ambas as trilhas de roda. Como neste caso não era importante a medida feita em cada uma das trilhas de roda, foi usada somente a medida sobre uma delas. O perfilômetro usado gerou perfis que têm 0,1 mm de resolução nas elevações e frequência de gravação de dados de aproximadamente 2000 medidas por segundo.

De acordo com norma da calibração dos medidores do tipo resposta, foram gerados a partir dos perfis coletados, perfis que têm uma medida a cada 50 cm. Para evitar o efeito da macrotextura, cada ponto representado no novo perfil calculado representou a elevação média dos pontos dos 75 mm anteriores e dos 75 mm posteriores a ele. Com isso, chegou-se a 37 perfis de 200 metros de comprimento, que têm medida de elevação a cada 50 cm. Os perfis não foram escolhidos aleatoriamente, ao contrário, foram escolhidos segmentos com QIs variando de -0,3 cont/km (um dos menores valores já medidos com o equipamento usado) até 42,7 cont/km, vide tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Irregularidade QI (cont/km) das seções utilizadas.

Faixa de QI (cont/km)	Número de Seções
-0,3 a 0,4	2
1,9 a 2,2	5
4,3 a 5,1	5
9,4 a 12,7	5
13,7 a 14,9	5
18,9 a 20,3	5
28,0 a 30,4	5
38,6 a 42,7	5

A partir desses perfis originais foram calculados os índices QI e IRI, usando-se os modelos normalizados pelo DNER-ES 173/86 e pela ASTM E 1926-98. Em seguida

as medidas de elevação dos perfis foram arredondadas de décimos de milímetros para milímetros e os cálculos foram repetidos. Com isso foi possível determinar as diferenças nos resultados, apenas diminuindo a resolução do perfil. Os resultados dos cálculos estão dispostos tanto na tabela 4.2, quanto nas figuras 4.3 e 4.4, para maior facilidade de visualização.

Figura 4.3 – Diferenças entre valores de QIs (cont/km), calculados sobre as mesmas seções, alterando-se somente a resolução das medidas de elevação do perfil.

Figura 4.4 – Diferenças entre valores de IRIs (m/km), calculados sobre as mesmas seções, alterando-se somente a resolução das medidas de elevação do perfil.

Tabela 4.2 – Resultados dos Cálculos de QI e IRI a partir dos perfis originais e arredondados.

Seção	QI Perfil 0,1 mm	QI Perfil 1 mm	Diferença entre QIs	% de Aumento (QI) corrigido	IRI Perfil 0,1 mm	IRI Perfil 1 mm	Diferença entre IRIs	% de Aumento (IRI)
1	-0.3	2.2	2.5	30%	0.60	0.79	0.19	32%
2	0.4	2.0	1.6	18%	0.64	0.81	0.17	27%
3	1.9	3.8	1.9	18%	0.81	0.96	0.15	18%
4	1.9	4.2	2.3	22%	0.72	0.88	0.17	23%
5	2.0	4.2	2.2	21%	0.81	0.96	0.15	19%
6	2.1	3.9	1.8	17%	0.72	0.91	0.19	26%
7	2.2	4.4	2.2	20%	0.78	0.94	0.16	20%
8	4.3	6.1	1.8	14%	0.89	1.05	0.16	18%
9	4.6	6.7	2.1	16%	1.08	1.22	0.14	13%
10	4.6	6.4	1.8	14%	1.09	1.25	0.15	14%
11	5.0	6.8	1.8	13%	1.05	1.18	0.13	12%
12	5.1	6.9	1.8	13%	1.02	1.21	0.20	19%
13	9.4	10.1	0.7	4%	1.29	1.34	0.04	3%
14	9.8	10.7	0.9	5%	1.28	1.38	0.10	8%
15	9.9	10.4	0.5	3%	1.30	1.37	0.06	5%
16	10.0	11.3	1.3	7%	1.34	1.45	0.11	8%
17	12.7	13.9	1.2	6%	1.31	1.48	0.18	14%
18	13.7	14.7	1.0	4%	1.54	1.66	0.12	8%
19	14.4	15.5	1.1	5%	1.38	1.50	0.12	9%
20	14.8	14.8	0.0	0%	1.64	1.73	0.09	5%
21	14.8	15.7	0.9	4%	1.66	1.72	0.06	4%
22	14.9	16.0	1.1	5%	1.55	1.67	0.12	8%
23	18.9	19.5	0.6	2%	2.03	2.14	0.12	6%
24	18.9	19.7	0.8	3%	1.87	1.95	0.09	5%
25	19.0	19.6	0.6	2%	1.89	1.97	0.08	4%
26	19.6	20.4	0.8	3%	1.68	1.77	0.09	5%
27	20.3	20.5	0.2	1%	1.91	2.02	0.11	6%
28	28.0	28.6	0.6	2%	2.26	2.28	0.02	1%
29	29.6	30.4	0.8	2%	2.64	2.71	0.08	3%
30	29.7	30.1	0.4	1%	2.32	2.42	0.10	4%
31	30.2	30.7	0.5	1%	2.32	2.35	0.03	1%
32	30.4	31.2	0.8	2%	2.72	2.77	0.05	2%
33	38.6	38.7	0.1	0%	2.98	3.04	0.06	2%
34	39.4	39.9	0.5	1%	2.68	2.72	0.03	1%
35	40.0	40.2	0.2	0%	3.24	3.30	0.06	2%
36	41.6	42.2	0.6	1%	2.72	2.83	0.11	4%
37	42.7	42.8	0.1	0%	3.02	3.09	0.07	2%

Na tabela 4.2, para que se possa calcular de forma correta a variação percentual do QI, é necessário acrescentar 8,54 aos dois valores antes do cálculo. Isto é indispensável, pois mesmo considerando que os índices se correlacionem de forma

linear, um perfil livre de imperfeições gera um $QI = -8,54$ cont/km e um $IRI = 0$ m/km. Se isto não fosse feito, o resultado do cálculo da simples diferença percentual entre os dois valores de QI seria muito diferente e equivocado.

Pela análise dos resultados, são relativamente grandes as diferenças percentuais apresentadas pelo QI e IRI , para os valores menores de irregularidade, principalmente para aqueles em que o QI é menor do que 10 cont/km.

Sendo assim, sempre que se for verificar o funcionamento de um perfilômetro que utilize elevações em décimos de milímetro no cálculo dos índices de irregularidade é preciso ter em mente o quanto da diferença observada entre os valores de índices de irregularidade obtidos a partir dos perfis estabelecidos com cada equipamento poderia ser atribuído somente às diferentes resoluções dos equipamentos, se este for o caso.

Evidenciou-se que tal diferença é mais pronunciada nas irregularidades baixas devido ao erro adicionado pelo arredondamento feito no aparelho, podendo atingir o percentual de 30% em casos extremos. Esse erro apenas depende de sua resolução e quanto menor a irregularidade, mais esse “ruído” se torna significativo em cima do perfil (a razão ruído/sinal aumenta).

A resposta objetiva da pergunta formulada no início deste item é negativa especialmente quando a comparação for realizada em trechos de baixa irregularidade, por exemplo, com $QI < 20$ cont/km ou $IRI < 2$ m/km. Nestes casos fica a recomendação de uso de equipamentos com resolução de medição de 0,1 mm, ou em outras palavras, resolução de medição igual à do perfilômetro sob análise.

Quando não for possível o uso de equipamentos capazes de gerar perfis com a mesma resolução do perfilômetro inercial, pode-se tentar estimar, por meio de uma simulação análoga à que foi realizada neste experimento, um fator de correção aproximado para determinado perfil. Não convém a utilização dos resultados da tabela 4.2 para eventuais correções, uma vez que este foi um estudo exemplificativo, pois o experimento realizado não contou com uma amostra significativa, nem fez uso de perfis medidos estaticamente, por essas razões não visou a determinação de fatores de correção. Não foi este o objetivo.

Uma outra solução que pode ser idealizada para quando faltar um equipamento com resolução igual ao do perfilômetro utilizado seria a realização da comparação em trechos com níveis de irregularidade acima dos limites exemplificados, pois assim, naturalmente a diferença devido a este fator tenderia a ser menor.

Por outro lado, não é recomendável o uso de trechos muito deteriorados para se realizar verificações de perfilômetros, pois normalmente em trechos deteriorados, pequenas variações transversais do perfilômetro durante sua medição podem gerar diferenças maiores. O item 4.1.4, a seguir, trata das recomendações para a obtenção de perfis para fins de verificação de perfilômetros inerciais.

4.1.4 A obtenção de perfis longitudinais de referência para verificação de perfilômetros inerciais

Trata este item de pontuar com a experiência que foi obtida durante o desenvolvimento deste trabalho, agregada aos estudos de bases mais sólidas encontrados na bibliografia disponível a respeito do tema, quais seriam as recomendações adequadas para a determinação de um perfil longitudinal de referência visando a verificação de perfilômetros inerciais a serem usados principalmente para a determinação do quociente de irregularidade (QI).

O subsídio desta pesquisa, que foi utilizado como base para as conclusões aqui apresentadas e justificadas, adveio de diversas tentativas realizadas ao longo de boa parte do tempo deste trabalho de se obter boas bases de referência para que se pudesse coletar dados tanto para a verificação do perfilômetro em suas diversas versões, como também para que se pudesse elaborar e testar um método para tal verificação, proposto no item 4.1.5.

As conclusões contidas neste item da pesquisa são de grande importância para qualquer técnico que trabalhe com avaliações de irregularidade longitudinal de pavimentos, seja ele dos quadros de um órgão governamental, agência reguladora, empresa de consultoria, empreiteira ou concessionária de rodovias.

Isto porque um técnico que lida com este tema, mais cedo ou mais tarde poderá se deparar com a tarefa de projetar ou “construir” uma base de referência para verificar um perfilômetro inercial, e pode ainda ser compelido a interpretar comparativamente os resultados emanados do perfilômetro, com os resultados da base, para no final julgar motivadamente se tal equipamento é adequado ou não ao uso a que se destina.

A escolha da base, o equipamento usado para medi-la e o método de medição podem influir grandemente nos resultados das avaliações de repetitividade e exatidão que foram mencionados no item 4.1.1 e também nos resultados da avaliação que será discutida no item 4.1.5.

A importância deste assunto foi aparentemente subestimada durante muito tempo pelos pesquisadores internacionais que já estudam os perfilômetros inerciais e seus resultados há anos. As principais evidências desta suspeita são as próprias normas que tratam do tema. Nenhuma delas dá a atenção devida à base de referência, embora todas elas façam uso de uma base de referência para a verificação dos perfilômetros.

Ademais, as duas melhores pesquisas a este respeito são também muito recentes e não estavam disponíveis nem quando a revisão bibliográfica desta pesquisa havia sido concluída. São elas: Karamihas (2005a) e Perera et al. (2006).

Levando-se em conta que bons perfilômetros inerciais podem tecnicamente produzir bons perfis longitudinais para cálculo dos índices de irregularidade mais comumente utilizados no setor rodoviário, é de se esperar que uma base que pretenda servir de referência para verificar tal equipamento tenha sido não só bem escolhida, como também medida de forma apropriada ao objetivo, com exatidão e confiabilidade. Usando-se uma referência inadequada, os resultados podem não ter credibilidade desejada.

Com base nas necessidades expostas e visando discutir mais detalhadamente o tema, a abordagem foi subdividida em quatro itens:

- a) As características recomendadas para o equipamento a ser usado;
- b) Escolha dos trechos e sua preparação;

- c) Realização da medição de campo;
- d) Processamento e compatibilização dos perfis.

O item “a” trata de sugerir quais as características que um equipamento ideal para se medir um perfil ou base de referência deve possuir.

Karamihas (2005a) fez um abrangente estudo sobre este assunto, considerando principalmente que o uso mais comum dos perfis longitudinais medidos com perfilômetros inerciais seria o cálculo do IRI, muito embora ele também tenha mencionado as características de outros índices de irregularidade usados nos EUA.

A pesquisa de Perera et al. (2006) foi mais pontual e buscou evidenciar quais são as limitações de se utilizar o equipamento Dipstick para medir um perfil longitudinal de referência visando a verificação de perfilômetros inerciais. Em tal trabalho, que também abordou outras fontes de erros deste tipo de comparação entre perfis, o índice de irregularidade focado foi somente o IRI.

Como os trabalhos mencionados são bastante abrangentes em apontar e/ou completar as fraquezas das normas norte-americanas para a escolha de um equipamento adequado a produzir um perfil de referência voltado a verificação de perfilômetros cujo uso principal é o cálculo do IRI, tais análises não serão reproduzidas aqui. Sendo assim, recomenda-se tais leituras aos interessados nesse índice.

No Brasil, como o índice normalizado é o QI, a análise deste quesito pode ser um pouco diferente, justamente pelo espaçamento entre os sucessivos pontos do perfil que devem ser levados em conta para o seu cálculo – que pode variar no caso do IRI.

Antes de focar especificamente as características que um equipamento a ser usado na medida de um perfil de referência deve ter, é importante recordar uma característica do quociente de irregularidade (QI).

Tendo em conta a norma técnica DNER ES-173, infere-se que no Brasil uma base de referência para verificação de um perfilômetro qualquer que pretenda servir ao cálculo do QI deva ser medida com espaçamento de 0,5 m.

Não é preciso afirmar que se trata de uma norma antiga, que não sofre revisão há muitos anos. Mesmo assim, por ser a única referência nacional e por estar em vigência, entende-se que ela deve ser levada em conta, mesmo que o contexto seja diferente daquele em que ela foi concebida.

Em termos do espaçamento entre os pontos do perfil usados para o cálculo do QI, tema discutido no item 4.3, foi concluído que é conveniente sua redução para 0,25 m, sendo assim esta proposta de verificação também levará em conta este espaçamento.

De volta às características que um medidor de perfil de referência deve ter, o primeiro item a ser firmado vem das conclusões do estudo do item anterior (4.1.3), ou seja, a sensibilidade da medida da elevação.

Como o objetivo é determinar um perfil que tenha características iguais ou melhores que um perfil obtido com perfilômetro inercial, a sensibilidade do equipamento deve ser melhor ou igual a 0,1 mm, que é a sensibilidade mínima da grande maioria dos perfilômetros inerciais.

Obviamente, o equipamento a ser usado deve estar calibrado em relação a um padrão com rastreabilidade metrológica, sendo que é recomendável que ele apresente erro de medição máximo de 0,1 mm na medida das elevações.

Em se tratando da medida do deslocamento longitudinal a ser realizada pelo equipamento que medirá o perfil de referência, deve-se seguir a recomendação das normas norte-americanas para perfilômetros, que inclusive coincide com a recomendação de Karamihas (2005a), ou seja, o erro apresentado pelo equipamento deve ser menor que 0,1%, sendo que tal verificação pode ser feita facilmente com uma trena calibrada em algum trecho preferencialmente com baixos índices de irregularidade.

O terceiro ponto a respeito do equipamento a ser usado para determinação de um perfil padrão para verificação de perfilômetros inerciais diz respeito à área de apoio do sensor de medição.

Como se sabe, perfilômetros inerciais baseados em laser normalmente medem o perfil através da medida em um único ponto para onde o laser foi direcionado no pavimento, o que torna este tipo de medida diferente da medida de um nível e mira.

No caso do nível e mira, por exemplo, a mira pode ter base de apoio com diferentes formatos, ou seja, pode representar a elevação média de uma amostra maior ou menor do pavimento. Isto pode representar uma diferença principalmente no sentido transversal, pois no sentido longitudinal os perfilômetros laser conseguem, de certa forma, compensar a diferença através da aplicação do filtro de média móvel.

O mesmo efeito acontece com equipamentos como o Dipstick, que por possuírem pés de apoio circulares, também representam a elevação média de uma área, neste caso circular.

Para o caso de um perfil que será usado para cálculo do QI, medido a cada 0,25 m, conforme é sugerido no item 4.3, seria possível fazer uso parcial das conclusões Karamihas (2005a). Este autor sugere que se efetue a medição do perfil de referência com base em uma área circular de 70 mm de diâmetro, pois segundo suas pesquisas, tal diâmetro conseguiria representar o efeito de “envelopamento” que o pneu exerce sobre os agregados subjacentes. O autor chega a mencionar que o ponto de apoio deveria ser de borracha, que quando submetida ao peso do equipamento usado, proporcionasse o mesmo envelopamento dos agregados que um pneu, muito embora ele também acredite que seja necessária mais pesquisa sobre esse tema.

A conclusão que se pode chegar para a recomendação da área de toque do equipamento no pavimento permanece como sendo uma área circular, de preferência com 70 mm de diâmetro, que, se for de borracha, não deve ter propriedades sujeitas a alteração pelo uso ou calor, sob pena de mudar de comportamento durante a medida de uma base.

O quarto e mais complexo ponto a respeito de requisitos para um equipamento capaz de determinar um perfil padrão é o espaçamento entre as medidas. As conclusões de Karamihas (2005a) são que o perfil deveria ser levantado continuamente, tendo em conta o ponto de apoio de 70 mm de diâmetro, ou seja, um ponto de medida seria colado ao ponto seguinte, sem saltar nenhum espaço.

Tecnicamente é uma ótima recomendação, especialmente para o cálculo do IRI, porém é muito pouco factível com os equipamentos disponíveis comercialmente hoje. Se fosse feito com nível e mira, uma base de 200 metros de comprimento teria, ao invés de 801 pontos (se levantada a cada 0,25 m), 2858 pontos. Embora difícil de executar, é provável que surjam em breve equipamentos automáticos ou semi-automáticos capazes de medir perfis quase que contínuos que atendam até com alguma folga todos os critérios apresentados por Karamihas (2005a).

Conforme já foi mencionado no item 2.8, um dos problemas de se efetuar quaisquer medidas de perfil com espaçamentos maiores que 7 cm entre os pontos do perfil é a possibilidade de ocorrência do efeito chamado de “*aliasing*”, ou seja, certos comprimentos de onda presentes no perfil, quando medidos em espaçamentos maiores, podem dar origem a falsos comprimentos de onda que seriam incluídos indevidamente no perfil medido e conseqüentemente no cálculo dos índices de irregularidade.

O segundo problema em se medir de forma descontínua, ou seja, em pontos espaçados é que o perfil obtido será uma amostra do perfil real, ou seja, perde-se informação que, na prática, pode contribuir com a irregularidade do pavimento.

No caso apenas da verificação de perfilômetros, isto se reflete na perda de informação dos resultados do equipamento que dizem respeito aos comprimentos de onda mais curtos que também podem afetar a dinâmica dos veículos e conseqüentemente os índices de irregularidade.

O erro de “*aliasing*” não é propriamente algo que ocasione um problema para uma comparação entre perfis de diferentes equipamentos, desde que eles possuam os mesmos espaçamentos e tenham seus pontos de medida bem alinhados.

Como fechamento deste quarto e último ponto, para o fim de se obter um ou mais perfis de referência visando verificar um perfilômetro inercial que será usado primordialmente para produzir perfis para o cálculo do QI, uma proposta razoável e factível diz respeito à capacidade do equipamento em efetuar a medida do perfil a cada 25 cm.

Para o caso do QI, desde que os perfis sejam bem alinhados para os fins de verificação, não seria necessário seguir a recomendação de Karamihas (2005a) de medição contínua do perfil de referência.

Por fim, o equipamento a ser usado deve apresentar características finais de exatidão e repetitividade melhores que o perfilômetro a ser verificado, considerando-se os mesmos métodos de verificação.

Em todos esses quesitos apresentados, acredita-se que bons equipamentos de nivelamento e também alguns equipamentos similares ao Dipstick seriam bons candidatos para a medição de perfis de referência visando a verificação de perfilômetros que tenham por fim o cálculo do QI.

Uma última observação importante a respeito desse tópico é que não basta equipamento adequado, sem pessoas devidamente treinadas a operá-lo. Portanto, um técnico qualificado deve operar o equipamento durante a medição de uma base de referência.

O item “b” da relação apresentada inicialmente, trata da escolha dos trechos onde serão definidos os perfis de referência e da sua preparação.

Para se verificar um perfilômetro inercial de forma minimamente adequada, seriam recomendáveis pelo menos duas bases de referência com valores de irregularidades diferentes, tal qual prescreve a norma AASHTO PP 49-03, já mencionada.

Para o caso brasileiro, levando-se em conta que a disponibilidade de trechos de pavimentos com irregularidades muito baixas é pequena, não seria adequado fazer uso de aproximações das faixas propostas pela norma americana citada acima. Tampouco seria adequado firmar faixas muito amplas ou valores de irregularidade muito altos, pois a preocupação em se ter uma boa exatidão da medida decresce com o aumento da irregularidade.

Sendo assim, são propostas duas faixas de irregularidade para os perfis de referência. A primeira para irregularidade baixa deve apresentar QI entre 5 e 25 contagens/km. A segunda, para irregularidade média, deve apresentar QI entre 30 e 50 contagens/km.

O comprimento das bases de referência mencionadas nas normas norte-americanas segue o padrão de unidades deles, geralmente conta com 160 metros e em alguns casos 320 metros aproximadamente. Nossa aproximação mais lógica é uma base com comprimento de 200 metros úteis. É preciso ressaltar que para comparações precisas de perfis longitudinais que envolvam processos de filtragem e de acerto do *offset* longitudinal, é preciso também medir o perfil de um certo trecho de pavimento anterior ao início da base e de um pequeno trecho posterior ao seu final. O método proposto no próximo item desta pesquisa faz uso de tais trechos adicionais.

Não basta determinar somente as faixas de QI das bases e seu comprimento, é preciso cuidar de outros aspectos que também são importantes na escolha dos trechos. A seguir estão mencionadas algumas dessas preocupações.

Deve haver espaço suficiente para aceleração e desaceleração do veículo, respectivamente antes e depois das bases, inclusive para a medição em alta velocidade.

Os trechos escolhidos não devem ter muita variação transversal da sua condição superficial, haja vista que um perfilômetro inercial trafega em velocidade e pode ser difícil passar precisamente na linha onde será medido o perfil de referência.

A presença de trincas, panelas, degraus e outros graves defeitos superficiais no trecho a ser medido também não são recomendáveis. Na presença de muitas trincas, por exemplo, a irregularidade medida com o perfilômetro laser poderá ser maior do que a irregularidade medida com um equipamento cujo sensor não seja pontual.

Auxilia nos trabalhos a escolha de trechos em tangente horizontal e vertical, vez que se torna mais simples para um perfilômetro manter-se alinhado. Outra preocupação a ser levada em conta é a possibilidade de fechamento do tráfego do trecho para que as leituras de referência e do perfilômetro possam ser feitas com segurança.

Quanto ao tipo do revestimento, recomenda-se escolher pavimentos com revestimentos similares àqueles que o perfilômetro irá medir após a verificação. Caso os trechos a serem medidos incluam pavimentos de concreto de cimento Portland com juntas transversais, recomenda-se também que se inclua na

comparação pelo menos um trecho de pavimento com juntas, assim será possível verificar se o equipamento trata de maneira adequada as juntas transversais.

Escolhidos os trechos, eles devem ser marcados, quando possível, com uma linha longitudinal visível sobre a qual o perfil deverá ser medido. Nesta linha, podem ser destacados os pontos a cada 25 cm, além do início e o fim, que devem ser bem claros. Pode-se optar por fazer uma base simples ou dupla (nas duas trilhas de roda).

Por economia de tempo e recursos, uma base simples é o bastante para esta verificação, haja vista que nela é possível verificar todos os medidores laser de um perfilômetro, bastando efetuar múltiplos passes em diferentes alinhamentos.

Deve-se evitar demarcar a base próxima de juntas longitudinais de pavimentos de concreto de cimento Portland e também próxima a emendas longitudinais construtivas de pavimentos com revestimento asfálticos.

Chega-se então ao item “c”, a realização das medidas de campo. Com o tráfego convenientemente segregado, deve-se executar preferencialmente no mesmo dia e em horários próximos as medições tanto com o equipamento de referência, quanto com o perfilômetro a ser verificado. Se não for possível a execução no mesmo dia, deve-se buscar fazê-lo no dia seguinte, no mesmo horário. Este requisito é útil nos casos em que a insolação possa alterar o perfil da superfície do pavimento, o que é mais comum nos pavimentos de concreto de cimento Portland.

Antes do início das medições é recomendável varrer o trecho para retirar quaisquer sujeiras ou agregados soltos que possam causar interferência nas medições.

O item “d”, último da relação apresentada, trata do processamento dos dados, mais especificamente da compatibilização dos perfis para que se possa proceder a comparação entre eles.

Como o assunto envolve não só o perfil de referência, como também o perfil obtido com o perfilômetro, ele será tratado no próximo item, dentro do método de correlação cruzada.

4.1.5 A verificação da repetitividade e exatidão das medidas de perfilômetros inerciais

No item 4.1.1 foi realizada uma análise crítica dos testes de repetitividade e exatidão das principais normas norte-americanas que tratam dos perfilômetros inerciais. A conclusão final da análise foi que todos os métodos propostos tinham problemas, alguns mais graves que outros, sendo que ao término da discussão foi revelada a existência de um método alternativo, devidamente verificado, que seria explicado e testado no presente item, tendo como referência um perfil obtido segundo as recomendações do item anterior.

O método ao qual se faz referência é chamado em inglês de “*cross correlation*”, expressão que pode ser traduzida simplesmente por correlação cruzada. Trata o método de correlacionar o perfil de referência com o perfil obtido por um perfilômetro inercial e apresentar como resultado um índice de concordância.

Há algumas referências bibliográficas sobre o tema, sendo que a mais explicativa e abrangente é, sem dúvida, Karamihas (2002), que menciona logo nas explicações iniciais tratar-se de uma técnica descrita por Bendat e Pierson, destinada à medição de atrasos entre sinais, à medição do grau de dependência entre dois sinais e/ou à recuperação de um sinal ruidoso.

O método foi adaptado para a comparação entre dois perfis longitudinais de pavimentos, normalmente quando se tem um deles como sendo o correto. Tal método permite detectar diferenças de alinhamento longitudinal entre os perfis e possibilita o cálculo de um “índice de concordância” (IC) máximo entre eles, que ocorre quando os perfis têm o melhor alinhamento longitudinal possível. Ele contempla também o acerto entre as diferenças de alinhamento vertical, que não são apresentadas em outros métodos.

O método tem a vantagem de poder ser usado em perfis filtrados para os comprimentos de onda que afetam determinado índice de irregularidade. Nessas condições, perfis com alto índice de concordância indicam que seus atributos que mais importam ao cálculo do índice aparecem em ambos os perfis com formas e em localizações semelhantes.

O resultado da comparação por este método é sintetizado por um único número que varia de -1 a 1, apelidado de “índice de concordância”. Quanto mais próximo de 1 seu resultado, maiores as semelhanças entre os perfis comparados.

Diferentemente dos métodos de comparação ponto a ponto e também de simples comparação de índices de irregularidade, este método não atribui pesos errados aos comprimentos de onda que menos importam, tampouco permite que eventuais erros de medida possam se compensar, o que pode ocorrer no caso da simples comparação de índices.

São essas características que qualificam este método para uso em quaisquer comparações de perfis longitudinais de pavimentos, em que incluem as verificações de perfilômetros, tanto em relação à repetitividade, quanto em relação à exatidão das medições.

Conforme se procurará evidenciar, a aplicação deste método em um contexto normativo adequado possibilita a correta verificação de um perfilômetro inercial, o que não acontece com os testes previstos nas normas mencionadas no item 4.1.1.

Como o detalhamento teórico da técnica foi muito bem descrito por Karamihas (2002), neste item procurar-se-á delinear uma explicação passo a passo restrita à aplicação do método que foi levemente adaptado para uso em perfilômetros destinados ao cálculo do QI. Em seguida, as adaptações serão comentadas e os outros parâmetros das verificações de repetitividade e exatidão serão definidos, para enfim, o método ser aplicado a uma verificação do perfilômetro inercial desenvolvido no âmbito desta pesquisa.

Vale informar que o método em si pode ser aplicado sem prejuízo em perfis com diferentes comprimentos e diferentes espaçamentos entre as elevações, muito embora, para efeitos de validação de perfilômetros recomenda-se que sejam seguidas as prescrições ressaltadas.

Para a utilização do método de correlação cruzada são necessários dois perfis longitudinais de pavimentos, que serão doravante chamados pelas letras P e Q. Para verificações de exatidão um deles deve ser o perfil de referência (Q), enquanto que o outro será perfil medido pelo equipamento a ser verificado (P).

Em verificações de repetitividade, como ambos devem ter sido medidos com o mesmo equipamento, qualquer um deles pode ser tomado como perfil de referência. Neste caso, se o perfilômetro já gerar perfis com espaçamentos regulares de 1 cm, não precisa ser realizada a interpolação indicada no passo 5. Caso contrário, sugere-se que ambos os perfis sejam interpolados para um espaçamento fixo igual a 1 cm.

Abaixo está a descrição passo a passo do método de correlação cruzada entre dois perfis longitudinais de pavimentos:

- Passo 1: Localize, identifique e meça um perfil de referência (Q) adequado aos propósitos da comparação. Ele será considerado também a referência de localização longitudinal, portanto o primeiro ponto de tal perfil será considerado como posição longitudinal “zero”. Em complementação ao perfil delimitado, deve ser medido adicionalmente, de forma contínua, o perfil dos 50 metros que antecedem a posição “zero” e o de 1 metro que sucede o último ponto do perfil de referência. Em outras palavras, se o perfil de referência requerido for de 200 metros de comprimento, deve ser medido na realidade o perfil com comprimento total de 251 metros. O espaçamento entre os pontos do perfil (Q) é chamado de Δx e deve ser sempre múltiplo de 1 cm.
- Passo 2: Selecione um perfil resultante da medição com o perfilômetro a ser verificado (P), no mesmo trecho demarcado. A medição de tal perfil deve ter sido iniciada pelo menos 50 m antes do ponto “zero” do perfil de referência e também deve ter continuado por pelo menos 1 m após o final do perfil de referência. O comprimento total do perfil (P) também deve ser de 251 m. A posição “zero” deve ter sido registrada automaticamente ou deve ser passível de identificação posterior caso o veículo saia sempre de um ponto com distância conhecida. O perfil gerado pelo perfilômetro inercial deve ser obtido com a filtragem normalmente utilizada para se evitar o efeito da macrotextura. Sugere-se o uso de média móvel com 150 mm de comprimento.

- Passo 3: Execute a filtragem do perfil de referência (Q) com o filtro do algoritmo do índice³ IRI. Esta filtragem retirará os comprimentos de onda que não afetam a irregularidade longitudinal dos pavimentos. O resultado desta filtragem será um perfil em inclinações, ao invés de elevações.
- Passo 4: Corte os excessos propositais deixados no comprimento do perfil de referência, deixando-o com os 200 metros, ou outro comprimento inicialmente demarcado. Convenciona-se chamar de L_q o comprimento da seção, neste caso $L_q = 200$ m; e de N_q o número de pontos do perfil de comprimento L_q . $N_q = L_q/\Delta x + 1$. Supondo-se $\Delta x = 0,25$ m, $N_q = 801$. Acerte o *offset* vertical do perfil de inclinações cortado de maneira que a média de todas as inclinações dele seja igual a zero. O perfil (Q) processado é chamado de (q). Calcule então o desvio padrão das inclinações do novo perfil, s_q .
- Passo 5: Caso o perfil (P) tenha sido medido em espaçamento diferente de 10 mm, recalcule seus pontos de elevação por meio de interpolações lineares de modo a gerar uma nova versão deste perfil que contenha as elevações espaçadas de 10 mm.
- Passo 6: Este passo compreende o processamento do perfil (P) e o cálculo da correlação cruzada entre os perfis. Tal cálculo deverá ser feito 201 vezes, variando-se de 1 em 1 cm a posição do perfil (P), o que compreenderá uma variação total de 1 metro para o lado esquerdo e de 1 metro para o lado direito, visando eliminar eventual *offset* longitudinal entre os perfis. A cada variação de 1 cm, o perfil (P) deverá ser processado de modo a gerar o perfil (p) compatível com o perfil (q) em termos de espaçamento, filtragem e tipo do perfil.

a) Para efeitos de cálculo convencionam-se:

Atribuir ao primeiro ponto de cada perfil o índice zero;

i = ponto individual do perfil (q) no espaçamento Δx ;

³ A filtragem do perfil e a conversão dele para inclinação é obtida diretamente após cada interação das equações recursivas do algoritmo do IRI, descrito no item 2.6.1. Os valores de saída são obtidos pelas diferenças entre as variáveis Z_3 e Z_1 , a cada interação.

$j = \Delta x / 0,01 \text{ m}$. Supondo-se $\Delta x = 0,25 \text{ m}$, $j = 25$;

m é um número inteiro que varia de -100 a 100 e representa as 201 posições diferentes do perfil (P) em relação ao perfil (q);

b) Para se determinar cada dos 201 perfis (p), deve-se determinar inicialmente os perfis P' , ponto a ponto, o que é feito variando-se m de -100 a 100 e em seguida, para cada valor de m , variando i , entre 0 e $(N_q - 1)$, usando a equação abaixo que elimina os pontos intermediários a Δx para cada nova posição m .

$$P'_{m_i} = P_{(i,j)+m} \quad (4.1)$$

c) A seguir, basta processar todos os 201 perfis P'_m seguindo os seguintes passos: filtragem com o mesmo filtro descrito no “Passo 3” que irá transformar os perfis de elevação para inclinação; corte dos 49 metros iniciais de cada perfil; acerto do *offset* vertical dos perfis de inclinações cortados de maneira que a média de todas as inclinações de cada perfil seja igual a zero. Os perfis (P'_m) processados passam a ser chamados de (p_m) e contam agora (se $L_q = 200 \text{ m}$), com 202 metros de comprimento cada um, ou seja, o comprimento L_q , acrescido de 1 metro em cada extremidade. Basta calcular então os desvios padrão dos 201 perfis de inclinações (p_m), chamados de s_{pm} .

d) Enfim, calcule as correlações cruzadas⁴ entre o perfil (q) e os diversos perfis (p_m). Desta maneira, será produzida uma função de correlação ρ_m para todos os valores inteiros de m variando de -100 a 100.

$$\rho_m = \frac{1}{N_q \cdot \max(s_{p_m}, s_q)^2} \sum_{i=0}^{N_q-1} (p_{m_i} \cdot q_i) \quad (4.2)$$

⁴ A fórmula de cálculo da correlação cruzada não é adequada para comparações teóricas com um ou ambos os perfis perfeitamente planos, pois nesses casos a somatória das multiplicações será igual a zero, uma vez que o *offset* vertical tenha sido acertado.

Passo 7: Ao final dos cálculos, deve ser buscado o valor máximo da função ρ_m . Este é o valor do “índice de concordância” entre os perfis P e Q, levando-se em conta as características do filtro aplicado.

À primeira vista, o método parece mais complicado do que realmente é. De forma simplificada, pode-se explicá-lo como sendo composto de um tratamento nos perfis que elimina o *offset* vertical e os comprimentos de onda indesejados, seguido da média normalizada da multiplicação ponto a ponto entre eles. Tal cálculo da média é repetido diversas vezes visando eliminar o eventual *offset* longitudinal entre os perfis.

Uma previsão que o método não faz diz respeito à equalização entre as resoluções das medidas dos perfis. Como o estudo do item 4.1.3 evidenciou, há diferenças no resultado da irregularidade quando os perfis têm resoluções diferentes. Tais diferenças são naturalmente provenientes de diferenças nos perfis, que por sua vez teriam reflexo no resultado da correlação cruzada – ainda que seja pequeno. Desta maneira, vale reforçar a recomendação para que seja usado perfil de referência com resolução de 0,1 mm.

Conforme foi informado no início deste item, o método de correlação cruzada proposto acima é uma adaptação do método descrito por Karamihas (2002), visando a verificação de perfilômetros inerciais para o cálculo do QI. Ao contrário do IRI, que segundo as normas disponíveis pode ser obtido a partir de perfis com espaçamentos muito pequenos, o QI no Brasil é medido em perfis com medidas espaçadas de 0,50 m, sendo que nesta pesquisa é sugerida a redução de tal espaçamento para 0,25 m.

Assim, mesmo em se atendendo a sugestão disposta no item anterior de se efetuar este tipo de verificação com um perfil medido no espaçamento de 0,25 m, ainda poderia haver diferença em relação ao IRI, pois em ambos os casos o perfil usado para o QI deixa de levar em conta intervalos de espaço entre um ponto e outro do perfil. Este é um dos motivos da adaptação do método que, em tese, é menos trabalhoso na medida em que exige um perfil de referência com espaçamento maior do que os normalmente usados para o cálculo do IRI.

A principal adaptação aplicada ao método, que pode ser considerada também uma melhoria, foi a padronização do espaçamento de 1 cm para o perfil obtido com

perfilômetro, visando buscar com maior exatidão a eventual diferença de *offset* entre os perfis. No mais, o método foi adaptado para propiciar a correlação entre perfis que inicialmente possuem espaçamentos de medidas consideravelmente diferentes, mas que no decorrer de sua aplicação tornam-se compatíveis.

Como se pode constatar o método resolve parte dos problemas apontados nas normas ASTM E 950-98 e AASHTO PP 49-03, no que diz respeito aos testes de exatidão e repetitividade dos perfis. Para resolver os demais pontos que foram evidenciados no item 4.1.1, seria necessário o estabelecimento de alguns critérios adicionais na obtenção dos perfis que serão comparados com o método de correlação cruzada.

Ambas as normas mencionadas acima, estabelecem que tais testes de verificação sejam realizados em 10 perfis medidos com o perfilômetro inercial. Tal providência é razoável, mas falta a determinação da velocidade de tráfego do perfilômetro durante tais medições. Outro problema a ser regrado diz respeito à textura da superfície do pavimento, fator que já foi citado por diversos autores como sendo influenciador dos resultados de verificações de perfilômetros.

Sendo assim, sugerem-se os seguintes passos para a realização de uma verificação de repetitividade e exatidão de um perfilômetro usando-se o método da correlação cruzada, tendo em vista que o equipamento será usado primordialmente para a determinação do QI ou IRI.

A verificação deve ser realizada em duas bases, escolhidas com critério, que possuam índices de irregularidade compreendidos em faixas diferentes. A base com irregularidade mais alta, chamada de base A, deve possuir QI entre 30 e 50 cont/km. A base com irregularidade mais baixa, chamada de base B, deve possuir QI compreendido entre 5 e 25 cont/km.

Embora o comprimento sugerido dos perfis de referência em si seja de 200 metros, é necessário que a medida tanto dos perfis de referência, quanto dos perfis do perfilômetro inercial, comece a ser executada 50 metros antes do início da base e finalize 1 metro depois, conforme indicado no método de correlação cruzada, totalizando 251 metros de comprimento.

O perfilômetro deverá ser passado por 10 vezes sobre os mesmos 251 metros de comprimento de cada uma das bases, sendo que, em 5 delas a medição deve ser feita em velocidade baixa e nas outras 5, a medição deve ser feita em velocidade alta.

Para os efeitos destas verificações, entende-se por velocidade baixa aquela que seja até 15 km/h acima da velocidade mínima de operação informada pelo fabricante, e por velocidade alta, aquela que seja maior ou igual a 70 km/h.

Com base em todos esses perfis, 11 no total para cada base, sendo 1 de referência e 10 de medições com o perfilômetro inercial, pode-se passar para as correlações cruzadas.

Para o teste de repetitividade, devem ser realizadas as 45 correlações cruzadas possíveis com os 10 perfis medidos, ou seja, todas as combinações de 2 em 2 perfis.

Os resultados dessas correlações serão sumarizados em uma variável por base, que representará a médias dos “índices de concordância”, representados pelas letras “IC”, sendo que o índice “R” representa o ensaio de repetitividade: IC_R . Como este índice deve ser calculado para cada base, sugere-se a nomenclatura IC_{RA} e IC_{RB} .

Os índices IC_{RA} e IC_{RB} devem apresentar valores iguais ou superiores a 0,92 para a aprovação do perfilômetro no critério de repetitividade.

Para a verificação da exatidão, basta correlacionar cada um dos 10 perfis medidos com o perfil de referência. Os resultados de cada base serão sumarizados em duas variáveis para cada base: IC_{E1} e IC_{E2} , onde o índice “E” representa a verificação de exatidão. A variável IC_{E1} representa a média dos 5 “índices de concordância” das correlações feitas entre os perfis medidos em alta velocidade e o perfil de referência, enquanto a variável IC_{E2} representa a média dos 5 índices de concordância medidos em baixa velocidade. A letra correspondente à base medida pode também ser acrescentada como índice ao nome da variável.

Os índices IC_{E1A} , IC_{E2A} , IC_{E1B} e IC_{E2B} devem apresentar valores iguais ou superiores a 0,88 para a aprovação do perfilômetro no critério de exatidão.

Em pavimentos com macrotextura muito pronunciada (por exemplo: superfícies fresadas, com camada de rolamento em SMA ou camada porosa de atrito etc), podem ser aceitos perfilômetros que apresentem resultados dos índices referentes à exatidão um pouco menores que 0,88, desde que fique provado que tais equipamentos sejam capazes de gerar índices iguais ou maiores que 0,88 quando testados em superfícies mais fechadas.

Em pavimentos trincados ou com juntas transversais, recomenda-se a aplicação de filtro para exclusão de medidas quando da aplicação da média móvel, conforme explicado no item 4.2.

Caso se obtenha resultados ruins, antes de condenar o perfilômetro inercial, é importante desconfiar de ambos os equipamentos usados e checar novamente neles todos os pontos passíveis de verificação e em se encontrando algo, refazer o(s) levantamentos prejudicado(s) e conseqüentemente a análise.

Deve ser ressaltado que os valores limites sugeridos neste método foram determinados com base tanto nos testes realizados com o perfilômetro desenvolvido, quanto em sugestões determinadas nas pesquisas Karamihas (2002 e 2005a).

O perfilômetro desenvolvido no âmbito desta pesquisa foi testado com o método proposto em 3 bases com irregularidades diferentes, sendo a primeira delas (Base A) localizada na faixa 4, do km 19,5 da pista norte da Rodovia dos Bandeirantes, em São Paulo. As duas outras (Base B e C) estavam localizadas na Cidade Universitária da USP, também na cidade de São Paulo. Todas as bases possuíam comprimento total de 251 metros.

Embora o método recomende a necessidade de apenas duas bases, por se tratar de uma pesquisa mais ampla, buscou-se com três bases com índices de irregularidade diferentes abranger um espectro um pouco maior de situações. Outras bases também na cidade universitária foram localizadas, mas como elas não reuniam as propriedades destacadas no item 4.1.4, foram descartadas.

Os greides das três bases escolhidas apresentavam inclinações de até 1% e todos os trechos eram em tangente. As figuras 4.5 e 4.6 mostram os pavimentos destas 3 bases usadas para a verificação de exatidão e repetitividade, com esse método.

Figura 4.5 – Fotografias dos pavimentos da Base A – Bandeirantes (à esquerda) mostrando o equipamento tipo Dipstick utilizado e da Base B – USP 1 (à direita).

Figura 4.6 – Fotografia do pavimento da Base C – USP 2.

As três bases tiveram seus perfis topográficos (de referência) medidos com equipamento similar ao Dipstick (mostrado na figura 4.5, e cuja descrição detalhada encontra-se no Apêndice D), ao longo do comprimento de 251 m. A verificação da calibração deste equipamento foi feita *in loco*, antes da medida de cada base, por meio de comparação das elevações medidas por ele, em placas de vidro de espessuras conhecidas. Os resultados da verificação da exatidão deste equipamento mostraram diferença máxima de 0,1 mm, o que qualificou o aparelho para a medição dos perfis de referência desta verificação.

A tabela 4.3, assim como a figura 4.7, evidenciam as características das bases utilizadas neste estudo, antes de iniciado o procedimento para o estabelecimento da correlação cruzada entre os perfis.

Como se pode perceber, os resultados dos índices de irregularidade entre as medições foram muito próximos, conforme indica a comparação percentual da tabela 4.4, o que confirmou os resultados obtidos em verificações anteriores calcadas apenas nos índices de irregularidade.

Tabela 4.3 – Resultados dos cálculos dos índices de irregularidade QI e IRI realizados a partir dos perfis longitudinais obtidos com o Dipstick e com o perfilômetro inercial, ambos considerando medidas a cada 25 cm, apenas no trecho útil de 200 metros de cada uma das bases.

	Medição Dipstick 25 cm		10 medições Perfilômetro	
	QI (cont/km)	IRI (m/km)	QI médio (cont/km)	IRI médio (m/km)
A - Base Bandeirantes	23.2	2.38	22.7	2.37
B - Base USP 1	28.6	2.66	28.9	2.73
C - Base USP 2	35.8	3.09	34.1	3.03

Tabela 4.4 – Diferenças percentuais dos resultados dos índices de irregularidade IRI e QI medidos a partir dos dois equipamentos diferentes.

	Diferenças Percentuais: Dipstick – Perfilômetro	
	QI	IRI
A - Base Bandeirantes	1.73%	0.38%
B - Base USP 1	-0.89%	-2.78%
C - Base USP 2	3.81%	2.10%

Figura 4.7 – Perfis não processados, referentes a medições da “Base USP 1” obtidos com o Dipstick e com o perfilômetro inercial.

Figura 4.8 – Os mesmos perfis da figura 4.5 (Base USP 1), processados com o filtro do índice IRI, após o procedimento de correlação cruzada para verificação de exatidão, que produziu $IC_E = 0,95$.

A figura 4.8 evidencia como ficaram os perfis da figura 4.7, depois de todos os processamentos requeridos pelo método de correlação cruzada. Os perfis são mostrados inclusive na posição em que o IC é máximo, no caso 0,95. A comparação da figura ilustra uma das correlações usadas na determinação da exatidão do perfilômetro, referente à “Base USP 1”. A figura evidencia inclusive que foram retirados do perfil os 49 metros iniciais, incluídos para evitar danos da filtragem.

Enfim, as tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 contêm os resultados de todas as correlações cruzadas efetuadas entre os perfis longitudinais medidos. A tabela 4.5 resume os dados referentes à verificação de exatidão do perfilômetro, em cada uma das medições feitas, comparadas com o perfil de referência, nas duas faixas de velocidade.

A tabela 4.6 apresenta os resultados de todas as combinações entre as medições do perfilômetro apenas em cada uma das bases, com vistas à verificação da repetitividade do equipamento.

A última tabela deste item, de número 4.7, apresenta os índices finais a partir dos quais se pode verificar que o equipamento desenvolvido no âmbito desta tese apresenta índices que classificam-no como adequado para uso, haja vista que todos os índices relativos à exatidão foram iguais ou maiores que 0,88, e que todos os índices relativos à repetitividade foram iguais ou maiores que 0,92.

Tabela 4.5 – Resultados referentes às correlações cruzadas entre perfis de referência e as 10 medições do perfilômetro, para verificação da exatidão.

Correlação Cruzada de Exatidão					
(Perfis de Referência X Perfis das 10 medições do Perfilômetro)					
A – Base Bandeirantes		B - Base USP 1		C - Base USP 2	
V = 45km/h	V = 70 km/h	V = 45km/h	V = 70 km/h	V = 45km/h	V = 70 km/h
0.94	0.95	0.95	0.93	0.83	0.89
0.92	0.94	0.93	0.96	0.89	0.86
0.93	0.92	0.91	0.85	0.91	0.89
0.93	0.92	0.93	0.87	0.86	0.85
0.92	0.92	0.92	0.88	0.89	0.89

Tabela 4.6 – Resultados referentes às 45 correlações cruzadas entre perfis obtidos com o perfilômetro em cada base, visando a verificação da repetitividade.

Correlações Cruzadas de Repetitividade									
A - Base Bandeirantes									
Passes	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.96	0.96	0.93	0.94	0.95	0.96	0.91	0.91	0.91
2		0.96	0.91	0.90	0.90	0.92	0.88	0.88	0.88
3			0.95	0.95	0.95	0.96	0.92	0.93	0.92
4				0.95	0.97	0.96	0.95	0.96	0.96
5					0.95	0.94	0.93	0.93	0.95
6						0.96	0.97	0.96	0.97
7							0.94	0.94	0.94
8								0.96	0.97
9									0.97

B - Base USP 1									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.98	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.88	0.88	0.91
2		0.96	0.97	0.96	0.95	0.95	0.88	0.9	0.91
3			0.98	0.97	0.95	0.95	0.91	0.93	0.94
4				0.98	0.96	0.96	0.91	0.92	0.93
5					0.98	0.96	0.91	0.94	0.95
6						0.92	0.91	0.93	0.94
7							0.85	0.88	0.89
8								0.96	0.96
9									0.98

C - Base USP 2									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.90	0.89	0.92	0.89	0.92	0.89	0.88	0.88	0.89
2		0.99	0.89	0.90	0.94	0.91	0.94	0.97	0.92
3			0.88	0.90	0.94	0.90	0.93	0.97	0.90
4				0.94	0.89	0.97	0.93	0.89	0.97
5					0.90	0.95	0.97	0.91	0.94
6						0.90	0.91	0.95	0.89
7							0.96	0.91	0.96
8								0.94	0.93
9									0.90

Tabela 4.7 – Resultados finais das correlações cruzadas para as 3 bases nos critérios de exatidão e repetitividade.

Resultados das Correlações Cruzadas			
	Verificação de Exatidão		Verificação de Repetitividade
A - Base Bandeirantes	$IC_{E1A} = 0,93$	$IC_{E2A} = 0,93$	$IC_{RA} = 0,94$
B - Base USP 1	$IC_{E1B} = 0,93$	$IC_{E2B} = 0,90$	$IC_{RB} = 0,94$
C - Base USP 2	$IC_{E1C} = 0,88$	$IC_{E2C} = 0,88$	$IC_{RC} = 0,92$

4.2 O tratamento de dados para evitar a influência indevida de juntas e trincas nos perfis medidos por perfilômetros

Como já foi explicado ao longo desta pesquisa, os perfilômetros inerciais que usam um feixe laser pontual para as medições sem contato da distância entre veículo e pavimento, calculam tal distância no local para onde o ponto laser estiver apontado.

Pelo motivo acima, é sempre necessário filtrar os dados originais dos perfis para tentar anular o efeito da macrotextura do pavimento, sendo que neste caso o senso comum é utilizar uma média móvel nos dados originais de elevação.

Acontece que este tipo de filtragem, preconizada pelas normas para este fim e que também foi usada nos dados deste trabalho, embora funcione muito bem para minimizar os efeitos da macrotextura, não funciona bem em superfícies que possuam trincas abertas ou juntas de dilatação.

A explicação é simples. Enquanto as reentrâncias da macrotextura de uma superfície de pavimento normalmente possuem uma profundidade média similar, trincas e juntas de dilatação podem apresentar uma profundidade muito diferente do restante da superfície, sendo assim, afetarão indevidamente o perfil medido, mesmo após aplicação da média móvel.

Tal afetação pode ser taxada de indevida, pois embora os lasers pontuais consigam medir a profundidade das trincas e juntas mais abertas (não seladas), os veículos não são afetados pela profundidade das trincas e juntas.

Desta maneira, estudou-se o caso com dados reais obtidos com o perfilômetro desenvolvido, em pavimentos de concreto de cimento portland com juntas transversais de dilatação.

Para este estudo, foram medidos mais de 100 km de perfis de faixas de rolamento de pavimentos de concreto de cimento Portland com juntas de dilatação transversais para verificar inicialmente se algumas juntas não seladas eram realmente medidas pelo perfilômetro.

A resposta a esta verificação preliminar mostrou que sim. Quando há a coincidência do momento de medição com o laser exatamente sobre uma junta de dilatação não selada, sua profundidade (se estiver dentro do curso do medidor laser) é medida pelo equipamento, conforme indica a figura 4.9 que apresenta tanto um segmento de perfil não filtrado, como também o mesmo perfil filtrado com uma média móvel de 150 mm de comprimento.

Figura 4.9 – Extrato com 1 m de comprimento de perfil longitudinal não filtrado com junta de dilatação e o mesmo perfil após a aplicação de média móvel com 150 mm.

Pela figura fica fácil concluir que uma junta pode ser medida pelo equipamento e também que ela afeta indevidamente mesmo um perfil filtrado com média móvel de 150 mm. Em outras palavras, o filtro de média móvel usado para eliminar as reentrâncias da textura do pavimento não é bom o bastante para eliminar as eventuais aberturas na superfície do pavimento.

Como as normas estrangeiras estudadas não tratam deste tema, idealizou-se no âmbito desta pesquisa um complemento ao filtro de média móvel que pudesse melhorar sua eficácia no caso apresentado.

A solução idealizada foi a de retirar um percentual dos dados de elevação medidos pelo equipamento em cada cálculo da média móvel. Supondo-se que dentro de uma média móvel existam 10 medições de elevação e que se desconsidere 20% dos pontos mais dispersos em relação à média, calcula-se a média dos 10 pontos e verificam-se os dois pontos mais distantes de média. Eliminam-se tais pontos e recalcula-se a média que será efetivamente usada.

Inicialmente pensava-se em aplicar tal procedimento apenas para as medições com valores menores do que à média – como acontece em juntas, entretanto a análise de alguns perfis não filtrados mostra que vez por outra podem acontecer medições indevidas maiores do que a média (picos), que podem ser explicadas pela presença de água em algum ponto localizado do pavimento, pela presença de detritos, sujeira ou objetos sobre a pista.

O exemplo gráfico de aplicação de tal filtro modificado, eliminando-se 10% dos valores mais dispersos, no cálculo de cada média móvel está na figura 4.10.

Figura 4.10 – Extrato com 1 m de comprimento de perfil longitudinal não filtrado com junta de dilatação, o mesmo perfil após a aplicação de média móvel com 150 mm e por fim após a aplicação do método de exclusão de pontos dispersos.

Como se pode verificar, com exceção do trecho relativo ao efeito da junta, a linha amarela corre sobre a linha rosa, ou seja, a linha amarela representa melhor a real trajetória do veículo sobre o pavimento.

O percentual de eliminação de pontos a ser aplicado na média móvel pode ser ajustado levando-se em conta a frequência de medição do equipamento e também as características do pavimento, tais como: abertura das juntas de dilatação de pavimentos ou de obras de arte, presença de trincas com mais de 2 ou 3 mm de abertura, proximidade entre as trincas, se houve medição sobre algum trecho molhado, se a pista apresentava detritos superficiais etc.

Infelizmente os trechos de pavimento de concreto com juntas transversais medidos para esta pesquisa não apresentavam muitas juntas não seladas. Se por um lado essa constatação é ruim, por outro ela é boa, pois poderá ficar evidenciado que este tipo de filtragem não alterou nem o valor do QI, nem o valor do IRI, o que autorizaria sua utilização.

As verificações foram realizadas em dois segmentos de pavimentos com juntas transversais. O primeiro com 6 km de comprimento. Foram executados 3 cálculos dos dois índices de irregularidade, sempre usando a média móvel com 150 mm de comprimento. O primeiro sem o algoritmo de subtração de pontos dispersos, o segundo com a subtração de 10% dos pontos dispersos em cada média, e o terceiro com a subtração de 20% dos pontos em cada média.

Em tais verificações tanto o QI quanto o IRI foram calculados em segmentos de 200 metros e depois foi tirada uma média dos resultados de todos os segmentos de 200 metros, de cada um dos índices, em cada trilha de roda. Para o cálculo do QI, foi usado o espaçamento de 50 cm entre os pontos do perfil, enquanto para o cálculo do IRI, neste caso o espaçamento utilizado foi de 20 mm.

Apenas para registrar, o número de pontos que compõem cada média móvel varia de acordo com a velocidade do veículo, uma vez que a versão utilizada do perfilômetro para essa verificação era capaz de gravar 2000 medidas por segundo em cada um dos sensores.

Os resultados obtidos no primeiro teste estão dispostos na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultados dos cálculos dos índices IRI e QI para 2 perfis com 6 km de comprimento, filtrados de 3 maneiras diferentes.

Tipo de Filtragem	IRI médio de 6 km de faixa (m/km)		QI médio de 6 km de faixa (cont/km)	
	Esq	Dir	Esq	Dir
MM 150mm	2.94	3.08	33.3	32.1
MM 150mm - 10%	2.94	3.08	33.3	32.1
MM 150mm - 20%	2.94	3.08	33.3	32.1

Como se pode notar, não houve alteração da média de nenhum dos índices com a mudança do filtro. O resultado pode parecer adverso, mas não é, uma vez que o pavimento medido estava bem conservado e muitas das juntas ou estavam seladas, ou apresentavam algum outro tipo de vedação que tornaram raras as medições mais profundas. Embora existissem alguns vales presentes no perfil, como aquele mostrado no gráfico da figura 4.9, seu número era pequeno e o efeito acabou desaparecendo no cálculo da média.

Em uma comparação ponto a ponto em todos os segmentos de 200 metros que compuseram as médias mostradas na tabela, a redução máxima do QI foi de 0,9 cont/km e no caso do IRI foi de 0,07 m/km. Tais valores embora pequenos, poderiam causar alguma diferença em um contrato de prestação de serviços.

Um segundo teste foi executado, em condições similares, mas desta vez em um outro pavimento de concreto de cimento portland, também com juntas transversais, mas com comprimento maior. O trecho usado neste segundo teste possuía 31 km de comprimento.

Além das filtragens executadas no trecho anterior, foi acrescentada mais uma, com o mesmo comprimento de média móvel e a exclusão de 25% dos pontos mais dispersos. Os resultados médios obtidos em cada uma das situações estão na tabela 4.9.

Embora a situação geral deste segundo trecho de pavimento estivesse melhor, o que se pode perceber por índices médios de irregularidade mais baixos em relação ao primeiro segmento, houve em alguns trechos a captura de mais vales relativos às

juntas de dilatação do pavimento, juntas de obras arte e também, provavelmente, de dispositivos de drenagem superficial.

Tabela 4.9 – Resultados dos cálculos dos índices IRI e QI para 2 perfis com 31 km de comprimento filtrados de 4 maneiras diferentes.

Tipo de Filtragem	IRI médio de 31 km de faixa (m/km)		QI médio de 31 km de faixa (cont/km)	
	Esq	Dir	Esq	Dir
MM 150mm	2.62	2.43	24.6	21.3
MM 150mm – 10%	2.60	2.43	24.1	21.3
MM 150mm – 20%	2.60	2.44	24.2	21.3
MM 150mm – 25%	2.61	2.44	24.4	21.4

De acordo com as médias, mais uma vez o filtro proposto não causou diferenças significativas nos índices de irregularidade, o que reforça a possibilidade de sua utilização.

Na comparação ponto a ponto em todos os segmentos de 200 metros que compuseram as médias, houve um ponto isolado em que a redução do QI foi de 7,5 cont/km e no caso do IRI foi de 0,11 m/km.

Diferentemente do caso anterior, no trecho de 200 metros salientado, o valor da redução do QI foi expressivo. Por essa razão, buscou-se verificar dentro de tal segmento de 200 metros o que teria causado a diferença. Não foi difícil identificar. Em um trecho com cerca de 1 metro de comprimento encontrou-se quatro medições de picos negativos. Tal trecho está mostrado na figura 4.11.

Infelizmente não houve uma anotação em campo específica que ajudasse a identificar a ocorrência, mas pelo conhecimento de tal rodovia, pode-se dizer que as causas mais prováveis de tais medições são: uma junta de dilatação especial de obra de arte ou um dispositivo de drenagem superficial.

Inicialmente pensou-se também que poderia ser uma junta longitudinal do pavimento, mas essa causa foi afastada, haja vista que tais medições foram registradas por ambos os sensores laser, o que indica uma das causas evidenciadas acima, que tem presença transversal na faixa de rolamento.

Figura 4.11 – Extrato com 1 m de comprimento de perfil longitudinal não filtrado com quatro medições inadequadas ao perfil, o mesmo perfil após a aplicação de média móvel com 150 mm e por fim após a aplicação do método de exclusão de pontos dispersos em dois percentuais distintos.

Conforme se pode verificar na figura apresentada, a exclusão de apenas 10% dos pontos de cada média móvel não foi o bastante para eliminar o efeito das medições profundas registradas pelo equipamento. Entretanto quando a exclusão atingiu 25% dos pontos o efeito foi aquele desejado.

A conclusão final deste estudo é que o método original proposto de exclusão de alguns dos pontos mais dispersos de cada média móvel é aplicável para a eliminação de pontos medidos corretamente pelo perfilômetro, mas que, por não causarem impacto no tráfego de veículos, não devem ser computados no perfil e conseqüentemente nos índices de irregularidade.

Em relação à simples média móvel, a modificação proposta pode alterar significativa e corretamente o valor dos índices de irregularidade somente nos trechos que realmente haviam sido afetados por medições que precisavam ser desconsideradas. Nos segmentos onde não havia tais ocorrências o filtro adicional não causou mudanças nos resultados de irregularidade, o que é mais um argumento a favor de sua utilização.

Quanto ao percentual de pontos que se deve eliminar, os estudos mostraram que em um equipamento que realizou cerca de 2000 medições por segundo, em que o veículo em geral trafegou a cerca de 80 km/h, até 25% dos valores puderam ser eliminados de forma a ajudar a melhorar a exatidão dos resultados de irregularidade.

Acredita-se que tal percentual possa variar conforme as condições do pavimento a ser medido, sendo que em caso de dúvidas o que pode ser feito é um exercício de aplicação de diferentes percentuais.

Para pavimentos com juntas transversais, muitas obras de arte, drenos transversais, sujeiras na pista etc, recomenda-se sua utilização para maior exatidão dos resultados. Nestes casos, de acordo com as características do pavimento e do equipamento, podem, em tese, ser eliminados entre 10 % e 25 % dos pontos mais dispersos, sem prejuízo para os resultados nos quais não há a ocorrência de picos ou vales que não são sentidos pelo veículo.

Em pavimentos asfálticos com poucas trincas e poucas obras de arte, sua utilização seria opcional, sendo que, caso se opte por usá-la, o percentual pode ser reduzido para aquele que represente a eliminação, de apenas 1 ponto em cada média móvel.

Depois que tal estudo havia sido completamente desenvolvido, sem que se tivesse encontrado tal preocupação na bibliografia, encontrou-se em Karamihas (2005a) a mesma preocupação. Tal autor propôs um método ligeiramente diferente, mas também funcional, para a correção dos mesmos problemas.

Embora tenha sido evidenciada a necessidade de aplicação de um filtro para a correção de certas medidas indevidas realizadas por lasers pontuais, este tema pode e deve ser estudado com mais profundidade e com maior massa de dados.

4.3 O tratamento do perfil longitudinal obtido para o cálculo do QI

A discussão alocada para este item trata de dois assuntos bastante importantes no que tange ao cálculo do quociente de irregularidade QI a partir de um perfil longitudinal obtido com perfilômetro inercial.

O primeiro diz respeito ao tamanho da média móvel empregada no perfil original extraído do perfilômetro para a filtragem (eliminação) da macrotextura do pavimento e o segundo diz respeito ao efeito relativo ao espaçamento entre os pontos do perfil longitudinal visando o cálculo do QI.

Quanto ao comprimento da média móvel, muito embora a norma ASTM E 1926-98 preconize – para o cálculo do IRI – o uso de uma média móvel de 250 mm de comprimento, dadas as características atuais dos perfilômetros que executam as medidas em frequências maiores que aquelas usadas há 10 anos, adotou-se como padrão o uso da média móvel com 150 mm de comprimento. Seu emprego foi feito em conjunto com o método detalhado no item anterior visando a eliminação de picos e vales que podem causar interferências indevidas mesmo em um perfil filtrado com média móvel mais longa.

A figura 4.12 mostra a mesma junta de dilatação evidenciada no item anterior, desta vez incluindo-se a média móvel de 250 mm na comparação.

Figura 4.12 – Extrato com 1 m de comprimento de perfil longitudinal não filtrado com junta de dilatação, o mesmo perfil após a aplicação de média móvel com 150 mm antes e depois da aplicação do método de exclusão de pontos dispersos e por fim apenas com média móvel de 250 mm.

Fica fácil de perceber que, neste caso, a média móvel de 150 mm empregada em conjunto com a exclusão de valores extremos foi mais eficiente que a simples média móvel de 250 mm adotada na norma americana. No pequeno trecho de pavimento normal que antecede e sucede a junta, ambas as filtragens produziram resultados similares.

A escolha do comprimento de 150 mm ao invés do comprimento de 250 mm deve-se especialmente a duas razões. A primeira diz respeito à maior comparabilidade entre um perfil obtido com nível e mira e um perfil obtido com perfilômetro. A base de uma mira nunca tem o diâmetro com 250 mm, ou seja, ela sempre representa a média da elevação de uma área menor, mais próxima de 150 mm. A segunda razão refere-se à própria área de toque do pneu de um veículo de passeio bem calibrado, que também se aproxima mais de 150 mm do que de 250 mm.

A filtragem realizada pela média móvel representa justamente a filtragem que o pneu do veículo faz da macrotextura da superfície pela qual trafega mediante sua deformação. Em outras palavras, como a suspensão do veículo não é afetada pela macrotextura, o perfil usado para o cálculo da irregularidade também não pode ser afetado.

Em termos dos índices de irregularidade, normalmente para superfícies mais fechadas parece não haver diferenças apreciáveis entre a adoção dos dois comprimentos de médias móveis, muito embora tal tema possa ser investigado mais a fundo, com um grande número de trechos dos mais diferentes tipos de superfícies visando uma conclusão mais abrangente. De qualquer maneira, este tipo de estudo não é tão simples de ser executado, pois no caso de se encontrarem pequenas diferenças em determinadas situações, seria necessário ainda determinar qual dos dois resultados melhor representa a realidade do perfil e isso passa necessariamente pela determinação das características do equipamento que foi usado na determinação do perfil de referência.

Por ora, a escolha da média móvel de 150 mm de comprimento aplicada com o método de eliminação de picos/vales deve ser usada, uma vez que se mostrou adequada em todas as comparações realizadas no âmbito desta pesquisa, seja

quando se utilizou nível e mira, seja quando se utilizou o Dipstick – ambos equipamentos com base de apoio muito menor que 250 mm.

Um cuidado que se deve ter no processamento de perfis é o de não aplicar a filtragem da média móvel em duplicidade. Deve-se verificar sempre se o perfil gerado pelo perfilômetro já sofreu esta filtragem por média móvel ao ser gerado – o que acontece às vezes.

No mais, o importante mesmo é padronizar o tratamento dos dados a ser empregado em nosso país, visando calcular os índices sempre da mesma forma.

Em casos excepcionais, como em superfícies muito abertas ou para perfilômetros que tenham frequência de medição baixa (por exemplo, uma frequência que seria considerada baixa é aquela em que o equipamento registra menos de 6 medições dentro do comprimento de 150 mm), outros comprimentos de média móvel podem ser necessários, devendo ser estudados caso a caso.

O segundo tema a ser tratado nesta oportunidade também é bastante importante no que tange ao processamento de perfis longitudinais visando o cálculo do quociente de irregularidade QI: trata-se do espaçamento entre os pontos do perfil usados para calcular o QI.

Muito embora em quase todos os cálculos de QI realizados tenham sido usados perfis processados para espaçamentos de 50 cm, conforme prescreve a norma DNER-ES 173/86, não poderia faltar a esta pesquisa uma discussão sobre a adequação ou não de tal espaçamento, haja vista a norma citada já possuir mais de 20 anos.

Sobre os efeitos da redução do espaçamento entre as medidas do perfil para cálculo do QI, foi encontrada apenas uma referência bibliográfica, trata-se de Sayers et al. (1986a). Tais autores informam que a redução no espaçamento entre pontos do perfil para o cálculo do QI é benéfica, na medida em que se reduz um erro aleatório que os espaçamentos maiores induzem no cálculo. Quando o QI é totalizado para grandes extensões, tal erro pode passar despercebido, entretanto em trechos menores é possível observá-lo claramente.

Como tais autores não evidenciam essas conclusões com experimentos de campo, dada a disponibilidade de perfis com espaçamentos muitas vezes menores do que os 50 cm recomendados pela norma nacional, desenvolveu-se o seguinte experimento visando quantificar as eventuais diferenças nos valores de QI para diferentes espaçamentos entre os pontos de perfis.

Foram escolhidos 12 perfis longitudinais com 200 metros de comprimento, obtidos com o perfilômetro inercial ao longo de diversas rodovias e processados para o espaçamento de apenas 20 mm entre seus pontos. Para efeito deste experimento, vamos supor que tais perfis representem a perfeita realidade de campo.

Os valores do QI – calculados de forma tradicional com 50 cm de espaçamento entre pontos, para cada um dos 12 trechos de 200 metros escolhidos estão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 4.10 – Valores do QI de 12 trechos de 200 m, calculados a partir de perfis com 50 cm de espaçamento.

Trecho	QI (cont/km)
1	12.3
2	13.3
3	21.9
4	25.1
5	23.6
6	32.1
7	32.8
8	38.9
9	30.7
10	14.6
11	14.5
12	11.7

Procurou-se escolher trechos com diferentes conformações de perfis e com valores de QI que variassem de 10 a 40 cont/km, por ser esta a faixa mais comum deste índice de irregularidade para as rodovias em estados bom e razoável de conservação.

O teste consistiu em tomar cada um dos 12 perfis e calcular o valor do QI 50 vezes, em cada uma delas, aumentando o espaçamento entre pontos do perfil efetivamente usados no cálculo de 20 em 20 mm até o espaçamento de 1 metro entre pontos do perfil.

A tabela 4.11 contém os dados referentes à variação percentual do valor do QI para cada um dos trechos, sempre em relação ao QI calculado com o menor espaçamento, que neste caso foi de 20 mm. Como a escala do QI parte do valor negativo de 8,54 cont/km, este valor foi somado aos valores encontrados antes do cálculo da variação percentual visando evitar o uso de um percentual exagerado.

Tabela 4.11 – Variação percentual do QI, para diferentes espaçamentos entre pontos do perfil, quando comparado com o valor referente ao espaçamento de 20mm.

Passo Usado do Cálculo do QI (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.02	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.04	0.09%	-0.05%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	-0.02%	-0.04%	0.05%	0.00%	0.09%	-0.10%
0.06	0.05%	0.09%	0.03%	0.03%	-0.03%	-0.12%	-0.07%	0.00%	0.05%	0.09%	-0.04%	-0.10%
0.08	0.19%	0.00%	0.07%	0.00%	0.00%	0.05%	0.00%	-0.06%	0.05%	0.04%	-0.09%	0.05%
0.1	-0.19%	-0.05%	0.23%	-0.12%	0.03%	0.07%	-0.15%	0.04%	-0.16%	0.34%	0.13%	-0.30%
0.12	0.28%	0.09%	0.13%	0.03%	-0.06%	-0.14%	-0.07%	0.00%	0.18%	0.21%	0.00%	-0.05%
0.14	-0.28%	-0.24%	-0.07%	-0.23%	-0.09%	-0.10%	0.10%	-0.17%	0.08%	0.26%	-0.40%	0.05%
0.16	0.24%	-0.09%	-0.07%	0.12%	-0.09%	0.17%	-0.05%	-0.04%	0.29%	-0.26%	-0.04%	0.25%
0.18	0.00%	-0.28%	0.27%	0.12%	-0.15%	-0.17%	-0.02%	-0.13%	0.31%	-0.26%	0.13%	-0.30%
0.2	-0.09%	-0.38%	0.17%	0.03%	-0.25%	-0.26%	-0.12%	-0.21%	0.23%	-0.34%	0.04%	-0.40%
0.22	0.09%	-0.80%	0.17%	-0.20%	0.22%	-0.22%	-0.29%	0.00%	-0.41%	-0.26%	-0.09%	-0.89%
0.24	-0.85%	0.38%	0.03%	-0.06%	-0.34%	-0.19%	-0.17%	0.04%	-0.34%	0.26%	0.18%	0.35%
0.26	-0.05%	-0.52%	0.43%	0.09%	-0.46%	-0.41%	0.05%	0.27%	0.18%	-0.73%	0.31%	-0.79%
0.28	-1.46%	1.23%	-0.20%	0.23%	-0.43%	-0.81%	-0.02%	-0.88%	0.18%	-1.54%	-0.13%	-0.20%
0.3	1.23%	0.28%	0.40%	-0.56%	-0.96%	-0.69%	-0.56%	-0.25%	0.44%	0.26%	0.18%	-1.14%
0.32	-0.24%	1.23%	-0.17%	0.09%	-0.09%	1.10%	0.05%	0.42%	0.75%	0.26%	-0.35%	0.45%
0.34	-0.14%	-0.28%	-0.13%	0.38%	0.12%	0.12%	0.02%	0.19%	0.99%	0.00%	-2.43%	-0.45%
0.36	0.85%	0.33%	0.67%	-0.26%	0.25%	-1.85%	-0.07%	0.29%	1.50%	-0.81%	-0.62%	0.55%
0.38	-0.61%	2.50%	0.00%	0.73%	0.28%	0.48%	-0.15%	0.19%	0.08%	-1.50%	0.84%	0.84%
0.4	0.24%	-1.51%	0.33%	-0.56%	0.37%	0.12%	-0.46%	0.65%	-0.05%	1.29%	-1.20%	-0.94%
0.42	0.47%	-0.09%	-0.20%	-0.41%	0.06%	-0.53%	0.00%	-0.58%	0.67%	-0.39%	-0.04%	0.59%
0.44	0.05%	1.42%	0.10%	0.47%	0.03%	1.05%	-0.24%	0.29%	0.03%	1.33%	0.22%	1.68%
0.46	-0.28%	-1.13%	0.07%	1.29%	0.59%	0.36%	0.27%	-0.25%	1.63%	0.13%	-1.06%	0.15%
0.48	-1.37%	1.18%	0.47%	0.82%	-0.49%	-1.80%	0.12%	1.11%	-0.05%	-1.89%	0.58%	0.45%
0.5	-1.70%	3.21%	1.50%	-1.58%	-0.62%	-2.73%	0.24%	-1.02%	1.79%	-0.99%	2.08%	0.20%
0.52	-0.66%	5.62%	0.30%	-1.05%	-1.39%	-0.77%	0.68%	0.25%	-1.48%	-1.63%	-0.62%	-0.74%
0.54	-0.28%	1.80%	-0.13%	-1.29%	-0.93%	0.05%	0.15%	-0.58%	0.78%	-2.57%	0.97%	3.22%
0.56	0.57%	-0.99%	0.40%	-0.41%	-1.42%	-1.51%	0.00%	-1.67%	2.28%	0.17%	-0.09%	0.74%
0.58	0.57%	1.61%	-0.70%	-0.06%	0.49%	-1.05%	-0.70%	0.50%	1.37%	0.09%	0.62%	-0.10%
0.6	1.65%	-0.33%	0.13%	0.18%	-1.05%	-2.52%	-0.36%	-0.50%	0.00%	0.04%	0.53%	-3.42%
0.62	2.17%	-0.47%	-0.23%	-0.70%	0.49%	-0.98%	0.46%	0.13%	0.03%	-0.26%	0.00%	1.73%
0.64	-1.56%	0.99%	0.17%	0.20%	0.83%	2.56%	0.46%	-0.31%	0.54%	-0.77%	0.49%	0.00%
0.66	0.19%	0.43%	0.10%	-0.15%	-2.01%	1.44%	-0.58%	0.13%	-0.73%	0.26%	2.21%	0.45%
0.68	1.04%	-2.13%	-0.03%	0.41%	0.28%	-0.62%	-0.05%	0.56%	-0.03%	1.46%	-1.11%	-0.50%
0.7	1.37%	-3.26%	0.43%	-1.26%	1.55%	-0.07%	-0.53%	0.06%	-0.08%	3.00%	0.80%	-0.50%
0.72	-0.28%	0.85%	0.60%	0.12%	-0.37%	-0.50%	-0.48%	-1.06%	2.31%	0.30%	-1.02%	-1.83%

Passo Usado do Cálculo do QI (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.74	0.57%	0.24%	-0.57%	-0.59%	-0.59%	-0.48%	-1.26%	-1.44%	0.08%	1.11%	3.41%	1.64%
0.76	0.90%	2.22%	0.00%	1.84%	-2.47%	-0.17%	-2.86%	0.46%	1.66%	-2.19%	1.59%	0.40%
0.78	0.99%	3.07%	0.63%	-0.94%	-1.05%	-2.66%	0.80%	-1.44%	0.26%	0.43%	0.09%	-1.29%
0.8	1.84%	-5.15%	-0.17%	-0.15%	-0.71%	2.61%	3.03%	2.46%	0.83%	2.70%	0.13%	-2.28%
0.82	1.75%	5.95%	-2.40%	0.88%	4.45%	-0.91%	-2.64%	0.60%	3.86%	-1.41%	-1.51%	-0.94%
0.84	1.70%	-2.84%	-0.33%	0.59%	-3.22%	1.01%	-0.24%	-6.70%	0.80%	-1.24%	-0.44%	-1.29%
0.86	1.51%	-2.50%	0.97%	-0.50%	2.47%	-1.15%	0.75%	1.25%	-2.41%	-2.96%	1.11%	-0.94%
0.88	2.88%	2.08%	0.07%	-1.84%	2.26%	-1.32%	-2.33%	-0.69%	0.44%	3.86%	-1.20%	2.87%
0.9	2.03%	-0.28%	1.13%	0.23%	0.68%	-0.69%	-1.87%	-4.30%	1.66%	-0.69%	-5.27%	-0.59%
0.92	-3.92%	-2.88%	-0.30%	4.01%	-0.49%	5.13%	-0.48%	0.79%	3.16%	-0.94%	-1.02%	-5.50%
0.94	2.93%	-2.17%	-0.20%	3.04%	-0.53%	1.80%	-0.12%	-0.29%	3.53%	2.10%	2.66%	-2.33%
0.96	-3.21%	2.32%	2.74%	0.41%	-1.11%	-4.27%	-1.38%	-1.46%	-0.47%	1.33%	1.81%	-2.33%
0.98	0.66%	3.59%	1.17%	0.35%	-4.42%	5.54%	2.33%	-3.17%	2.77%	-4.50%	1.51%	-3.82%
1	-2.69%	3.40%	-0.30%	-2.81%	-4.95%	-3.81%	5.28%	-5.74%	2.15%	0.21%	2.74%	3.12%

Os resultados encontrados confirmam a expectativa registrada por Sayers et al. (1986a), pois não pode ser observada qualquer tendência de aumento ou diminuição nos valores do QI com o aumento do espaçamento entre os pontos utilizados para seu cálculo. A visualização desta variação pode observada na figura 4.13.

Figura 4.13 – Representação gráfica dos percentuais de variação do valor do QI para diferentes espaçamentos entre pontos de 12 perfis longitudinais.

Pela análise dos dados, fica claro que o uso de perfis com espaçamento menor que 0,50 m apresenta variabilidade menor dos resultados e que os perfis com espaçamentos maiores de 0,50 m apresentam variações bastante expressivas.

Embora para perfilômetros inerciais seja possível a medição de perfis com espaçamentos muito pequenos – tal qual evidencia o estudo realizado – atualmente a medida de um perfil de referência com outro equipamento, como um nível e mira ou Dipstick é praticamente inviável em espaçamentos muito pequenos, da ordem de 20 ou 40 mm.

Ao mesmo tempo é preciso lembrar que não é qualquer espaçamento que se presta ao cálculo do QI. No caso do exercício realizado, como o espaçamento do perfil era de 20 mm ficou fácil simplesmente pular alguns pontos e calcular o QI em qualquer espaçamento. Todavia, deve-se lembrar que espaçamentos adequados ao cálculo do QI precisam ser divisores de 1,00 e 2,50 ao mesmo tempo, pois são esses os comprimentos em metros das bases que são levadas em conta no cálculo deste índice.

Desta maneira, com base no estudo apresentado e na viabilidade técnica atual de outros equipamentos para a obtenção de perfis de referência que possam ser usados na verificação de perfilômetros inerciais, pode-se concluir que o espaçamento de 0,25 m representa um grande avanço em termos de diminuição da dispersão de valores de irregularidade. Pode-se observar pelo gráfico que as diferenças encontradas para o cálculo de QI com o espaçamento no entorno de 0,25 m foram menores que 1%, enquanto que no cálculo do QI da forma tradicional, com espaçamento ao redor de 0,50 m, chegou a ocorrer diferença maior que 5%.

O espaçamento de 0,25 m atende todos os requisitos necessários: é divisível por 1 e por 2,5; é factível sua medição com nível e mira e Dipstick; e, acima de tudo, representa uma melhoria sensível na diminuição da variabilidade do cálculo do QI, haja vista que os resultados obtidos a este espaçamento, são bastante próximos dos resultados obtidos com o menor espaçamento estudado.

Há outro ponto muito importante a favor da atualização do espaçamento entre pontos do perfil da norma brasileira de 0,5 m para 0,25 m. Trata-se do não prejuízo dos contratos vigentes que usam o QI.

Conforme se pôde evidenciar pelo gráfico e pela tabela apresentados, diminuir o espaçamento dos pontos não prejudica ninguém, apenas reduz a variabilidade que o espaçamento maior pode causar.

Em outras palavras, pode-se afirmar que com o QI calculado a cada 0,25 m qualquer fiscalização de irregularidade fica mais justa e correta. Não há prejuízo para as partes, pois não há tendência.

Embora este item da pesquisa não tenha intenção em sugerir um tratamento diferenciado para o cálculo do IRI, é importante informar que a norma ASTM E 1926 – 98 preconiza o uso de perfis longitudinais com espaçamento igual ou inferior a 0,3 m. Ou seja, mudando-se o espaçamento do QI para 0,25 m seria totalmente possível calcular ambos os índices a partir de um mesmo perfil longitudinal, de forma a atender ambas as normas, o que não deixa de ser mais um ponto a favor da mudança.

Vale registrar que no caso do IRI, segundo estudos de Sayers (1995), ao contrário do QI, existe uma tendência de diminuição do valor da irregularidade calculada com o aumento do espaçamento entre pontos do perfil a partir do espaçamento de 0,2 m. Mesmo assim, afirma o autor que perfis com espaçamentos de até 0,3 m apresentam IRI com erros menores que 2% em relação a perfis com espaçamentos muito pequenos.

Portanto, pode-se afirmar que as evidências coletadas neste item suportam as conclusões de que a média móvel de 150 mm de comprimento, utilizada em conjunto com o método de supressão de picos, é adequada à filtragem de perfis longitudinais obtidos com perfilômetros visando o cálculo do QI, bem como que o espaçamento de 0,25 m possa e deva ser usado para cálculo do QI, haja vista que em todos os pontos de vista analisados só foram encontrados benefícios para tal redução, que deve ser sugerida às autoridades normalizadoras brasileiras.

4.4 A incerteza dos índices de irregularidade e a fiscalização de contratos

Conforme já foi mencionado nas partes iniciais deste texto, a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos possui várias utilidades, dentre as quais está a fiscalização de contratos.

Dentro de tal item destacam-se principalmente duas espécies principais de contratos:

- a) Os contratos de concessão ou de parceria público-privada, nos quais normalmente uma empresa privada concessionária ou parceira, dentro do rol de obrigações assumidas, torna-se sujeita a uma avaliação estatal de vários parâmetros que visam monitorar o desempenho de sua atividade de conservação viária, dentre os quais normalmente está incluída a avaliação da irregularidade do pavimento;
- b) Os contratos de construção ou manutenção de um pavimento qualquer, em que o contratante pode condicionar o recebimento do serviço a um determinado valor de índice de irregularidade, podendo inclusive estabelecer prêmios ou penalidades econômicas para a superação ou o não atendimento das especificações contratuais. Neste caso, o contratante pode ser tanto uma empresa pública, quanto uma empresa privada.

É certo que existe uma incerteza de medição relacionada à grande maioria das diversas grandezas mensuráveis e com a irregularidade longitudinal não é diferente.

Por este motivo, é importante discutir em uma pesquisa como esta qual seria a incerteza ou erro que pode estar associado a uma determinada medida de irregularidade realizada a partir de um perfilômetro inercial que apresente características equivalentes aos equipamentos deste tipo fabricados nas diversas partes do mundo.

Esta análise foi dividida em dois subitens. O primeiro tratará de analisar a incerteza dos índices de irregularidade relativos ao equipamento e sua operação. O segundo tratará de uma característica ainda não explorada do quociente de irregularidade QI,

que diz respeito aos comprimentos de onda que são levados em conta em seu cálculo.

4.4.1 As incertezas nos índices relativos ao perfilômetro e sua operação

Mesmo de posse de parâmetros restritos para a qualificação de um perfilômetro inercial, conforme a proposta do item 4.1.5, ainda restará uma incerteza quanto às medições dos perfis levantados por perfilômetros inerciais, cujo efeito nos índices de irregularidade calculados pode ser estimado com base em simulações.

Para simulá-lo em um caso específico basta tomar um perfil longitudinal qualquer e imaginar que ele represente de forma correta o perfil de campo, dadas as características do medidor utilizado – trata-se portanto de uma análise relativa.

A partir de tal perfil, pode-se calcular os índices de irregularidade e em seguida, adicionar um “ruído” aleatório ao longo de todo o perfil até que o resultado da correlação cruzada entre o novo perfil “ruidoso” e o original atinja o limite prescrito do índice de concordância desejado. Quando se atingir tal índice, calcula-se novamente o resultado dos mesmos índices de irregularidade e por fim basta comparar os valores.

Perfis diferentes devem mostrar diferenças percentuais também diferentes com a adição do ruído. O que se deseja evidenciar é que existe uma margem de incerteza que pode ser ao menos exemplificada mediante um exercício relativamente simples. Tal exemplo serve para que os responsáveis pela fiscalização de índices de irregularidade em contratos tenham a devida sensibilidade em relação a esta margem de incerteza para não punir ou bonificar indevidamente com base em um limite rígido de um determinado índice de irregularidade.

Para o índice IRI, o exercício proposto já foi realizado para um bom número de segmentos e para 3 valores de índice de concordância, obtidos a partir do método de correlação cruzada. Os resultados estão em Karamihas (2005a) e foram reproduzidos na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Relação entre o índice de concordância e a diferença esperada no valor do IRI.

Índice de Concordância (IC)	Diferença % no esperada no valor do IRI (95% das vezes)
0,98	± 2 %
0,94	± 5 %
0,88	± 10%

Como não há estudo similar para o QI, escolheu-se aleatoriamente 5 perfis longitudinais com 200 metros de comprimento cada (medidos com o perfilômetro em rodovias paulistas), que apresentassem valores de QI (cont/km) diferentes, visando estimar para essas amostras qual seria o erro no valor do QI que um perfilômetro aprovado no critério de exatidão proposto, com $IC_E = 0,88$, poderia apresentar.

Para aproveitar melhor a oportunidade deste exercício, foi calculado também o resultado do IRI antes e depois da adição ruído aleatório ao perfil. Para esta verificação, os perfis utilizados apresentavam elevações espaçadas de 0,25 m.

A média da intensidade do ruído aleatório adicionado aos perfis aumentou até que o índice de concordância entre o perfil original e o perfil modificado atingisse 0,88. A média das elevações do ruído adicionado foi igual a zero.

A tabela 4.13 apresenta os resultados desta verificação, que revelou para a amostra testada, que a variação do QI tende a ser igual ou maior que a variação do IRI para a mesma adição de ruído. É importante notar que a variação do IRI, ficou dentro da expectativa informada na tabela 4.12.

Tabela 4.13 – Resultados da estimação de erro que pode conter os índices IRI e QI, quando medidos a partir de um perfilômetro que apresente $IC_E = 0,88$.

	Desvio Padrão (mm) do ruído adicionado ao perfil para $IC_E = 0,88$	QI Original (cont/km)	QI do perfil com adição de ruído (cont/km)	Percentual de aumento absoluto do QI	IRI Original (m/km)	IRI do perfil com adição de ruído (m/km)	Percentual de aumento absoluto do IRI
Perfil 1	0,25	3,9	4,9	8%	0,93	0,98	5%
Perfil 2	0,67	22,2	26,1	13%	2,33	2,54	9%
Perfil 3	0,87	28,7	32,1	9%	2,73	2,95	8%
Perfil 4	1,01	35,9	39,9	9%	3,16	3,44	9%
Perfil 5	1,54	56,1	64,3	13%	4,76	5,15	8%

Seria necessário um estudo muito mais abrangente que este para que se pudesse determinar uma expectativa de erros que poderiam eventualmente estar presentes nos valores de QI de um perfilômetro que possua $IC_E = 0,88$. De qualquer maneira, os exemplos apresentados servem para que se tenha noção de que mesmo bons perfilômetros apresentam uma incerteza de medição teórica, que é estimável e que não apresentou valores de erro exorbitantes.

Este exercício também demonstra que, diferentemente do teste de verificação da exatidão de perfilômetros preconizado pela ASTM E 950-98, a verificação através do método da correlação cruzada não permite que perfilômetros que possam produzir erros muito grandes, sejam erroneamente qualificados. Vale lembrar que esta informação foi apresentada no item 4.1.1, onde foi relatado que é possível acrescentar ruído em um determinado perfil de maneira que o IRI tenha aumentado em 1,52 m/km, sem que o perfilômetro deixasse de ser classificado na primeira classe da ASTM E 950-98.

Além das incertezas relativas ao equipamento, existem as incertezas relativas ao processo. Conforme já foi mencionado, as medições de irregularidade com perfilômetros inerciais normalmente são feitas ao longo de linhas finas vez que o laser normalmente é pontual. Assim, como o posicionamento na faixa de rolamento está atrelado ao posicionamento do veículo, é natural que existam pequenas diferenças entre medições que não forem feitas exatamente ao longo das mesmas linhas.

Não é fácil, neste caso, estimar o quanto de incerteza pode existir em uma avaliação de irregularidade devido ao posicionamento do veículo e conseqüentemente dos módulos de medição na faixa de rolamento. Isto variará muito de pavimento para pavimento.

O que se pode ressaltar a este respeito é que pavimentos em melhor estado de conservação normalmente apresentam maior uniformidade transversal e dessa maneira, menor deve ser a variação dos valores dos índices de irregularidade devido a pequenas variações de posicionamento transversal.

Ademais, não se pode esquecer que há outras fontes de erros possíveis em levantamentos de perfis longitudinais destinados à avaliação de irregularidade, que

foram ressaltadas no item 2.8, as quais são controláveis principalmente através de treinamento de operadores e da verificação periódica do equipamento.

A recomendação que se pode deixar para o caso de existirem dúvidas em relação a uma determinada avaliação de irregularidade, é a verificação do perfilômetro inicialmente através dos testes mais rápidos, tais como a verificação dos módulos laser com blocos padrão e o teste de balanço. Com o perfilômetro verificado, pode ser executada a repetição das medições sobre as quais pairaram dúvidas, para que se confirme ou não os resultados encontrados.

Uma maneira de aumentar a confiabilidade das avaliações está na execução de duas ou mais medições para se avaliar um mesmo trecho. Nestes casos, antes de calcular os índices, os perfis longitudinais de cada medição devem ser cuidadosamente “encaixados”, ou seja, o *offset* longitudinal entre as medições deve ser acertado para que o cálculo dos índices seja feito exatamente nos mesmos trechos de pavimento.

Para concluir esta discussão é preciso reafirmar que existe uma margem de incerteza associada aos índices de irregularidade de pavimentos medidos a partir de perfis longitudinais que foram obtidos com perfilômetros inerciais e que, quando os perfilômetros são sujeitos a uma avaliação através do método da correlação cruzada, esta incerteza pode ser estimada.

Nas amostras analisadas nesta verificação, o erro máximo provocado no QI com a adição de ruído artificial a um perfil longitudinal de pavimento real, de maneira a atingir-se um índice de concordância de 0,88, foi de 13%.

Uma última observação importante que pode ser extraída da tabela 4.13 diz respeito à quantidade de ruído que foi adicionada em cada caso para se obter o $IC = 0,88$. Pode-se perceber facilmente que quanto menor a irregularidade da base, menor foi a quantidade de ruído adicionada, isso significa que o método da correlação cruzada entre perfis é bem balanceado em relação ao nível de irregularidade. Se por um lado pode ser mais fácil para um perfilômetro medir corretamente um trecho com irregularidade baixa, por outro, o método é sensível a isto e limita mais ainda a quantidade de ruído aceitável nesses casos.

Como existem outras incertezas neste tipo de avaliação, como por exemplo, aquela relativa ao posicionamento do veículo na faixa de rolamento, que é mais difícil de ser estimada, recomenda-se que gestores de contratos que possuam limites baseados na irregularidade adotem uma margem de erro nos resultados das avaliações de irregularidade, para que possam cumprir as determinações contratuais com maior margem de acerto possível. Ademais, cumpre ressaltar que o índice de irregularidade QI apresenta algumas características que podem aumentar em muito a incerteza de certos greides de pavimentos, conforme será evidenciado no item a seguir.

4.4.2 Os comprimentos de onda que afetam o quociente de irregularidade QI

Já na fase final do desenvolvimento desta pesquisa, descobriu-se casualmente, quando se buscava um trecho de pavimento com baixa irregularidade, que o quociente de irregularidade QI pode ser afetado por comprimentos de onda muito grandes, que em teoria são muito mais relacionados ao greide de uma rodovia do que à irregularidade propriamente dita.

Antes de prosseguir na discussão é importante mencionar o conceito de irregularidade longitudinal de pavimentos, no que diz respeito às amplitudes e comprimentos de onda normalmente entendidos como irregularidade longitudinal. Segundo Domingues (2004), os menores comprimento de onda e amplitude referentes ao que se classifica como sendo irregularidade longitudinal são: $\lambda = 0,5 \text{ m}$ e $A = 1 \text{ mm}$; enquanto os maiores são $\lambda = 50 \text{ m}$ e $A = 200 \text{ mm}$.

Tal conceito é bastante aderente àquele apregoado por outras publicações, mesmo que de forma tácita. Por exemplo, a norma ASTM E 950-98 recomenda a filtragem dos perfis longitudinais obtidos com perfilômetros, desde que o filtro não altere os comprimentos de onda menores que 60 metros presentes nos perfis.

Segundo informações obtidas através do Prof. Steve Karamihas⁵, os fabricantes norte-americanos de perfilômetros inerciais já filtram os perfis obtidos das medições visando eliminar os grandes comprimentos de onda eventualmente presentes no perfil, que sejam maiores que 91 m (300 pés) ou maiores que 61 m (200 pés), tal qual recomenda a ASTM.

O procedimento é feito visando apenas uniformizar a forma dos perfis obtidos a velocidades mais baixas, uma vez que o efeito de tais comprimentos de onda no cálculo do IRI é praticamente zero.

Sendo assim, resolveu-se estudar, ainda que de forma preliminar, qual seria esta influência que os grandes comprimentos de onda poderiam causar no resultado do QI.

Figura 4.14 – Gráfico do ganho do quociente de irregularidade (QI), referente a perfis longitudinais em inclinações.

⁵ Tais informações foram obtidas em conversações por e-mail, mantidas no ano de 2007.

A figura 2.17 apresentou a resposta dos índices IRI e QI a diversos comprimentos de onda, entretanto tal figura, assim como outras similares disponíveis na literatura, não incluiu os comprimentos de onda maiores que 50 metros.

Assim, inicialmente buscou-se refazer o gráfico relativo ao ganho do QI para verificar como os grandes comprimentos de onda afetam tal índice. Este gráfico é apresentado na figura 4.14.

A análise da figura 4.14 revela que há certa influência dos comprimentos de onda acima de 50 m nos valores do QI. A figura evidencia que até comprimentos de onda com mais de 500 metros podem influenciar no valor deste índice.

Sendo assim, idealizou-se um pequeno estudo para que se pudesse avaliar o impacto dos comprimentos de onda grandes no valor do QI. Mais uma vez, aproveitou-se a oportunidade também para verificar o efeito no índice IRI.

Para este estudo idealizaram-se 3 segmentos de 200 m com greides teóricos que possuíssem comprimentos de onda considerados grandes, ou seja, bem maiores que os 50 metros, foram eles: 100 m, 200 m e 300 m. Para estes comprimentos de onda foram escolhidas amplitudes consideradas compatíveis, respectivamente 300 mm, 400 mm e 1100 mm.

Estes valores foram idealizados visando simular aproximada e hipoteticamente um greide possível para uma seção de rodovia que apresentasse curvas verticais côncavas ou convexas.

Ainda como parte desta simulação, escolheram-se 3 perfis de pavimentos medidos com o perfilômetro, com diferentes irregularidades.

A verificação consistiu em calcular a irregularidade dos trechos dos greides criados, dos segmentos medidos com o perfilômetro e por fim do perfil gerado através da soma ponto a ponto do greide com o perfil medido, para quantificar a influência dos grandes comprimentos de onda tanto no QI, quanto no IRI.

Os resultados estão na tabela 4.14, que incluiu também um cálculo percentual do acréscimo absoluto nos valores dos índices IRI e QI após a adição do greide no perfil medido.

Tabela 4.14 – Resultados dos cálculos do QI e IRI de segmentos de 200 m de um greide teórico, de um perfil medido com perfilômetro e do perfil resultante da soma dos dois perfis anteriores visando a verificação da influência dos grandes comprimentos de onda nos valores de tais índices de irregularidade.

Greide Idealizado			QI (cont/km)				IRI (m/km)			
Perfil	Comp. de onda (m)	Amplitude (mm)	Sobre o perfil original	Somente sobre o greide	Sobre a soma dos perfis: original+	% de aumento do QI, após adição do greide	Sobre o perfil original	Somente sobre o greide	Sobre a soma dos perfis: original+	% de aumento do IRI, após adição do greide
					greide	do greide			greide	do greide
A	100	300	2.2	12.9	16.2	130.4%	0.79	0.39	0.89	12.7%
	200	400	2.2	-1.4	4.8	24.2%	0.79	0.06	0.79	0.0%
	300	1100	2.2	0.6	6.1	36.3%	0.79	0.05	0.79	0.0%
B	100	300	20.5	12.9	28.6	27.9%	2.2	0.39	2.24	1.8%
	200	400	20.5	-1.4	21.6	3.8%	2.2	0.06	2.21	0.5%
	300	1100	20.5	0.6	21.9	4.8%	2.2	0.05	2.2	0.0%
C	100	300	27.7	12.9	34.6	19.0%	2.84	0.39	2.85	0.4%
	200	400	27.7	-1.4	28.6	2.5%	2.84	0.06	2.83	-0.4%
	300	1100	27.7	0.6	29.1	3.9%	2.84	0.05	2.83	-0.4%

Os resultados da tabela 4.14 demonstram claramente que o QI é muito mais suscetível aos longos comprimentos de onda que poderiam, em tese, existir em determinados segmentos de uma rodovia, do que o IRI.

Ao analisar os resultados do QI, não se pode esquecer que a escala parte do valor negativo de 8,54 cont/km, ou seja, até no comprimento de onda de 300 metros, o calculo do QI somente sobre o greide de um pavimento teoricamente perfeito em termos de irregularidade mostrou um valor absoluto considerável, cerca de 9 cont/km.

Entretanto, deve-se notar que quanto maior foi irregularidade do perfil somado ao perfil do greide, menor foi a diferença final no resultado do QI. Em outras palavras, pavimentos com greide sinuoso, com baixa irregularidade tenderão a apresentar um impacto maior no valor do QI do que pavimentos mais irregulares, com a mesma sinuosidade no greide.

Esta constatação diferencia os índices QI e IRI para tais comprimentos de onda, pois as influências de grandes comprimentos de onda no valor do índice IRI são muito

menores já para o comprimento de onda de 100 metros e desaparecem nos comprimentos de onda maiores.

Pode-se dizer que tal influência dos grandes comprimentos de onda no valor do QI é indevida, pois ele computa como irregularidade algo que não é considerado irregularidade pelos conceitos mais difundidos.

Muito embora este efeito seja restrito às grandes curvas verticais, não há nenhuma menção dele na literatura, o que torna esta constatação muito importante.

A relevância desta constatação é maior, pois como se sabe, perfilômetros inerciais em geral foram idealizados para medir bem os comprimentos de onda de até 60 metros. Acima deste valor como se deixa a seara da irregularidade para se adentrar na seara do greide, não houve grande esforço dessa indústria, nem das normas, para capturar o que não era necessário.

Portanto, quando se mede com um perfilômetro inercial convencional um perfil de uma rodovia com muitas curvas verticais de grandes raios, o QI calculado a partir desse perfil tenderá a ser menor do que o QI calculado a partir de um nivelamento topográfico.

É muito importante registrar ainda que os medidores do tipo resposta também não são sensíveis a tais comprimentos de onda longos. Se os acelerômetros dos perfilômetros inerciais que possuem sensibilidade de décimo de milímetro não conseguem sentir o deslocamento da carroceria do veículo quando ele trafega sobre uma curva vertical grande, que dirá os sistemas mecânicos que mediam o deslocamento da suspensão.

Isto quer dizer que os comprimentos de onda longos também não eram levados em conta pelos medidores do tipo resposta e nem o são pelos perfilômetros inerciais. Pode-se concluir, portanto, que se trata de uma limitação do método de determinação do QI realizado a partir das acelerações verticais médias quadráticas.

Feitas tais constatações, ainda que em caráter preliminar, resta registrar sugestões de como lidar com esta situação.

A primeira idéia seria o estudo da aplicação de um filtro sobre os perfis determinados por perfilômetros visando realmente retirar todos os comprimentos de onda acima de 50 ou 60 metros, antes de se calcular o QI.

O ponto negativo desta idéia é que haveria uma pequena alteração da característica do QI, que embora seja mesma há mais de 20 anos e tem sido usada desta forma, não interferiria nos resultados anteriores, medidos com os medidores do tipo resposta, pois a própria norma que trata da escolha de bases para calibração de tais medidores, DNER-PRO 164/94, não previa bases em curvas verticais. Em outras palavras, como os medidores do tipo resposta não computavam curvas verticais de grandes raios como irregularidade e como o método de calibração deles também não usava bases em curvas verticais, esta limitação do QI passou despercebida.

A idéia de filtrar os perfis, antes do cálculo do QI foi testada preliminarmente para os perfis reais usados nos testes da tabela 4.14 que foram somados com o greide idealizado. Foi aplicado um filtro do tipo Butterworth de segunda ordem visando retirar os comprimentos de onda maiores que 60 metros. Os resultados estão na tabela 4.15 e demonstram que o efeito foi positivo, na medida em que os resultados tornaram-se muito parecidos com aquele gerados pelo perfil original, ou seja, o filtro conseguiu eliminar os grandes comprimentos de onda do greide.

Tabela 4.15 – Resultados dos cálculos do QI e IRI do perfil original, somado ao greide idealizado, filtrado com filtro tipo Butterworth para retirar os comprimentos de onda maiores que 60 metros.

Perfil	Greide Idealizado		QI (cont/km)	IRI (m/km)
	Comprimento de onda (m)	Amplitude (mm)	Perfil resultante: original+ greide, filtrado com BW 60m	Perfil resultante: original+ greide, filtrado com BW 60m
A	100	300	4.5	0.79
	200	400	2.1	0.77
	300	1100	2.1	0.77
B	100	300	21.4	2.24
	200	400	20.2	2.22
	300	1100	20.2	2.22
C	100	300	28.2	2.82
	200	400	27.3	2.84
	300	1100	27.3	2.84

Uma outra solução possível seria equipar os perfilômetros inerciais com um outro sensor inercial, capaz de registrar as inclinações do veículo durante a medição e com isso corrigir os perfis medidos pelo conjunto módulo laser e acelerômetro com o objetivo de incluir neles os grandes comprimentos de onda, que não são medidos da forma tradicional. Isso é factível, tornaria os resultados dos QIs medidos nessas situações mais similares aos cálculos obtidos a partir de perfis topográficos, embora parte de tais valores não possam ser considerados irregularidade propriamente dita.

Uma terceira idéia seria não alterar nem o equipamento, nem a forma de cálculo do índice, mas indicar aos usuários de dados de perfilômetros e em uma eventual norma brasileira que venha a tratar do tema, uma observação explicando que o valor do QI em trechos de curvas verticais de grandes raios pode ser subestimado por perfilômetros inerciais. Isso porque os greides com grandes comprimentos de onda afetam o QI, mas não são medidos normalmente pelos perfilômetros inerciais, sendo que este efeito tende a ser percentualmente maior, quanto menor o valor do QI.

Trata-se de um assunto que requer mais reflexão antes que uma decisão seja tomada. De qualquer maneira, no momento, a terceira idéia é a que entra em prática automaticamente, até que se reflita se a primeira ou a segunda sugestões descritas é melhor que ela.

O uso conjunto do IRI em situações de greides sinuosos que possuam grandes comprimentos de onda pode também auxiliar na superação de eventuais diferenças.

4.5 A correlação entre os índices IRI e QI – algumas considerações

Em nosso país, dada a normalização do DNER, que fixa o QI como sendo o índice de irregularidade longitudinal oficial é de se esperar que ele seja realmente o índice mais utilizado. Isto é verdade, muito embora em algumas vezes não só concessionárias como também órgãos oficiais solicitem os resultados em IRI.

Como o modelo de cálculo e conseqüentemente de calibração de um medidor do tipo-resposta em IRI não é muito difundido por não haver norma nacional, o que a maioria dos prestadores de serviço faz para determinar o IRI é usar um dos modelos

de correlação mais conhecidos e “converter” o valor do QI em IRI. Até onde se sabe, os modelos disponíveis são bastante acreditados pelos técnicos e pelo que consta sabe não foram determinados com base em um grande banco de dados.

Certamente, o advento dos perfilômetros inerciais pode tornar desnecessário, a partir do desenvolvimento de *softwares* adequados de processamento, o uso de correlações entre os dois índices. Entretanto, como ainda pode demorar um pouco até que se esteja usando somente perfilômetros inerciais no Brasil e tendo em vista o fato de muitas vezes se converterem medidas antigas de irregularidade para uniformizar bancos de dados, acredita-se que pode ser de grande utilidade não só conhecer melhor os erros embutidos nos modelos mais usados atualmente, como também propor um novo modelo baseado em uma representativa base de dados.

É importante informar que para todos os trechos de perfis utilizados nesses estudos de correlação entre IRI e QI, o IRI foi calculado de forma independente, mesmo em trechos consecutivos (vide item 2.6.1). Essa opção foi feita, pois nos estudos originais de correlação entre os dois índices não houve trechos consecutivos, ou seja, o cálculo também foi independente. Além disso, é muito mais lógico para este estudo que o cálculo seja feito desta maneira, pois como já foi explicado, o cálculo do QI é sempre independente entre trechos e não seria correta a comparação com um valor de IRI que contivesse a influência de um trecho anterior, não computado pelo QI.

4.5.1 A verificação dos modelos atuais de correlação

Os dois modelos de correlação mais usados no Brasil e que foram objeto desta verificação estão em Paterson (1986, 1987). Os modelos são:

$$IRI = \frac{QI + 10}{14} \quad (4.3)$$

$$IRI = \frac{QI *}{13} \quad (4.4)$$

Em ambos os modelos o QI está na unidade de contagens/km e o IRI em m/km.

É imprescindível informar que para o QI calculado a partir do perfil longitudinal, com base no modelo disponível na norma DNER-ES 173/86, o modelo de correlação correto segundo os trabalhos citados é o primeiro (4.3), que seguindo esta interpretação, é o adequado para uso com dados de equipamentos calibrados pelo método brasileiro. Vale dizer, portanto, que não é adequado o uso do modelo (4.4) para equipamentos calibrados conforme a norma DNER-ES 173/86, pois tal modelo foi determinado usando-se como referência o valor do QI^* (cont/km), que foi obtido por medidores do tipo resposta usados durante a PICR e cuja forma de calibração foi alterada durante o estudo, conforme já foi elucidado. Mesmo sabendo disto, ambos os modelos foram testados.

É importante também mencionar que o modelo de correlação correto (4.3) foi obtido a partir dos dados do Experimento Internacional de Irregularidade de Pavimentos (IRRE), que não contou com um número muito grande de segmentos avaliados. O estudo que propôs o modelo acima levou em conta os dados de 49 trechos de pavimentos em nível e em tangente, com comprimento de 320 metros cada, sendo que 13 deles tinham superfície de concreto asfáltico, 12 haviam sofrido apenas tratamentos superficiais, outros 12 eram estradas de pedregulhos e por fim, os últimos 12 eram estradas de terra, de acordo com dados do próprio estudo de Sayers et al. (1986a).

Os mesmos segmentos da tabela 4.2 foram utilizados para esta verificação. Os perfis foram usados com as elevações em milímetros. A tabela 4.16 contém os resultados.

A própria tabela 4.16 e a figuras 4.15 e 4.16 evidenciam que o modelo (4.3) é melhor que o modelo (4.4), especialmente para valores de irregularidade menores. Nos valores menores ($IRI < 2$ m/km, por exemplo), o modelo (4.4) pode apresentar erros significativos, o que vai ao encontro das observações de Paterson (1987).

Pôde-se concluir desta verificação que o melhor a se fazer era uma nova determinação dos modelos de correlação, utilizando-se um número bem maior de trechos, levando-se em conta o QI e IRI calculados com base em perfis medidos em décimos de milímetros.

É difícil precisar o porquê, mas embora uma verificação deste tipo não seja muito complexa de ser realizada, não foi encontrado desde os trabalhos da PICR e do IRRE, nenhum outro modelo de correlação entre tais índices.

Tabela 4.16 - Cálculo QI e IRI de acordo com os modelos de correlação mais utilizados.

QI Medido (cont/km)	QI=IRI*13	QI=(14*IRI) – 10	IRI Medido (m/km)	IRI = QI/13	IRI = (QI+10)/14	Erro % IRI=QI/13	Erro % IRI=(QI+10)/14
2.2	7.79	-1.61	0.79	0.17	0.87	-78.6%	10.2%
2.0	8.26	-1.10	0.81	0.15	0.86	-81.0%	5.9%
3.8	10.58	1.39	0.96	0.29	0.99	-69.6%	2.6%
4.2	9.33	0.05	0.88	0.32	1.01	-63.5%	14.7%
4.2	10.48	1.29	0.96	0.32	1.01	-66.2%	6.1%
3.9	9.32	0.04	0.91	0.30	0.99	-66.9%	9.5%
4.4	10.19	0.98	0.94	0.34	1.03	-64.1%	9.0%
6.1	11.53	2.42	1.05	0.47	1.15	-55.3%	9.7%
6.7	14.01	5.09	1.22	0.52	1.19	-57.8%	-2.2%
6.4	14.23	5.32	1.25	0.49	1.17	-60.6%	-6.2%
6.8	13.64	4.69	1.18	0.52	1.20	-55.6%	1.9%
6.9	13.23	4.25	1.21	0.53	1.21	-56.3%	-0.5%
10.1	16.79	8.08	1.34	0.78	1.44	-41.8%	7.5%
10.7	16.68	7.96	1.38	0.82	1.48	-40.5%	6.9%
10.4	16.93	8.24	1.37	0.80	1.46	-41.5%	6.6%
11.3	17.42	8.76	1.45	0.87	1.52	-39.9%	5.3%
13.9	16.99	8.30	1.48	1.07	1.71	-28.0%	15.0%
14.7	20.05	11.59	1.66	1.13	1.76	-32.0%	6.0%
15.5	17.98	9.36	1.50	1.19	1.82	-20.6%	21.3%
14.8	21.27	12.91	1.73	1.14	1.77	-34.0%	2.6%
15.7	21.57	13.23	1.72	1.21	1.84	-29.7%	6.8%
16.0	20.09	11.63	1.67	1.23	1.86	-26.1%	11.5%
19.5	26.35	18.38	2.14	1.50	2.11	-30.0%	-1.7%
19.7	24.28	16.15	1.95	1.52	2.12	-22.5%	8.6%
19.6	24.57	16.46	1.97	1.51	2.11	-23.6%	7.1%
20.4	21.79	13.47	1.77	1.57	2.17	-11.2%	22.8%
20.5	24.83	16.74	2.02	1.58	2.18	-21.8%	8.0%
28.6	29.33	21.59	2.28	2.20	2.76	-3.5%	20.9%
30.4	34.28	26.92	2.71	2.34	2.89	-13.8%	6.3%
30.1	30.20	22.52	2.42	2.32	2.86	-4.4%	18.2%
30.7	30.15	22.47	2.35	2.36	2.91	0.4%	23.6%
31.2	35.40	28.12	2.77	2.40	2.94	-13.3%	6.3%
38.7	38.72	31.70	3.04	2.98	3.48	-2.1%	14.4%
39.9	34.85	27.53	2.72	3.07	3.56	13.0%	31.3%
40.2	42.12	35.37	3.30	3.09	3.59	-6.2%	8.7%
42.2	35.30	28.01	2.83	3.25	3.73	14.9%	31.9%
42.8	39.28	32.30	3.09	3.29	3.77	6.7%	22.2%

Figura 4.15 – IRI (m/km) calculado a partir do perfil e o mesmo índice obtido com base no QI (cont/km) calculado, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil.

Figura 4.16 – QI (cont/km) calculado a partir do perfil e o mesmo índice obtido com base no IRI (m/km) calculado, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil.

Muito embora o presente estudo contenha somente uma análise relativa – uma vez que não utilizou perfis medidos estaticamente, como conclusões desta verificação

preliminar deve-se destacar não só o uso as diferenças apresentadas pelo modelo (4.4), que neste exercício chegou a adicionar às conversões um erro superior a 50%, mas também as diferenças encontradas com o uso do modelo (4.3), que embora melhor que o anterior, ainda não pôde ser considerado adequado por ter apresentado erros superiores a 20%, principalmente para os valores mais elevados de irregularidade.

4.5.2 A proposição de um novo modelo de correlação

Usando-se como subsídio os resultados obtidos no item anterior que evidenciam as falhas dos modelos de correlação mais usados atualmente para se converter o RI em QI e vice-versa, aliado ao fato de que o número de segmentos utilizados no IRRE para se chegar ao modelo (4.3) ter sido reduzido, buscar-se-á neste item a elaboração de um novo modelo de correlação que apresente resultados igualmente bons, para valores mais altos e mais baixos de irregularidade.

Sabe-se atualmente que a maioria das empresas privadas e dos órgãos rodoviários que usam os dados da irregularidade longitudinal de pavimentos prefere que eles sejam calculados a cada 200 metros, ao invés de 320 metros, conforme preconizado pela norma DNER-PRO 182/94, por uma razão bastante simples: é muito mais fácil trabalhar com 5 medidas por quilômetro do que com valores quebrados. Sendo assim, para esta comparação serão usados resultados de irregularidade calculados a cada 200 m.

Ao mesmo tempo, como o modelo de determinação do QI trazido pela norma DNER-PRO 164/94 preconiza seu cálculo a partir de um perfil longitudinal medido a cada 50 cm, usar-se-á este padrão de espaçamento também para o cálculo do IRI.

Os dados usados na nova correlação proposta foram obtidos com o perfilômetro inercial desenvolvido no âmbito desta pesquisa e atingiram cerca de 2000 km de faixas de rolamento, o que gerou aproximadamente 4000 km de trilhas de roda que tiveram seus perfis longitudinais medidos. Havia nos trechos considerados grande diversidade de greides e de curvas horizontais, que foram incluídos indistintamente.

Visando evitar qualquer tipo de viés que pudesse afetar os dados, foram avaliados trechos de rodovias paulistas e mineiras, sendo que dentro deste rol havia rodovias concedidas à iniciativa privada e também rodovias conservadas pelo poder público. Com exceção dos trechos de obras de arte, todos os demais tinham revestimento asfáltico. Dentre as rodovias escolhidas, havia trechos construídos há menos de 6 anos nunca restaurados e também trechos com mais de 30 anos de construção, restaurados diversas vezes.

Como o intuito desta pesquisa não é julgar a qualidade das vias que foram avaliadas e sim somente propor um modelo de correlação entre os índices IRI e QI, os nomes das rodovias avaliadas não serão revelados.

Ao todo foram obtidos pouco mais de 21.000 perfis longitudinais cujas elevações foram registradas em décimos de milímetros, com 200 metros de comprimento cada um. A partir de cada perfil foi calculado o QI e o IRI, usando os modelos normalizados.

Os valores de QI (cont/km) foram arredondados para valores inteiros, enquanto os valores de IRI (m/km) foram arredondados para 2 casas decimais.

Da massa de dados original decidiu-se por suprimir os pares ordenados cujo QI fosse maior que 80 cont/km. Essa medida visou eliminar pontos que poderiam representar áreas com defeitos superficiais graves, como lombadas, degraus, cruzamentos em nível com linhas férreas, tartarugas, panelas etc. O valor foi escolhido após uma análise qualitativa dos dados.

Restaram 20.963 pares de índices de irregularidade a serem correlacionados. Todos esses pares estão dispostos no Apêndice C. A figura 4.17 apresenta graficamente a distribuição de todos esses pontos, onde o QI variou de -1 a 80 cont/km e o IRI variou de 0,59 a 6,71 m/km.

Figura 4.17 – Representação cartesiana de todos os pares de QI x IRI calculados.

A análise inicial da figura 4.17 indicou que havia certa uniformidade na distribuição dos pontos, sendo que a dispersão da correlação entre os índices tendeu a aumentar com o aumento da irregularidade, mesmo assim a tendência de uma correlação linear mostrou-se bastante sólida.

Ademais, foram observados alguns pontos bastante dispersos principalmente na parte superior do gráfico. Essa observação levou a uma análise individual dos perfis de tais pontos, visando verificar alguma ocorrência em campo que pudesse desqualificá-los.

Foram marcados e analisados cerca de 60 pontos, dos quais 41 apresentaram perfis com alguma anormalidade. As principais anormalidades identificadas diziam respeito muito provavelmente à presença de sonorizadores, lombadas, tartarugas de sinalização, trincas muito abertas, trechos com pavimento molhado e também à presença de algum tipo de objeto sobre a pista. Desta maneira, os 41 pontos referentes a perfis considerados anormais foram eliminados. Tais pontos estão destacados no Apêndice C.

A figura 4.18 mostra novamente a distribuição dos pares de índices de irregularidade, uma vez retirados os pontos referentes a perfis considerados inadequados à pesquisa. Neste caso foram considerados 20.922 pontos.

Figura 4.18 – Representação cartesiana dos pares QI x IRI, uma vez retirados 41 pontos para os quais foram encontradas situações adversas.

A figura 4.18 apresenta ainda o resultado da correlação linear entre os pontos considerados, ao lado do respectivo coeficiente de determinação, que ratificou a existência de uma boa relação linear.

Figura 4.19 – Distribuição da quantidade de segmentos de 200m em função do QI.

A figura 4.19 evidencia a distribuição dos pontos dispostos na figura 4.18 em função do valor do índice QI, a partir do ponto com $QI = 1$ cont/km, onde é possível perceber a predominância de pontos com quocientes de irregularidade entre 6 e 40 cont/km.

Para os 3 dos valores de QI com mais pontos, foi feita uma verificação da forma da distribuição das frequências de IRI, que são apresentadas através dos histogramas da figura 4.20.

Figura 4.20 – Histogramas com a distribuição dos valores do IRI para 3 QI diferentes.

Figura 4.21 – Representação gráfica e regressão linear da média dos IRI por valor de QI.

Como se pode verificar através das linhas de tendência incluídas nos 3 histogramas por meio de média móvel, a distribuição dos valores do IRI para um mesmo valor de QI segue uma distribuição próxima da normal. A partir desta verificação, calculou-se o valor médio dos IRIs para cada um dos valores de QI. Aos pontos encontrados foi aplicada nova regressão linear, conforme o disposto na figura 4.21.

Os modelos lineares de correlação da figura 4.21 e o da figura 4.18 são bastante próximos. A diferença maior fica por conta do aumento do coeficiente de determinação deste último caso, que chegou muito mais próximo do valor máximo, o que confirma, de certa maneira, a hipótese assumida da distribuição normal dos pontos do IRI em relação ao QI.

Figura 4.22 – Gráfico *box plot* da variação do IRI em função de cada valor de QI, para QI < 41 cont/km.

Figura 4.23 – Gráfico *box plot* da variação do IRI em função de cada valor de QI, para QI > 40 cont/km.

As figuras 4.22 e 4.23 evidenciam a dispersão entre os valores de IRI para cada valor de QI através de um gráfico do tipo *box plot*, que permite a visualização dos valores máximos e mínimos que são representados pelos traços azuis, do primeiro e terceiro quartis representados pela caixa branca e por fim do valor da mediana representado pelo traço vermelho. Tais representações se prestam a dimensionar a variação do IRI em relação a cada QI, ou seja, servem para alertar que, mesmo diante de uma boa relação linear entre as médias do IRI para cada QI que foi apresentada na figura 4.21, existe uma grande variabilidade de valores possíveis de IRI para um mesmo valor de QI.

Para melhor visualização optou-se por dividir o gráfico em dois, partindo do ponto com QI = 1 cont/km, haja vista existir nas amostras somente 1 ponto com QI = -1 cont/km e apenas 3 pontos com QI = 0 cont/km.

Figura 4.24 – Representação gráfica da Média X Desvio Padrão dos IRIs para cada valor de QI.

Na figura 4.24 é possível verificar que o desvio padrão do IRI para cada unidade do QI aumenta com a média do próprio IRI. A relação deste aumento é próxima de uma reta, o que pode ser evidenciado pelo valor do coeficiente de determinação da reta.

Figura 4.25 – Coeficiente de variação do IRI em função dos valores do QI.

A figura 4.25 evidencia o coeficiente de variação dos valores do IRI em relação a cada valor de QI. Como visto, a grande maioria dos valores dos coeficientes de

variação (CV) é menor que 10%, sendo que os valores mais baixos de QI possuem CV do IRI ao redor de 6%.

Figura 4.26 – Representação da distribuição da variação amostral total de IRI em função do QI.

A figura 4.26 mostra uma compilação dos dados de todas as amostras da relação IRI x QI de duas formas. A primeira, de cor roxa, evidencia – assumindo-se que a amostra representa bem a população de valores de IRI possíveis para cada QI – que 95% dos valores de IRI apresentam uma variação máxima aproximada de 20% em relação à média dos valores de IRI para um mesmo valor de QI. Seria como afirmar que com base nas amostras coletadas, existiria uma probabilidade de 95% dos valores verdadeiros de QI, que quando convertidos para IRI usando o modelo da figura 4.21, estariam dentro de uma faixa de $\pm 20\%$ do valor obtido pelo modelo.

A área de cor azul da figura 4.26 indica o percentual dos valores máximos de IRI encontrados para um mesmo valor de QI, divididos pela média. Como se pode verificar, mesmo com a variação de 95% dos pontos estando dentro de 20% do valor médio, os valores máximos atingiram até 37% acima do valor médio.

Sobre o modelo de correlação proposto, é importante salientar que os dados médios de IRI em relação a cada valor de QI foram correlacionados usando-se diversos outros modelos usando-se o *software* “Curve Expert”, sendo que tal *software*

apontou cinco outros modelos de correlação que apresentaram valores ainda superiores de coeficiente de determinação. Entretanto, a própria magnitude da dispersão da correlação e o alto valor de R^2 da correlação linear não justificariam a apresentação de um modelo mais complexo de ser usado e memorizado que o de uma simples relação linear.

Sendo assim, a conclusão desta análise evidencia que o modelo determinado na figura 4.21 pode ter sua constante arredondada para o número inteiro 10, sem um grande prejuízo em termos da qualidade do valor convertido, conforme pode ser observado pela quase-estabilidade do valor de R^2 . Fazendo-se desta forma, a constante fica inclusive a mesma do modelo determinado no IRRE, o que facilita sua aplicação e memorização. A figura 4.28 mostra a reta com a constante alterada.

Figura 4.27 – Média dos valores de IRI em função de QI e a respectiva regressão linear dos pontos, com a constante arredondada para o valor 10.

Para efeitos de memorização, recomenda-se que passe a ser utilizado, quando indispensável a correlação entre as duas variáveis, o modelo:

$$QI = 15,42 \cdot IRI - 10 \quad (4.5)$$

Enfim, usando-se os mesmos dados utilizados no item 4.7.1 para a verificação da inadequação dos modelos mais usados para a conversão de IRI em QI e vice-versa, aplicou-se o novo modelo de correlação proposto para que se pudesse visualizar

sua adequação graficamente quando aplicado a um novo conjunto de dados não incluídos nos mais de 20.000 pares de índices usados no seu estabelecimento.

Figura 4.28 – IRI (m/km) calculado a partir do perfil e o mesmo índice obtido com base no QI (cont./km) calculado, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil e também através do modelo obtido nesta pesquisa.

Figura 4.29 – QI (cont./km) calculado a partir do perfil e o mesmo índice obtido com base no IRI (m/km) calculado, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil e também através do modelo obtido nesta pesquisa.

Conforme se pode verificar nas figuras 4.28 e 4.29, o novo modelo proposto é visualmente mais adequado à conversão dos índices de irregularidade QI e IRI.

Mais do que determinar um novo modelo de correlação que conseguisse aliar um pouco mais de exatidão à conversão entre os índices de irregularidade QI e IRI, essa parte da pesquisa mostrou um resultado muito importante e que não era exatamente o que se esperava dela.

Tal resultado diz respeito à grande dispersão dos valores deste tipo de conversão entre os índices de irregularidade QI e IRI. Conforme ficou demonstrado visual e numericamente através das diversas figuras deste item, existe uma grande dispersão de valores que, ao que se sabe, era completamente desconhecida. Por melhor que seja o modelo de correlação entre IRI e QI ele sempre deve estar acompanhado de uma informação a respeito da dispersão dos valores que é grande, afinal no caso mais extremo, para um mesmo valor de $QI = 50$ cont/km, houve valores de IRI variando entre 2,36 e 4,62 m/km, ou seja, uma variação de 2,26 m/km.

A explicação para tanta dispersão nos valores está ligada à própria diferença na natureza dos índices IRI e QI, que pode ser visualmente lembrada na figura 2.17 que apresenta a resposta desses índices aos diferentes comprimentos de onda presentes em perfis longitudinais de rodovias. Tal figura ratifica não só a semelhança entre eles, já explicada ao longo desta pesquisa, mas também diferenças importantes em alguns dos comprimentos de onda que pesam muito mais em um índice do que no outro, conforme foi discutido no item 4.4.2.

Portanto, a principal conclusão e legado deste extenso estudo da relação entre os índices de irregularidade IRI e QI não é o novo modelo de correlação proposto e sim a informação de que se deve evitar a correlação entre eles sempre que possível, haja vista que a melhor das correlações ainda poderá esconder uma grande dispersão de valores que não permitirá aos técnicos concluir sobre o real estado da irregularidade daquele pavimento. A dispersão é tanta que poderia causar a uma concessionária de rodovias ou a um empreiteiro que estivesse entregando uma obra de pavimentação uma variabilidade injusta em seus incentivos.

A concessionária poderia ser multada indevidamente e/ou poderia deixar de ser multada por sua agência fiscalizadora e prejudicar os usuários com um pavimento de

qualidade de rolamento inferior, caso o índice de irregularidade pelo qual ela estivesse sendo fiscalizada fosse obtido por meio de correlação.

O empreiteiro, por sua vez, se tivesse seu contrato de entrega do serviço vinculado a um índice de irregularidade que tivesse sido obtido por correlação, poderia deixar de ganhar um bônus para ter um desconto em seu pagamento.

Tais exemplos são mais palpáveis, embora menos danosos do que o emprego de índices correlacionados, por exemplo, para a gerência de uma grande malha pavimentada. Dá para se imaginar quantas decisões erradas e quantos milhões de reais em prejuízos dados ruins poderiam causar.

A conclusão secundária desse estudo é o novo modelo de correlação proposto:

$$QI = 15,42.IRI - 10 \quad (4.6)$$

Embora tal modelo represente uma sensível melhora nas correlações usadas atualmente, ele deve ser usado com bastante cautela, somente onde realmente não houver a possibilidade de se calcular o índice da forma adequada, a partir de um perfil longitudinal, ou seja, principalmente para dados mais antigos, pois as observações do presente indicam que no futuro todos os medidores de irregularidade para rodovias serão perfilômetros, ou seja, permitirão o cálculo dos índices IRI e QI a partir dos perfis longitudinais.

Ademais, acompanhando tal modelo deve estar a informação de que a conversão efetuada por ele deve, em 95% das vezes, apresentar um valor que pode na realidade ser 20% maior ou 20% menor.

Vale destacar que este estudo foi realizado somente com dados de perfis medidos com o perfilômetro inercial desenvolvido no âmbito desta pesquisa. Muito embora tal equipamento tenha apresentado bons resultados em todas as verificações realizadas, os perfis longitudinais medidos por ele e por outros perfilômetros inerciais

podem apresentar as diferenças já ilustradas, em relação aos grandes comprimentos de onda, quando comparados a perfis obtidos por métodos estáticos.

Uma das explicações possíveis para as diferenças entre os modelos (4.3) e (4.6) refere-se justamente à grande diversidade de geometria dos segmentos utilizados neste estudo, ao contrário do que aconteceu no IRRE, onde todos os segmentos eram em tangente e em nível.

Embora não tenha sido realizado um estudo específico para correlacionar o “QI verdadeiro” com IRI, acredita-se que a dispersão neste caso, seria bem menor. Isto porque esses dois índices se aproximam mais um do outro, já que ambos são modelos diretos de quarto de carro, apenas com os valores diferentes de constantes de mola, de amortecimento e de massas. Vale lembrar que a escala do “QI verdadeiro” parte do zero e que por se tratar de um modelo de quarto de carro ele filtraria os valores dos grandes comprimentos de onda, ou seja, não seria afetado pelo greide.

Por outro lado, vale registrar que não seria possível verificar a correlação entre QI* e IRI, pois como já foi salientado, o QI* foi obtido a partir de medidores do tipo resposta específicos, usados na PICR.

4.6 Exposição de motivos da proposição do anteprojeto de norma

Quanto mais esta pesquisa chegava perto de seu prazo de conclusão, mais foi ficando evidente a importância que teria a apresentação de uma proposta bem embasada de um anteprojeto de norma técnica brasileira que tratasse tanto dos perfilômetros inerciais, quanto da avaliação de irregularidade longitudinal de pavimentos a partir de suas medidas.

Ficou constatado ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa que a nova realidade brasileira em termos de avaliação de irregularidade longitudinal, ficou carente de um instrumento que permitisse a todos os envolvidos neste tipo de avaliação a correta verificação dos equipamentos e também a padronização de procedimentos dos

levantamentos e cálculos. Vale mencionar que essa pesquisa ajudou a disseminar o uso deste tipo de perfilômetro no Brasil.

Todos os estudos e análises realizados no âmbito desta tese visando compreender profundamente sobre os fatores que influenciam tais medições e seus resultados precisavam de um fechamento que os unisse com aquilo que se aprendeu através da análise criteriosa da bibliografia internacional.

Tal instrumento, mais sucinto e de mais fácil aplicação é justamente o anteprojeto de norma brasileira que é apresentado no Apêndice B.

Ele foi idealizado para aplicação no Brasil, já que nosso país não adota o IRI como índice padrão de irregularidade longitudinal de pavimentos, e sim o quociente de irregularidade – QI.

O anteprojeto proposto não contém as falhas já descobertas e criticadas de outros instrumentos normativos. Pelo contrário, ele foi escrito para contemplar o estado da arte em termos de parâmetros de equipamentos e verificações de desempenho.

Como a norma norte americana ASTM E 950-98 é sem dúvida o instrumento normativo mais conhecido a este respeito, a proposição foi baseada nela, visando a elaboração de um texto que fosse compatível com suas principais recomendações, sem, no entanto, desprezar as peculiaridades brasileiras e as constatações feitas durante esta pesquisa.

Em relação à norma ASTM E 950-98, as principais alterações incorporadas foram:

- a) O estabelecimento de apenas uma categoria de perfilômetro inercial, ao invés de quatro, uma vez que com o desenvolvimento tecnológico atual, não faz sentido a existência de mais que uma classe;
- b) O incremento dos procedimentos de verificação do equipamento em campo, visando aumentar a confiabilidade dos resultados produzidos;
- c) A inclusão de recomendações adicionais para a realização dos levantamentos;

- d) A padronização do filtro a ser utilizado no processamento dos perfis visando a produção de resultados mais exatos do quociente de irregularidade (QI);
- e) A exclusão do filtro relativo aos comprimentos de onda maiores que 60 m, visto que o QI é mais sensível a eles do que o IRI;
- f) O estabelecimento de um método para a determinação do perfil longitudinal que deve ser utilizado como base para o cálculo de QI, que deve utilizar perfil espaçado a cada 25 cm.
- g) A padronização de um filtro para a avaliação de pavimentos de concreto de cimento portland com juntas transversais e de outros pavimentos que apresentem fissuras, aberturas ou sujeiras eventuais sobre a pista;
- h) A inclusão de um método simplificado para verificação de perfilômetros inerciais através da comparação do resultado do QI;
- i) A inclusão de um método completamente diferente daquele existente na norma ASTM E 950-98 visando a verificação de desempenho de perfilômetros inerciais de acordo com sua exatidão e repetitividade, que leva em conta a correlação cruzada entre perfis.

Quando da conclusão desta pesquisa, o anteprojeto produzido será enviado aos órgãos normativos competentes para siga o devido processo a fim de se transformar, quem sabe, em uma norma nacional.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Assim como o corpo desta pesquisa foi ordenado em partes de forma a organizar melhor as reflexões acerca da avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com o uso de perfilômetros inerciais, aqui em seu último e conclusivo capítulo, as efetivas contribuições sobre o tema serão ressaltadas levando-se em conta a mesma ordem em que foram discutidas, inclusive com a menção dos itens. Esta escolha foi feita, uma vez que há constatações e conseqüentemente contribuições para o entendimento do tema em todo o texto da tese. Em seguida estão dispostas as sugestões para pesquisas futuras a respeito do tema e por fim as considerações finais.

Uma primeira conclusão de âmbito geral que cabe registrar nesta parte introdutória, diz respeito à constatação da grande carência de pesquisa nacional a respeito do tema tratado. A última pesquisa de doutorado brasileira que tratou do assunto foi defendida há quase 10 anos, enquanto no exterior, publicam-se estudos sobre o tema freqüentemente – muito embora lá fora, como se sabe, o nosso Quociente de Irregularidade (QI) seja pouco conhecido. Este é provavelmente o principal motivo que fez com este trabalho reunisse diversas contribuições ao longo de todo o texto, uma vez que após o entendimento do assunto, buscou-se através da pesquisa a aproximação entre o QI e o estado da arte, antes distantes.

5.1 Conclusões da pesquisa

As contribuições deixadas por esta pesquisa se iniciam com a revisão bibliográfica, que mesmo não tendo um fim em si própria, inovou ao registrar de forma cronológica desde os primórdios das avaliações de irregularidade, chegando ao estado da arte neste tema. Pode-se afirmar que não foi encontrada outra revisão bibliográfica tão abrangente e que permita a quem quer que pesquise sobre o tema entender historicamente os porquês de cada passo na evolução desta avaliação funcional.

Como foi ressaltado na parte introdutória desta pesquisa, a revisão bibliográfica registrada no capítulo 2 não foi escrita de forma passiva. Pelo contrário, desde o começo adotou-se um discurso dissertativo, que incluiu ao longo do texto críticas, percepções e os impactos sobre o que estava sendo citado. Um caso que deve ser ressaltado foi o esclarecimento da diferença entre o atual Quociente de Irregularidade (QI), o “QI verdadeiro” (*Quarter-Car Index*), e o QI*, advindo das medições realizadas com medidores do tipo resposta durante a PICR.

O item 2.3 deixa como contribuição principal uma análise aprofundada das limitações dos medidores do tipo resposta, visando esclarecer as razões das principais incertezas que estão incluídas nas suas medições e que as tornam pouco confiáveis. Por sua vez, o item 2.7 trata das características dos perfilômetros inerciais e o item 2.8, relaciona e explica as principais fontes de erros das medidas realizadas com tais perfilômetros. A análise presente nestes três itens foi parte dos objetivos desta pesquisa no que tange ao entendimento da diferenças dos dois tipos de equipamentos.

Pelo fato de o equipamento usado nesta tese ser mais do que um simples medidor de irregularidade, o item 2.5 buscou ressaltar todos os usos possíveis dos dados não só da irregularidade, como também do perfil longitudinal de pavimentos, já que este último praticamente não havia sido usado no meio rodoviário nem em pesquisas nacionais de que se tenha conhecimento, por absoluta dificuldade em medi-lo de forma rápida e confiável.

O item 2.6 registra as diferenças entre os índices QI e IRI, e explica detalhadamente como se calcula tais índices, vez que, especialmente no caso do IRI, a forma de cálculo a partir de um perfil longitudinal é pouco difundida em nosso país.

No Capítulo 3 destacam-se as contribuições relacionadas ao desenvolvimento do perfilômetro inercial, com foco na evolução tecnológica do equipamento ao longo do tempo da pesquisa. Em seguida, são relacionados os aspectos operacionais do equipamento desenvolvido, o que inclui tanto a parte de campo quanto a parte de processamento dos dados.

O item 3.3 reuniu constatações essenciais para o prosseguimento da pesquisa, uma vez que nele estão os resultados dos primeiros testes operacionais realizados com o

perfilômetro inercial desenvolvido. Detalhes importantes até então desconhecidos foram percebidos através de diversos testes realizados. Entre os principais destaques que faziam parte dos objetivos desta pesquisa estão: a verificação da diferença nas formas dos perfis medidos a velocidades diferentes sem consequência no valor dos índices IRI e QI; as diferenças causadas pela resolução das elevações medidas com nível e mira no resultado do QI; e por fim, os surpreendentes resultados de uma comparação entre medições com um medidor do tipo resposta e o perfilômetro inercial que revelaram a existência de uma tendência até então desconhecida nas medições dos medidores do tipo resposta, para o caso estudado.

O Capítulo 3 é encerrado destacando outros usos possíveis para os perfilômetros inerciais, como a medição de afundamentos plásticos nas trilhas de roda, a medição do degrau entre pista e acostamento e a notação gráfica inovadora idealizada para visualização gráfica da distribuição da irregularidade em pistas de grandes dimensões, como por exemplo em aeroportos.

O Capítulo 4 sem dúvida reúne o maior número de contribuições inovadoras deixadas por esta pesquisa, muitas inclusive em nível internacional, a começar pela extensa discussão a respeito de como se deve verificar um perfilômetro inercial, tema que preocupa os técnicos da área, haja vista o retrospecto complicado dos medidores do tipo resposta.

A extensa análise das verificações propostas nas normas norte-americanas não encontra paralelo na bibliografia, não só pela abrangência, mas também por incluir na análise o QI. A proposta do teste de balanço apresentada para perfilômetros também apresenta melhorias em relação às normas estrangeiras existentes que, por omitirem algumas variáveis de controle, podem levar a conclusões erradas.

Dadas as diferenças observadas nos testes iniciais do perfilômetro em relação à resolução dos perfis, pesquisou-se de forma mais abrangente o tema. Os resultados, ainda que preliminares, por não terem incluído perfis medidos estaticamente e também por não terem um grande segmentos pesquisados, evidenciaram a grande diferença que pode ser induzida tanto no QI, quanto no IRI se o mesmo perfil for medido em resoluções diferentes. Tal constatação é importante para as verificações de perfilômetros.

Outro tema bastante preocupante tratado dentro do item 4.1, foi a organização de um rol de recomendações destinado a obtenção de perfis longitudinais de referência que é necessário para a verificação de perfilômetros. Havia alguma informação dispersa sobre o tema voltado ao IRI, mas nesta oportunidade tal informação foi completada com as percepções advindas desta pesquisa e sistematizada para facilitar a obtenção de perfis adequados que minimizem os impactos adversos sobre a verificação de perfilômetros, sendo que neste caso, o tema foi tratado levando-se em conta o uso dos perfilômetros para o cálculo do QI.

O item 4.1 é encerrado com a proposta de um método estudado para a verificação de perfilômetros. Tal método é uma versão melhorada e adaptada ao QI, de um método proposto pelo professor Steve Karamihas da Universidade de Michigan, um dos grandes estudiosos de irregularidade de pavimentos da atualidade. Uma das importantes inovações incluídas no procedimento foi a necessidade de verificação do perfilômetro em duas velocidades diferentes próximas dos seus limites de utilização, sugestão inclusive discutida com o próprio professor Karamihas. No que foi possível, o método também foi simplificado para tornar-se menos trabalhoso, por exemplo, com a adoção da medida em somente uma das trilhas de roda.

Da forma como foi proposto, pode-se dizer com alguma segurança que ele se torna o método mais abrangente já conhecido e divulgado para verificação de um perfilômetro inercial, especialmente adaptado para atender aos critérios mais relevantes ao cálculo do QI. Embora os parâmetros de aceitação de perfilômetros estabelecidos no final do método terem respaldo de outros estudos, eles são passíveis de estudos complementares, em um número maior de bases e com diferentes equipamentos.

O item 4.2 também apresenta uma contribuição inovadora para evitar a influência errônea que trincas, juntas, aberturas no pavimento, assim como sujeiras na pista podem ocasionar nas medições dos perfis longitudinais e conseqüentemente nos índices de irregularidade. A proposta registrada e testada neste item, ainda que preliminar, mostrou-se eficaz para os segmentos verificados.

O item 4.3 registra duas contribuições importantes para a uniformização do processamento de perfis obtidos a partir de perfilômetros inerciais visando o cálculo

do QI. A primeira diz respeito ao comprimento da média móvel usada como filtro para simular o efeito do envelopamento que os pneus exercem sobre os agregados, e assim evitar a influência da macrotextura nos perfis. As conclusões indicam que a média móvel com comprimento de 150 mm quando usada em conjunto com o método de eliminação de influências indesejáveis ao perfil apresenta bom desempenho para fins a que se destina.

A segunda contribuição, não menos importante, derivou do estudo da influência da redução do espaçamento das medidas do perfil longitudinal usado para o cálculo do QI. A conclusão foi que o espaçamento de 0,25 m é melhor que o espaçamento hoje normalizado no Brasil, que é de 0,5 m, uma vez que a variabilidade dos resultados observados diminuiu sensivelmente.

O item 4.4 contempla inovações muito importantes. Há neste item um método que permite avaliar a incerteza presente nos índices de irregularidade de medidas de perfis realizadas com perfilômetros inerciais que foram verificados pelo método de correlação cruzada. Tal procedimento reforça a utilidade do uso do índice de concordância uma vez que ele não permite a aprovação de equipamentos que possam realizar medidas com erros expressivos.

Este item ainda apresenta uma revelação muito importante a respeito do quociente de irregularidade. Ficou constatado que o QI é afetado por comprimentos de onda grandes, que não fazem parte daqueles normalmente considerados como causadores de irregularidade. Isto acontece primordialmente em curvas verticais e, pelo fato dos perfilômetros inerciais geralmente apresentarem limitações quanto aos comprimentos de onda capturados, existe a tendência do QI ser subestimado em alguns casos. Algumas propostas iniciais sobre como abordar esta situação foram registradas, muito embora o assunto necessite de mais pesquisa, que poderia eventualmente indicar o uso do IRI conjuntamente com o QI em determinadas situações.

Presente no rol de objetivos desta pesquisa, o estudo da correlação entre os índices de irregularidade IRI e QI, localizado no item 4.5, tratou inicialmente de uma verificação preliminar das limitações dos dois modelos mais usados em nosso país, o que inclusive reforçou a diferenciação entre os índices QI e QI*, uma vez que

correlação “ $QI^* = IRI.13$ ”, foi determinada com os dados da PICR, que chamou de QI^* os valores de irregularidade gerados por medidores do tipo resposta.

Em seguida, foi apresentado o detalhamento de uma nova pesquisa de correlação entre os índices, levando-se em conta um grande número de quilômetros de perfis longitudinais medidos pelo perfilômetro inercial desenvolvido e verificado no âmbito desta tese. Deve ser registrado que esta pesquisa diferencia-se bastante do estudo do IRRE no número muito maior de segmentos utilizados e no fato de ter utilizado trechos com grande diversidade de geometrias, uma vez que o estudo do IRRE utilizou somente trechos em tangente e em nível, avaliados com nível e mira.

Dentre os segmentos utilizados para o estabelecimento do novo modelo de correlação, existem alguns trechos com valor de QI muito próximo de zero. Embora eles possam causar alguma estranheza, quando se observa o valor correspondente do IRI , percebe-se tratar de valores baixos, porém plausíveis se comparados com boas rodovias de outros países. A título de curiosidade, vale registrar que todos os segmentos com $QI < 5$ cont/km utilizados no âmbito desta pesquisa só foram encontrados no trecho do prolongamento da Rodovia dos Bandeirantes, no estado de São Paulo, construído após sua concessão à iniciativa privada e que é provavelmente o melhor trecho de rodovia brasileira no que se refere à irregularidade longitudinal. Muito embora a repetitividade de tais resultados baixos tenha sido verificada, infelizmente não foi possível estabelecer uma base em algum daqueles trechos para levantamento com nível e mira.

Ao contrário do que se pensava inicialmente, a principal contribuição deste estudo não foi o novo modelo de correlação e sim o fato de que se deve evitar a correlação entre tais índices. Embora possa ser atribuída uma relação linear entre eles, há uma dispersão considerada grande (mais ou menos 20% do valor do índice obtido pela conversão, em 95% dos casos), que agrega boa incerteza aos resultados obtidos através de correlações. Mesmo assim, pode-se afirmar que a nova correlação, disposta a seguir, mostrou-se melhor que aquelas comumente utilizadas:

$$QI = 15,42.IRI - 10 \quad (5.1)$$

O item 4.6 resume as inovações que foram agregadas ao anteprojeto de norma que é apresentado no Apêndice B. Tais inovações levaram em conta o que havia de

melhor nas normas estrangeiras, os conhecimentos adquiridos nesta pesquisa e também as normas brasileiras vigentes. Espera-se que os órgãos normalizadores brasileiros possam avaliar a proposta e colocá-la em discussão para que em breve o Brasil possa ter uma norma própria para este tipo de avaliação.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Embora abrangente no que tange à irregularidade de pavimentos, essa pesquisa não teve a pretensão de esgotar o tema. Pode-se dizer que a profundidade dos pontos abordados variou juntamente com o interesse e a representatividade que tal ponto teria para o entendimento do assunto e a melhoria mais substancial dos resultados de tal tipo de avaliação.

Sendo assim, é possível afirmar que muitas portas para novas pesquisas foram abertas neste texto, algumas delas de forma bastante clara, outras nem tanto, pois estão em comentários e citações ao longo de todo o percurso.

Nesta oportunidade final serão salientadas aquelas cuja importância saltou aos olhos.

Em termos de perfilômetros voltados a avaliação da irregularidade longitudinal, os estudos mais recentes indicam que a pesquisa está se movimentando para o desenvolvimento de módulos de medição baseados em uma projeção de linhas de laser, ao invés de somente um ponto. Tais linhas teriam a vantagem de garantir uma medição mais repetitiva e correta em superfícies com muitas reentrâncias, tais como misturas asfálticas muito abertas, superfícies fresadas ou texturizadas. Em tese, este tipo de módulo seria capaz de filtrar no momento da medida boa parte dos efeitos da macrotextura que atualmente são eliminados pela média móvel.

Ainda quanto aos equipamentos, merece destaque o desenvolvimento relativamente recente do scanner de pavimentos, que é capaz de medir perfis longitudinais e o perfil transversal em um grande número de pontos de uma faixa de rolamento através de um laser de varredura rápida, que possibilita ainda a reprodução da superfície em 3 dimensões. Como ainda existem poucas unidades, dado o alto

preço, talvez este tipo de equipamento ainda demore a chegar ao Brasil. De qualquer maneira, trata-se de um terreno fértil a desenvolvimentos similares.

Na área de equipamentos específicos para a pavimentação, tudo leva a crer que caibam pesquisas e desenvolvimentos na parte de instrumentação das máquinas acabadoras para quaisquer tipos de superfícies de pavimentos visando a determinação do perfil longitudinal em tempo real, durante o processo final de execução da camada de rolamento, para que os executores possam aprimorar as técnicas empregadas a fim de entregar pavimentos com acabamento cada vez melhor. Conforme foi evidenciado na parte inicial desta pesquisa, pavimentos que são executados com índices de irregularidade menores tendem a durar mais e a requerer menos manutenção.

Para finalizar a discussão sobre equipamentos, vale ressaltar também a necessidade do desenvolvimento de um equipamento para a medição rápida e exata de perfis de referência destinados à verificação de perfilômetros laser, em substituição ao nível e mira e mesmo àqueles similares ao Dipstick. Acredita-se que já exista tecnologia disponível para o desenvolvimento de um equipamento que tenha produtividade e exatidão maiores do que os dois citados, e que seja capaz de executar medidas praticamente contínuas.

A respeito da verificação de perfilômetros inerciais embora o método proposto já represente um avanço considerável em relação às normas estrangeiras vigentes, acredita-se que ainda exista espaço para mais pesquisa sobre os diversos aspectos englobados por este assunto. Tais pesquisas deveriam ser planejadas para incluir a maior diversidade possível de bases e de equipamentos.

Com relação ao QI, seria importante o aprofundamento dos estudos relativos ao impacto causado pelos grandes comprimentos de onda do greide.

Por fim, e talvez o item mais importante desta pequena relação de sugestões para pesquisas futuras em razão do impacto que pode causar no setor rodoviário, deve ser registrada a indicação para a realização de pesquisas relacionadas ao estabelecimento de fatores de pagamento de contratos em relação aos índices de irregularidade medidos após a execução dos serviços de execução e de manutenção de pavimentos.

Percebe-se pelas pesquisas no exterior que o tema dos fatores de pagamento relacionados à irregularidade dos pavimentos tem sido bastante abordado e conseqüentemente aplicado nos contratos relacionados à pavimentação dos países mais desenvolvidos.

As pesquisas para tal determinação devem ser bastante amplas e passam pela verificação de todos os custos ocasionados pela irregularidade dos pavimentos, sejam eles relacionados com os usuários, com a manutenção da pista e por fim com toda a sociedade, que normalmente arca no final das contas com todos estes custos, estejam eles embutidos nos impostos, nos pedágios, no custo dos produtos transportados e também na competitividade internacional do país. Tais fatores de pagamento poderiam em tese, inclusive, se tornar uma norma nacional de uso obrigatório para as contratações de pavimentação do setor público, seja para projetos novos, seja para a recuperação da malha viária existente.

5.3 Considerações finais

Durante os anos que se passaram desde o início do desenvolvimento desta pesquisa, a importância da medida da irregularidade longitudinal de pavimentos só aumentou no cenário rodoviário de nosso país, uma vez que aos poucos, concessionárias de rodovias e também órgãos da administração pública, perceberam sua importância e os benefícios de sua medição com qualidade.

Foi durante o período de 5 anos desta pesquisa que a grande maioria dos técnicos que lida com rodovias tomou conhecimento do que vem a ser um perfilômetro inercial, apelidado de perfilômetro laser ou simplesmente barra laser. Mais importante que isto, foi notar que neste relativamente curto espaço de tempo, muitos desses técnicos passaram a entender um pouco das diferenças entre os diversos tipos de avaliação de irregularidade e puderam valorizar os perfilômetros inerciais, antes completamente desconhecidos – embora já há muito usados mundo afora.

Essas constatações iniciais não só ressaltam a importância do tema escolhido, como também demonstram que essa pesquisa conseguiu sair dos muros da universidade

para causar um impacto rápido e concreto no meio técnico que lida com este tema, mesmo antes de sua conclusão.

Isto aconteceu por dois motivos que merecem menção expressa: o primeiro diz respeito à divulgação de resultados parciais dos vários assuntos pesquisados dentro do tema da avaliação da irregularidade de pavimentos dentro de diversos congressos, simpósios, aulas especiais proferidas em cursos de graduação e também com o auxílio de colegas interessados no tema, o que inclusive culminou há alguns meses atrás com a concretização da tese de doutorado de Benevides (2006), que fez uso de dados obtidos com o perfilômetro inercial desenvolvido nesta pesquisa.

O segundo motivo diz respeito à criação de uma pequena empresa, batizada de Cibernétrica, que foi fundada a partir de meados desta pesquisa para explorar o potencial econômico que os desenvolvimentos aqui consolidados trouxeram. Trata-se de uma realização também importante que ratifica a relevância do tema estudado no meio técnico nacional.

REFERÊNCIAS

AHLIN, K.; GRANLUND, J. **Calculation of Reference Ride Quality, Using ISO 2631 Vibration Evaluation**. 36th United Kingdom Group Meeting on Human Response to Vibration. Farmborough, UK, September, 2001.

ALAVI, S.; TAVARES, M. P. **MDT Ride Specification Review**. In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/JPUGPresentationspdf/Alavi-MDT%20Ride%20Spec%20Review.pdf>. Acesso em setembro de 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard Equipment Specification for Inertial Profiler**. AASHTO MP11-03. Estados Unidos, 2003a.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard Practice for Quantifying Roughness of Pavements**. AASHTO PP 37M-99. Estados Unidos, 2003b.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard Practice for Certification of Inertial Profiling Systems**. AASHTO PP 49-03. Estados Unidos, 2003c.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard Practice for Operating Profilers and Evaluating Pavement Profiles**. AASHTO PP 50-03. Estados Unidos, 2003d.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard Practice for Pavement Ride Quality When Measured Using Inertial Profiling Systems**. AASHTO PP 51-03. Estados Unidos, 2003e.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **2005 ACPA Profiler Repeatability Tests**. R&T Update – Concrete Pavement Research & Technology. N. 7.02. Skokie, IL, Estados Unidos. 2006.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph.** ASTM E 1274 – 88 (Reapproved 1993). Estados Unidos, 1998.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth.** ASTM E 1845-96. Estados Unidos, 1997a.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Calibration of Systems Used for Measuring Vehicular Response to Pavement Roughness.** ASTM E 1448-92 (Reapproved 1998). Estados Unidos, 1992.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements.** ASTM E 1926-98. Estados Unidos, 1999b.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method.** ASTM E 1364-95. Estados Unidos, 1996.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Establishes Inertial Profiling Reference.** ASTM E 950-98. Estados Unidos, 1999a.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique.** ASTM E 965-96. Estados Unidos, 1997b.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems.** ASTM E 867 – 04. Estados Unidos, 2004.

ARCHONDO-CALLAO, R. S. **Unpaved Roads Roughness Estimation by Subjective Evaluation.** Infrastructure Notes. Transport, Water and Urban Development. The World Bank. N. RT-2. October, 1999.

ARIZONA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Smoothness Specification.** In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em:

<http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Nodes-Smoothness%20Spec%20Arizona%20DOT%20Enjoy%20the%20Ride.pdf>. Acesso em março de 2005.

ARRB GROUP LTD. **Site da empresa na Internet.** Disponível em: <http://www.arrb.com.au>. Acesso em junho de 2005.

AWASTHI, G. et al. **On Pavement Roughness Indices.** Journal of Civil Engineering, Institution of Engineers (India), Vol. 84, May, 2003. Disponível em : <http://www.ieindia.org/publish/cv/0503/may03cv6.pdf>. Acesso em março de 2005.

BALBO, J. T. **Pavimentos Asfálticos: Patologias e Manutenção.** São Paulo, Editora Plêiade, 1997.

BARELLA, R. M. et al. **A Avaliação de Irregularidade com Perfilômetros Inerciais de Sensores Laser: Resultados Comparativos e Vantagens Técnicas.** In: 35ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – 35ª RAPv, Rio de Janeiro, 2004.

BARELLA, R. M. et al. **Irregularidade Longitudinal de Pavimentos: Sensibilidade de Perfis, Comparação de Equipamentos e Correlação entre QI e IRI.** In: XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – XIX Anpet, Recife, 2005.

BENEVIDES, S. A. S. **Modelos de Desempenho de Pavimentos Asfálticos para um Sistema de Gestão de Rodovias Estaduais do Ceará.** Tese (Doutorado) apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

BENNETT, C. R. **Calibrating Road Roughness Meters in Developing Countries.** **Transportation Research Record.** N. 1536. Washington, 1996.

BENNETT, C. R. **Utilization of Vehicle Simulation and True Profile Measurement in New Construction Smoothness Evaluation.** In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002. Disponível em: <http://www.rpug.org/2002/1-Establishing%20Reference.pdf>. Acesso em maio de 2004.

BESTER, C. J. **The effect of Road Roughness on Safety.** Transportation Research Board, 82 Annual Meeting. Washington, 2003.

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

BUDRAS, J. A **Synopsis on the Current Equipment Used for Measuring Pavement Smoothness**. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration Web Site. August, 2001. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/smoothness/index.cfm>. Acesso em maio de 2004.

BURSANESCU, L.; BLAIS, F. **Automated Pavement Distress Data Collection and Analysis: a 3-D Approach**. National Research Council of Canada. 1997. Disponível em: <http://iit-iti.nrc-cnrc.gc.ca/iit-publications-iti/docs/NRC-41574.pdf>. Acesso em junho de 2004.

BYRUM, C. R. **Hump-finder**. In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Byrum_RPUG2003.ppt. Acesso em janeiro de 2005.

CAICEDO, B et al. **Medida perfil longitudinal de un pavimento mediante navegacion inercial**. XIV SIMPÓSIO Colombiano sobre Ingenieria de Pavimentos. Popayán, Colômbia, 2003.

CANADIAN STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (C-SHRP). **Summary of Pavement Smoothness Specifications in Canada and Around the world**. Technical Brief # 16. July, 1999.

CAREY, W.N.; IRICK, P.E. The Pavement Serviceability Performance Concept. **Highway Research Board**, HRB Bulletin 250, 1959.

CARVALHO, M. D.; SILVA, L. S. **Avaliação do Conforto de Rolamento de Pavimentos de Concreto com o Emprego do Perfilógrafo Califórnia**. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico. São Paulo, 2000.

CASSANIGA, J. C.; MACHADO FILHO, P. R. **Utilização do Merlin no Controle da Condição de Conforto de Pavimentos**. 16º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, Dezembro, 2002.

CENTER ON MUNICIPAL GOVERNMENT PERFORMANCE. **How Smooth are New York City's Streets? Results of a Study Conducted by the Fund for the City of New York**. New York, 1998. Disponível em: <http://www.fcny.org/cmgp/streets/pages/reports.htm>. Acesso em janeiro de 2005.

CENTER ON MUNICIPAL GOVERNMENT PERFORMANCE. **Measuring City Streets: The Way to Go?** In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Barbara_FCNY_rpug2003.pps. Acesso em janeiro de 2005.

CHANG, G. K. et al. **FHWA ProVAL User's Guide Version 2.60**. Austin, 2006. Disponível em: <http://www.roadprofile.com>. Acesso em junho de 2006.

CHATTI, K.; LEE, D. **Development of a New Profile Based Truck Dynamic Load Index (DLI)**. Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

CHOUBANE, B. et al. **Evaluation of High-Speed Profilers for Measurement of Asphalt Pavement Smoothness in Florida**. Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

CHOUBANE, B.; MacNAMARA, R. L. **Evaluation of a Lightweight Profiler for Measurement of PCC Pavement Roughness**. Research Report FL/DOT/SMO/01-446. State of Florida DOT. February, 2001.

CUNDILL, M. A. **The MERLIN Road Roughness Machine: User Guide**. TRL Report 229. London. 1996.

DAHLSTEDT, S. **Estimated Roughness on Roads with Low IRI Values**. Transportation Research Board, 82 Annual Meeting. Washington, 2003.

DARONCHO, C. **Contribuição à Análise de Qualidade de Viagem e suas Relações com a Distribuição de Defeitos em Segmentos de Rodovias**.

Dissertação apresentada ao Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

DEBORD, K. J. **Runway roughness measurement, quantification, and application – the Boeing Method**. Document n. D6-81746. Boeing Commercial Airplane Group. USA, November, 1995.

DELANNE, Y.; PEREIRA, P. **Analyse de la Relation entre L’uni et la Qualité D’usage des Route**. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N. 288. Septembre-Octobre, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Calibração e Controle de Sistemas Medidores de Irregularidade de Superfície de Pavimento (Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter)**. DNER-PRO 164/94. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manutenção de Sistemas Medidores de Irregularidade de Superfície de Pavimento - Integrador IPR/USP e Maysmeter**. DNER-PRO 229/94. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Medição da Irregularidade de Superfície de Pavimento com Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter**. DNER-PRO 182/94. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro, 1994c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Método de Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta**. DNER-ES 173/86. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro, 1986.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA EM TRANSPORTES. **Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos - Procedimento**. DNIT 006/2003 – PRO. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL E INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Edital N. 283/2005 - Seleção de Empresa para Execução dos Serviços Técnicos**

Especializados de Levantamento Visual Contínuos de Defeitos (LVC) e de Irregularidade (IRI). Brasília, 2005. Disponível em: http://www.dnit.gov.br/intranet/aplweb/sis_SAPE/anexos/Edital/Edital_edital0283_05-00_0.pdf. Acesso em novembro de 2005.

DEVORE, J. J. **Accurate Bump Shapes from an Inertial Profiler.** In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Devore-Accurate%20Bump%20Shapes%20From%20an%20Inertial%20Profiler.pdf>. Acesso em janeiro de 2005.

DEWAN, S. A.; SMITH, R. E. **Estimating IRI from Pavement Distresses to Calculate Vehicle Operating Costs for the Cities and Counties of San Francisco Bay Area.** Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

DIRECTORATE GENERAL TRANSPORT. Long Term Performance of Road Pavements. Transportation Research - COST 324. **European Commission**, Luxembourg, 1997a.

DIRECTORATE GENERAL TRANSPORT. New Road Monitoring Equipment and Methods - COST 325. **European Commission**, Luxembourg, 1997b.

DOMINGUES, F. A. A. **Notas de aula da disciplina: Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos - PTR-5008.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Curso de pós-graduação em engenharia de transportes. São Paulo, 2004.

DORÉ, G. et al. **Prediction of winter roughness based on the analysis of subgrade soil variability.** Transportation Research Board, 80 Annual Meeting. Washington, 2001.

DOUGAN, C. E. D. **Variation of Pavement Smoothness Between Adjacent Lanes: Implications for Performance Based Contracting.** Transportation Research Board, 82 Annual Meeting. Washington, 2003.

DOUGAN, C. E. et al. **Lateral Variation in Pavement Smoothness.** Report Number: 2232 – F – 02 – 4, prepared by the University of Connecticut for the Connecticut Department of Transportation. 2002. Disponível em: <http://docs.trb.org/00938446.pdf>. Acesso em julho de 2004.

DYER, J. **Analysis of Common Filtering Methods in Road Profiling.** In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Dyer-Analysis%20of%20Common%20Filtering%20Methods.pdf>. Acesso em julho de 2004.

DYNATEST. **Road Surface Profiler 5051 Mark II.** Product catalogue. 2004.

EAPA; EUROBITUME. **Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements.** Report. March, 2004.

ESPINAL, J. A. V.; ALVARENGA, E. R. **Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI).** Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano. El Salvador, Mayo, 2005.

FABRICIO, J. M. et al. **Prediction Models of Cracking, Roughness and Raveling Developed in Brazil.** Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

FACE COMPANIES. **Site da empresa na Internet.** Disponível em: <http://www.faceco.com>. Acesso em junho de 2005.

FARIAS, M. M.; SOUZA, R. O. **Irregularidade Longitudinal e sua Influência na Avaliação Funcional de Pavimentos.** Encontro Nacional de Conservação Rodoviária - VI ENACOR. Brasília, 2002.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Appendix E – Measuring Pavement Roughness.** Washington, 1999. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/hpmsmanl/appe.htm>. Acesso em julho de 2004.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Pavement Smoothness Index Relationships: Final Report.** Publication N. FHWA-RD-02-057. McLEAn, Va, October, 2002.

FERNANDES JÚNIOR, J. L.; BARBOSA, R. E. **Efeitos da Carga Por Eixo, do Tipo de Eixo, da Velocidade e da Condição dos Pavimentos Sobre as Cargas Dinâmicas.** 36ª Reunião Anual de Pavimentação. Curitiba, Agosto, 2005.

FERNANDO E. G. **An Index for Evaluating Initial Overlay Smoothness Using Measured Profiles.** Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

FERNANDO, E. G. **Evaluation of the Accuracy of Surface Profilers.** Transportation Research Board, 79 Annual Meeting. Washington, 2000.

FERNANDO, E. G. **TxDOT Certification Program with Comments on Portables.** In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Emmanuel_2003%20RPUG%20Conference%20Presentation.ppt Acesso em julho de 2004.

FERNANDO, E. G.; BERTRAND C. **Application of Profile Data to Detect Localized Roughness.** Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

FHWA-LTPP TECHNICAL SUPPORT SERVICES CONTRACTOR. **2003 Comparison Testing of LTPP Profilers (Final Report).** FHWA, April, 2004.

FINN, F. **Pavement Management Systems – Past, Present, and Future.** Public Roads. V.68, N.1. July/August, 1998. Disponível em: <http://www.tfhr.gov/pubrds/julaug98/pavement.htm>. Acesso em fevereiro de 2004.

FLORIDA STATE. **Florida Method of Test for Measuring Pavement Longitudinal Profiles Using a Laser Profiler.** Designation: FM 5-549. Florida, 2001.

FULTS, K. **AASHTO Ride Specification.** In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Ken_RPUG2003.PPT. Acesso em abril de 2005.

GANJI, V. **Pavement Smoothness Performance Relates Specification.** In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Ganji-Pavement%20Smoothness%20Performance%20Related%20Spec.pdf>. Acesso em janeiro de 2005.

GERARDI, M. **Utilization of Vehicle Simulation and True Profile Measurement in New Construction Smoothness Evaluation.** In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2001.

GERARDI, T. **Current Smoothness Assessment Methods Vehicle Response.** APR Consultants, Inc. In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002. Disponível em: <http://www.rpug.org/2002/1-Current%20Smoothness%20Assess.pdf>. Acesso em julho de 2005.

GILLESPIE T. D. et al. Calibration and Correlation of Response-Type Road Roughness Measuring Systems. **National Cooperative Highway Research Program Report 228.** Transportation Research Board, Washington, 1980.

GILLESPIE, T. D. **Everything You Always Wanted to Know about the IRI, but Were Afraid to Ask!** In: Road Profiler User Group Meeting. Lincoln, 1992.

GORSKI, M. B. The Implication of the International Road Roughness Experiment for Belgium. **Transportation Research Record.** N. 1084. Washington, 1986.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Edital de Licitação N.008/CIC/97 – Lote 12 – Sistema Rodoviário Castello Branco / Raposo Tavares. Secretaria dos Transportes.** São Paulo, 1997.

HALL, K. et al. **LTPP Data Analysis: Effectiveness of Maintenance and Rehabilitation Options.** NCHRP Web document 47. June, 2002.

HAWAII ASPHALT PAVING INDUSTRY. **Pavement Evaluation.** Slides em Power Point, sem data.

HERR, B. **High Tech Pavement Measurement Technology Development, Testing and Applications. Pavement Profile Scanners.** Presented in China Road NDT Conference. Phoenix Scientific, 2004.

HOSSAIN, Z. Q. S. M. **Effect of Curling on As-Constructed Smoothness of Portland Cement Concrete Pavements.** Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

HUDSON, W. R. et al. **Infrastructure Management**. USA, McGraw-Hill, p.89-141, 1997.

HVEEM, F. N. Devices for Recording and evaluating pavement roughness. **Highway Research Board**. HRB Bulletin 264, 1960.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM**. Portaria INMETRO 029 de 1995. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2003.

JANOFF, M. S. Methodology for Computing Pavement Ride Quality from Pavement Roughness Measurements. **Transportation Research Record**. N. 1084. Washington, 1986.

KARAMIHAS, S. M. **2005 ACPA Profiler Repeatability Tests**. UMTRI, November, 2005b.

KARAMIHAS, S. M. and CABLE, J. K. **Developing Smooth, Quiet, Safe Portland Cement Concrete Pavements**. Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology. Iowa State University. 2004.

KARAMIHAS, S. M. **Critical Profiler Accuracy Requirements**. UMTRI, August, 2005a.

KARAMIHAS, S. M. **Development of Cross Correlation for Objective Comparison of Profiles**. Final Report. Report 2002-35. UMTRI, 2002.

KARAMIHAS, S. M. et al. **Transverse Variations in International Roughness Index**. Transportation Research Board, 80 Annual Meeting. Washington, 2001.

KARAMIHAS, S. M. **Road Roughness Home Page**. Disponível em: <http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/index.html>. Acesso em janeiro de 2004.

KARAMIHAS, S. M. **The 2004 FHWA Profiler Round-Up, Part II**. University of Michigan Transportation Research Institute – UMTRI. In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004b. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Karamihas-FHWA%20Profiler%20Round-Up.pdf>. Acesso em julho de 2005.

KARAMIHAS, S. M. **The 2004 FHWA Profiler Round-Up.** University of Michigan Transportation Research Institute – UMTRI. In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004a. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Karamihas-FHWA%20Profiler%20Round-Up%20Part%20II.pdf>. Acesso em julho de 2005.

KARAMIHAS, S. M. **Use of Cross Correlation for Objective Profile Comparison.** In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Steve_RPUG%202003.ppt. Acesso em Janeiro de 2004.

KOHN, S. **Smoothness Criteria for Concrete Pavements.** In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Starr_rpug.ppt. Acesso em janeiro de 2004.

KOHN, S.; PERERA, R. **Comparison of SHRP profilometers.** Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, 1993.

KOHN, S.; PERERA, R. **Short Term Changes in Roughness of Concrete Pavements.** In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Kohn-Short%20Term%20Changes%20in%20Roughness%20of%20Concrete%20Pavements.pdf>. Acesso em fevereiro de 2004.

KSAIBATI, K. et al. **A Comparison of Roughness Measurements From Laser And Ultrasonic Road Profilers.** Florida State. Designation: FL/DOT/SMO/98-425. Florida, 1998a.

KSAIBATI, K. et al. **The Development of Florida Smoothness Specifications for Flexible Pavements.** Florida State. Designation: FL/DOT/SMO/98-422. Florida, 1998b.

KSAIBATI, K.; AL MAHMOOD, S. **Utilizing the Long-Term Pavement Performance Database in Evaluating the Effectiveness of Pavement Smoothness.** The University of Wyoming. 2002.

KULAKOWSKI, B. T. Critical Evaluation of the Calibration Procedure for Mays Meters. **Transportation Research Record.** N. 1084. Washington, 1986.

LA TORRE, F. et al. Correlation Between Longitudinal Roughness and User Perception in Urban Areas. **Transportation Research Record**. N. 1806, Washington, 2002.

LAURENT, J.; HÉBERT, J. **Simulated Manual Rut Depth Measurements Using Multipoint Transverse Profile Data**. In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/ RPUGPresentationspdf/Laurent-Simulated%20Manual%20Rut%20Depth%20Measurements%20Using%20Multi.pdf>. Acesso em fevereiro de 2004.

LEE D. et al. **Development of Roughness Thresholds for Preventive Maintenance Action Aimed at Reducing Dynamic Loads**. Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

LEE, D. et al. **Development of Roughness Thresholds for Preventive Maintenance of Pavements Using PMS Distress and Ride Quality Data**. Transportation Research Board, 80 Annual Meeting. Washington, 2001.

LEICHTY, M. **Real Time Profiler (RTP) Smoothness Testing**. In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: [http://www.rpug.org/2003/Mark_Real%20Time%20Profiler%20\(RTP\)%20Smoothness%20Testing.ppt](http://www.rpug.org/2003/Mark_Real%20Time%20Profiler%20(RTP)%20Smoothness%20Testing.ppt). Acesso em junho de 2004.

Li, Y.; DELTON, J. Approaches to Evaluation of Profiler Accuracy. **Transportation Research Record**. N. 1860. Washington, 2003.

LIN, J. et al. **Correlation Analysis Between International Roughness Index (IRI) and Pavement Distress by Neural Network**. Transportation Research Board, 82 Annual Meeting. Washington, 2003.

LINEMAN, L. **Accelerometer Study**. In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Lauren_Accelerometer%20Study%20RPUG2003.pps

LOIZOS A.; PLATI C. **Road roughness Measured by Profilograph Relation to Users Perception and the Need for Repair**. In: Road Profiler User Group Meeting.

Virginia, 2002. Disponível em: <http://www.rpug.org/2002/3-Road%20Roughness%20measured.pdf>. Acesso em janeiro de 2004.

MAURER, F.; CHALMAN, D. **History of RPUG**. In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Fred_RPUG2003.ppt. Acesso em fevereiro de 2004.

MCGHEE, K. K. **A New Approach to Measuring Ride Quality for Bridges**. In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002.

MCGHEE, K. K. **Quality Assurance of Road Roughness Measurement**. Virginia Transportation Research Council in Cooperation with the U.S. Department of Transportation. Virginia, 2000.

MCKENZIE, D.; SRINARAWAT, M. **Root Mean Square Vertical Acceleration (RMSVA) as a Basis for Mays Meter Calibration**. Brazil Project Technical Memo BR-23, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, February, 1978.

MEHTA, Y. et al. **Evaluation of the Road Surface Profiler and the Transverse Profilograph Determination of Rut Depth Measurements**. Transportation Research Board, 80 Annual Meeting. Washington, 2001.

MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Michigan Test Method for Certification of Profilometers**. MTN 730-02. Michigan, Estados Unidos, 2007.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Modelo de contrato do CREMA para Rodovias Federais**. Brasília, 2000.

MITCHELL, T. **WesTrack Track roughness Fuel Consumption, and Maintenance Costs**. Publication N. FHWA-RD-00-052. January, 2000.

NAIR, S. K.; HUDSON W. R. Serviceability Prediction from User-Based Evaluations of Pavement Ride Quality. **Transportation Research Record**. N. 1084. Washington, 1986.

NAKAHARA, S. M. **Estudo do desempenho de reforços de pavimentos asfálticos em via urbana sujeita a tráfego comercial pesado**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **LTPP Data Analysis: Factors Affecting Pavement Smoothness**. Research Results Digest. N. 264, February, 2002.

NINGYUAN, L. et al. **Quality Assurance Process Applied in Pavement Roughness Measures**. In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002.

NINGYUAN, L. et al. **Verification of Network Level Pavement Roughness Measurements**. Transportation Research Board, 80 Annual Meeting. Washington, 2001.

PAIVA, C. E. L.; CAMPOS, A. C. R. **Previsão de Evolução da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos Asfálticos: Comparação e Ajustes dos Modelos da DNER Pro 159 e do HDM III, Aplicados aos Pavimentos Paulistas**. 16º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, Dezembro, 2002.

PASTORIUS, W. D. O.; HOWE, D. **Advances in Laser Vision Sensors for Profiling Longitudinal Tinning**. In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Pastorius-Advances%20in%20Laser%20Vision%20Sensors%20for%20Profiling%20Lo.pdf>. Acesso em março de 2005.

PASTORIUS, W. D. O.; HOWE, D. **New sensor for longitudinal tinning**. In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Walt_RPUG%202003.ppt. Acesso em março de 2005.

PATERSON, W. D. O. International Roughness Index: Relationship to Other Measures of Roughness and Riding Quality. **Transportation Research Record**. N. 1084. Washington, 1986.

PATERSON, W. D. O. **Road Deterioration and Maintenance Effects**. The Highway Design and Maintenance Standards Series. 1987.

PAVEMENT TOOLS CONSORTIUM. **Pavement Guide Interactive, Module 9 – Pavement Evaluation.** Part 2: Roughness. Disponível em: http://guides.ce.washington.edu/ptc/Modules/09_pavement_evaluation/09-1_body.htm. Acesso em janeiro de 2005.

PERERA, R. **Effect of Variation of Simulation Speed of Quarter Car in the IRI Algorithm.** In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Rohan_RPUG%202003.ppt. Acesso em junho de 2005.

PERERA, R. W. et al. **Factors Contributing to Differences Between Profiler and Reference Device IRI.** Transportation Research Board, 85 Annual Meeting. Washington, 2006.

PERERA, R. W.; KOHN S. D. **Profiling Errors and How to Avoid Them.** In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002a. Disponível em: <http://www.rpug.org/2002/2-Profiling%20errors%20and%20how%20to%20avoid%20them.pdf>. Acesso em junho de 2005.

PERERA, R. W.; KOHN, S. D. **Issues in Pavement Smoothness.** NCHRP Web Document 42. Prepared for: National Cooperative Highway Research Program. 2002a.

PERERA, R. W.; KOHN, S. D. **LTPP Data Analysis: Factors Affecting Pavement Smoothness.** NCHRP Web Document 40. Prepared for: National Cooperative Highway Research Program. 2001.

PERERA, R.; WISER, L. **Causes for Differences Between Profiler IRI and Dipstick IRI.** In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Perera-Causes%20for%20Differences%20Between%20Profiler%20and%20Dipstick%20IRI.pdf>. Acesso em junho de 2005.

PHOENIX SCIENTIFIC INC. **Application Note: Shoulder/Edge-of-Pavement (EOP) Condition Assessment.** San Marcos, CA, 2001. Disponível em: <http://www.phnx-sci.com/images/pdf/AN-pavements-001p.pdf>. Acesso em janeiro de 2005.

PHOENIX SCIENTIFIC INC. **Pavement Profile Scanner (PPS) White Paper**. San Marcos, CA, 2004a. Disponível em: http://www.phnx-sci.com/images/pdf/PPS-2005_White_Paper_Eng.pdf. Acesso em julho de 2005.

PHOENIX SCIENTIFIC INC. **Software Development and Testing of Rut and Ride Measurement Using a Transverse PPS-2000**. San Marcos, CA, 2004b. Disponível em: http://www.phnx-sci.com/images/pdf/RR_Report.pdf. Acesso em julho de 2005.

PONT, J. J.; SCOTT, A. **Beyond Road Roughness—Interpreting Road Profile Data**. Road & Transport Research, March, 1999. Disponível em: http://www.findarticles.com/p/articles/mi_qa3927/is_199903/ai_n8842197. Acesso em janeiro de 2005.

PREM, H. **Technical note: Measurement of reference profiles for high-speed profiler validation**. Road & Transport Research. March, 1999. Disponível em: http://www.findarticles.com/p/articles/mi_qa3927/is_199903. Acesso em fevereiro de 2005.

QUEIROZ, C.V. **A Procedure for Obtaining a Stable Roughness Scale from Rod-and-Level Profiles**. Working Document No. 22, Brazil/UNDP Study, GEIPOT, Brasilia, 1981.

QUEIROZ, C.V. **Calibrating Response-Type Roughness Measurement Systems Through Rod-and-Level Profiles**. Third International Conference on Low-Volume Loads, Arizona State University, TRB, TRR 898, 1983.

RASMUSSEN, R. O. et al. **Inertial Profile Data Analysis to Characterize Concrete Pavement Slab Curvature and Other Behavior**. In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/ RPUGPresentationspdf/Rasmussen.pdf>. Acesso em julho de 2005.

RASMUSSEN, R. O.; WILDE, W. J. **FHWA Pavement Profile Viewer**. In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2001. Disponível em: <http://www.rpug.org/2001/011022-FHWAProfileViewerPresentation.pdf>. Acesso em janeiro de 2005.

RICHTER, C. **Reducing Roughness in Rehabilitated Asphalt Concrete (AC) Pavements**. Publication N.FHWA-RD-98-149. December, 1998.

ROAD PROFILER USER GROUP. **Site da associação da Internet**. Disponível em: <http://www.rpug.org>. Acesso em janeiro de 2004.

RODRIGUEZ, L.; MATHEWS, M. **Managing for Pavement Smoothness**. In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2004. Disponível em: <http://www.rpug.org/2004/RPUGPresentationspdf/Rodriguez%20&%20Mathews-Georgia%20Managing%20for%20Pavement%20Smoothness.pdf>. Acesso em julho de 2005.

RUOTOISTENMÄKI, A. et al. **Accuracy of the Condition Data for a Road Network**. Helsinki School of Economics. Working Papers. W-372. June, 2004.

SALEH, M. F. et al. **A Mechanistic Roughness Model Based on Vehicle-Pavement Interaction**. Transportation Research Board, 79 Annual Meeting. Washington, 2000.

SALEH, M. F.; MAMLOUK, M. S. **Calibration and Verification of A Mechanistic Pavement Roughness Performance Model**. Transportation Research Board, 81 Annual Meeting. Washington, 2002.

SAYERS, M. W. et al. **Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements**. World Bank Technical Paper Number 46. WTP-46. Washington, 1986b.

SAYERS, M. W. et al. **The international road roughness experiment**. World Bank Technical Paper Number 45. WTP-45. Washington, 1986a.

SAYERS, M. W. et al. The International Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements. **Transportation Research Record**. N. 1084. Washington, 1986d.

SAYERS, M. W. On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile. **Transportation Research Record**. N. 1501. Washington, 1995.

SAYERS, M. W.; KARAMIHAS S. M. **Interpretation of Road Roughness Profile Data**. Final report prepared for: Federal Highway Administration. 1996.

SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. **The Little Book of Profiling**. University of Michigan. 1998. Disponível em: http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/lit_book.pdf. Acesso em janeiro de 2004.

SCHLEPPI, B. L. **How Bridges Affect Ride Quality on Ohio's Interstate Highway System**. In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002. Disponível em: <http://128.173.204.63/pavement/profilers/19.pdf>. Acesso em junho de 2004.

SCHWARTZ, C. et al. **Laboratory Evaluation of Inertial Profiler Accuracy**. In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002. Disponível em: <http://www.rpug.org/2002/1Labo-ratory%20Evaluation%20of%20Inertial%20Profiler%20Accuracy.pdf>. Acesso em janeiro de 2005.

SESTINI, V. M. **Correlação entre o custo operacional e o índice de irregularidade internacional (IRI), uma aplicação do modelo HDM III**. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico. São Paulo, 2000.

SEVERO, L. E. P. et al. **Utilização De Perfilômetro Laser para a Medida De Irregularidade Longitudinal e do Afundamento em Trilhas De Roda**. In: 9º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária – 9º Enacor, Natal, 2004.

SHAFIZADEH, K. et al. **A Statistical Analysis of Factors Associated with Driver-Perceived Road Roughness on Urban Highways**. Research Project T1803, Task 28, Highway Roughness. Washington State Transportation Commission. June, 2002.

SHAFIZADEH, K.; MANNERING, F. **Acceptability of pavement roughness on urban highways by the driving public**. Transportation Research Board, 82 Annual Meeting. Washington, 2003.

SHAFIZADEH, K.; SIVANESWARAN, N. **WSDOT/UW Road Roughness Study**. In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Siva_WSDOT%20and%20UW%20Roughness%20Study%20-%20RPUG%202003.ppt. Acesso em junho de 2004.

SIDDIQUE, Z. et al. **Short-Term Roughness Progression on Newly Built Concrete Pavements**. In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002.

SMITH, K. L. et al. **Smoothness Specifications for Pavements**. Final report prepared for: National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. National Research Council. NCHRP Web Document 1. EUA, 1997. Disponível em: <http://www.nap.edu/books/nch001/html/R1.html>. Acesso em janeiro de 2005.

SPANGLER, E.B.; KELLEY, W. J. **GMR Road Profilometer – A Method for Measuring Road Profile**. Research Publication GMR-452. General Motor Research Laboratory, Warren, MI, 1964.

SWAN, M.; KARAMIHAS, S. M. **Using a Ride Quality Index for Construction Quality Control and Acceptance Specifications**. In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002. Disponível em: <http://www.rpug.org/2002/1-Using%20Ride%20Quality%20Index.pdf>. Acesso em julho de 2004.

SWAN, M.; KARAMIHAS, S. M. **Using ride quality index for construction quality control and acceptance**. Transportation Research Board, 82 Annual Meeting. Washington, 2003.

SWEITZER, S. **Measuring Ride Quality for Construction Acceptance**. In: Road Profiler User Group Meeting. Austin, 2003. Disponível em: http://www.rpug.org/2003/Shannon_RPUG%202003.ppt. Acesso em janeiro de 2005.

TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Operating Inertial Profilers and Evaluating Pavement Profiles**. Specification Tex-1001-S, 1999.

TIMM, D. H.; McQUEEN, J. M. **A Study of Manual vs. Automated Pavement Condition Surveys**. Alabama Department of Transportation. May, 2004.

TITI, H. **IRI Smoothness Criteria for Asphalt Concrete Pavements in Louisiana**. In: Road Profiler User Group Meeting. Virginia, 2002. Disponível em: <http://www.rpug.org/2002/4-%20IRI%20Smoothness%20Criteria.pdf>. Acesso em janeiro de 2004.

TRANSPORTATION RESEARCH LABORATORY. **A guide to the pavement evaluation and maintenance of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries.** Overseas Road Note 18. Berkshire, 1999.

UDDIN, W.; GEORGE, K. P. **A Short Course in Pavement Management.** The University of Mississippi, Oxford Campus, 1993.

UMTRI RESEARCH REVIEW. **On the shape of roads to come – measuring and interpreting road roughness profiles.** University of Michigan Transportation Research Institute. V. 33, N.1. January-March, 2002.

UNITED STATES GENERAL ACCOUNTING OFFICE. **Transportation Infrastructure: Better data needed to rate the nation's Highway Conditions.** Report to Congressional Committees. September, 1999.

VICROADS. **Validation of Roughness Measurements.** Notes on Technology Exchange Workshop. Austrália, 1999. Disponível em: <http://www.romdas.com/romdascd/info/other/roughness/ausrough.pdf>

VISSER, A.T. et al. **Experience with roughness measurements for Pavement management in southern Africa.** 4th International Conference on Managing Pavements. Durban, South Africa, 1998.

WANG, H. **Road Profiler Performance Evaluation and Accuracy Criteria Analysis.** Dissertação (Mestrado) apresentada à Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, Estados Unidos, 2006.

WATANATADA, T. et al. **The Highway Design and Maintenance Standards Model.** The Highway Design and Maintenance Standards Series. Volume 1 – Description of the HDM-III Model. The World Bank. Washington, 1987.

WEALE, J. C.; SJOGREN, L. **Profiling & Indexing Unsurfaced Roadways.** In: Road Profiler User Group Meeting. Stateline, 2001. Disponível em: <http://www.rpug.org/2001/Unpaved%20Road%20Roughness.ppt>

WEAVER, R. J. Quantifying Pavement Serviceability as It is Judged by Highway Users. **Transportation Research Record.** N. 715. Washington, 1979.

APÊNDICE A

Telas das últimas versões dos **softwares** Logger e Shell do Perfilômetro.

CiberShell - C:\Base 1

[r] Base 1 - Pista Norte - Faixa 1 - km 0.00 ate km 7.40 - km 3.16 ate km 3.75.cut

Pasta | Obs | Nomes | Extrair | **Processamento** | Excel

Pré processamento

Média (mm)

Picos (%)

Perfil

Intervalo (mm)

☒ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5

Relatórios

Trecho (m)

Intervalo IRI (mm)

IRI contínuo ☒

Colunas

Prefixo

Colunas do Relatório

1: QI	☒ 1	☒ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	
2: QI média	☒ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	
3: IRI	☒ 1	☒ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	
4: IRI média	☒ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	
5: ATR	☒ 1	☒ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	☒ N ☒ Desvio ☒ Central
6: Velocidade						
7: OBS	☒	Incluir placas de km				

APÊNDICE B

Proposta de anteprojeto de norma brasileira para a avaliação de irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais.

Método de determinação do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais e seu uso para a determinação do quociente de irregularidade (QI)

Resumo

Trata a presente norma de estabelecer as características mínimas, a verificação de funcionamento e o método de operação, de perfilômetros com referência inercial, que embarcados em veículos possam medir e registrar continuamente o perfil longitudinal de pavimentos. O perfilômetro inercial consiste em um veículo equipado com transdutores (sensores) e um sistema computacional de coleta e gravação de dados destinado à medição e registro do perfil longitudinal da superfície por onde ele trafegar. Tendo em vista que o fim mais comum dos perfis longitudinais é a avaliação de irregularidade longitudinal de pavimentos, este método também contempla o processamento de perfis longitudinais visando o cálculo do quociente de irregularidade (QI).

Prefácio

Este anteprojeto de norma foi preparado voluntariamente pelo Eng. Rodrigo Maluf Barella como parte de sua pesquisa de doutorado, visando a submissão para a Diretoria de Planejamento e Pesquisa do DNIT como sugestão para normalização nacional de levantamentos contínuos de perfis longitudinais de pavimentos destinados principalmente a avaliação funcional de pavimentos através do cálculo do quociente de irregularidade (QI). As recomendações sobre o processamento de perfis longitudinais para o cálculo do QI estão incluídas. Vale ressaltar que perfis longitudinais de pavimentos se prestam também a outros fins, tais como: auxiliar nas decisões de restauração e na localização de defeitos superficiais de pavimentos.

1 Objetivo

O objetivo principal da presente norma é fixar as características exigíveis em perfilômetros inerciais de pavimentos e suas diretrizes operacionais visando a determinação adequada de perfis longitudinais de pavimentos que serão usados principalmente em avaliações funcionais de pavimentos. O segundo objetivo também

abrangido pela norma é o de estabelecer quais as características desejáveis em perfis que serão usados para o cálculo do quociente de irregularidade (QI).

2 Referências normativas e bibliográficas

2.1 Referências normativas

- a) DNER ES 173/86
- b) ASTM E 950 – 98
- c) ASTM E 1926 – 98
- d) ASTM E 2560 – 07
- d) AASHTO PP 49 – 03
- e) AASHTO PP 50 – 03
- f) AASHTO MP 11 – 03
- g) MTN 730-02 - Michigan Department of Transportation
- h) Tex-1001-S (1999) - Texas Department of Transportation

2.2 Referências Bibliográficas

- a) BARELLA, R. B. Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais. Tese (Doutorado) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. São Paulo, 2007.
- b) PERERA, R. W. et al. Factors Contributing to Differences Between Profiler and Reference Device IRI. Transportation Research Board, 85 Annual Meeting. Washington, 2006.
- c) KARAMIHAS, S. M. Development of Cross Correlation for Objective Comparison of Profiles. Final Report. Report 2002-35. UMTRI, 2002.

- d) KARAMIHAS, S. M. Critical Profiler Accuracy Requirements. UMTRI, August, 2005.
- e) SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. The Little Book of Profiling. University of Michigan. 1998.

3 Definições

a) Perfilômetro inercial de pavimentos

Trata-se do nome adotado por esta norma para se referenciar ao equipamento composto por transdutor(es) de deslocamento vertical, transdutor de deslocamento longitudinal e transdutor(es) de aceleração, devidamente montados e conectados a um sistema de processamento computacional que, instalado em veículo, seja capaz de medir e calcular continuamente o perfil longitudinal da superfície por onde ele trafegar. Suas características mínimas estão previstas nesta norma. Salienta-se que os nomes: perfilômetro laser ou barra laser, têm sido usados em nosso país para designar o tipo mais comum de perfilômetro inercial, qual seja, aquele no qual os transdutores de deslocamento vertical que medem a distância entre o veículo e o pavimento fazem uso de um feixe de laser.

b) Módulos de medição de um perfilômetro inercial

São em geral caixas fechadas e protegidas onde são instalados os transdutores de deslocamento vertical e os transdutores de aceleração de um perfilômetro inercial. Tais módulos são os efetivos responsáveis pela medição do perfil longitudinal. Eles trabalham normalmente fixados a um suporte ou barra junto ao pára-choque dianteiro ou traseiro do veículo onde estão instalados.

c) Perfil longitudinal puro

É aquele que contém as medidas originais feitas pelo perfilômetro, sem qualquer tipo de filtragem, obtidas no menor espaçamento longitudinal possível.

d) Perfil longitudinal filtrado

É o perfil longitudinal puro que sofreu apenas filtragem visando retirar o efeito da textura da superfície.

e) Perfil longitudinal decimado

É o perfil longitudinal filtrado, cujo espaçamento longitudinal entre pontos é de 250 mm.

4 Condições gerais do levantamento

4.1 Equipamento

Informações gerais

O equipamento necessário à realização do procedimento prescrito pelo presente método é o perfilômetro inercial de pavimentos, assim definido no item 3. Os componentes de tal equipamento, destacados em sua definição, possuem as seguintes funções:

Transdutor(es) de deslocamento vertical: medir em alta frequência a distância entre a carroceria do veículo e o pavimento subjacente;

Transdutor(es) de aceleração: medir a aceleração vertical do veículo, como meio de prover um referencial inercial de sua posição vertical¹;

Transdutor de deslocamento longitudinal: medir continuamente o deslocamento do veículo;

Sistema de processamento capaz de gerar como saída o perfil longitudinal da superfície trafegada.

O perfilômetro inercial de pavimentos deve possuir ao menos 1 conjunto de transdutores de deslocamento vertical e de aceleração, o que possibilitaria a medida do perfil longitudinal em apenas uma das trilhas de roda. Recomenda-se, entretanto,

¹ A critério do fabricante, o equipamento pode contar ainda com sistema inercial auxiliar composto de giroscópio e/ou de sensores de inclinação.

a presença de 2 conjuntos visando a determinação simultânea dos perfis longitudinais correspondentes às duas trilhas de roda da faixa de rolamento.

Quando se usam 2 conjuntos de transdutores, seus módulos de medição devem ser instalados com uma distância entre 1,5 m e 1,8 m, um do outro, visando possibilitar a medição simultânea em ambas as trilhas de roda. Para levantamentos em nível de rede, recomenda-se a distância de 1,6 m entre os módulos de medição.

O equipamento deve acompanhar pelo menos 3 blocos com medidas padrão (ou um bloco com 3 medidas padrão), visando possibilitar a verificação estática dos transdutores de deslocamento verticais.

O perfilômetro deve ainda possibilitar a visualização do status de todos os transdutores durante o levantamento, como medida para garantir que a informação correta está sendo medida pelo equipamento.

Requisitos do veículo

O veículo é a plataforma de montagem de um perfilômetro inercial de pavimentos. Não existem limitações quanto ao tipo de veículo que pode ser empregado para tal montagem. Naturalmente recomenda-se que ele possa acomodar de forma conveniente todos os componentes do perfilômetro e também 2 pessoas: o motorista e o operador do equipamento. O estado de conservação do veículo deve ser tal que permita um rolamento suave com facilidade de manutenção de uma trajetória que acompanhe as trilhas de roda da faixa de rolamento por onde ele trafegar.

Requisitos dos transdutores

- a) Aceleração vertical: são usados para o estabelecimento do referencial inercial do equipamento. O(s) acelerômetro(s) deve(m) ser montado(s) com seu eixo de medição alinhado ao do medidor de deslocamento, na direção perpendicular à superfície do pavimento. Sua faixa de medição deve ser grande o bastante para acomodar os níveis de aceleração vertical sofridos

pelo veículo (tipicamente ± 2 g). O sistema deve possibilitar a verificação dos valores medidos por esses sensores de acordo com a aceleração da gravidade ou com outra espécie de padrão.

- b) Deslocamento vertical: são usados para a medição da distância entre o veículo e o pavimento. Deve(m) ser montado(s) com seu eixo de medição perpendicular ao pavimento e alinhado(s) ao eixo de medição do(s) transdutor(es) de aceleração. O curso útil deste(s) transdutor(es) e sua fixação ao veículo deve ser tal que acomode a medição dos deslocamentos normalmente sofridos pela carroceria nos dois sentidos (para baixo e para cima). Deve ser dada preferência a transdutores sem contato, cujas medições não sejam alteradas em virtude de vento, temperatura ou pressão atmosférica. A frequência das medições destes transdutores deve ser tal que permita a execução de medidas espaçadas em no máximo 25 mm, levando-se em conta sua velocidade máxima de operação. A resolução destes transdutores deve ser igual ou melhor que 0,1 mm.
- c) Deslocamento longitudinal: pode ser do tipo que produz uma série de pulsos em intervalos que representem a distância trafegada sobre a superfície. Qualquer tipo de transdutor de deslocamento longitudinal que produza resultados com a exatidão necessária é passível de uso. A exatidão da medição deste transdutor pode ser estabelecida por uma calibração com trena. O erro máximo permitido é 0,1%.

Coleta de dados e cálculo do perfil longitudinal

Toda a coleta de dados deve ser controlada por um sistema que permita ao operador visualizar em tempo real o estado de funcionamento de todos os componentes do perfilômetro.

Durante a operação de coleta de dados com o perfilômetro, o operador do equipamento deve ser capaz de registrar observações que devem ficar vinculadas ao trecho nas quais elas foram inseridas. O equipamento pode possuir

adicionalmente sensor para registrar automaticamente informações referentes ao início, fim ou a presença de marcos intermediários do trecho trafegado.

O cálculo do perfil longitudinal pode ser feito durante ou após a coleta e gravação dos dados obtidos dos sensores. O espaçamento entre os pontos do perfil gerado pelo perfilômetro pode variar de acordo com o interesse do usuário. Para o cálculo do quociente de irregularidade (QI) deverá utilizado perfil longitudinal decimado com espaçamento de 25 cm, cujas recomendações de processamento estão dispostas no item 5.6.

4.2 Equipe de campo e aspectos de segurança

Recomenda-se sempre uma equipe com duas pessoas para a operação de coleta de dados com perfilômetros inerciais: o motorista e o operador do equipamento. Tal recomendação justifica-se não só pela segurança da operação, pois o motorista pode dedicar-se somente à condução do veículo, mas também pela qualidade do levantamento, haja vista que o operador pode dedicar-se inteiramente a verificar o funcionamento do equipamento, à rota a ser seguida e ao registro das observações pertinentes.

Toda fixação de equipamentos no veículo deve estar de acordo com a legislação vigente e com as recomendações do fabricante do veículo. Todas as medidas para garantir a segurança do levantamento devem ser tomadas.

4.3 Calibração dos componentes do perfilômetro inercial

Visando manter a confiabilidade dos resultados gerados, é importante que os componentes dos perfilômetros inerciais sejam calibrados periodicamente, de acordo com a recomendação do fabricante.

Efetivamente, o que pode ser calibrado e ajustado em um perfilômetro inercial são seus transdutores. O sistema como um todo, por ser constituído normalmente por rotinas lógicas e cálculos matemáticos, não necessita normalmente de uma calibração, pois não se trata de um item que perde a calibração (a menos que o fabricante afirme o contrário).

Caso na calibração sejam verificados erros nas medidas dos transdutores acima do recomendado pelo fabricante, eles podem necessitar de ajustes específicos que podem depender da assistência técnica autorizada pelo próprio fabricante do equipamento.

É o fabricante do perfilômetro que deve estabelecer o método de calibração adequado para os transdutores do perfilômetro, seguindo as seguintes diretrizes gerais:

- a) Transdutores de aceleração: por possuírem normalmente escala que compreende a faixa de $-2g$ a $+2g$, os transdutores de aceleração podem ser calibrados estaticamente em bancadas que permitam posicioná-los em pelo menos 3 posições: apontados perpendicularmente para baixo, depois para cima para cima e por fim na horizontal. Nestas situações, o transdutor deverá marcar: $+1g$, $-1g$ e $0g$. São aceitos outros métodos de calibração para estes transdutores, estáticos ou dinâmicos, desde que comprovadamente sejam verificados os valores medidos em pelo menos 3 pontos da escala. O fabricante poderá ou não prover meios para que seja possível ajustar os valores medidos pelo transdutor de aceleração.
- b) Transdutor de deslocamento vertical: deve ser calibrado estaticamente ao longo de sua escala de medição com incrementos não maiores que 25 mm. O fabricante poderá ou não prover meios para que seja possível ajustar os valores medidos pelo transdutor de deslocamento.
- c) Transdutor de deslocamento longitudinal: deve ser calibrado em um segmento reto e plano que esteja em bom estado de conservação e que possua comprimento conhecido. Caso a medição feita por este transdutor esteja vinculada à rodagem do veículo, é importante também ajustar antes a pressão dos pneus. Erros maiores do que 0,1% não são aceitos e devem ensejar o ajuste ou a substituição do transdutor. O fabricante deve prover meios para possibilitar o ajuste da calibração deste transdutor pelo próprio usuário.

5 Procedimento do levantamento

5.1 Preparatório

Ligar todo o equipamento e se necessário aguardar o tempo prescrito pelo fabricante para a estabilização dos componentes.

Verificar se todos os transdutores estão apresentando as leituras esperadas.

5.2 Verificação de calibração e funcionamento

Recomenda-se a realização de uma verificação das leituras dos sensores antes de dar início às medições do dia e também ao final dos trabalhos do dia para que as medições realizadas sejam validadas.

Os transdutores de deslocamento vertical devem ser verificados estaticamente com o uso de um ou mais blocos padrão que possuam pelo menos 3 dimensões conhecidas. Cumprindo as recomendações de segurança do fabricante, especialmente quando este transdutor fizer uso de laser, deve-se verificar se a medida registrada por este(s) transdutor(es) quando o bloco-padrão for posicionado sob ele(s) está de acordo com o recomendado pelo fabricante.

O sistema como um todo deve também ser verificado com um teste de balanço que checa, com o veículo estacionado, não só os transdutores de deslocamento vertical, como também os transdutores de aceleração, assim como toda a parte de cálculo do perfil longitudinal do equipamento.

Para a realização deste teste, os transdutores de deslocamento vertical devem ser posicionados sobre uma superfície lisa e perpendicular ao feixe. Sugere-se que o sistema tenha uma função especial para a realização deste teste de balanço², que simulará eletronicamente o deslocamento longitudinal do veículo (à velocidade de pelo menos 30km/h) enquanto o sistema coleta e grava os dados dos transdutores. Neste íterim o veículo deve ser balanceado em local próximo do local de instalação

² Quando o equipamento não dispuser de rotina que permita a execução do teste de balanço, a simulação do deslocamento do veículo pode ser feita levantando-se a roda onde o hodômetro estiver instalado, para se poder girá-la manualmente. Para uma simulação adequada, a roda deve ser girada de modo a simular o deslocamento à pelo menos 30 km/h.

dos módulos de medição, de maneira enérgica para cima e para baixo por cerca de 30 segundos. Sugere-se que tais balançadas procurem deslocar o veículo pelo menos ± 30 mm, sendo que devem ser efetuadas no mínimo 10 balançadas.

Como o perfil da superfície não muda durante o balanço do veículo estacionado, todo seu movimento vertical deve ter sido registrado pelos transdutores de aceleração e de deslocamento vertical. Ao final, o perfil gerado pelo equipamento deve ser praticamente plano. Aceita-se como bom o resultado em que o perfil final gerado durante o tempo em que o veículo foi balançado não apresente amplitudes maiores que 1% em relação às amplitudes do deslocamento vertical às quais o veículo foi submetido ou 0,1 mm, o que for maior. Antes da análise dos resultados deste teste os pontos do perfil gerado devem ter sido filtrados com média móvel de 150 mm de comprimento e opcionalmente com um filtro que retire as ondas de comprimento maior que 60 m. Por exemplo, um veículo que foi balançado ± 40 mm, pode apresentar perfil longitudinal com no máximo $\pm 0,4$ mm de amplitude.

Caso o valor das amplitudes do perfil registrado ultrapasse o limite fixado, devem ser verificadas todas as conexões e fixações dos transdutores para que o teste seja repetido. Caso realmente não se consiga um resultado positivo, os transdutores podem precisar de nova calibração ou de manutenção especializada.

Por fim, resta verificar a pressão dos pneus e a calibração do hodômetro. Os pneus devem ser calibrados seguindo-se as recomendações do fabricante do veículo antes de se proceder a verificação do hodômetro.

A verificação do hodômetro deve ser feita num trecho plano com pelo menos 50 metros de comprimento. Para executá-la pode-se demarcar com trena uma seção qualquer com poucas imperfeições superficiais e proceder à comparação com o resultado da medição realizada com o hodômetro do equipamento. Por se tratar de uma verificação rápida é aceitável uma diferença de até 0,2%.

5.3 Recomendações gerais para o levantamento

Levantamentos com perfilômetros inerciais cujos sensores de distância sejam baseados em laser ou outro tipo de radiação eletromagnética dependem

normalmente de superfícies secas para que possam medir corretamente. Desta maneira, a menos que o fabricante do equipamento afirme o contrário, não se deve executar este tipo de medição em superfícies molhadas.

Caso o trecho a ser medido não tenha marcações claras para seu início ou fim, sugere-se fazer inicialmente seu reconhecimento e se necessário implantar marcos que possam ser facilmente identificados com o veículo em movimento à velocidade normal do tráfego.

Recomenda-se especialmente para a avaliação das faixas de rolamento mais lentas ou de tráfego intenso que se opte por fazer o levantamento em dias e horários de menor movimento.

É recomendável se iniciar a gravação dos dados um pouco antes do início do trecho – alguns equipamentos requerem pelo menos 150 metros de antecedência para o aquecimento dos filtros.

Recomenda-se evitar a coleta de dados em velocidades menores que 25 km/h ou à velocidade mínima de funcionamento do equipamento informada pelo fabricante, pois em velocidades muito baixas pode haver perdas dos maiores comprimentos de onda dos perfis, que podem influenciar nos resultados dos índices de irregularidade. Medidas em velocidades muito baixas só devem ser realizadas quando for impraticável a medição em velocidades maiores ou quando os grandes comprimentos de onda não forem importantes.

Mudanças muito bruscas de velocidade durante o levantamento devem ser evitadas, pois podem causar pequenas alterações nas medidas dos transdutores de aceleração devido à possível inclinação do veículo.

A medição do perfil longitudinal de um pavimento deve ser feita sempre com o perfilômetro posicionado sobre as trilhas de roda da faixa de rolamento. Quando se estiver usando somente um módulo de medição, ele deve ser posicionado no centro de uma das trilhas de roda. Quando se estiver usando dois módulos de medição, recomenda-se que pelo menos o módulo da direita seja posicionado sobre o centro da trilha de roda direita.

5.4 Levantamento de campo

Antes do início da coleta de dados com o perfilômetro o operador deve identificar corretamente no sistema o trecho a ser medido.

A medição deve ser feita o mais continuamente possível. Sempre que houver interrupções, deve-se na medida do possível retornar algumas dezenas de metros antes do trecho em que o levantamento foi interrompido para que a medição possa ser emendada, sem prejuízo dos dados.

Durante o levantamento, todo tipo de ocorrência que possa causar interferência nos resultados do perfil ou dos índices de irregularidade, deve ser registrada de forma que fique referenciada à posição do hodômetro do perfilômetro. Alguns exemplos de ocorrências que devem ser registradas são: lombadas, praça de pedágio, obras de arte, mudança temporária de faixa, ultrapassagem, desvios, sujeira na pista, paradas na pista, mudança no tipo do revestimento, trechos com umidade, observações quanto ao funcionamento do equipamento etc.

O operador do equipamento deve também observar durante a medição a razoabilidade das medidas feitas pelos transdutores do perfilômetro e em caso de suspeita de mau funcionamento a dúvida deve ser registrada no sistema e o levantamento deve ser interrompido assim que as condições de segurança forem favoráveis, para que se possa repetir os testes de funcionamento, descritos no item 5.2.

5.5 Processamento dos dados

O processamento de dados consiste na adequação das informações obtidas pelo perfilômetro inercial de acordo com a utilização pretendida.

Dependendo do perfilômetro utilizado, o processamento de dados ou parte dele, pode ser feito simultaneamente com o levantamento de campo, ou posteriormente com o auxílio de *software*.

A maioria das aplicações dos perfis longitudinais requerem que o perfil puro seja filtrado para a eliminação da influência da macrotextura da superfície. Superfícies

especiais podem requerer processos de filtragem especial. São exemplos de superfícies especiais: revestimentos fresados e revestimentos com *grooving*.

O perfil longitudinal necessário para a determinação do QI é chamado de perfil longitudinal decimado e pode ser obtido de duas formas, dependendo de como é a saída de dados do perfilômetro inercial utilizado³:

a) Obtenção do perfil longitudinal decimado a partir do perfil longitudinal puro:

Nos casos em que o perfilômetro inercial permita o acesso ou o processamento a partir do perfil longitudinal puro, este último deve ser obtido no menor espaçamento possível, e a partir dele deve ser seguida a instrução abaixo para a obtenção do perfil longitudinal decimado, sendo que este processo já engloba a filtragem.

O perfil longitudinal decimado possuirá apenas um ponto a cada 250 mm. Para obter cada um desses pontos, deve-se calcular a média das elevações dos pontos do perfil longitudinal puro, 75 mm antes e 75 mm depois dele, ou seja, será utilizada a altura média de todos os pontos situados no num raio de 75 mm. Este procedimento é similar a aplicação de uma média móvel com 150 mm de comprimento.

Adicionalmente à filtragem especificada, pode ser utilizado procedimento para a eliminação de até 25% dos pontos mais dispersos de cada média visando retirar a influência indevida de trincas, juntas de dilatação e sujeiras, cuja elevação possa ter sido medida pelo equipamento, mas que não fazem parte da sua superfície ou não afetam a dinâmica dos veículos.

A aplicação deste procedimento é simples. Suponha-se que dentro dos 150 mm lineares do perfil longitudinal puro, cujas elevações serão usadas para o cálculo de um ponto do perfil a partir do qual será calculado o QI, existam 12 medições. Calcula-se inicialmente a média das elevações dos 12 pontos e então se verificam quais os pontos mais dispersos em relação à média e retiram-se tais pontos conforme o percentual definido. Por exemplo, se foi escolhido 20% devem ser

³ Sempre que possível é preferível a utilização do método descrito na alínea “a”, uma vez com a aplicação dele torna-se possível a eliminação de pontos indesejáveis presentes no perfil longitudinal puro.

retirados 2 pontos. Retirados tais pontos, recalcula-se a média com os 10 pontos que restaram e este é o novo valor médio que deve compor o perfil decimado.

O percentual para a eliminação de pontos recomendado varia entre 10 e 25%. A escolha do valor a ser usado deve ser feita em função das características das juntas, trincas, sujeiras ou de outras razões que possam ter causado medidas indesejadas na superfície avaliada, levando-se em conta ainda as características do perfilômetro utilizado. Como regra geral, o percentual a ser escolhido deve ser o menor valor que garanta que os pontos medidos “indevidamente” sejam retirados do perfil.

b) Obtenção do perfil longitudinal decimado a partir do perfil longitudinal filtrado:

Em alguns perfilômetros só é possível obter-se como saída o perfil longitudinal filtrado, ou seja, o usuário não tem acesso ao perfil longitudinal puro.

Nestes casos portanto, não se pode aplicar o método de médias descrito, tampouco é possível a aplicação do procedimento de eliminação de pontos descritos no item a.

Para a obtenção do perfil longitudinal decimado a partir do perfil longitudinal filtrado, o que se deve fazer é somente adequar o espaçamento entre os pontos do perfil. Se o perfil filtrado obtido já estiver em espaçamento que seja divisor de 250 mm, basta a eliminação dos pontos intermediários a 250 mm para a criação do perfil decimado; caso contrário é necessária a interpolação dos pontos disponíveis no perfil filtrado para a obtenção do perfil decimado.

5.6 Processamento de perfis longitudinais para obtenção do quociente de irregularidade (QI)⁴

O quociente de irregularidade – QI (cont/km) é o índice de irregularidade longitudinal de pavimentos normalizado no Brasil desde os anos 80 pelo então Departamento

⁴ Para a determinação de outros índices de irregularidade longitudinal – não normalizados no Brasil, recomenda-se a utilização de normas consagradas de outros países. Para a determinação do Índice Internacional de Irregularidade (IRI) recomenda-se o procedimento da norma norte-americana ASTM E 1926–98.

Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), visando a avaliação funcional de pavimentos com o uso de medidores de irregularidade do tipo resposta.

O método de determinação do QI a partir de um perfil longitudinal de pavimentos está normalizado pela norma DNER-ES 173/86, que trata do Método de Nível e Mira para a Calibração de Medidores de Irregularidade do Tipo Resposta.

Pelo fato de perfilômetros inerciais gerarem perfis similares ao perfil medido por nível e mira para os comprimentos de onda que afetam a irregularidade do pavimento, o mesmo método de cálculo deve ser usado⁵.

A única mudança para o cálculo do QI a partir de perfil longitudinal decimado, obtido com perfilômetro inercial é que neste caso deve ser levado em conta que os pontos estão espaçados 250 mm, ao invés de 500 mm recomendados pela norma supracitada.

De posse do perfil longitudinal decimado, pode-se aplicar todo o método de cálculo da norma DNER-ES 173/86 para a determinação do QI de cada perfil longitudinal, com a simples mudança do valor da variável "S", que era 0,5 m e passará a ser 0,25 m. Para maior facilidade no cálculo do QI, recomenda-se o uso de softwares ou planilhas eletrônicas.

Para levantamentos de irregularidade em nível de rede, recomenda-se o cálculo do QI a cada 200 metros. Para aplicações específicas podem ser usados outros espaçamentos.

5.7 Relatórios

Os relatórios referentes aos perfis longitudinais resultantes das medições e aos resultados dos quocientes de irregularidade (QI) devem ser produzidos em meio eletrônico.

⁵ Pelo fato do Quociente de Irregularidade (QI) ser suscetível a computar como irregularidade grandes comprimentos de onda presentes normalmente em curvas verticais, dependendo do perfilômetro inercial utilizado, pode haver a subestimação dos valores do QI nestes locais. Sabe-se que a subestimação pode ser relevante especialmente em quando tais locais apresentarem valores de QI baixos.

Os perfis longitudinais devem obedecer ao padrão ERD⁶ ou PPF⁷ e podem ser produzidos em diferentes espaçamentos, conforme sua utilização. Recomenda-se que o equipamento possa gerar perfis com ou sem filtragens.

Os relatórios referentes aos resultados do quociente de irregularidade QI devem preferencialmente ser produzidos em planilhas eletrônicas e devem conter em seu cabeçalho no mínimo as seguintes informações: identificação da rodovia, identificação da faixa de rolamento, identificação do sentido da medição, data da medição, equipamento utilizado, nome do operador e a distância entre os medidores de deslocamento caso se utilize mais do que um.

Os resultados do QI devem ser dispostos por trilha de roda, sendo opcional a inclusão de uma coluna com o resultado médio de ambas as trilhas. Em cada linha do relatório deve estar identificado o início e final da seção, o(s) valor(es) do QI (cont/km) e ao lado as observações anotadas durante o levantamento.

Opcionalmente os relatórios podem incluir também: velocidade média do veículo no segmento, as condições climáticas, a hora do levantamento, dados do veículo, contratante do serviço, coordenadas geográficas etc.

5.8 Verificação simplificada do perfilômetro inercial quanto ao QI

Esta norma apresenta dois tipos de verificação dos resultados de um perfilômetro inercial, sendo que esta primeira é uma forma simples de verificação através apenas da comparação do resultado do índice QI, que por apresentar limitações, não pode ser usada para qualificar ou condenar um equipamento.

Para a verificação do desempenho de um perfilômetro inercial quanto à repetitividade e exatidão de suas medições de perfis é necessário o uso do método da correlação cruzada entre perfis, descrito no item 6.

A verificação simplificada foi incluída na norma visando possibilitar aos principais interessados nos resultados de uma avaliação de irregularidade averiguar, de forma

⁶ O formato do arquivo para a gravação de perfis longitudinais ERD foi definido pelo Transportation Research Institute da Universidade de Michigan (EUA). Seus detalhes estão disponíveis em <http://www.umtri.umich.edu/divisionPage.php?pageID=118>

⁷ O formato do arquivo para gravação de perfis longitudinais PPF foi normalizado pela ASTM E 2560 – 07.

relativamente expedita, se um perfilômetro inercial produz resultados similares do quociente de irregularidade (QI).

Recomenda-se que esta verificação seja realizada em duas bases com 200 metros de comprimento cada uma.

Visando testar o equipamento em situações distintas, o valor do QI de cada base deve estar situado em uma faixa diferente. Uma das bases deve ter baixa irregularidade ($5 = QI = 25$ cont/km) e a outra média irregularidade ($30 = QI = 50$ cont/km).

As bases não devem conter trincas, fissuras, degraus, placas, tampouco devem apresentar variação visível de irregularidade ao longo de seu perfil transversal.

Facilita também os trabalhos a escolha de trechos retos e em tangente. Outra preocupação a ser levada em conta é a possibilidade de fechamento do tráfego do trecho para que as leituras de referência e do perfilômetro possam ser feitas com segurança.

Quanto ao tipo do revestimento, o melhor a se fazer é escolher pavimentos com revestimentos similares àqueles que o perfilômetro irá medir após a verificação.

Por economia de tempo e de recursos, sugere-se que mesmo no caso do perfilômetro a ser verificado possuir módulos de medição para as duas trilhas de roda simultaneamente, as bases de referência podem ser determinadas somente em uma das trilhas, sendo que neste caso o perfilômetro deverá executar todo o processo duas vezes, uma com cada módulo passando sobre a linha da base.

As bases devem ser demarcadas, quando possível, com linha pintada ao longo de todo o comprimento de 200 metros visando guiar a trajetória do perfilômetro, sendo que podem ser feitas marcações secundárias transversais em tal linha a cada 25 cm ao longo de todo o seu comprimento para facilitar a medição com o equipamento de referência, especialmente caso seja usado o nível e mira.

Determinadas as bases, é preciso medir seus perfis longitudinais de forma criteriosa, com um equipamento adequado.

As características desejadas de um equipamento para se medir os perfis de referência são:

- Sensibilidade de medição da elevação melhor ou igual a 0,1 mm
- Erro máximo de medição de elevação 0,2 mm
- Possibilidade de medição em intervalos regulares de espaço de 25 cm
- Área de apoio sobre o pavimento circular plana, preferencialmente com 70 mm de diâmetro

Para maior confiabilidade dos dados, o equipamento a ser usado na medição dos perfis de referência deve possuir meios para verificação de sua calibração *in loco* ou deve possuir certificado de calibração recente que comprove sua capacidade de obtenção de resultados dentro do esperado para este ensaio.

Em pavimentos susceptíveis a deformações superficiais devido à temperatura, umidade ou insolação, tais fatores devem ser controlados da melhor forma possível para que as medições do perfil de referência e as medições com o perfilômetro possam ser realizadas nas mesmas condições.

A medida de cada uma das bases de referência pode ser executada apenas uma vez, devendo ser repetida caso restem dúvidas sobre sua confiabilidade.

Antes de iniciar a medição do perfil de referência, o pavimento deverá ser varrido para que eventuais sujeiras ou agregados soltos sejam removidos da linha de medição.

Com base nos dados dos perfis de referência obtidos, devem ser calculados os valores dos quocientes de irregularidade (QI), usando-se o método prescrito na norma DNER ES 173/86, sendo que a única alteração será o espaçamento entre medidas, que ao invés de 0,5 m, deve ser de 0,25 m.

As medições do perfilômetro inercial a ser verificado devem ser executadas 3 vezes em cada uma das bases de referência, em velocidade próxima daquela em que ele deverá ser utilizado. Caso o equipamento possua dois módulos de medição, um para cada trilha de roda, devem ser realizadas 3 medições com cada módulo.

Os operadores do perfilômetro devem tomar os cuidados possíveis para que o sensor de medição do equipamento passe por sobre a linha demarcatória da base. Também devem ser tomadas todas as providências possíveis visando possibilitar ao perfilômetro registrar com a maior exatidão possível o ponto de início da base de referência.

Para cálculo do QI a partir dos perfis longitudinais determinados com o perfilômetro, deve ser seguida a recomendação do item 5.6 desta norma.

Deve ser calculada a média dos resultados do QI das três medições do perfilômetro e o valor médio determinado é que deve ser comparado ao valor obtido do perfil de referência.

São considerados razoáveis os resultados de QI do perfilômetro que não diferirem mais do que 10% dos resultados obtidos a partir dos perfis de referência.

Para o cálculo desta diferença percentual, pelo fato da escala do QI não partir de zero e sim de -8,54 cont/km, o valor de “8,54” deve ser adicionado aos dois valores de QI, antes do cálculo da diferença percentual, conforme o exemplo abaixo:

QI da base = 13 cont/km

QI do módulo esquerdo do perfilômetro = 14,7 cont/km

$$\text{Diferença \% entre as medições} = \left(\frac{(14,7 + 8,54)}{(13 + 8,54)} - 1 \right) * 100 = 7,9\%$$

Caso algum dos resultados médios do QI obtidos com o perfilômetro inercial verificado tenha apresentado diferença superior a 10% em relação aos valores de referência, recomenda-se a repetição das medições tanto dos perfis de referência, quanto dos perfis do perfilômetro, nas mesmas bases. Se a diferença superior a 10% persistir, recomenda-se a execução da verificação descrita no item 6 para determinar a real capacidade do equipamento, uma vez que esta verificação não se presta a qualificar corretamente um perfilômetro inercial.

6 Verificação de exatidão e repetitividade para qualificação de perfilômetros para levantamentos em nível de rede

Este item da norma é recomendado para verificações anuais de avaliação da capacidade de perfilômetros inerciais produzirem medidas repetitivas e exatas de perfis longitudinais que serão utilizados para o cálculo do quociente de irregularidade (QI).

Sua aplicação é recomendada também a fabricantes de perfilômetros inerciais para que possam classificar seus perfilômetros de acordo com sua capacidade de medição.

O método proposto consiste em efetuar uma série de medições com o perfilômetro em duas bases de referência criteriosamente escolhidas e medidas, que possuam irregularidades diferentes, usando-se velocidades diferentes do perfilômetro.

Ao contrário de uma verificação simplificada que é baseada somente na comparação entre os resultados de um índice de irregularidade, este tipo de verificação trata da comparação entre perfis longitudinais e por isso é o método adequado a uma verificação integral da aptidão deste tipo de equipamento.

O método escolhido para a comparação entre os perfis é conhecido como “correlação cruzada”.

6.1 A determinação das bases de referência

Para estas verificações devem ser determinadas duas bases de referência que possuam 200 metros de comprimento, acrescidos de 50 m antes do início da base e 1 metro depois do final dela, totalizando 251 metros, sem contar os trechos necessários à aceleração e desaceleração do veículo que devem ser longos o suficiente para permitir medições próximas à velocidade limite usada pelo equipamento em medições rodoviárias.

Visando testar o equipamento em situações distintas, o valor do QI de cada base deve estar situado em faixas diferentes. Uma das bases deve ter baixa irregularidade ($5 = QI = 25$ cont/km) e a outra média irregularidade ($30 = QI = 50$ cont/km). Visando padronizar a nomenclatura, a base com irregularidade mais alta,

será doravante chamada pela letra “A” e a base com irregularidade mais baixa será doravante chamada pela letra “B”.

As bases não devem conter trincas, fissuras, degraus, panelas, tampouco devem apresentar variação visível de irregularidade ao longo de seu perfil transversal.

Auxilia nos trabalhos a escolha de trechos com greide reto (ou com pequena inclinação) e em tangente. Outra preocupação a ser levada em conta é a possibilidade de fechamento do tráfego do trecho para que as leituras de referência e do perfilômetro possam ser feitas com segurança.

Quanto ao tipo do revestimento, recomenda-se escolher pavimentos com revestimentos similares àqueles que o perfilômetro irá medir após a verificação. Caso os trechos a serem medidos incluam pavimentos de concreto de cimento Portland com juntas transversais, recomenda-se também que se inclua na comparação pelo menos um trecho de pavimento com juntas, assim se poderá verificar se o equipamento trata de maneira adequada as juntas transversais.

Por economia de tempo e de recursos é aceitável mesmo no caso do perfilômetro a ser verificado possuir mais módulos de medição destinados ao levantamento de perfis longitudinais, que as bases de referência possam ser determinadas somente em uma das trilhas de roda. No caso de existirem mais módulos destinados à medição de perfis longitudinais para avaliação de irregularidade o processo deve ser repetido para cada módulo.

As bases devem ser demarcadas com uma linha longitudinal visível, sempre que possível, ao longo de todo o comprimento de 251 metros visando guiar a trajetória do perfilômetro, sendo que podem ser feitas marcações secundárias em tal linha a cada 25 cm ao longo de todo o seu comprimento, além das demarcações de início e fim, para facilitar a medição com o equipamento de referência, especialmente caso seja usado nível e mira.

Determinadas as bases, é preciso medir seus perfis longitudinais de forma criteriosa, com um equipamento adequado.

As características desejadas de um equipamento para se medir os perfis de referência são:

- Sensibilidade de medição da elevação melhor ou igual a 0,1 mm
- Erro máximo de medição de elevação 0,1 mm
- Possibilidade de medição em intervalos regulares de espaço de 25 cm
- Área de apoio sobre o pavimento circular plana, de preferência com 70 mm de diâmetro

Para maior confiabilidade dos dados, o equipamento a ser usado na medição dos perfis de referência deve possuir meios para verificação de sua calibração *in loco* ou deve possuir certificado de calibração recente que comprove sua capacidade de obtenção de resultados dentro do esperado para este ensaio.

Em pavimentos susceptíveis a deformações superficiais devido à temperatura, umidade ou insolação, tais fatores devem ser controlados da melhor forma possível para que as medições do perfil de referência e as medições com o perfilômetro possam ser realizadas nas mesmas condições.

Antes de iniciar a medição do perfil de referência, o pavimento deverá ser varrido para que eventuais sujeiras ou agregados soltos sejam removidos da linha de medição.

O perfil de referência deve preferencialmente ser medido sem interrupções, do começo ao fim. Caso parem dúvidas na medição do perfil de referência, ela deve ser refeita.

6.2 As medições com o perfilômetro inercial

O perfilômetro deverá ser passado por 10 vezes sobre os mesmos 251 metros de comprimento de cada uma das bases, sendo que, em 5 delas a medição deve ser feita em velocidade baixa e nas outras 5, a medição deve ser feita em velocidade alta.

Caso o perfilômetro não possua um dispositivo eletrônico para a marcação exata do início da sessão, sugere-se que ele parta sempre de uma distância conhecida do início da base para que posteriormente tal trecho possa ser eliminado dos perfis.

Para os efeitos destas verificações, entende-se por velocidade baixa aquela que seja até 15 km/h acima da velocidade mínima de operação do perfilômetro, informada pelo fabricante, e por velocidade alta, aquela que seja maior ou igual a 70 km/h.

Especificamente nestas verificações devem ser utilizados perfis longitudinais filtrados, obtidos no menor espaçamento regular possível, ou seja, caso os perfis não sejam obtidos filtrados pelo perfilômetro, eles devem ser filtrados com o procedimento de média e/ou com o procedimento de eliminação de pontos descritos no item 5.5 - letra a, mas não devem ser decimados para o espaçamento de 250 mm.

Com base em todos esses perfis, 11 no total para cada base, sendo 1 de referência e 10 provenientes de medições com o perfilômetro inercial, pode-se passar para o cálculo das correlações cruzadas.

6.3 O processamento dos dados e o cálculo das correlações cruzadas

O método das correlações cruzadas é aplicado sempre entre duas medições de um mesmo perfil longitudinal e apresentará como resultado um número chamado de “índice de concordância” que varia entre -1 e 1, onde o número 1 significa que ambos os perfis são iguais em suas características.

Como na presente verificação os perfis das duas bases de referência foram medidos diversas vezes pelo perfilômetro, os cálculos deverão ser executados várias vezes, sendo que ao final usar-se-á “índices de concordância” médios.

Para o teste de repetitividade, devem ser realizadas as 45 correlações cruzadas possíveis com os 10 perfis medidos, ou seja, todas as combinações de 2 em 2 perfis.

Os resultados dessas correlações serão sumarizados em uma variável por base, que representará a médias dos “índices de concordância”, apelidados de IC, sendo que o índice “R” representa o ensaio de repetitividade: IC_R . Como este índice deve ser calculado para cada base, sugere-se a nomenclatura IC_{RA} e IC_{RB} .

Para a verificação da exatidão, basta correlacionar cada um dos 10 perfis medidos com o perfil de referência. Os resultados de cada base serão sumarizados em duas variáveis para cada base: IC_{E1} e IC_{E2} , onde o índice “E” representa a verificação de exatidão. As variáveis IC_{E1A} e IC_{E1B} representam a média dos 5 “índices de concordância” das correlações feitas entre os perfis medidos a alta velocidade e o perfil de referência, respectivamente para as bases A e B. As variáveis IC_{E2A} e IC_{E2B} representam a média dos 5 índices de concordância medidos à baixa velocidade, em cada uma das bases.

Para efeitos de cálculo dos índices de concordância das correlações cruzadas, os dois perfis necessários serão doravante chamados pelas letras P e Q. Para verificações de exatidão um deles deve ser o perfil de referência (Q), enquanto que o outro será perfil medido pelo equipamento a ser verificado (P).

Em verificações de repetitividade, como ambos devem ter sido medidos com o mesmo equipamento, qualquer um deles pode ser tomado como perfil de referência. Neste caso, se o perfilômetro já gerar perfis com espaçamentos regulares de 1 cm, não precisa ser realizada a interpolação indicada no passo 5. Caso contrário sugere-se que ambos os perfis sejam interpolados para um espaçamento fixo igual a 1 cm.

Abaixo está a descrição passo a passo do método de correlação cruzada entre dois perfis longitudinais de pavimentos:

Passo 1: O perfil de referência (Q) será considerado também a referência de localização longitudinal, portanto o primeiro ponto de tal perfil será considerado como posição longitudinal “zero”. Para a aplicação deste método assume-se que foram medidos adicionalmente à base de referência de 200 metros, de forma contínua, o perfil dos 50 metros que antecedem a posição “zero” e o de 1 metro que sucedem o último ponto do perfil de referência. Em outras palavras, para uma base de referência de 200 metros de comprimento, deve ser medido o perfil de um segmento com comprimento total de 251 metros. O espaçamento entre os pontos do perfil (Q) é chamado de Δx e deve ser sempre múltiplo de 1 cm.

Passo 2: Selecione um perfil resultante da medição com o perfilômetro a ser verificado (P), no mesmo trecho demarcado. A medição de tal perfil deve ter sido iniciada pelo menos 50 m antes do ponto “zero” do perfil de referência e também

deve ter continuado por pelo menos 1 m após o final do perfil de referência. O comprimento total do perfil (P) também deve ser de 251 m. A posição “zero” deve ter sido registrada automaticamente ou deve ser passível de identificação posterior caso o veículo saia sempre de um ponto com distância conhecida. O perfil gerado pelo perfilômetro inercial deve ser obtido com a filtragem normalmente utilizada para se evitar o efeito da macrotextura. Sugere-se o uso de média móvel com 150 mm de comprimento.

Passo 3: Execute a filtragem do perfil de referência (Q) com o filtro do algoritmo do índice⁸ IRI. Esta filtragem retirará os comprimentos de onda que não afetam a irregularidade longitudinal dos pavimentos. O resultado desta filtragem será um perfil em inclinações, ao invés de elevações.

Passo 4: Corte os excessos propositais deixados no comprimento perfil de referência, deixando-o com os 200 metros. Convenciona-se chamar de L_q o comprimento da seção, neste caso $L_q = 200$ m; e de N_q o número de pontos do perfil de comprimento L_q . $N_q = L_q/\lambda + 1$. Supondo-se $\lambda = 0,25$ m, $N_q = 801$. Acerte o *offset* vertical do perfil de inclinações extraído de maneira que a média de todas as inclinações dele seja igual a zero. O perfil (Q) processado é chamado de (q). Calcule então o desvio padrão das inclinações do novo perfil, s_q .

Passo 5: Caso o perfil (P) tenha sido medido em espaçamento diferente de 10 mm, recalcule seus pontos de elevação por meio de interpolações lineares de modo a gerar uma nova versão deste perfil que contenha as elevações espaçadas de 10 mm.

Passo 6: Este passo compreende o processamento do perfil (P) e o cálculo da correlação cruzada entre os perfis. Tal cálculo deverá ser feito 201 vezes, variando-se de 1 em 1 cm a posição do perfil (P), o que compreenderá uma variação total de 1 metro para o lado esquerdo e de 1 metro para o lado direito, visando eliminar eventual *offset* longitudinal entre os perfis. A cada variação de 1 cm, o perfil (P) deverá ser processado de modo a gerar o perfil (p) compatível com o perfil (q) em termos de espaçamento, filtragem e tipo do perfil.

a) Para efeitos de cálculo convencionam-se:

⁸ O método de filtragem com o algoritmo do IRI deverá ser anexado posteriormente a este anteprojeto.

Atribuir ao primeiro ponto de cada perfil o índice zero;

i = representa o ponto individual do perfil (q) no espaçamento Δx ;

$j = \Delta x / 0,01$ m. Supondo-se $\Delta x = 0,25$ m, $j = 25$;

m é um número inteiro que varia de -100 a 100 e representa as 201 posições diferentes do perfil (P) em relação ao perfil (q);

b) Para se determinar cada um dos 201 perfis (p), deve-se determinar inicialmente os perfis P' , ponto a ponto, o que é feito variando-se m de -100 a 100 e em seguida, para cada valor de m , variando i , entre 0 e $(N_q - 1)$, usando-se a equação abaixo que elimina os pontos intermediários a Δx para cada nova posição m .

$$P'_{m_i} = P_{(i \cdot j) + m} \quad (1)$$

c) A seguir, basta processar todos os 201 perfis P'_m seguindo os seguintes passos: filtragem com o mesmo filtro descrito no “Passo 3”; conversão dos perfis de elevação para inclinação; corte dos 49 metros iniciais de cada perfil; acerto do *offset* vertical dos perfis de inclinações cortados de maneira que a média de todas as inclinações de cada perfil seja igual a zero. Os perfis (P'_m) processados passam a ser chamados de (p_m) e contam agora com 202 metros de comprimento cada um, ou seja, o comprimento L_q , acrescido de 1 metro em cada extremidade. Basta calcular então os desvios padrão dos 201 perfis de inclinações (p_m), chamados de s_{pm} .

d) Enfim, calcule as correlações cruzadas entre o perfil (q) e os diversos perfis (p_m). Desta maneira, será produzida uma função de correlação r_m para todos os valores inteiros de m variando de -100 a 100.

$$r_m = \frac{1}{N_q \cdot \max(s_{p_m}, s_q)^2} \sum_{i=0}^{N_q-1} (p_{m_i} \cdot q_i) \quad (2)$$

Passo 7: Ao final dos cálculos, deve ser buscado o valor máximo da função γ_m . Este é o valor do “índice de concordância” entre os perfis P e Q, levando-se em conta as características do filtro aplicado.

6.4 A avaliação dos resultados e classificação do perfilômetro

Para que o perfilômetro seja aprovado (qualificado) nesta verificação de exatidão e repetitividade, os critérios abaixo precisam ser satisfeitos:

- Os índices IC_{RA} e IC_{RB} devem apresentar valores iguais ou superiores a 0,92 para a aprovação do perfilômetro no critério de repetitividade.
- Os índices IC_{E1A} , IC_{E2A} , IC_{E1B} e IC_{E2B} devem apresentar valores iguais ou superiores a 0,88 para a aprovação do perfilômetro no critério de exatidão.

Em pavimentos com macrotextura muito pronunciada (por exemplo: superfícies fresadas, com camada de rolamento em SMA ou camada porosa de atrito etc), podem ser aceitos perfilômetros que apresentem resultados dos índices referentes à exatidão um pouco menores que 0,88, desde que fique provado que tais equipamentos sejam capazes de gerar índices iguais ou maiores que 0,88 quando testados em superfícies fechadas.

Em pavimentos trincados ou com juntas transversais, recomenda-se a aplicação do filtro para exclusão de medidas quando da aplicação da média móvel.

Caso se obtenha resultados ruins, antes de condenar o perfilômetro inercial, é importante checar nos equipamentos usados todos os pontos passíveis de verificação e em se encontrando algo, refazer o(s) levantamentos prejudicado(s) e conseqüentemente a análise.

APÊNDICE C

Dados utilizados na correlação entre IRI e QI

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
0.60	-1	1.27	9	1.53	12	1.72	14	1.90	16	1.58	19	2.21	21	2.34	25	2.79	30	3.25	39	4.75	57		
0.59	0	1.30	9	1.53	12	1.72	14	1.90	16	1.58	19	2.22	21	2.34	25	2.83	30	3.23	39	3.51	57		
0.65	0	1.48	9	1.53	12	1.72	14	1.90	16	1.59	19	2.22	21	2.34	25	2.79	30	3.21	39	3.96	57		
0.66	0	1.13	9	1.53	12	1.72	14	1.90	16	1.60	19	2.22	21	2.35	25	2.83	30	3.62	39	3.51	57		
0.68	1	1.32	9	1.53	12	1.72	14	1.90	16	1.61	19	2.22	21	2.35	25	2.43	30	3.07	39	4.12	57		
0.69	1	1.27	9	1.53	12	1.73	14	1.90	16	1.62	19	2.22	21	2.35	25	2.04	31	3.06	39	5.09	57		
0.72	1	1.34	9	1.53	12	1.73	14	1.90	16	1.63	19	2.22	21	2.35	25	2.07	31	2.76	39	4.83	57		
0.73	1	1.23	9	1.53	12	1.73	14	1.90	16	1.64	19	2.22	21	2.35	25	2.14	31	2.83	39	4.05	57		
0.73	1	1.23	9	1.53	12	1.73	14	1.91	16	1.64	19	2.22	21	2.36	25	2.15	31	3.25	39	4.54	57		
0.73	1	1.28	9	1.53	12	1.73	14	1.91	16	1.64	19	2.22	21	2.36	25	2.18	31	2.86	39	3.74	57		
0.74	1	1.21	9	1.53	12	1.73	14	1.91	16	1.64	19	2.22	21	2.37	25	2.18	31	3.59	39	4.81	57		
0.72	2	1.19	9	1.53	12	1.73	14	1.91	16	1.66	19	2.23	21	2.37	25	2.26	31	2.96	39	4.70	57		
0.74	2	1.27	9	1.53	12	1.73	14	1.91	16	1.68	19	2.23	21	2.37	25	2.27	31	3.20	39	3.75	57		
0.74	2	1.27	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.68	19	2.23	21	2.37	25	2.27	31	2.90	39	4.74	57		
0.75	2	1.32	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.68	19	2.23	21	2.37	25	2.27	31	3.69	39	4.28	57		
0.75	2	1.22	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.68	19	2.23	21	2.37	25	2.29	31	3.47	39	2.09	57		
0.77	2	1.27	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.69	19	2.23	21	2.38	25	2.30	31	3.37	39	4.41	57		
0.78	2	1.35	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.69	19	2.24	21	2.38	25	2.30	31	3.23	39	4.43	57		
0.82	2	1.34	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.70	19	2.24	21	2.38	25	2.32	31	3.14	39	4.53	57		
0.82	2	1.36	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.71	19	2.24	21	2.38	25	2.32	31	3.14	39	4.37	57		
0.84	2	1.24	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.71	19	2.24	21	2.38	25	2.33	31	3.31	39	4.75	57		
0.84	2	1.36	9	1.54	12	1.73	14	1.91	16	1.71	19	2.25	21	2.38	25	2.36	31	3.30	39	3.37	57		
0.84	2	1.25	9	1.54	12	1.73	14	1.92	16	1.71	19	2.25	21	2.38	25	2.37	31	3.17	39	3.49	57		
0.84	2	1.27	9	1.54	12	1.73	14	1.92	16	1.71	19	2.25	21	2.39	25	2.39	31	3.45	39	4.51	57		
0.71	3	1.27	9	1.54	12	1.73	14	1.92	16	1.71	19	2.25	21	2.39	25	2.39	31	3.12	39	3.60	57		
0.76	3	1.26	9	1.54	12	1.73	14	1.92	16	1.71	19	2.25	21	2.39	25	2.40	31	3.66	39	4.50	57		
0.77	3	1.22	9	1.54	12	1.74	14	1.92	16	1.72	19	2.25	21	2.39	25	2.41	31	3.51	39	4.50	57		
0.78	3	1.22	9	1.54	12	1.74	14	1.92	16	1.72	19	2.25	21	2.39	25	2.44	31	3.38	39	4.31	57		
0.78	3	1.12	9	1.54	12	1.74	14	1.92	16	1.72	19	2.25	21	2.39	25	2.44	31	3.00	39	4.36	57		
0.79	3	1.20	9	1.54	12	1.74	14	1.92	16	1.72	19	2.25	21	2.39	25	2.45	31	3.25	39	4.77	57		
0.81	3	1.25	9	1.54	12	1.74	14	1.92	16	1.73	19	2.26	21	2.39	25	2.45	31	3.49	39	4.59	57		
0.81	3	1.34	9	1.54	12	1.74	14	1.92	16	1.73	19	2.26	21	2.39	25	2.45	31	3.41	39	4.54	57		
0.81	3	1.25	9	1.54	12	1.74	14	1.93	16	1.73	19	2.26	21	2.40	25	2.46	31	3.11	39	4.26	57		
0.81	3	1.20	9	1.54	12	1.74	14	1.93	16	1.73	19	2.26	21	2.40	25	2.46	31	3.22	39	4.40	57		
0.83	3	1.39	9	1.54	12	1.74	14	1.93	16	1.73	19	2.26	21	2.40	25	2.48	31	3.43	39	4.37	58		
0.83	3	0.98	10	1.54	12	1.74	14	1.93	16	1.74	19	2.27	21	2.40	25	2.49	31	3.22	39	4.38	58		
0.83	3	1.06	10	1.54	12	1.74	14	1.93	16	1.74	19	2.27	21	2.40	25	2.49	31	3.30	39	4.39	58		
0.83	3	1.12	10	1.54	12	1.74	14	1.93	16	1.74	19	2.27	21	2.40	25	2.50	31	2.55	40	4.43	58		
0.83	3	1.15	10	1.54	12	1.74	14	1.93	16	1.74	19	2.27	21	2.40	25	2.50	31	2.59	40	4.55	58		
0.84	3	1.16	10	1.54	12	1.74	14	1.94	16	1.74	19	2.27	21	2.40	25	2.50	31	2.65	40	4.04	58		
0.84	3	1.17	10	1.54	12	1.74	14	1.94	16	1.75	19	2.28	21	2.40	25	2.50	31	2.67	40	4.77	58		
0.84	3	1.17	10	1.54	12	1.74	14	1.94	16	1.75	19	2.28	21	2.41	25	2.51	31	2.70	40	4.52	58		
0.84	3	1.17	10	1.54	12	1.75	14	1.94	16	1.75	19	2.28	21	2.41	25	2.51	31	2.74	40	4.43	58		
0.85	3	1.17	10	1.54	12	1.75	14	1.94	16	1.75	19	2.28	21	2.41	25	2.51	31	2.76	40	4.20	58		
0.85	3	1.17	10	1.55	12	1.75	14	1.94	16	1.75	19	2.28	21	2.41	25	2.51	31	2.78	40	4.67	58		
0.85	3	1.18	10	1.55	12	1.75	14	1.94	16	1.76	19	2.29	21	2.41	25	2.51	31	2.79	40	4.73	58		
0.85	3	1.18	10	1.55	12	1.75	14	1.95	16	1.76	19	2.29	21	2.41	25	2.52	31	2.81	40	4.45	58		
0.85	3	1.19	10	1.55	12	1.75	14	1.95	16	1.76	19	2.29	21	2.41	25	2.52	31	2.87	40	4.77	58		
0.85	3	1.19	10	1.55	12	1.75	14	1.95	16	1.76	19	2.29	21	2.41	25	2.52	31	2.90	40	4.92	58		
0.86	3	1.19	10	1.55	12	1.75	14	1.95	16	1.76	19	2.30	21	2.41	25	2.52	31	2.91	40	4.46	58		
0.86	3	1.19	10	1.55	12	1.75	14	1.95	16	1.76	19	2.30	21	2.42	25	2.52	31	2.92	40	4.59	58		
0.86	3	1.20	10	1.55	12	1.75	14	1.95	16	1.77	19	2.30	21	2.42	25	2.53	31	2.92	40	4.03	58		
0.86	3	1.20	10	1.55	12	1.75	14	1.96	16	1.77	19	2.31	21	2.42	25	2.53	31	2.93	40	4.55	58		
0.86	3	1.20	10	1.55	12	1.75	14	1.96	16	1.77	19	2.31	21	2.43	25	2.54	31	2.95	40	4.98	58		
0.86	3	1.20	10	1.55	12	1.75	14	1.96	16	1.77	19	2.31	21	2.43	25	2.55	31	3.01	40	4.61	58		
0.86	3	1.20	10	1.55	12	1.75	14	1.96	16	1.77	19	2.32	21	2.43	25	2.56	31	3.04	40	4.69	58		
0.86	3	1.20	10	1.55	12	1.75	14	1.97	16	1.78	19	2.32	21	2.43	25	2.56	31	3.06	40	4.47	58		
0.87	3	1.20	10	1.55	12	1.76	14	1.97	16	1.78	19	2.32	21	2.44	25	2.57	31	3.07	40	4.41	58		
0.87	3	1.20	10	1.55	12	1.76	14	1.97	16	1.78	19	2.33	21	2.44	25	2.58	31	3.11	40	4.91	58		
0.87	3	1.21	10	1.55	12	1.76	14	1.97	16	1.78	19	2.33	21	2.45	25	2.58	31	3.12	40	4.48	58		
0.87	3	1.21	10	1.55	12	1.76	14	1.98	16	1.78	19	2.34	21	2.45	25	2.58	31	3.15	40	4.79	58		
0.88	3	1.21	10	1.55	12	1.76	14	1.99	16	1.78	19	2.34	21	2.45	25	2.58	31	3.15	40	4.11	58		
0.89	3	1.21	10	1.55	12	1.76	14	1.99	16	1.78	19	2.34	21	2.45	25	2.59	31	3.17	40	3.62	58		
0.89	3	1.22	10	1.55	12	1.76	14	1.99	16	1.78	19	2.34	21	2.45	25	2.59	31	3.18	40	4.23	58		
0.89	3	1.22	10	1.55	12	1.76	14	2.00	16	1.79	19	2.38	21	2.45	25	2.60	31	3.23					

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
0.88	4	1.25	10	1.56	12	1.81	14	1.90	16	1.83	19	2.13	21	2.57	25	2.94	31	2.81	40	3.96	58		
0.89	4	1.25	10	1.56	12	1.81	14	1.82	16	1.83	19	2.00	21	2.57	25	2.94	31	3.00	40	4.21	59		
0.89	4	1.25	10	1.56	12	1.82	14	1.94	16	1.83	19	1.83	21	2.60	25	2.99	31	2.46	40	4.24	59		
0.89	4	1.26	10	1.56	12	1.82	14	1.81	16	1.83	19	1.96	21	2.60	25	3.00	31	3.77	40	4.54	59		
0.89	4	1.26	10	1.56	12	1.83	14	1.59	16	1.83	19	1.74	21	2.63	25	3.03	31	2.67	40	4.94	59		
0.89	4	1.26	10	1.56	12	1.83	14	1.76	16	1.83	19	2.11	21	2.66	25	3.15	31	3.56	40	4.91	59		
0.90	4	1.26	10	1.56	12	1.83	14	1.83	16	1.83	19	2.11	21	2.69	25	2.63	31	3.32	40	4.38	59		
0.90	4	1.26	10	1.56	12	1.84	14	1.79	16	1.83	19	2.12	21	2.70	25	3.09	31	3.04	40	4.25	59		
0.90	4	1.26	10	1.56	12	1.85	14	1.64	16	1.83	19	2.01	21	2.89	25	2.63	31	3.42	40	4.06	59		
0.90	4	1.26	10	1.57	12	1.85	14	1.92	16	1.83	19	2.24	21	2.39	25	2.61	31	3.49	40	5.30	59		
0.90	4	1.26	10	1.57	12	1.86	14	1.78	16	1.83	19	2.18	21	2.29	25	3.13	31	3.42	40	5.01	59		
0.90	4	1.26	10	1.57	12	1.87	14	1.62	16	1.83	19	2.00	21	2.29	25	2.87	31	3.52	40	4.50	59		
0.90	4	1.26	10	1.57	12	1.88	14	1.74	16	1.84	19	2.21	21	2.14	25	2.72	31	3.82	40	4.81	59		
0.90	4	1.26	10	1.57	12	2.00	14	1.86	16	1.84	19	2.31	21	2.69	25	2.84	31	3.42	40	5.33	59		
0.90	4	1.27	10	1.57	12	1.70	14	1.74	16	1.84	19	2.12	21	2.55	25	3.04	31	3.69	40	4.51	59		
0.91	4	1.27	10	1.57	12	1.77	14	1.45	16	1.84	19	2.05	21	2.20	25	2.78	31	3.45	40	4.57	59		
0.91	4	1.27	10	1.57	12	1.74	14	1.83	16	1.84	19	2.30	21	1.93	25	2.63	31	3.00	40	4.86	59		
0.91	4	1.27	10	1.57	12	1.62	14	1.62	16	1.84	19	2.18	21	2.33	25	2.65	31	3.56	40	5.30	59		
0.91	4	1.27	10	1.57	12	1.62	14	1.80	16	1.84	19	1.95	21	2.29	25	2.44	31	3.10	40	4.44	59		
0.91	4	1.27	10	1.57	12	1.51	14	1.67	16	1.84	19	2.28	21	2.51	25	2.63	31	3.55	40	4.71	59		
0.91	4	1.27	10	1.57	12	1.62	14	1.68	16	1.84	19	2.20	21	2.28	25	2.47	31	3.62	40	4.31	59		
0.91	4	1.27	10	1.57	12	1.62	14	1.82	16	1.84	19	2.08	21	2.71	25	2.70	31	3.33	40	5.23	59		
0.92	4	1.27	10	1.57	12	1.65	14	1.83	16	1.84	19	2.28	21	2.37	25	2.29	31	2.70	40	4.57	59		
0.92	4	1.27	10	1.57	12	1.76	14	1.84	16	1.84	19	2.09	21	2.25	25	2.80	31	2.88	40	4.13	59		
0.92	4	1.27	10	1.57	12	1.74	14	1.86	16	1.84	19	2.13	21	2.43	25	2.61	31	2.69	40	4.67	59		
0.92	4	1.27	10	1.57	12	1.70	14	1.85	16	1.84	19	1.93	21	2.25	25	2.64	31	3.25	40	4.77	59		
0.92	4	1.27	10	1.57	12	1.62	14	1.64	16	1.85	19	2.22	21	2.31	25	2.86	31	3.48	40	4.70	59		
0.92	4	1.28	10	1.57	12	1.45	14	1.68	16	1.85	19	1.78	21	2.02	25	2.47	31	2.76	40	4.09	59		
0.92	4	1.28	10	1.57	12	1.70	14	1.54	16	1.85	19	1.97	21	1.90	25	2.90	31	3.33	40	4.46	59		
0.92	4	1.28	10	1.57	12	1.69	14	1.80	16	1.85	19	2.07	21	2.53	25	2.78	31	3.05	40	4.82	59		
0.92	4	1.28	10	1.58	12	1.57	14	1.59	16	1.85	19	2.17	21	2.44	25	2.37	31	3.48	40	4.51	59		
0.92	4	1.28	10	1.58	12	1.73	14	1.71	16	1.85	19	1.87	21	2.30	25	2.83	31	2.65	40	4.35	59		
0.92	4	1.28	10	1.58	12	1.58	14	1.82	16	1.85	19	2.15	21	2.54	25	2.74	31	3.08	40	3.29	59		
0.92	4	1.28	10	1.58	12	1.65	14	1.63	16	1.85	19	2.18	21	2.31	25	2.62	31	2.78	40	4.10	59		
0.92	4	1.28	10	1.58	12	1.85	14	1.85	16	1.85	19	2.03	21	2.11	25	2.52	31	2.87	40	4.19	59		
0.92	4	1.28	10	1.58	12	1.67	14	1.56	16	1.85	19	2.02	21	2.43	25	2.54	31	3.02	40	4.75	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.60	14	1.51	16	1.85	19	1.98	21	2.32	25	2.79	31	2.92	40	4.44	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.62	14	1.64	16	1.85	19	2.15	21	2.35	25	2.32	31	3.45	40	4.83	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.62	14	1.79	16	1.86	19	2.16	21	2.45	25	2.79	31	3.32	40	4.08	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.55	14	1.69	16	1.86	19	2.27	21	2.15	25	2.38	31	3.03	40	3.81	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.50	14	1.75	16	1.86	19	2.21	21	2.28	25	2.62	31	3.50	40	4.87	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.80	14	1.91	16	1.86	19	2.28	21	2.07	25	3.02	31	3.20	40	4.80	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.57	14	1.91	16	1.86	19	2.14	21	2.18	25	3.07	31	3.28	40	4.49	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.55	14	1.91	16	1.86	19	1.93	21	2.15	25	2.69	31	3.26	40	4.28	59		
0.93	4	1.28	10	1.58	12	1.78	14	1.68	16	1.86	19	1.85	21	2.23	25	2.79	31	3.14	40	4.32	59		
0.93	4	1.29	10	1.58	12	1.69	14	1.87	16	1.86	19	1.95	21	2.25	25	2.83	31	3.01	40	4.41	59		
0.93	4	1.29	10	1.58	12	1.73	14	1.77	16	1.86	19	1.98	21	2.27	25	2.94	31	3.24	40	4.86	59		
0.93	4	1.29	10	1.58	12	1.73	14	1.79	16	1.86	19	1.77	21	2.38	25	2.81	31	3.38	40	4.13	59		
0.94	4	1.29	10	1.58	12	1.70	14	1.75	16	1.86	19	2.04	21	2.24	25	2.99	31	3.21	40	3.74	59		
0.94	4	1.29	10	1.58	12	1.70	14	1.61	16	1.86	19	2.15	21	2.03	25	2.72	31	3.57	40	4.80	59		
0.94	4	1.29	10	1.58	12	1.32	14	1.87	16	1.86	19	2.29	21	1.99	25	2.51	31	3.46	40	4.93	59		
0.94	4	1.29	10	1.58	12	1.51	14	1.93	16	1.87	19	1.81	21	2.16	25	2.87	31	3.45	40	4.28	59		
0.94	4	1.29	10	1.59	12	1.57	14	1.92	16	1.87	19	2.22	21	2.40	25	2.73	31	3.43	40	4.06	59		
0.94	4	1.29	10	1.59	12	1.58	14	1.83	16	1.87	19	2.13	21	2.28	25	2.84	31	3.29	40	4.35	59		
0.94	4	1.29	10	1.59	12	1.72	14	1.76	16	1.87	19	1.88	21	2.47	25	2.70	31	3.25	40	4.95	59		
0.94	4	1.29	10	1.59	12	1.59	14	1.89	16	1.87	19	2.10	21	2.32	25	2.37	31	3.14	40	4.25	59		
0.94	4	1.29	10	1.59	12	1.82	14	1.77	16	1.87	19	1.92	21	2.23	25	2.62	31	3.70	40	4.03	59		
0.94	4	1.29	10	1.59	12	1.61	14	1.99	16	1.87	19	2.05	21	2.47	25	2.62	31	3.52	40	4.38	60		
0.95	4	1.29	10	1.59	12	1.64	14	1.57	16	1.87	19	2.24	21	2.30	25	2.41	31	2.96	40	4.41	60		
0.95	4	1.29	10	1.59	12	1.55	14	1.67	16	1.87	19	2.27	21	2.32	25	2.74	31	3.46	40	4.50	60		
0.95	4	1.29	10	1.59	12	1.61	14	1.71	16	1.87	19	2.08	21	2.53	25	2.40	31	3.31	40	4.53	60		
0.95	4	1.29	10	1.59	12	1.63	14	1.60	16	1.87	19	2.22	21	2.51	25	2.61	31	3.38	40	4.79	60		
0.95	4	1.29	10	1.59	12	1.77	14	1.69	16	1.87	19	1.87	21	2.50	25	2.36	31	3.03	40	4.95	60		
0.95	4	1.29	10	1.59	12	1.66	14	1.63	16	1.87	19	2.22	21	2.46	25	2.51	31	3.69	40	4.75	60		
0.95	4	1.29	10	1.59	12	1.52	14	1.71	16	1.87	19	2.12	21	2									

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
0.99	4	1.31	10	1.61	12	1.56	14	1.92	16	1.89	19	2.15	21	2.11	25	2.73	31	2.87	41	4.90	60		
0.99	4	1.31	10	1.61	12	1.65	14	1.59	16	1.89	19	2.14	21	2.01	25	2.57	31	2.88	41	5.16	60		
0.99	4	1.31	10	1.61	12	1.51	14	1.83	16	1.89	19	2.13	21	1.91	25	3.12	31	2.88	41	4.18	60		
0.99	4	1.31	10	1.62	12	1.58	14	1.55	16	1.89	19	1.96	21	2.16	25	2.73	31	2.90	41	4.58	60		
1.00	4	1.31	10	1.62	12	1.46	14	1.82	16	1.89	19	2.14	21	2.10	25	2.75	31	2.92	41	4.67	60		
1.00	4	1.31	10	1.62	12	1.51	14	1.74	16	1.89	19	1.61	21	2.05	25	2.65	31	2.92	41	4.53	60		
1.00	4	1.31	10	1.62	12	1.79	14	1.74	16	1.89	19	1.91	21	2.15	25	2.74	31	2.95	41	4.79	60		
1.01	4	1.31	10	1.62	12	1.69	14	1.24	17	1.89	19	1.88	21	2.43	25	2.89	31	2.96	41	4.56	60		
1.02	4	1.31	10	1.62	12	1.72	14	1.38	17	1.89	19	2.34	21	2.36	25	2.83	31	2.97	41	4.34	60		
1.02	4	1.31	10	1.63	12	1.55	14	1.39	17	1.90	19	2.04	21	2.27	25	2.42	31	3.01	41	3.55	60		
1.02	4	1.31	10	1.63	12	1.62	14	1.43	17	1.90	19	2.07	21	2.33	25	2.88	31	3.02	41	3.80	60		
1.02	4	1.31	10	1.63	12	1.71	14	1.46	17	1.90	19	2.10	21	2.46	25	2.64	31	3.05	41	4.15	60		
1.02	4	1.31	10	1.63	12	1.66	14	1.47	17	1.90	19	1.96	21	2.17	25	2.71	31	3.06	41	4.95	60		
1.02	4	1.31	10	1.63	12	1.67	14	1.48	17	1.90	19	2.27	21	2.21	25	2.89	31	3.10	41	4.51	60		
1.04	4	1.31	10	1.63	12	1.72	14	1.48	17	1.90	19	1.97	21	2.35	25	2.94	31	3.14	41	4.08	60		
1.04	4	1.31	10	1.63	12	1.63	14	1.49	17	1.90	19	1.88	21	2.35	25	2.86	31	3.17	41	4.15	60		
1.05	4	1.31	10	1.63	12	1.55	14	1.49	17	1.90	19	1.96	21	2.55	25	2.74	31	3.20	41	4.40	60		
1.05	4	1.31	10	1.63	12	1.22	15	1.50	17	1.90	19	2.01	21	2.23	25	2.75	31	3.23	41	4.54	60		
1.06	4	1.31	10	1.63	12	1.22	15	1.50	17	1.90	19	2.12	21	2.51	25	2.85	31	3.23	41	4.01	60		
1.08	4	1.31	10	1.63	12	1.27	15	1.50	17	1.90	19	2.14	21	2.35	25	2.86	31	3.24	41	4.18	61		
1.11	4	1.31	10	1.64	12	1.28	15	1.51	17	1.90	19	2.10	21	2.13	25	2.61	31	3.25	41	4.23	61		
1.13	4	1.31	10	1.64	12	1.36	15	1.53	17	1.90	19	1.85	21	2.27	25	2.44	31	3.31	41	4.37	61		
1.02	4	1.31	10	1.64	12	1.37	15	1.53	17	1.90	19	1.98	21	2.31	25	2.50	31	3.31	41	4.44	61		
0.67	5	1.31	10	1.64	12	1.37	15	1.53	17	1.90	19	2.25	21	2.31	25	2.00	31	3.33	41	3.93	61		
0.85	5	1.31	10	1.64	12	1.37	15	1.53	17	1.90	19	2.20	21	2.50	25	2.59	31	3.34	41	5.19	61		
0.90	5	1.32	10	1.64	12	1.38	15	1.54	17	1.91	19	1.72	21	2.26	25	2.77	31	3.35	41	4.64	61		
0.90	5	1.32	10	1.64	12	1.38	15	1.54	17	1.91	19	2.28	21	2.45	25	2.78	31	3.36	41	4.88	61		
0.91	5	1.32	10	1.64	12	1.39	15	1.54	17	1.91	19	1.40	22	2.01	25	2.72	31	3.36	41	5.08	61		
0.92	5	1.32	10	1.64	12	1.39	15	1.54	17	1.91	19	1.46	22	2.20	25	2.75	31	3.37	41	4.83	61		
0.92	5	1.32	10	1.65	12	1.40	15	1.55	17	1.91	19	1.56	22	2.51	25	3.04	31	3.46	41	4.95	61		
0.93	5	1.32	10	1.65	12	1.41	15	1.55	17	1.91	19	1.57	22	2.51	25	2.91	31	3.58	41	4.93	61		
0.93	5	1.32	10	1.65	12	1.42	15	1.55	17	1.91	19	1.66	22	2.48	25	2.54	31	3.59	41	4.15	61		
0.93	5	1.32	10	1.65	12	1.44	15	1.56	17	1.91	19	1.68	22	2.43	25	2.45	31	3.61	41	4.34	61		
0.94	5	1.32	10	1.65	12	1.44	15	1.56	17	1.91	19	1.69	22	2.24	25	2.76	31	3.67	41	4.80	61		
0.94	5	1.32	10	1.66	12	1.45	15	1.56	17	1.91	19	1.71	22	2.43	25	2.50	31	3.17	41	4.56	61		
0.94	5	1.32	10	1.66	12	1.46	15	1.57	17	1.91	19	1.71	22	2.20	25	2.51	31	3.60	41	4.82	61		
0.94	5	1.32	10	1.66	12	1.46	15	1.57	17	1.91	19	1.71	22	2.34	25	2.76	31	3.73	41	4.43	61		
0.94	5	1.32	10	1.66	12	1.47	15	1.57	17	1.91	19	1.75	22	2.26	25	2.45	31	3.53	41	5.38	61		
0.95	5	1.32	10	1.66	12	1.47	15	1.57	17	1.91	19	1.78	22	2.06	25	2.76	31	2.91	41	4.34	61		
0.95	5	1.32	10	1.66	12	1.47	15	1.57	17	1.91	19	1.81	22	2.43	25	2.99	31	3.41	41	3.65	61		
0.95	5	1.32	10	1.67	12	1.47	15	1.57	17	1.91	19	1.81	22	2.52	25	2.00	32	3.36	41	5.01	61		
0.95	5	1.32	10	1.67	12	1.48	15	1.57	17	1.91	19	1.82	22	2.45	25	2.05	32	3.43	41	4.42	61		
0.95	5	1.32	10	1.67	12	1.48	15	1.58	17	1.92	19	1.82	22	2.54	25	2.18	32	3.46	41	5.18	61		
0.95	5	1.32	10	1.67	12	1.48	15	1.58	17	1.92	19	1.83	22	2.40	25	2.24	32	2.86	41	4.48	61		
0.95	5	1.32	10	1.68	12	1.48	15	1.58	17	1.92	19	1.83	22	2.12	25	2.26	32	2.77	41	4.91	61		
0.96	5	1.32	10	1.68	12	1.48	15	1.58	17	1.92	19	1.83	22	2.14	25	2.31	32	3.11	41	4.28	61		
0.96	5	1.32	10	1.68	12	1.48	15	1.59	17	1.92	19	1.84	22	2.48	25	2.34	32	2.59	41	4.82	61		
0.96	5	1.32	10	1.68	12	1.48	15	1.59	17	1.92	19	1.84	22	2.38	25	2.35	32	3.30	41	4.10	61		
0.96	5	1.32	10	1.69	12	1.48	15	1.59	17	1.92	19	1.84	22	2.55	25	2.37	32	3.71	41	3.75	61		
0.96	5	1.32	10	1.69	12	1.48	15	1.59	17	1.92	19	1.85	22	2.45	25	2.37	32	3.75	41	5.15	61		
0.96	5	1.33	10	1.69	12	1.49	15	1.59	17	1.92	19	1.85	22	2.25	25	2.38	32	2.95	41	5.28	61		
0.96	5	1.33	10	1.71	12	1.49	15	1.59	17	1.92	19	1.85	22	2.37	25	2.41	32	2.98	41	4.36	61		
0.96	5	1.33	10	1.74	12	1.49	15	1.60	17	1.92	19	1.86	22	2.56	25	2.41	32	3.36	41	4.51	61		
0.97	5	1.33	10	1.57	12	1.49	15	1.60	17	1.92	19	1.86	22	2.36	25	2.41	32	3.34	41	4.79	61		
0.97	5	1.33	10	1.64	12	1.49	15	1.60	17	1.92	19	1.87	22	2.24	25	2.41	32	3.36	41	4.60	61		
0.97	5	1.33	10	1.35	12	1.50	15	1.61	17	1.92	19	1.87	22	2.03	25	2.41	32	3.39	41	4.57	61		
0.97	5	1.33	10	1.43	12	1.50	15	1.61	17	1.92	19	1.88	22	2.29	25	2.42	32	3.48	41	4.81	61		
0.97	5	1.33	10	1.56	12	1.50	15	1.61	17	1.92	19	1.88	22	2.16	25	2.43	32	3.18	41	4.46	61		
0.97	5	1.33	10	1.56	12	1.50	15	1.61	17	1.92	19	1.89	22	2.37	25	2.45	32	2.94	41	4.71	61		
0.97	5	1.33	10	1.48	12	1.50	15	1.61	17	1.92	19	1.89	22	2.17	25	2.46	32	3.71	41	3.98	61		
0.97	5	1.33	10	1.27	12	1.50	15	1.62	17	1.92	19	1.89	22	2.18	25	2.47	32	3.61	41	5.00	61		
0.97	5	1.33	10	1.41	12	1.51	15	1.62	17	1.92	19	1.91	22	2.26	25	2.48	32	3.29	41	4.48	61		
0.97	5	1.33	10	1.48	12	1.51	15	1.62	17	1.92	19	1.92	22	2.18	25	2.48	32	3.45	41	4.47	61		
0.97	5	1.33	10	1.39	12	1.51	15	1.62	17	1.92	19	1.92	22	1.92	25	2.49	32	3.67	41	4.50	61		
0.97	5	1.33	10	1.32	12	1.51	15	1.62	17	1.92	19	1.92	22	1									

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.00	5	1.34	10	1.30	12	1.54	15	1.67	17	1.94	19	1.99	22	2.01	26	2.70	32	2.84	41	4.39	62		
1.01	5	1.34	10	1.52	12	1.55	15	1.67	17	1.94	19	1.99	22	2.03	26	2.70	32	2.98	41	5.16	62		
1.01	5	1.34	10	1.46	12	1.55	15	1.68	17	1.94	19	2.00	22	2.04	26	2.71	32	2.65	41	4.58	62		
1.01	5	1.34	10	1.44	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.05	26	2.71	32	2.03	41	4.23	62		
1.01	5	1.34	10	1.64	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.06	26	2.72	32	3.56	41	5.17	62		
1.01	5	1.34	10	1.51	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.07	26	2.72	32	3.66	41	4.49	62		
1.01	5	1.34	10	1.42	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.08	26	2.72	32	3.32	41	5.13	62		
1.01	5	1.34	10	1.55	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.09	26	2.72	32	3.32	41	4.48	62		
1.01	5	1.34	10	1.67	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.10	26	2.75	32	3.02	41	4.69	62		
1.01	5	1.34	10	1.34	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.11	26	2.75	32	3.11	41	5.33	62		
1.01	5	1.34	10	1.49	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.11	26	2.77	32	2.92	41	4.68	62		
1.01	5	1.34	10	1.43	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.12	26	2.79	32	3.72	41	4.76	62		
1.01	5	1.34	10	1.43	12	1.55	15	1.68	17	1.95	19	2.00	22	2.13	26	2.79	32	3.51	41	4.94	62		
1.01	5	1.34	10	1.46	12	1.56	15	1.68	17	1.95	19	2.01	22	2.13	26	2.80	32	3.28	41	4.36	62		
1.01	5	1.34	10	1.32	12	1.56	15	1.68	17	1.95	19	2.01	22	2.13	26	2.81	32	3.36	41	5.10	62		
1.02	5	1.34	10	1.45	12	1.56	15	1.68	17	1.95	19	2.01	22	2.14	26	2.81	32	3.60	41	5.35	62		
1.02	5	1.34	10	1.55	12	1.56	15	1.68	17	1.95	19	2.01	22	2.14	26	2.82	32	3.23	41	4.95	62		
1.02	5	1.35	10	1.62	12	1.56	15	1.69	17	1.95	19	2.01	22	2.14	26	2.82	32	3.45	41	3.93	62		
1.02	5	1.35	10	1.49	12	1.56	15	1.69	17	1.95	19	2.01	22	2.14	26	2.83	32	3.35	41	4.52	62		
1.02	5	1.35	10	1.57	12	1.56	15	1.69	17	1.95	19	2.01	22	2.15	26	2.87	32	3.28	41	4.12	62		
1.02	5	1.35	10	1.58	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.01	22	2.15	26	2.88	32	3.24	41	4.13	62		
1.02	5	1.35	10	1.62	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.02	22	2.16	26	2.88	32	3.23	41	5.00	62		
1.02	5	1.35	10	1.47	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.02	22	2.16	26	2.89	32	3.33	41	5.19	62		
1.03	5	1.35	10	1.56	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.02	22	2.17	26	2.90	32	3.32	41	3.92	62		
1.03	5	1.35	10	1.55	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.02	22	2.18	26	2.91	32	3.22	41	4.33	62		
1.03	5	1.35	10	1.38	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.02	22	2.18	26	2.92	32	3.19	41	4.70	62		
1.03	5	1.35	10	1.58	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.02	22	2.18	26	2.92	32	3.08	41	4.97	62		
1.03	5	1.35	10	1.48	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.03	22	2.18	26	2.92	32	3.40	41	4.85	62		
1.03	5	1.35	10	1.60	12	1.56	15	1.69	17	1.96	19	2.03	22	2.18	26	2.94	32	3.03	41	5.08	62		
1.03	5	1.35	10	1.58	12	1.56	15	1.70	17	1.96	19	2.03	22	2.18	26	2.94	32	2.93	41	4.68	62		
1.03	5	1.35	10	1.47	12	1.56	15	1.70	17	1.96	19	2.03	22	2.18	26	2.95	32	3.40	41	4.40	62		
1.03	5	1.35	10	1.46	12	1.56	15	1.70	17	1.96	19	2.03	22	2.19	26	2.96	32	3.06	41	4.68	62		
1.03	5	1.35	10	1.33	12	1.56	15	1.70	17	1.96	19	2.03	22	2.19	26	2.97	32	2.75	41	5.06	62		
1.03	5	1.35	10	1.34	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.04	22	2.19	26	2.98	32	3.06	41	3.60	62		
1.04	5	1.35	10	1.53	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.04	22	2.20	26	2.99	32	2.48	41	3.97	63		
1.04	5	1.35	10	1.57	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.04	22	2.20	26	2.99	32	3.12	41	4.24	63		
1.04	5	1.35	10	1.49	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.04	22	2.20	26	2.99	32	3.09	41	4.42	63		
1.04	5	1.35	10	1.66	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.04	22	2.21	26	3.00	32	3.71	41	4.67	63		
1.04	5	1.35	10	1.45	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.04	22	2.21	26	3.01	32	2.95	41	4.64	63		
1.04	5	1.35	10	1.74	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.04	22	2.21	26	3.05	32	3.45	41	5.19	63		
1.04	5	1.35	10	1.44	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.05	22	2.21	26	3.08	32	3.52	41	4.67	63		
1.04	5	1.35	10	1.54	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.05	22	2.22	26	3.10	32	3.68	41	5.18	63		
1.04	5	1.35	10	1.45	12	1.57	15	1.70	17	1.96	19	2.05	22	2.22	26	3.13	32	3.59	41	4.05	63		
1.05	5	1.35	10	1.35	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.05	22	2.22	26	2.47	32	3.28	41	3.89	63		
1.05	5	1.35	10	1.53	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.05	22	2.24	26	2.93	32	3.62	41	5.17	63		
1.05	5	1.35	10	1.65	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.05	22	2.24	26	2.72	32	3.31	41	5.04	63		
1.05	5	1.35	10	1.63	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.05	22	2.24	26	2.73	32	3.74	41	3.74	63		
1.05	5	1.35	10	1.61	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.05	22	2.24	26	2.58	32	3.71	41	4.08	63		
1.05	5	1.35	10	1.33	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.05	22	2.24	26	2.98	32	3.55	41	4.80	63		
1.05	5	1.35	10	1.49	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.05	22	2.24	26	2.46	32	3.32	41	4.39	63		
1.06	5	1.35	10	1.54	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.05	22	2.24	26	2.75	32	3.43	41	3.99	63		
1.06	5	1.36	10	1.40	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.24	26	2.79	32	2.46	42	4.53	63		
1.06	5	1.36	10	1.53	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.24	26	2.80	32	2.55	42	4.73	63		
1.06	5	1.36	10	1.64	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.25	26	3.17	32	2.57	42	5.42	63		
1.06	5	1.36	10	1.54	12	1.57	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.25	26	2.71	32	2.71	42	4.54	63		
1.06	5	1.36	10	1.45	12	1.58	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.25	26	2.67	32	2.77	42	4.20	63		
1.06	5	1.36	10	1.53	12	1.58	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.25	26	2.57	32	2.82	42	4.34	63		
1.06	5	1.36	10	1.20	13	1.58	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.25	26	2.82	32	2.83	42	4.23	63		
1.06	5	1.36	10	1.24	13	1.58	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.26	26	3.00	32	2.83	42	4.81	63		
1.06	5	1.36	10	1.32	13	1.58	15	1.71	17	1.97	19	2.06	22	2.26	26	2.90	32	2.88	42	4.97	63		
1.06	5	1.36	10	1.32	13	1.58	15	1.71	17	1.98	19	2.07	22	2.26	26	2.80	32	2.89	42	4.67	63		
1.06	5	1.36	10	1.32	13	1.58	15	1.71	17	1.98	19	2.07	22	2.26	26	2.74	32	2.91	42	5.06	63		
1.07	5	1.36	10	1.32	13	1.58	15	1.71	17	1.98	19	2.07	22	2.26	26	2.57	32	2.93	42	4.39	63		
1.07	5	1.36	10	1.33	13	1.58	15	1.72	17	1.98	19	2.07	22	2.26	26	2.83	32	2.93	42	5.05	63		
1.07	5	1.36	10	1.33	13	1.58	15	1.72	17	1.98	19	2.07	22	2									

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
0.98	6	1.37	10	1.41	13	1.60	15	1.73	17	1.99	19	2.10	22	2.34	26	2.70	32	3.02	42	5.25	64		
0.99	6	1.37	10	1.41	13	1.60	15	1.73	17	1.99	19	2.10	22	2.34	26	2.61	32	3.63	42	3.82	64		
0.99	6	1.37	10	1.41	13	1.60	15	1.73	17	1.99	19	2.10	22	2.34	26	2.98	32	3.37	42	4.56	64		
0.99	6	1.37	10	1.42	13	1.60	15	1.73	17	1.99	19	2.10	22	2.34	26	2.41	32	3.50	42	4.78	64		
1.00	6	1.37	10	1.42	13	1.60	15	1.74	17	1.99	19	2.10	22	2.35	26	2.72	32	3.45	42	4.79	64		
1.00	6	1.37	10	1.42	13	1.60	15	1.74	17	1.99	19	2.10	22	2.35	26	2.49	32	3.03	42	4.37	64		
1.00	6	1.37	10	1.42	13	1.60	15	1.74	17	1.99	19	2.10	22	2.35	26	2.92	32	2.79	42	4.75	64		
1.00	6	1.37	10	1.42	13	1.61	15	1.74	17	1.99	19	2.10	22	2.35	26	2.90	32	3.28	42	4.98	64		
1.00	6	1.37	10	1.42	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.36	26	2.98	32	3.15	42	4.97	64		
1.00	6	1.37	10	1.42	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.36	26	2.81	32	3.37	42	5.20	64		
1.00	6	1.37	10	1.42	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.36	26	2.86	32	3.29	42	5.22	64		
1.00	6	1.37	10	1.42	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.36	26	2.94	32	2.97	42	4.85	64		
1.01	6	1.37	10	1.42	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.36	26	2.80	32	3.38	42	5.24	64		
1.01	6	1.37	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.36	26	2.74	32	3.31	42	4.56	64		
1.01	6	1.37	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.36	26	2.78	32	3.30	42	5.01	64		
1.01	6	1.37	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.37	26	2.38	32	3.16	42	4.91	64		
1.01	6	1.37	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.37	26	2.59	32	4.03	42	5.17	64		
1.01	6	1.38	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.37	26	2.59	32	3.38	42	4.31	64		
1.01	6	1.38	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.37	26	2.85	32	3.42	42	5.10	64		
1.01	6	1.38	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.37	26	2.88	32	3.17	42	4.82	64		
1.01	6	1.38	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.38	26	3.13	32	3.19	42	4.98	64		
1.01	6	1.38	10	1.43	13	1.61	15	1.74	17	2.00	19	2.11	22	2.38	26	2.88	32	3.77	42	4.85	64		
1.01	6	1.38	10	1.43	13	1.61	15	1.75	17	2.00	19	2.11	22	2.38	26	2.48	32	3.74	42	4.96	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.61	15	1.75	17	2.01	19	2.11	22	2.38	26	3.00	32	3.31	42	5.25	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.61	15	1.75	17	2.01	19	2.11	22	2.38	26	2.41	32	3.62	42	4.40	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.75	17	2.01	19	2.11	22	2.38	26	3.03	32	3.39	42	4.52	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.75	17	2.01	19	2.12	22	2.38	26	2.48	32	3.56	42	4.89	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.75	17	2.01	19	2.12	22	2.38	26	2.80	32	3.43	42	4.20	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.75	17	2.01	19	2.12	22	2.39	26	2.58	32	3.13	42	4.53	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.75	17	2.01	19	2.12	22	2.39	26	2.61	32	3.98	42	4.36	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.75	17	2.01	19	2.12	22	2.39	26	2.74	32	3.41	42	5.35	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.75	17	2.01	19	2.12	22	2.39	26	2.88	32	3.63	42	4.27	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.75	17	2.01	19	2.12	22	2.39	26	3.08	32	3.32	42	4.12	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.76	17	2.01	19	2.12	22	2.39	26	3.01	32	3.77	42	4.91	64		
1.02	6	1.38	10	1.44	13	1.62	15	1.76	17	2.01	19	2.12	22	2.39	26	3.10	32	2.69	42	4.81	64		
1.02	6	1.38	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.01	19	2.12	22	2.40	26	2.63	32	3.17	42	4.82	64		
1.02	6	1.38	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.12	22	2.40	26	2.37	32	3.22	42	4.98	64		
1.02	6	1.38	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.12	22	2.40	26	2.55	32	3.50	42	4.83	64		
1.02	6	1.38	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.40	26	2.84	32	2.85	42	4.74	64		
1.03	6	1.38	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.40	26	2.81	32	3.09	42	3.69	64		
1.03	6	1.38	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.41	26	2.93	32	3.61	42	4.87	64		
1.03	6	1.39	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.41	26	2.97	32	3.05	42	4.89	64		
1.03	6	1.39	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.41	26	2.82	32	3.06	42	4.04	65		
1.03	6	1.39	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.41	26	3.02	32	2.98	42	4.43	65		
1.03	6	1.39	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.42	26	2.82	32	3.03	42	4.72	65		
1.03	6	1.39	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.42	26	2.52	32	3.56	42	4.89	65		
1.03	6	1.39	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.42	26	2.71	32	3.01	42	5.45	65		
1.03	6	1.39	10	1.45	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.42	26	2.99	32	3.55	42	5.18	65		
1.03	6	1.39	10	1.46	13	1.62	15	1.76	17	2.02	19	2.13	22	2.42	26	2.84	32	2.53	42	5.09	65		
1.03	6	1.39	10	1.46	13	1.62	15	1.77	17	2.02	19	2.13	22	2.43	26	2.68	32	2.82	42	5.10	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.62	15	1.77	17	2.02	19	2.13	22	2.43	26	2.83	32	3.65	42	4.51	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.02	19	2.13	22	2.43	26	2.91	32	3.93	42	4.64	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.43	26	2.87	32	3.49	42	4.46	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.43	26	2.91	32	3.22	42	5.37	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.44	26	3.09	32	3.05	42	5.40	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.45	26	2.95	32	3.66	42	4.71	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.45	26	2.88	32	3.73	42	4.45	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.45	26	2.87	32	3.82	42	5.22	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.45	26	2.63	32	3.48	42	3.67	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.45	26	2.58	32	3.70	42	4.00	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.45	26	2.73	32	3.58	42	5.76	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.45	26	2.75	32	3.57	42	4.95	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.46	26	2.61	32	3.34	42	4.96	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2.46	26	2.72	32	3.41	42	5.04	65		
1.04	6	1.39	10	1.46	13	1.63	15	1.77	17	2.03	19	2.14	22	2									

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.06	6	1.41	10	1.48	13	1.64	15	1.79	17	2.05	19	2.17	22	2.54	26	2.43	32	3.33	42	4.64	66		
1.06	6	1.41	10	1.48	13	1.64	15	1.79	17	2.05	19	2.17	22	2.56	26	2.75	32	2.68	43	5.54	66		
1.06	6	1.41	10	1.48	13	1.64	15	1.79	17	2.05	19	2.17	22	2.56	26	2.92	32	2.85	43	5.19	66		
1.06	6	1.41	10	1.48	13	1.64	15	1.79	17	2.05	19	2.18	22	2.57	26	2.38	32	2.90	43	5.22	66		
1.06	6	1.41	10	1.49	13	1.64	15	1.79	17	2.05	19	2.18	22	2.57	26	2.67	32	2.96	43	4.44	66		
1.06	6	1.41	10	1.49	13	1.64	15	1.79	17	2.05	19	2.18	22	2.57	26	2.79	32	2.98	43	4.99	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.64	15	1.79	17	2.05	19	2.18	22	2.58	26	2.37	32	3.07	43	5.02	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.05	19	2.18	22	2.58	26	2.76	32	3.09	43	4.75	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.05	19	2.18	22	2.58	26	2.74	32	3.09	43	5.19	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.05	19	2.18	22	2.58	26	3.14	32	3.14	43	4.39	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.06	19	2.18	22	2.59	26	2.72	32	3.20	43	5.01	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.06	19	2.18	22	2.60	26	2.46	32	3.20	43	4.87	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.06	19	2.18	22	2.60	26	2.34	32	3.23	43	4.91	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.06	19	2.18	22	2.61	26	2.90	32	3.23	43	4.01	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.06	19	2.18	22	2.61	26	2.94	32	3.24	43	5.26	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.06	19	2.19	22	2.61	26	2.96	32	3.25	43	5.07	66		
1.07	6	1.41	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.06	19	2.19	22	2.62	26	2.72	32	3.33	43	4.31	66		
1.07	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.06	19	2.19	22	2.62	26	2.71	32	3.34	43	4.20	66		
1.07	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.19	22	2.64	26	2.15	33	3.34	43	4.32	66		
1.07	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.19	22	2.65	26	2.17	33	3.37	43	5.07	66		
1.07	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.19	22	2.66	26	2.20	33	3.37	43	5.21	66		
1.07	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.19	22	2.66	26	2.27	33	3.38	43	4.16	66		
1.07	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.19	22	2.67	26	2.31	33	3.53	43	4.85	66		
1.07	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.19	22	2.83	26	2.34	33	3.54	43	5.14	66		
1.08	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.19	22	2.91	26	2.36	33	3.59	43	3.54	66		
1.08	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.19	22	2.17	26	2.37	33	3.59	43	5.06	66		
1.08	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.79	17	2.07	19	2.20	22	2.33	26	2.42	33	3.62	43	4.59	66		
1.08	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.80	17	2.07	19	2.20	22	2.63	26	2.42	33	3.63	43	3.78	66		
1.08	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.80	17	2.07	19	2.20	22	2.52	26	2.42	33	3.66	43	4.27	66		
1.08	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.80	17	2.07	19	2.20	22	2.41	26	2.43	33	3.69	43	4.33	66		
1.08	6	1.42	10	1.49	13	1.65	15	1.80	17	2.07	19	2.20	22	2.46	26	2.43	33	3.71	43	4.15	66		
1.08	6	1.42	10	1.49	13	1.66	15	1.80	17	2.07	19	2.20	22	2.56	26	2.43	33	4.00	43	5.25	66		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.07	19	2.20	22	2.71	26	2.44	33	3.66	43	4.65	66		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.07	19	2.20	22	2.49	26	2.44	33	3.48	43	4.96	66		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.20	22	2.58	26	2.45	33	3.11	43	4.87	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.20	22	2.49	26	2.45	33	3.33	43	5.46	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.44	26	2.45	33	4.03	43	5.59	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.56	26	2.47	33	3.94	43	4.73	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.42	26	2.47	33	3.19	43	5.68	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.27	26	2.47	33	3.60	43	5.04	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.35	26	2.48	33	2.73	43	4.74	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.15	26	2.48	33	3.39	43	5.67	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	1.94	26	2.48	33	3.66	43	4.89	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.12	26	2.48	33	2.86	43	4.73	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.02	26	2.49	33	3.12	43	5.13	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.33	26	2.50	33	2.36	43	5.36	67		
1.08	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.08	19	2.21	22	2.23	26	2.51	33	3.36	43	5.03	67		
1.09	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.09	19	2.21	22	2.33	26	2.51	33	3.22	43	4.72	67		
1.09	6	1.42	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.09	19	2.22	22	2.30	26	2.53	33	3.27	43	4.06	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.09	19	2.22	22	2.34	26	2.54	33	2.85	43	4.73	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.09	19	2.22	22	2.28	26	2.54	33	3.20	43	5.33	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.09	19	2.22	22	2.21	26	2.54	33	3.93	43	5.33	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.09	19	2.22	22	2.21	26	2.54	33	3.00	43	5.09	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.09	19	2.22	22	2.12	26	2.54	33	3.12	43	4.23	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.09	19	2.22	22	2.35	26	2.55	33	3.39	43	4.73	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.10	19	2.22	22	2.15	26	2.55	33	3.75	43	5.30	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.80	17	2.10	19	2.22	22	2.23	26	2.56	33	3.65	43	4.99	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.81	17	2.10	19	2.22	22	2.30	26	2.56	33	3.73	43	5.00	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.81	17	2.10	19	2.22	22	2.12	26	2.57	33	3.33	43	5.18	67		
1.09	6	1.43	10	1.50	13	1.66	15	1.81	17	2.10	19	2.22	22	2.31	26	2.58	33	3.52	43	4.56	67		
1.09	6	1.43	10	1.51	13	1.67	15	1.81	17	2.10	19	2.22	22	2.49	26	2.59	33	3.77	43	4.97	67		
1.09	6	1.43	10	1.51	13	1.67	15	1.81	17	2.10	19	2.22	22	2.44	26	2.60	33	3.04	43	4.90	67		
1.10	6	1.43	10	1.51	13	1.67	15	1.81	17	2.10	19	2.22	22	2.23	26	2.60	33	3.55	43	4.91	67		
1.10	6	1.43	10	1.51	13	1.67	15	1.81	17	2.10	19	2.22	22	2.64	26	2.61	33	3.33	43	5.10	67		
1.10	6	1.43	10	1.51	13	1.67	15	1.81	17	2.10	19	2.22	22	2									

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.12	6	1.46	10	1.52	13	1.68	15	1.82	17	2.19	19	2.26	22	2.63	26	2.92	33	3.40	43	5.03	68		
1.12	6	1.47	10	1.52	13	1.68	15	1.82	17	2.19	19	2.26	22	2.55	26	2.92	33	3.04	43	5.28	68		
1.12	6	1.47	10	1.52	13	1.68	15	1.82	17	2.19	19	2.26	22	2.36	26	2.92	33	3.65	43	5.36	68		
1.13	6	1.47	10	1.52	13	1.68	15	1.82	17	2.20	19	2.27	22	2.64	26	2.93	33	2.85	43	4.87	68		
1.13	6	1.47	10	1.52	13	1.68	15	1.82	17	2.20	19	2.27	22	2.57	26	2.93	33	3.41	43	5.78	68		
1.13	6	1.47	10	1.52	13	1.68	15	1.82	17	2.20	19	2.27	22	2.62	26	2.94	33	3.60	43	5.52	68		
1.13	6	1.47	10	1.52	13	1.68	15	1.82	17	2.20	19	2.27	22	2.33	26	2.96	33	3.45	43	4.92	68		
1.13	6	1.47	10	1.52	13	1.68	15	1.82	17	2.21	19	2.27	22	2.29	26	2.97	33	3.22	43	5.48	68		
1.13	6	1.47	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.21	19	2.27	22	2.63	26	2.98	33	3.83	43	5.31	68		
1.13	6	1.47	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.21	19	2.27	22	2.44	26	2.99	33	3.52	43	4.95	68		
1.13	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.22	19	2.27	22	2.53	26	3.00	33	2.81	43	5.30	68		
1.13	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.22	19	2.27	22	2.26	26	3.01	33	3.58	43	4.49	68		
1.13	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.23	19	2.27	22	2.41	26	3.05	33	2.90	43	5.65	68		
1.14	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.24	19	2.27	22	2.49	26	3.06	33	3.24	43	5.97	68		
1.14	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.29	19	2.28	22	2.40	26	3.07	33	3.33	43	4.76	68		
1.14	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.39	19	2.28	22	2.26	26	3.09	33	3.38	43	5.25	68		
1.14	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	1.92	19	2.28	22	2.46	26	3.11	33	3.68	43	4.43	69		
1.14	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	1.68	19	2.28	22	2.41	26	3.14	33	3.70	43	5.29	69		
1.15	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	1.89	19	2.28	22	2.14	26	3.14	33	3.67	43	4.47	69		
1.15	6	1.48	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.04	19	2.28	22	1.95	26	2.42	33	3.26	43	5.16	69		
1.15	6	1.49	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	1.97	19	2.28	22	2.40	26	2.92	33	2.75	43	5.50	69		
1.15	6	1.49	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.05	19	2.28	22	2.17	26	2.84	33	3.24	43	6.04	69		
1.15	6	1.49	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	1.83	19	2.28	22	2.39	26	2.61	33	3.63	43	5.35	69		
1.15	6	1.49	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.04	19	2.28	22	2.13	26	3.08	33	3.48	43	5.31	69		
1.15	6	1.49	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	1.93	19	2.28	22	1.95	26	3.12	33	3.74	43	5.16	69		
1.15	6	1.49	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	1.80	19	2.28	22	2.75	26	2.41	33	3.46	43	5.44	69		
1.15	6	1.50	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	1.61	19	2.29	22	2.50	26	2.92	33	3.41	43	5.11	69		
1.15	6	1.50	10	1.53	13	1.68	15	1.82	17	2.08	19	2.29	22	1.91	26	2.27	33	3.25	43	5.90	69		
1.15	6	1.50	10	1.53	13	1.68	15	1.83	17	2.11	19	2.29	22	2.34	26	2.98	33	2.78	43	4.95	69		
1.15	6	1.50	10	1.53	13	1.68	15	1.83	17	1.83	19	2.29	22	2.47	26	2.60	33	3.35	43	2.98	69		
1.15	6	1.50	10	1.53	13	1.68	15	1.83	17	1.89	19	2.29	22	2.48	26	3.19	33	3.89	43	4.93	69		
1.16	6	1.50	10	1.53	13	1.68	15	1.83	17	1.96	19	2.30	22	2.41	26	3.06	33	3.69	43	5.71	69		
1.16	6	1.50	10	1.53	13	1.68	15	1.83	17	1.81	19	2.30	22	2.39	26	2.87	33	3.83	43	5.23	69		
1.16	6	1.50	10	1.53	13	1.68	15	1.83	17	1.97	19	2.30	22	2.46	26	2.73	33	4.04	43	5.35	69		
1.16	6	1.51	10	1.53	13	1.69	15	1.83	17	2.09	19	2.31	22	2.57	26	2.76	33	3.90	43	5.46	69		
1.16	6	1.51	10	1.53	13	1.69	15	1.83	17	1.95	19	2.31	22	2.49	26	2.35	33	3.43	43	4.89	69		
1.17	6	1.51	10	1.53	13	1.69	15	1.83	17	1.82	19	2.31	22	2.22	26	2.47	33	3.28	43	3.35	69		
1.17	6	1.51	10	1.53	13	1.69	15	1.83	17	1.92	19	2.31	22	2.47	26	2.69	33	3.40	43	5.37	69		
1.17	6	1.52	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.46	19	2.32	22	2.29	26	2.69	33	3.93	43	5.58	69		
1.17	6	1.52	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.80	19	2.32	22	2.34	26	2.82	33	3.32	43	5.33	69		
1.17	6	1.52	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.77	19	2.33	22	2.53	26	3.01	33	3.76	43	4.87	69		
1.18	6	1.52	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.94	19	2.33	22	2.54	26	2.42	33	4.01	43	5.31	69		
1.18	6	1.53	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.88	19	2.33	22	2.43	26	2.28	33	3.37	43	4.27	69		
1.19	6	1.53	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.86	19	2.33	22	2.56	26	3.06	33	3.62	43	5.14	69		
1.19	6	1.54	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.75	19	2.33	22	2.59	26	2.87	33	3.11	43	5.23	69		
1.19	6	1.54	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.95	19	2.33	22	2.43	26	3.00	33	3.68	43	5.00	69		
1.19	6	1.54	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	2.13	19	2.33	22	2.26	26	2.60	33	3.57	43	5.10	69		
1.19	6	1.55	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.75	19	2.34	22	2.18	26	2.52	33	2.79	44	5.08	69		
1.19	6	1.56	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.88	19	2.34	22	2.56	26	2.91	33	3.00	44	5.02	69		
1.20	6	1.57	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	2.11	19	2.34	22	2.07	26	2.01	33	3.01	44	4.77	69		
1.21	6	1.57	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	2.19	19	2.34	22	2.25	26	2.67	33	3.03	44	5.11	69		
1.25	6	1.58	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	2.27	19	2.34	22	2.07	26	2.42	33	3.10	44	4.42	69		
1.27	6	1.42	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.97	19	2.34	22	2.64	26	2.82	33	3.20	44	4.56	70		
1.32	6	1.30	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.90	19	2.35	22	2.50	26	2.72	33	3.21	44	4.90	70		
1.33	6	1.34	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.77	19	2.36	22	2.12	26	2.43	33	3.22	44	5.55	70		
1.36	6	1.37	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	2.02	19	2.36	22	2.19	26	3.06	33	3.23	44	4.80	70		
1.09	6	1.29	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	2.04	19	2.36	22	1.95	26	2.59	33	3.28	44	4.96	70		
1.07	6	1.42	10	1.54	13	1.69	15	1.83	17	1.94	19	2.36	22	2.11	26	2.77	33	3.34	44	5.40	70		
1.12	6	1.33	10	1.54	13	1.69	15	1.84	17	1.91	19	2.36	22	2.12	26	2.53	33	3.45	44	5.30	70		
1.13	6	1.37	10	1.54	13	1.69	15	1.84	17	1.93	19	2.37	22	2.26	26	2.99	33	3.50	44	5.41	70		
1.26	6	1.39	10	1.54	13	1.69	15	1.84	17	1.87	19	2.38	22	2.48	26	3.11	33	3.50	44	5.50	70		
1.09	6	1.44	10	1.54	13	1.69	15	1.84	17	1.77	19	2.39	22	2.32	26	2.66	33	3.53	44	5.50	70		
1.04	6	1.38	10	1.54	13	1.69	15	1.84	17	2.00	19	2.39	22	2.07	26	2.76	33	3.62	44	3.74	70		
0.97	6	1.35	10	1.54	13	1.69	15	1.84	17	1.92	19	2.39	22	2.28	26	2.82	33	3.68	44	3.55	70		
1.15	6	1.36	10	1.54	13	1.69	15	1.84	17	2.04	19	2.39	22	2									

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.07	7	1.32	10	1.55	13	1.70	15	1.85	17	1.86	19	2.31	22	2.12	27	2.99	33	2.85	44	5.72	71		
1.07	7	1.28	10	1.55	13	1.70	15	1.85	17	1.99	19	2.18	22	2.13	27	2.82	33	3.51	44	3.79	71		
1.07	7	1.36	10	1.55	13	1.70	15	1.85	17	2.10	19	2.08	22	2.13	27	2.79	33	3.65	44	5.37	71		
1.07	7	1.35	10	1.55	13	1.70	15	1.85	17	1.67	19	2.05	22	2.15	27	2.47	33	3.58	44	5.51	71		
1.07	7	1.32	10	1.55	13	1.70	15	1.85	17	2.04	19	2.25	22	2.15	27	2.91	33	3.00	44	4.10	71		
1.07	7	1.30	10	1.55	13	1.70	15	1.85	17	2.04	19	2.25	22	2.15	27	2.85	33	3.09	44	5.81	72		
1.07	7	1.40	10	1.55	13	1.71	15	1.85	17	2.09	19	2.31	22	2.16	27	2.76	33	2.90	44	4.62	72		
1.07	7	1.40	10	1.55	13	1.71	15	1.85	17	1.95	19	2.25	22	2.16	27	2.87	33	3.43	44	5.05	72		
1.07	7	1.30	10	1.55	13	1.71	15	1.85	17	2.05	19	2.07	22	2.17	27	2.50	33	3.65	44	5.14	72		
1.07	7	1.38	10	1.55	13	1.71	15	1.85	17	1.94	19	2.36	22	2.19	27	2.46	33	3.62	44	5.69	72		
1.08	7	1.41	10	1.55	13	1.71	15	1.85	17	1.84	19	2.14	22	2.19	27	2.88	33	3.65	44	4.87	72		
1.08	7	1.46	10	1.55	13	1.71	15	1.85	17	1.95	19	2.06	22	2.20	27	2.66	33	2.91	44	5.67	72		
1.08	7	1.40	10	1.55	13	1.71	15	1.86	17	1.89	19	2.24	22	2.20	27	2.79	33	3.76	44	5.45	72		
1.08	7	1.32	10	1.55	13	1.71	15	1.86	17	1.89	19	2.02	22	2.21	27	3.02	33	3.55	44	5.33	72		
1.08	7	1.32	10	1.55	13	1.71	15	1.86	17	1.94	19	2.33	22	2.21	27	2.38	33	3.40	44	5.73	72		
1.08	7	1.42	10	1.55	13	1.71	15	1.86	17	2.13	19	2.01	22	2.21	27	3.06	33	3.09	44	4.95	72		
1.08	7	1.39	10	1.55	13	1.71	15	1.86	17	1.87	19	2.20	22	2.22	27	2.72	33	3.60	44	5.44	72		
1.08	7	1.54	10	1.55	13	1.71	15	1.86	17	2.18	19	2.04	22	2.23	27	2.46	33	4.00	44	5.20	72		
1.08	7	1.37	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.99	19	2.21	22	2.24	27	2.39	33	3.55	44	5.60	72		
1.08	7	1.34	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.81	19	2.13	22	2.24	27	2.85	33	3.45	44	5.27	72		
1.08	7	1.34	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.93	19	2.36	22	2.24	27	2.83	33	3.30	44	5.49	72		
1.08	7	1.38	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.02	19	2.19	22	2.24	27	3.02	33	3.41	44	5.79	72		
1.08	7	1.44	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.93	19	2.14	22	2.25	27	2.88	33	2.37	44	5.80	72		
1.08	7	1.39	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.99	19	2.15	22	2.25	27	3.33	33	3.49	44	6.05	72		
1.08	7	1.31	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.91	19	2.15	22	2.26	27	3.05	33	2.80	44	5.10	72		
1.09	7	1.44	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.22	19	2.28	22	2.26	27	2.63	33	3.30	44	6.16	72		
1.09	7	1.42	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.01	19	2.17	22	2.26	27	2.57	33	3.22	44	5.06	72		
1.09	7	1.39	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.84	19	2.21	22	2.27	27	3.13	33	3.73	44	5.69	72		
1.09	7	1.34	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.97	19	2.01	22	2.27	27	2.83	33	3.51	44	4.48	72		
1.09	7	1.42	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.08	19	2.03	22	2.27	27	2.91	33	3.47	44	4.69	72		
1.09	7	1.40	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.83	19	1.83	22	2.28	27	2.96	33	3.23	44	5.79	72		
1.09	7	1.38	10	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.08	19	2.20	22	2.28	27	2.91	33	3.43	44	4.85	72		
1.09	7	1.10	11	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.08	19	2.10	22	2.28	27	2.96	33	3.12	44	5.24	72		
1.09	7	1.16	11	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.11	19	2.11	22	2.28	27	3.17	33	3.58	44	4.53	72		
1.09	7	1.17	11	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.03	19	2.01	22	2.28	27	2.96	33	3.80	44	5.30	72		
1.09	7	1.19	11	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.95	19	2.01	22	2.28	27	3.03	33	3.63	44	5.99	72		
1.09	7	1.19	11	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.96	19	2.24	22	2.29	27	2.65	33	3.67	44	6.19	72		
1.10	7	1.19	11	1.56	13	1.71	15	1.86	17	2.02	19	1.94	22	2.29	27	2.21	33	3.29	44	3.78	72		
1.10	7	1.21	11	1.56	13	1.71	15	1.86	17	1.92	19	2.11	22	2.29	27	2.50	33	3.83	44	5.90	73		
1.10	7	1.22	11	1.56	13	1.72	15	1.86	17	2.02	19	2.32	22	2.29	27	2.98	33	3.82	44	6.20	73		
1.10	7	1.22	11	1.56	13	1.72	15	1.86	17	2.07	19	1.75	22	2.29	27	2.59	33	3.26	44	3.82	73		
1.10	7	1.23	11	1.56	13	1.72	15	1.86	17	1.99	19	2.22	22	2.29	27	2.66	33	3.60	44	5.54	73		
1.10	7	1.23	11	1.56	13	1.72	15	1.86	17	2.24	19	2.01	22	2.29	27	2.60	33	3.68	44	5.59	73		
1.10	7	1.23	11	1.56	13	1.72	15	1.86	17	2.00	19	2.21	22	2.29	27	2.40	33	3.77	44	5.74	73		
1.10	7	1.23	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.99	19	2.13	22	2.29	27	2.36	33	3.76	44	4.17	73		
1.10	7	1.23	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.90	19	2.10	22	2.30	27	2.13	33	3.54	44	5.93	73		
1.10	7	1.24	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.93	19	2.04	22	2.30	27	2.93	33	3.54	44	5.75	73		
1.10	7	1.24	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.85	19	2.11	22	2.31	27	2.48	33	2.69	44	4.70	73		
1.10	7	1.25	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.99	19	2.13	22	2.31	27	3.03	33	3.24	44	6.36	73		
1.10	7	1.25	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.98	19	2.20	22	2.32	27	2.83	33	3.36	44	5.35	73		
1.11	7	1.25	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	2.04	19	2.18	22	2.32	27	2.73	33	3.29	44	5.00	73		
1.11	7	1.25	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.98	19	1.76	22	2.32	27	2.88	33	3.69	44	4.27	73		
1.11	7	1.25	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.78	19	1.99	22	2.32	27	2.99	33	3.17	44	5.30	73		
1.11	7	1.25	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.66	19	2.09	22	2.33	27	3.15	33	3.08	44	5.44	73		
1.11	7	1.26	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	2.13	19	1.94	22	2.33	27	3.07	33	3.25	44	5.38	73		
1.11	7	1.26	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.80	19	2.02	22	2.33	27	2.80	33	3.19	44	6.23	73		
1.11	7	1.26	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.86	19	2.06	22	2.34	27	2.95	33	3.70	44	5.20	73		
1.11	7	1.26	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	2.05	19	1.85	22	2.34	27	2.56	33	3.52	44	4.58	73		
1.11	7	1.26	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.93	19	2.01	22	2.35	27	2.85	33	3.56	44	5.17	73		
1.11	7	1.27	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.83	19	2.07	22	2.35	27	2.98	33	3.50	44	6.08	73		
1.11	7	1.27	11	1.56	13	1.72	15	1.87	17	1.82	19	2.15	22	2.35	27	2.99	33	2.68	44	5.27	73		
1.11	7	1.27	11	1.57	13	1.72	15	1.87	17	1.98	19	2.29	22	2.35	27	3.03	33	3.82	44	5.34	73		
1.11	7	1.27	11	1.57	13	1.72	15	1.87	17	2.06	19	2.15	22	2.35	27	2.89	33	3.86	44	5.77	73		
1.11	7	1.28	11	1.57	13	1.72	15	1.87	17	1.76	19	2.20	22	2.35	27	3.07	33	3.32	44	5.70	73		
1.11	7	1.28	11	1.57	13	1.72	15	1.87	17	2.24	19	2.04	22	2									

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.75	20	2.18	22	2.44	27	2.69	34	3.53	45	6.25	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.75	20	2.06	22	2.44	27	2.70	34	3.57	45	5.51	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.75	20	1.89	22	2.44	27	2.70	34	3.58	45	5.54	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.76	20	2.34	22	2.44	27	2.70	34	3.59	45	5.94	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.77	20	2.32	22	2.44	27	2.70	34	3.64	45	5.94	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.78	20	2.19	22	2.45	27	2.72	34	3.66	45	4.95	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.78	20	2.25	22	2.45	27	2.72	34	3.68	45	4.14	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.78	20	2.02	22	2.45	27	2.73	34	3.71	45	4.66	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.78	20	2.17	22	2.45	27	2.74	34	3.72	45	5.83	75		
1.13	7	1.33	11	1.58	13	1.73	15	1.89	17	1.79	20	2.30	22	2.45	27	2.75	34	3.75	45	5.51	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.73	15	1.90	17	1.79	20	2.20	22	2.45	27	2.75	34	3.75	45	5.82	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.79	20	2.09	22	2.46	27	2.76	34	3.76	45	5.21	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.80	20	2.37	22	2.46	27	2.77	34	3.32	45	5.33	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.80	20	2.03	22	2.46	27	2.77	34	3.78	45	5.42	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.80	20	1.98	22	2.47	27	2.77	34	3.68	45	5.03	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.80	20	2.10	22	2.47	27	2.79	34	3.12	45	5.33	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.80	20	2.15	22	2.47	27	2.80	34	3.46	45	4.79	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.80	20	1.99	22	2.48	27	2.81	34	3.74	45	5.39	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.81	20	2.29	22	2.48	27	2.84	34	3.76	45	6.23	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.81	20	1.97	22	2.48	27	2.84	34	3.31	45	3.55	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.82	20	2.06	22	2.48	27	2.84	34	3.37	45	5.26	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.82	20	2.26	22	2.48	27	2.87	34	3.69	45	6.08	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.82	20	2.04	22	2.49	27	2.88	34	2.84	45	6.08	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.82	20	2.33	22	2.49	27	2.89	34	3.56	45	6.47	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.82	20	2.23	22	2.49	27	2.97	34	3.73	45	5.15	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.82	20	2.12	22	2.49	27	2.97	34	2.64	45	5.69	75		
1.14	7	1.34	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.83	20	2.23	22	2.49	27	2.98	34	3.37	45	5.04	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.83	20	2.16	22	2.50	27	2.98	34	3.84	45	6.00	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.83	20	2.12	22	2.50	27	2.99	34	3.95	45	5.00	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.83	20	2.32	22	2.50	27	2.99	34	3.65	45	6.00	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.83	20	2.13	22	2.51	27	2.99	34	3.33	45	4.24	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.83	20	2.11	22	2.52	27	3.01	34	3.81	45	4.38	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.83	20	2.16	22	2.52	27	3.04	34	3.57	45	5.44	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.84	20	1.84	22	2.53	27	3.04	34	3.31	45	5.65	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.84	20	2.12	22	2.53	27	3.07	34	3.79	45	6.06	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.84	20	2.11	22	2.53	27	3.08	34	3.67	45	5.33	76		
1.14	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.84	20	1.63	23	2.53	27	3.10	34	3.66	45	4.97	76		
1.15	7	1.35	11	1.58	13	1.74	15	1.90	17	1.84	20	1.68	23	2.53	27	3.20	34	3.98	45	6.42	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.74	15	1.90	17	1.84	20	1.70	23	2.53	27	3.22	34	3.91	45	5.56	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.74	15	1.90	17	1.85	20	1.70	23	2.54	27	3.24	34	3.47	45	6.10	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.74	15	1.90	17	1.85	20	1.74	23	2.54	27	3.16	34	3.03	45	5.92	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.74	15	1.90	17	1.85	20	1.77	23	2.54	27	2.86	34	3.43	45	5.96	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.74	15	1.90	17	1.85	20	1.77	23	2.54	27	2.63	34	3.07	45	6.46	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.75	15	1.90	17	1.85	20	1.80	23	2.54	27	2.74	34	3.09	45	5.38	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.85	20	1.81	23	2.55	27	3.07	34	4.03	45	5.58	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.85	20	1.81	23	2.55	27	3.25	34	3.51	45	5.87	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.85	20	1.83	23	2.55	27	2.79	34	3.86	45	5.42	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.85	20	1.83	23	2.55	27	2.50	34	3.56	45	6.06	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.85	20	1.84	23	2.55	27	2.97	34	3.65	45	4.77	76		
1.15	7	1.35	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.84	23	2.55	27	2.82	34	3.63	45	6.19	76		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.86	23	2.55	27	2.72	34	3.08	45	5.10	76		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.86	23	2.55	27	3.23	34	3.15	45	5.66	76		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.86	23	2.55	27	3.19	34	3.10	45	5.90	76		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.88	23	2.55	27	3.04	34	3.92	45	5.74	76		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.88	23	2.56	27	2.70	34	4.05	45	6.04	76		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.91	23	2.56	27	3.26	34	3.47	45	5.44	76		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.92	23	2.56	27	3.05	34	3.54	45	5.65	77		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.93	23	2.56	27	1.89	34	3.68	45	5.46	77		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.93	23	2.56	27	2.75	34	2.97	45	6.16	77		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.94	23	2.57	27	2.35	34	3.26	45	3.45	77		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.95	23	2.57	27	2.95	34	3.79	45	6.18	77		
1.15	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.95	23	2.58	27	2.57	34	3.54	45	4.82	77		
1.16	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.86	20	1.95	23	2.58	27	3.05	34	3.30	45	3.86	77		
1.16	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.87	20	1.96	23	2.58	27	2.89	34	3.79	45	6.71	77		
1.16	7	1.36	11	1.59	13	1.75	15	1.91	17	1.87	20	1.96	23	2									

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.17	7	1.38	11	1.60	13	1.76	15	1.93	17	1.90	20	2.05	23	2.78	27	2.50	34	3.40	45	5.61	78
1.17	7	1.38	11	1.60	13	1.76	15	1.93	17	1.90	20	2.05	23	2.78	27	2.44	34	3.34	45	5.75	78
1.17	7	1.38	11	1.60	13	1.76	15	1.94	17	1.90	20	2.05	23	2.79	27	2.12	34	3.46	45	4.66	78
1.17	7	1.38	11	1.60	13	1.76	15	1.94	17	1.90	20	2.05	23	2.82	27	2.78	34	3.74	45	5.93	78
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.76	15	1.94	17	1.91	20	2.05	23	2.87	27	2.86	34	3.91	45	5.72	78
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.76	15	1.94	17	1.91	20	2.05	23	2.87	27	3.01	34	3.64	45	5.63	78
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.06	23	2.88	27	2.56	34	3.63	45	5.53	78
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.06	23	2.45	27	2.88	34	2.73	46	5.00	78
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.06	23	2.32	27	3.08	34	2.96	46	4.09	78
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.06	23	2.26	27	2.85	34	2.98	46	5.31	78
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.06	23	2.29	27	3.09	34	3.07	46	6.25	79
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.06	23	2.62	27	2.79	34	3.10	46	5.64	79
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.06	23	2.31	27	2.87	34	3.15	46	6.11	79
1.18	7	1.38	11	1.60	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.06	23	2.57	27	3.07	34	3.23	46	6.55	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.07	23	2.46	27	2.88	34	3.25	46	5.86	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.94	17	1.91	20	2.07	23	2.58	27	2.36	34	3.32	46	5.80	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.91	20	2.07	23	2.49	27	3.15	34	3.45	46	3.44	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.91	20	2.07	23	2.39	27	2.72	34	3.51	46	5.67	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.07	23	2.50	27	2.45	34	3.56	46	6.37	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.07	23	2.43	27	2.76	34	3.74	46	6.36	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.07	23	2.55	27	2.53	34	3.82	46	5.52	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.07	23	2.31	27	2.96	34	3.67	46	5.93	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.07	23	2.60	27	1.95	34	3.87	46	5.56	79
1.18	7	1.38	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.08	23	2.38	27	3.01	34	3.96	46	5.92	79
1.18	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.08	23	2.45	27	2.84	34	4.20	46	6.00	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.08	23	2.51	27	2.70	34	3.93	46	2.95	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.08	23	2.27	27	3.14	34	3.88	46	5.97	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.08	23	2.34	27	2.93	34	3.57	46	5.33	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.08	23	2.12	27	2.69	34	4.07	46	6.31	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.09	23	2.37	27	2.63	34	3.15	46	6.50	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.09	23	2.55	27	3.21	34	4.00	46	5.36	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.09	23	2.16	27	2.96	34	3.62	46	6.11	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.77	15	1.95	17	1.92	20	2.09	23	1.91	27	2.96	34	3.70	46	4.74	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.78	15	1.95	17	1.92	20	2.09	23	2.23	27	2.83	34	3.99	46	6.00	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.78	15	1.95	17	1.93	20	2.09	23	2.25	27	3.03	34	3.83	46	5.03	79
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.09	23	2.15	27	2.91	34	3.89	46	5.32	80
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.09	23	2.64	27	2.70	34	3.88	46	5.70	80
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.09	23	2.43	27	3.11	34	3.86	46	5.99	80
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	2.45	27	2.72	34	4.06	46	5.30	80
1.19	7	1.39	11	1.61	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	2.36	27	3.32	34	3.64	46	4.71	80
1.19	7	1.39	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	2.35	27	2.86	34	3.73	46	5.27	80
1.19	7	1.39	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	2.06	27	2.91	34	3.49	46	3.87	80
1.19	7	1.39	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	2.11	27	2.35	34	3.08	46	6.33	80
1.20	7	1.39	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	2.80	27	2.64	34	3.78	46	6.15	80
1.20	7	1.39	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	1.99	27	3.11	34	4.20	46	5.93	80
1.20	7	1.39	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	2.30	27	3.12	34	3.57	46	5.98	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.10	23	2.37	27	3.27	34	3.46	46	6.63	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.93	20	2.11	23	2.46	27	2.98	34	3.62	46	2.94	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.94	20	2.11	23	2.62	27	3.07	34	3.62	46	5.30	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.94	20	2.11	23	2.50	27	3.15	34	3.76	46	6.63	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.94	20	2.11	23	2.48	27	3.14	34	3.51	46	5.82	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.94	20	2.12	23	2.33	27	2.94	34	3.54	46	6.38	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.94	20	2.12	23	2.47	27	2.80	34	3.14	46	6.29	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.94	20	2.12	23	2.30	27	2.83	34	3.27	46	6.11	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.78	15	1.96	17	1.94	20	2.12	23	2.32	27	2.86	34	3.60	46	6.27	80
1.20	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.94	20	2.12	23	2.13	27	2.91	34	3.89	46	3.43	80
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.94	20	2.12	23	2.20	27	2.43	34	3.87	46	6.69	80
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.94	20	2.12	23	2.48	27	3.15	34	3.79	46	5.72	80
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.94	20	2.12	23	2.32	27	3.02	34	3.40	46	5.81	80
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.94	20	2.12	23	2.31	27	3.08	34	3.87	46	6.19	80
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.94	20	2.12	23	2.42	27	2.59	34	2.81	46	5.44	80
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.94	20	2.12	23	2.50	27	2.48	34	2.60	46	6.03	80
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.94	20	2.12	23	2.52	27	2.71	34	3.29	46	6.53	80
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.95	20	2.12	23	2.44	27	2.48	34	3.66	46		
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.95	20	2.13	23	2.45	27	2.91	34	3.82	46		
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.95	20	2.13	23	1.80	27	2.81	34	3.76	46		
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.97	17	1.95	20	2.13	23	2.03	27	2.91	34	3.83	46		
1.21	7	1.40	11	1.62	13	1.79	15	1.98	17	1.95	20	2.13	23	2.37	27	2.5					

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.24	7	1.41	11	1.63	13	1.80	15	2.08	17	1.96	20	2.16	23	2.55	27	2.39	35	3.64	46				
1.24	7	1.41	11	1.63	13	1.80	15	2.09	17	1.96	20	2.16	23	2.12	27	2.40	35	4.10	46				
1.24	7	1.41	11	1.63	13	1.80	15	2.14	17	1.97	20	2.16	23	2.50	27	2.41	35	3.61	46				
1.25	7	1.41	11	1.63	13	1.81	15	2.26	17	1.97	20	2.17	23	2.41	27	2.41	35	3.42	46				
1.26	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	2.30	17	1.97	20	2.17	23	2.35	27	2.43	35	3.19	46				
1.26	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.82	17	1.97	20	2.17	23	2.34	27	2.43	35	3.73	46				
1.27	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.86	17	1.97	20	2.17	23	2.46	27	2.43	35	3.53	46				
1.27	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.87	17	1.97	20	2.17	23	2.23	27	2.46	35	4.03	46				
1.28	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.86	17	1.97	20	2.17	23	2.52	27	2.49	35	3.83	46				
1.28	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.94	17	1.97	20	2.18	23	2.18	27	2.54	35	4.10	46				
1.28	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.80	17	1.97	20	2.18	23	2.49	27	2.56	35	3.57	46				
1.28	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.95	17	1.97	20	2.18	23	2.32	27	2.57	35	3.62	46				
1.29	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.82	17	1.97	20	2.18	23	2.59	27	2.58	35	3.54	46				
1.29	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.81	17	1.97	20	2.18	23	2.47	27	2.58	35	3.58	46				
1.31	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.57	17	1.97	20	2.18	23	2.55	27	2.60	35	3.29	46				
1.32	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.69	17	1.97	20	2.18	23	2.50	27	2.61	35	3.63	46				
1.32	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.86	17	1.97	20	2.18	23	2.69	27	2.62	35	3.48	46				
1.44	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	2.12	17	1.97	20	2.18	23	2.61	27	2.64	35	3.59	46				
1.06	7	1.41	11	1.64	13	1.81	15	1.77	17	1.97	20	2.19	23	2.56	27	2.66	35	3.47	46				
1.18	7	1.41	11	1.64	13	1.82	15	1.76	17	1.97	20	2.19	23	2.42	27	2.66	35	3.88	46				
1.21	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.89	17	1.97	20	2.19	23	2.50	27	2.66	35	3.75	46				
1.21	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.70	17	1.97	20	2.19	23	2.67	27	2.66	35	2.78	46				
1.26	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.83	17	1.97	20	2.19	23	2.53	27	2.67	35	3.60	46				
1.14	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.78	17	1.97	20	2.19	23	2.79	27	2.68	35	3.94	46				
1.18	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.91	17	1.98	20	2.19	23	2.62	27	2.69	35	4.13	46				
1.15	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.78	17	1.98	20	2.19	23	2.45	27	2.70	35	3.57	46				
1.16	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.91	17	1.98	20	2.19	23	2.61	27	2.70	35	4.07	46				
1.15	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.75	17	1.98	20	2.19	23	2.33	27	2.70	35	3.92	46				
1.15	7	1.42	11	1.64	13	1.82	15	1.98	17	1.98	20	2.19	23	2.19	27	2.70	35	3.47	46				
1.21	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.82	17	1.98	20	2.19	23	2.45	27	2.73	35	3.54	46				
1.13	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.84	17	1.98	20	2.20	23	2.20	27	2.75	35	3.89	46				
1.17	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.69	17	1.98	20	2.20	23	2.71	27	2.76	35	2.88	47				
1.09	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.73	17	1.98	20	2.20	23	2.28	27	2.76	35	3.10	47				
1.24	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.79	17	1.98	20	2.20	23	2.35	27	2.78	35	3.10	47				
1.19	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.73	17	1.98	20	2.20	23	2.35	27	2.78	35	3.12	47				
1.22	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.68	17	1.98	20	2.20	23	2.44	27	2.79	35	3.18	47				
1.02	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.65	17	1.98	20	2.20	23	2.58	27	2.79	35	3.28	47				
1.09	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.97	17	1.98	20	2.20	23	2.12	27	2.79	35	3.42	47				
1.17	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.86	17	1.98	20	2.20	23	2.15	27	2.79	35	3.48	47				
1.22	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.90	17	1.98	20	2.20	23	2.39	27	2.80	35	3.55	47				
1.12	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.72	17	1.98	20	2.20	23	2.29	27	2.82	35	3.55	47				
1.08	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.92	17	1.99	20	2.20	23	2.44	27	2.87	35	3.56	47				
1.19	7	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.77	17	1.99	20	2.20	23	2.78	27	2.87	35	3.59	47				
0.98	8	1.42	11	1.65	13	1.83	15	1.74	17	1.99	20	2.21	23	2.21	27	2.88	35	3.71	47				
0.99	8	1.42	11	1.66	13	1.83	15	1.79	17	1.99	20	2.21	23	2.73	27	2.89	35	3.77	47				
1.04	8	1.42	11	1.66	13	1.83	15	1.72	17	1.99	20	2.21	23	2.15	27	2.91	35	3.91	47				
1.06	8	1.42	11	1.66	13	1.83	15	1.87	17	1.99	20	2.21	23	2.47	27	2.91	35	4.03	47				
1.06	8	1.42	11	1.66	13	1.83	15	1.84	17	1.99	20	2.21	23	2.08	27	2.92	35	3.81	47				
1.07	8	1.42	11	1.66	13	1.83	15	1.86	17	1.99	20	2.21	23	2.34	27	2.92	35	3.97	47				
1.07	8	1.42	11	1.66	13	1.83	15	1.69	17	1.99	20	2.21	23	2.59	27	2.93	35	4.10	47				
1.08	8	1.42	11	1.66	13	1.84	15	1.90	17	1.99	20	2.21	23	2.56	27	2.93	35	4.20	47				
1.08	8	1.42	11	1.66	13	1.84	15	1.83	17	1.99	20	2.21	23	2.53	27	2.94	35	3.81	47				
1.08	8	1.42	11	1.66	13	1.84	15	2.00	17	1.99	20	2.21	23	2.56	27	2.96	35	3.62	47				
1.08	8	1.42	11	1.66	13	1.84	15	1.79	17	1.99	20	2.21	23	2.53	27	2.96	35	3.54	47				
1.08	8	1.42	11	1.66	13	1.84	15	1.67	17	1.99	20	2.21	23	2.47	27	2.98	35	3.95	47				
1.09	8	1.42	11	1.66	13	1.84	15	1.82	17	1.99	20	2.21	23	2.69	27	3.00	35	3.69	47				
1.09	8	1.42	11	1.66	13	1.84	15	1.81	17	2.00	20	2.21	23	2.32	27	3.00	35	3.89	47				
1.09	8	1.42	11	1.66	13	1.84	15	1.49	17	2.00	20	2.22	23	2.55	27	3.02	35	4.16	47				
1.10	8	1.43	11	1.66	13	1.84	15	1.71	17	2.00	20	2.22	23	2.42	27	3.03	35	4.15	47				
1.10	8	1.43	11	1.66	13	1.84	15	1.89	17	2.00	20	2.22	23	2.86	27	3.05	35	2.78	47				
1.11	8	1.43	11	1.66	13	1.84	15	1.77	17	2.00	20	2.22	23	2.38	27	3.06	35	3.42	47				
1.11	8	1.43	11	1.67	13	1.84	15	2.01	17	2.00	20	2.22	23	2.55	27	3.07	35	4.00	47				
1.11	8	1.43	11	1.67	13	1.84	15	1.85	17	2.00	20	2.22	23	2.72	27	3.09	35	3.59	47				
1.11	8	1.43	11	1.67	13	1.85	15	1.88	17	2.00	20	2.22	23	2.48	27	3.11	35	3.67	47				
1.11	8	1.43	11	1.67	13	1.85	15	1.82	17	2.00	20	2.22	23	2.37	27	3.14	35	4.10	47				
1.12	8	1.43	11	1.67	13	1.85	15	1.83	17	2.00	20	2.22	23	2.34	27	3.18	35	3.37	47				
1.12	8	1.43	11	1.67	13	1.85	15	1.90	17	2.01	20	2.23	23	2.54	27	3.21	35	2.98	47				
1.12	8	1.43	11	1.67	13	1.85	15	1.85	17	2.01</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.15	8	1.44	11	1.70	13	1.91	15	1.74	17	2.02	20	2.26	23	2.25	28	3.11	35	3.65	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.91	15	1.98	17	2.02	20	2.26	23	2.26	28	3.03	35	3.36	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.92	15	1.92	17	2.02	20	2.26	23	2.26	28	2.90	35	3.24	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.92	15	1.95	17	2.02	20	2.26	23	2.26	28	3.18	35	3.97	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.92	15	1.75	17	2.02	20	2.26	23	2.26	28	3.19	35	3.69	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.92	15	2.21	17	2.02	20	2.26	23	2.26	28	3.29	35	3.82	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.93	15	1.79	17	2.02	20	2.26	23	2.27	28	3.14	35	3.80	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.94	15	1.61	17	2.02	20	2.26	23	2.27	28	3.08	35	3.43	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.96	15	1.85	17	2.03	20	2.27	23	2.30	28	2.79	35	3.20	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.97	15	1.76	17	2.03	20	2.27	23	2.30	28	3.10	35	3.73	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.98	15	1.76	17	2.03	20	2.27	23	2.31	28	2.91	35	4.23	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	2.00	15	1.82	17	2.03	20	2.27	23	2.31	28	2.44	35	4.14	47				
1.15	8	1.44	11	1.71	13	1.64	15	1.77	17	2.03	20	2.27	23	2.32	28	3.33	35	4.18	47				
1.15	8	1.44	11	1.72	13	1.66	15	1.49	17	2.03	20	2.27	23	2.32	28	2.75	35	3.29	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.70	15	1.52	17	2.03	20	2.28	23	2.32	28	3.19	35	4.25	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.79	15	1.71	17	2.03	20	2.28	23	2.33	28	2.98	35	3.91	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.45	15	1.63	17	2.03	20	2.28	23	2.33	28	2.58	35	3.92	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.52	15	2.03	17	2.03	20	2.28	23	2.34	28	3.19	35	3.85	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.44	15	1.82	17	2.03	20	2.28	23	2.34	28	3.03	35	3.97	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.69	15	1.58	17	2.03	20	2.28	23	2.34	28	3.11	35	3.61	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.83	15	2.07	17	2.03	20	2.28	23	2.34	28	2.93	35	3.16	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.51	15	1.63	17	2.03	20	2.28	23	2.35	28	3.05	35	3.03	47				
1.16	8	1.44	11	1.72	13	1.69	15	1.87	17	2.03	20	2.28	23	2.35	28	2.70	35	3.39	47				
1.16	8	1.44	11	1.73	13	1.81	15	2.18	17	2.03	20	2.28	23	2.35	28	2.53	35	3.76	47				
1.16	8	1.44	11	1.73	13	1.78	15	1.82	17	2.03	20	2.28	23	2.36	28	2.89	35	3.63	47				
1.16	8	1.44	11	1.73	13	1.70	15	1.88	17	2.03	20	2.28	23	2.36	28	2.51	35	3.59	47				
1.16	8	1.44	11	1.73	13	1.60	15	1.47	17	2.03	20	2.28	23	2.36	28	2.62	35	3.89	47				
1.16	8	1.44	11	1.73	13	1.64	15	1.63	17	2.03	20	2.29	23	2.36	28	2.49	35	3.99	47				
1.16	8	1.44	11	1.73	13	1.66	15	1.81	17	2.03	20	2.29	23	2.36	28	2.76	35	3.88	47				
1.16	8	1.44	11	1.73	13	1.77	15	1.79	17	2.03	20	2.29	23	2.37	28	2.68	35	3.84	47				
1.16	8	1.44	11	1.74	13	1.76	15	1.92	17	2.03	20	2.29	23	2.37	28	3.48	35	3.13	47				
1.17	8	1.44	11	1.74	13	1.82	15	1.82	17	2.04	20	2.30	23	2.37	28	3.12	35	3.98	47				
1.17	8	1.44	11	1.75	13	1.78	15	1.88	17	2.04	20	2.30	23	2.37	28	2.55	35	3.93	47				
1.17	8	1.45	11	1.75	13	1.55	15	2.01	17	2.04	20	2.30	23	2.38	28	2.97	35	3.25	47				
1.17	8	1.45	11	1.75	13	1.68	15	1.88	17	2.04	20	2.30	23	2.38	28	2.81	35	3.69	47				
1.17	8	1.45	11	1.76	13	1.56	15	1.99	17	2.04	20	2.30	23	2.38	28	3.22	35	2.90	48				
1.17	8	1.45	11	1.76	13	1.84	15	1.87	17	2.04	20	2.30	23	2.38	28	2.40	35	3.11	48				
1.17	8	1.45	11	1.76	13	1.77	15	1.82	17	2.04	20	2.31	23	2.38	28	2.95	35	3.23	48				
1.17	8	1.45	11	1.73	13	1.89	15	1.78	17	2.04	20	2.31	23	2.38	28	3.21	35	3.45	48				
1.17	8	1.45	11	1.58	13	1.76	15	1.63	17	2.04	20	2.31	23	2.39	28	2.36	35	3.46	48				
1.17	8	1.45	11	1.45	13	2.01	15	1.89	17	2.04	20	2.32	23	2.39	28	3.19	35	3.47	48				
1.17	8	1.45	11	1.58	13	1.83	15	1.69	17	2.04	20	2.32	23	2.39	28	2.50	35	3.52	48				
1.17	8	1.45	11	1.39	13	1.93	15	1.95	17	2.04	20	2.32	23	2.39	28	2.93	35	3.61	48				
1.17	8	1.45	11	1.48	13	1.80	15	1.76	17	2.04	20	2.32	23	2.40	28	2.90	35	3.63	48				
1.17	8	1.45	11	1.50	13	1.79	15	1.40	18	2.05	20	2.32	23	2.41	28	2.88	35	3.65	48				
1.17	8	1.45	11	1.60	13	1.86	15	1.42	18	2.05	20	2.32	23	2.41	28	2.55	35	3.75	48				
1.17	8	1.45	11	1.49	13	1.85	15	1.46	18	2.05	20	2.32	23	2.41	28	3.08	35	3.75	48				
1.17	8	1.45	11	1.68	13	1.67	15	1.47	18	2.05	20	2.32	23	2.41	28	3.03	35	3.83	48				
1.18	8	1.45	11	1.55	13	1.70	15	1.48	18	2.05	20	2.32	23	2.42	28	3.40	35	3.94	48				
1.18	8	1.45	11	1.50	13	1.57	15	1.51	18	2.05	20	2.32	23	2.42	28	2.48	35	4.00	48				
1.18	8	1.45	11	1.61	13	1.73	15	1.51	18	2.05	20	2.32	23	2.42	28	3.10	35	4.04	48				
1.18	8	1.45	11	1.49	13	1.59	15	1.51	18	2.05	20	2.32	23	2.43	28	3.33	35	4.08	48				
1.18	8	1.45	11	1.37	13	1.64	15	1.55	18	2.05	20	2.32	23	2.43	28	2.91	35	3.88	48				
1.18	8	1.45	11	1.62	13	1.73	15	1.56	18	2.05	20	2.32	23	2.44	28	3.08	35	3.91	48				
1.18	8	1.45	11	1.58	13	1.71	15	1.56	18	2.05	20	2.32	23	2.44	28	3.14	35	4.48	48				
1.18	8	1.45	11	1.65	13	1.85	15	1.56	18	2.05	20	2.32	23	2.44	28	3.15	35	4.34	48				
1.18	8	1.45	11	1.57	13	1.75	15	1.57	18	2.05	20	2.33	23	2.44	28	3.10	35	3.99	48				
1.18	8	1.45	11	1.63	13	1.75	15	1.58	18	2.05	20	2.33	23	2.44	28	3.17	35	4.13	48				
1.18	8	1.45	11	1.65	13	1.94	15	1.58	18	2.05	20	2.33	23	2.44	28	3.07	35	4.20	48				
1.18	8	1.46	11	1.65	13	1.74	15	1.60	18	2.05	20	2.33	23	2.45	28	2.72	35	3.45	48				
1.18	8	1.46	11	1.58	13	1.72	15	1.60	18	2.05	20	2.33	23	2.45	28	2.61	35	3.99	48				
1.18	8	1.46	11	1.72	13	1.67	15	1.60	18	2.05	20	2.33	23	2.45	28	2.75	35	3.38	48				
1.18	8	1.46	11	1.60	13	1.78	15	1.61	18	2.05	20	2.33	23	2.45	28	3.01	35	3.02	48				
1.18	8	1.46	11	1.67	13	1.71	15	1.61	18	2.05	20	2.33	23	2.46	28	3.28	35	3.77	48				
1.18	8	1.46	11	1.59	13	1.65	15	1.61	18	2.05	20	2.34	23	2.46	28	3.39	35	3.31	48				
1.18	8	1.46	11	1.53	13	1.61	15	1.62	18	2.05	20	2.34	23	2.46	28	2.99	35	3.82	48				
1.19	8	1.46	11	1.62	13	1.60	15	1.62	18	2.05	20	2.34	23	2.47	28	3.27	35	4.02	48				
1.19	8	1.46	11	1.65	13	1.53	15	1.62	18	2.05</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.20	8	1.47	11	1.65	13	1.78	15	1.70	18	2.07	20	2.43	23	2.57	28	3.47	35	3.33	48				
1.20	8	1.47	11	1.63	13	1.50	15	1.71	18	2.07	20	2.44	23	2.57	28	3.02	35	3.75	48				
1.20	8	1.47	11	1.58	13	1.65	15	1.71	18	2.07	20	2.45	23	2.57	28	3.14	35	3.47	48				
1.20	8	1.47	11	1.53	13	1.79	15	1.71	18	2.07	20	2.46	23	2.58	28	2.55	35	3.69	48				
1.20	8	1.47	11	1.69	13	1.85	15	1.71	18	2.07	20	2.46	23	2.58	28	2.88	35	3.26	48				
1.20	8	1.47	11	1.52	13	1.89	15	1.71	18	2.07	20	2.47	23	2.58	28	3.02	35	3.49	48				
1.20	8	1.47	11	1.53	13	1.73	15	1.71	18	2.07	20	2.47	23	2.59	28	2.91	35	4.25	48				
1.20	8	1.47	11	1.50	13	1.81	15	1.71	18	2.07	20	2.47	23	2.60	28	3.29	35	4.05	48				
1.20	8	1.47	11	1.54	13	1.74	15	1.71	18	2.07	20	2.48	23	2.60	28	3.23	35	3.67	48				
1.20	8	1.47	11	1.49	13	1.76	15	1.71	18	2.08	20	2.48	23	2.60	28	3.20	35	3.49	48				
1.21	8	1.47	11	1.62	13	1.62	15	1.71	18	2.08	20	2.48	23	2.61	28	3.03	35	3.92	48				
1.21	8	1.47	11	1.67	13	1.79	15	1.72	18	2.08	20	2.54	23	2.62	28	2.93	35	3.38	48				
1.21	8	1.47	11	1.59	13	1.67	15	1.72	18	2.08	20	2.08	23	2.62	28	2.68	35	3.73	48				
1.21	8	1.47	11	1.41	13	1.74	15	1.72	18	2.08	20	2.25	23	2.63	28	3.10	35	3.76	48				
1.21	8	1.47	11	1.66	13	1.67	15	1.72	18	2.08	20	2.32	23	2.63	28	2.25	36	3.61	48				
1.21	8	1.47	11	1.63	13	1.68	15	1.72	18	2.08	20	1.83	23	2.63	28	2.26	36	3.91	48				
1.21	8	1.47	11	1.55	13	1.74	15	1.72	18	2.08	20	2.07	23	2.63	28	2.42	36	3.81	48				
1.21	8	1.47	11	1.30	13	1.61	15	1.73	18	2.08	20	2.22	23	2.63	28	2.47	36	3.69	48				
1.21	8	1.48	11	1.70	13	1.62	15	1.73	18	2.08	20	2.38	23	2.63	28	2.51	36	3.98	48				
1.21	8	1.48	11	1.60	13	1.70	15	1.73	18	2.08	20	2.07	23	2.63	28	2.52	36	3.75	48				
1.21	8	1.48	11	1.59	13	1.76	15	1.73	18	2.08	20	2.45	23	2.64	28	2.55	36	3.36	48				
1.21	8	1.48	11	1.53	13	1.65	15	1.73	18	2.08	20	2.46	23	2.64	28	2.55	36	4.16	48				
1.21	8	1.48	11	1.36	13	1.96	15	1.74	18	2.08	20	2.36	23	2.64	28	2.55	36	3.44	48				
1.21	8	1.48	11	1.63	13	1.69	15	1.74	18	2.09	20	2.19	23	2.64	28	2.55	36	3.91	48				
1.21	8	1.48	11	1.56	13	1.71	15	1.74	18	2.09	20	2.24	23	2.65	28	2.56	36	3.61	48				
1.21	8	1.48	11	1.49	13	1.63	15	1.74	18	2.09	20	2.15	23	2.65	28	2.58	36	4.12	48				
1.21	8	1.48	11	1.61	13	1.73	15	1.74	18	2.09	20	2.07	23	2.65	28	2.58	36	3.31	48				
1.21	8	1.48	11	1.48	13	1.59	15	1.74	18	2.09	20	2.26	23	2.65	28	2.59	36	4.03	48				
1.21	8	1.48	11	1.65	13	1.73	15	1.74	18	2.09	20	1.98	23	2.65	28	2.62	36	3.77	48				
1.21	8	1.48	11	1.42	13	1.66	15	1.74	18	2.09	20	2.17	23	2.67	28	2.63	36	3.63	48				
1.21	8	1.48	11	1.58	13	1.71	15	1.75	18	2.09	20	2.14	23	2.67	28	2.65	36	2.43	48				
1.21	8	1.48	11	1.38	13	1.75	15	1.75	18	2.09	20	2.17	23	2.68	28	2.66	36	3.83	48				
1.21	8	1.48	11	1.48	13	1.64	15	1.75	18	2.09	20	2.28	23	2.69	28	2.68	36	3.92	48				
1.21	8	1.48	11	1.46	13	1.67	15	1.75	18	2.09	20	2.24	23	2.70	28	2.68	36	4.36	48				
1.21	8	1.48	11	1.57	13	1.81	15	1.75	18	2.09	20	2.24	23	2.70	28	2.69	36	3.81	48				
1.21	8	1.48	11	1.57	13	1.78	15	1.75	18	2.09	20	2.21	23	2.71	28	2.71	36	2.95	48				
1.21	8	1.48	11	1.72	13	1.69	15	1.75	18	2.10	20	2.04	23	2.71	28	2.72	36	3.94	48				
1.21	8	1.48	11	1.39	13	1.75	15	1.75	18	2.10	20	2.16	23	2.71	28	2.73	36	3.93	48				
1.22	8	1.48	11	1.41	13	1.76	15	1.76	18	2.10	20	2.13	23	2.72	28	2.74	36	3.24	48				
1.22	8	1.48	11	1.59	13	1.82	15	1.76	18	2.10	20	2.24	23	2.73	28	2.78	36	3.03	49				
1.22	8	1.48	11	1.86	13	1.76	15	1.76	18	2.10	20	2.18	23	2.73	28	2.79	36	3.10	49				
1.22	8	1.48	11	1.59	13	1.78	15	1.76	18	2.10	20	2.10	23	2.75	28	2.81	36	3.13	49				
1.22	8	1.48	11	1.69	13	1.76	15	1.76	18	2.10	20	2.13	23	2.75	28	2.81	36	3.20	49				
1.22	8	1.48	11	1.53	13	1.37	15	1.76	18	2.10	20	2.37	23	2.75	28	2.82	36	3.29	49				
1.22	8	1.48	11	1.28	13	1.60	15	1.76	18	2.10	20	2.14	23	2.75	28	2.84	36	3.29	49				
1.22	8	1.48	11	1.82	13	1.44	15	1.76	18	2.10	20	2.35	23	2.79	28	2.85	36	3.36	49				
1.22	8	1.48	11	1.56	13	1.81	15	1.76	18	2.10	20	2.42	23	2.80	28	2.86	36	3.43	49				
1.22	8	1.48	11	1.49	13	1.71	15	1.76	18	2.10	20	2.44	23	2.80	28	2.89	36	3.63	49				
1.22	8	1.48	11	1.59	13	1.60	15	1.76	18	2.10	20	1.99	23	2.80	28	2.90	36	3.66	49				
1.22	8	1.48	11	1.55	13	1.73	15	1.77	18	2.11	20	2.53	23	2.81	28	2.91	36	3.73	49				
1.22	8	1.48	11	1.70	13	1.48	15	1.77	18	2.11	20	2.11	23	2.82	28	2.92	36	3.79	49				
1.22	8	1.49	11	1.61	13	1.57	15	1.77	18	2.11	20	2.15	23	2.82	28	2.94	36	3.86	49				
1.22	8	1.49	11	1.62	13	1.59	15	1.77	18	2.11	20	2.24	23	2.82	28	2.97	36	3.86	49				
1.22	8	1.49	11	1.52	13	1.61	15	1.77	18	2.11	20	2.12	23	2.86	28	2.98	36	3.87	49				
1.22	8	1.49	11	1.54	13	1.45	15	1.77	18	2.11	20	2.23	23	2.19	28	2.98	36	3.90	49				
1.22	8	1.49	11	1.57	13	1.73	15	1.77	18	2.11	20	2.43	23	2.54	28	3.00	36	4.01	49				
1.22	8	1.49	11	1.53	13	1.52	15	1.77	18	2.11	20	2.38	23	2.61	28	3.02	36	4.07	49				
1.22	8	1.49	11	1.57	13	1.78	15	1.77	18	2.11	20	2.27	23	2.60	28	3.02	36	4.38	49				
1.22	8	1.49	11	1.67	13	1.61	15	1.77	18	2.11	20	2.36	23	2.46	28	3.04	36	4.07	49				
1.22	8	1.49	11	1.21	14	1.74	15	1.77	18	2.11	20	2.27	23	2.77	28	3.04	36	3.23	49				
1.22	8	1.49	11	1.23	14	1.73	15	1.78	18	2.11	20	2.10	23	2.39	28	3.04	36	3.74	49				
1.22	8	1.49	11	1.29	14	1.68	15	1.78	18	2.12	20	2.31	23	2.49	28	3.05	36	3.10	49				
1.22	8	1.49	11	1.30	14	1.76	15	1.78	18	2.12	20	2.28	23	2.57	28	3.11	36	3.97	49				
1.22	8	1.49	11	1.32	14	1.79	15	1.78	18	2.12	20	2.24	23	2.86	28	3.11	36	4.05	49				
1.22	8	1.49	11	1.34	14	1.56	15	1.78	18	2.12	20	2.00	23	2.41	28	3.12	36	3.57	49				
1.22	8	1.50	11	1.34	14	1.57	15	1.78	18	2.12	20	2.32	23	2.52	28	3.15	36	3.34	49				
1.23	8	1.50	11	1.34	14	1.64	15	1.78	18	2.12	20	2.36	23	2.44	28	3.15	36	3.96	49				
1.23	8	1.50	11	1.35	14	1.58	15	1.78	18	2.12</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.24	8	1.51	11	1.45	14	1.53	16	1.80	18	2.14	20	2.40	23	2.31	28	2.92	36	3.94	49				
1.24	8	1.51	11	1.45	14	1.53	16	1.80	18	2.15	20	2.24	23	2.34	28	3.35	36	3.91	49				
1.24	8	1.51	11	1.45	14	1.53	16	1.80	18	2.15	20	2.14	23	2.41	28	3.27	36	3.77	49				
1.24	8	1.51	11	1.45	14	1.53	16	1.80	18	2.15	20	2.34	23	2.60	28	3.05	36	3.88	49				
1.24	8	1.51	11	1.45	14	1.54	16	1.80	18	2.15	20	2.07	23	3.04	28	2.32	36	3.17	49				
1.24	8	1.51	11	1.46	14	1.55	16	1.80	18	2.15	20	2.00	23	2.64	28	2.71	36	3.77	49				
1.24	8	1.51	11	1.46	14	1.55	16	1.80	18	2.15	20	2.22	23	2.10	28	3.04	36	3.46	49				
1.24	8	1.51	11	1.46	14	1.55	16	1.80	18	2.15	20	2.05	23	2.44	28	2.73	36	3.44	49				
1.24	8	1.51	11	1.46	14	1.55	16	1.80	18	2.15	20	2.12	23	2.31	28	3.04	36	3.55	49				
1.24	8	1.51	11	1.46	14	1.56	16	1.80	18	2.15	20	2.31	23	2.60	28	3.11	36	3.61	49				
1.24	8	1.51	11	1.46	14	1.56	16	1.80	18	2.15	20	2.16	23	2.26	28	2.59	36	3.97	49				
1.24	8	1.51	11	1.46	14	1.56	16	1.80	18	2.15	20	2.03	23	2.54	28	3.09	36	3.35	49				
1.24	8	1.52	11	1.46	14	1.56	16	1.81	18	2.16	20	1.44	23	2.27	28	2.39	36	3.86	49				
1.24	8	1.52	11	1.47	14	1.57	16	1.81	18	2.16	20	2.00	23	2.39	28	2.51	36	3.95	49				
1.24	8	1.52	11	1.47	14	1.57	16	1.81	18	2.16	20	2.13	23	2.27	28	2.82	36	3.62	49				
1.24	8	1.52	11	1.47	14	1.57	16	1.81	18	2.16	20	2.06	23	2.77	28	3.13	36	3.46	49				
1.24	8	1.52	11	1.47	14	1.57	16	1.81	18	2.16	20	2.45	23	2.44	28	3.23	36	3.97	49				
1.24	8	1.52	11	1.47	14	1.57	16	1.81	18	2.16	20	2.18	23	2.65	28	2.91	36	3.39	49				
1.24	8	1.52	11	1.47	14	1.57	16	1.81	18	2.16	20	2.30	23	2.62	28	2.94	36	4.01	49				
1.24	8	1.52	11	1.48	14	1.57	16	1.81	18	2.16	20	2.13	23	2.12	28	2.84	36	4.48	49				
1.25	8	1.52	11	1.48	14	1.58	16	1.81	18	2.16	20	2.26	23	2.19	28	2.94	36	4.33	49				
1.25	8	1.52	11	1.48	14	1.58	16	1.81	18	2.16	20	2.08	23	2.31	28	3.27	36	4.21	49				
1.25	8	1.52	11	1.48	14	1.58	16	1.81	18	2.16	20	2.29	23	2.30	28	2.76	36	3.84	49				
1.25	8	1.52	11	1.48	14	1.58	16	1.81	18	2.17	20	1.94	23	2.56	28	2.88	36	3.35	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.58	16	1.81	18	2.17	20	2.23	23	2.78	28	2.25	36	3.73	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.58	16	1.81	18	2.17	20	2.28	23	2.58	28	2.91	36	3.96	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.58	16	1.82	18	2.17	20	2.11	23	2.46	28	3.01	36	4.11	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.59	16	1.82	18	2.17	20	2.09	23	2.49	28	2.96	36	3.88	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.59	16	1.82	18	2.17	20	2.40	23	2.76	28	3.01	36	4.12	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.59	16	1.82	18	2.17	20	2.21	23	2.78	28	2.72	36	3.59	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.59	16	1.82	18	2.17	20	2.20	23	2.36	28	2.85	36	4.29	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.59	16	1.82	18	2.18	20	2.25	23	2.67	28	2.98	36	3.97	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.59	16	1.82	18	2.18	20	2.27	23	2.31	28	2.83	36	3.65	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.59	16	1.82	18	2.18	20	2.38	23	2.20	28	2.75	36	3.49	49				
1.25	8	1.52	11	1.49	14	1.60	16	1.82	18	2.18	20	2.12	23	2.44	28	3.36	36	3.88	49				
1.25	8	1.53	11	1.50	14	1.60	16	1.82	18	2.18	20	2.34	23	2.64	28	3.24	36	3.85	49				
1.25	8	1.53	11	1.50	14	1.60	16	1.82	18	2.18	20	2.33	23	2.46	28	3.19	36	3.24	49				
1.25	8	1.53	11	1.50	14	1.60	16	1.82	18	2.18	20	2.22	23	2.17	28	3.27	36	3.99	49				
1.25	8	1.53	11	1.50	14	1.60	16	1.82	18	2.18	20	2.17	23	2.59	28	3.10	36	3.05	49				
1.25	8	1.53	11	1.50	14	1.60	16	1.82	18	2.18	20	2.41	23	2.55	28	3.24	36	3.06	49				
1.25	8	1.53	11	1.50	14	1.60	16	1.82	18	2.18	20	1.80	23	2.35	28	2.88	36	3.90	49				
1.25	8	1.53	11	1.50	14	1.60	16	1.82	18	2.18	20	2.36	23	2.64	28	3.10	36	3.64	49				
1.25	8	1.53	11	1.50	14	1.60	16	1.82	18	2.19	20	1.69	23	2.55	28	3.36	36	4.47	49				
1.26	8	1.53	11	1.50	14	1.61	16	1.82	18	2.19	20	2.04	23	2.38	28	3.09	36	4.17	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.19	20	2.16	23	2.80	28	2.75	36	3.71	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.19	20	2.10	23	2.74	28	2.76	36	3.69	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.19	20	2.19	23	2.68	28	2.56	36	3.45	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.19	20	2.48	23	2.91	28	2.85	36	4.07	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.20	20	2.21	23	2.68	28	2.94	36	3.58	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.20	20	1.83	23	2.52	28	3.25	36	3.57	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.20	20	2.19	23	2.54	28	3.05	36	3.59	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.20	20	2.15	23	2.46	28	2.88	36	3.16	49				
1.26	8	1.53	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.20	20	2.30	23	2.10	28	2.88	36	2.92	50				
1.26	8	1.54	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.20	20	2.24	23	2.38	28	3.04	36	3.02	50				
1.26	8	1.54	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.21	20	2.42	23	2.71	28	3.43	36	3.34	50				
1.26	8	1.54	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.21	20	2.16	23	2.64	28	3.33	36	3.41	50				
1.27	8	1.54	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.21	20	2.25	23	2.43	28	3.10	36	3.46	50				
1.27	8	1.54	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.21	20	2.25	23	2.59	28	2.90	36	3.64	50				
1.27	8	1.54	11	1.51	14	1.61	16	1.83	18	2.22	20	2.23	23	2.70	28	3.23	36	4.20	50				
1.27	8	1.54	11	1.51	14	1.62	16	1.83	18	2.22	20	2.02	23	2.64	28	3.07	36	3.71	50				
1.27	8	1.54	11	1.51	14	1.62	16	1.83	18	2.22	20	2.14	23	2.38	28	2.95	36	4.20	50				
1.27	8	1.54	11	1.51	14	1.62	16	1.83	18	2.22	20	2.19	23	2.66	28	3.27	36	4.13	50				
1.27	8	1.55	11	1.51	14	1.62	16	1.83	18	2.22	20	2.22	23	2.33	28	2.68	36	4.29	50				
1.27	8	1.55	11	1.51	14	1.62	16	1.83	18	2.22	20	2.48	23	2.77	28	2.76	36	4.24	50				
1.27	8	1.55	11	1.51	14	1.62	16	1.83	18	2.22	20	2.03	23	2.58	28	2.83	36	4.23	50				
1.27	8	1.55	11	1.51	14	1.62	16	1.83	18	2.22	20	2.22	23	2.19	28	2.96	36	3.93	50				
1.27	8	1.55	11	1.52	14	1.62	16	1.84	18	2.22	20	2.08	23	2.47	28	2.97	36	3.58	50				
1.27	8	1.55	11	1.52	14	1.62	16	1.84	18	2.23</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.29	8	1.61	11	1.54	14	1.65	16	1.85	18	2.15	20	1.99	24	2.54	28	2.97	36	3.75	50				
1.29	8	1.62	11	1.54	14	1.65	16	1.85	18	2.20	20	2.00	24	2.39	28	2.66	36	4.14	50				
1.29	8	1.62	11	1.54	14	1.65	16	1.85	18	1.91	20	2.00	24	2.29	28	3.07	36	3.50	50				
1.29	8	1.63	11	1.54	14	1.65	16	1.85	18	2.05	20	2.00	24	2.07	29	2.44	36	3.99	50				
1.29	8	1.63	11	1.54	14	1.65	16	1.85	18	2.11	20	2.01	24	2.09	29	2.83	36	3.69	50				
1.29	8	1.66	11	1.54	14	1.65	16	1.85	18	2.16	20	2.02	24	2.12	29	2.89	36	3.47	50				
1.29	8	1.66	11	1.54	14	1.65	16	1.85	18	2.06	20	2.02	24	2.13	29	3.07	36	3.87	50				
1.29	8	1.68	11	1.54	14	1.65	16	1.85	18	2.04	20	2.02	24	2.14	29	3.11	36	3.59	50				
1.29	8	1.42	11	1.54	14	1.65	16	1.86	18	1.98	20	2.02	24	2.18	29	3.10	36	4.00	50				
1.29	8	1.37	11	1.54	14	1.65	16	1.86	18	2.05	20	2.03	24	2.20	29	2.97	36	3.92	50				
1.29	8	1.35	11	1.54	14	1.65	16	1.86	18	1.96	20	2.03	24	2.21	29	3.42	36	4.02	50				
1.29	8	1.47	11	1.54	14	1.65	16	1.86	18	2.11	20	2.05	24	2.21	29	3.59	36	4.22	50				
1.29	8	1.38	11	1.54	14	1.65	16	1.86	18	2.04	20	2.05	24	2.21	29	3.06	36	4.06	50				
1.29	8	1.54	11	1.54	14	1.65	16	1.86	18	2.18	20	2.05	24	2.22	29	3.17	36	4.26	50				
1.29	8	1.54	11	1.54	14	1.65	16	1.86	18	1.84	20	2.07	24	2.22	29	2.93	36	1.93	50				
1.29	8	1.47	11	1.54	14	1.66	16	1.86	18	1.92	20	2.07	24	2.23	29	2.77	36	3.48	50				
1.30	8	1.38	11	1.54	14	1.66	16	1.86	18	2.19	20	2.07	24	2.24	29	2.65	36	3.77	50				
1.30	8	1.55	11	1.54	14	1.66	16	1.86	18	2.14	20	2.07	24	2.24	29	3.33	36	3.46	50				
1.30	8	1.47	11	1.54	14	1.66	16	1.86	18	2.07	20	2.07	24	2.24	29	2.85	36	3.16	50				
1.30	8	1.43	11	1.54	14	1.66	16	1.86	18	2.07	20	2.08	24	2.24	29	3.15	36	3.22	50				
1.30	8	1.49	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	2.19	20	2.08	24	2.26	29	3.41	36	3.18	50				
1.30	8	1.39	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	2.12	20	2.08	24	2.26	29	3.08	36	3.74	50				
1.30	8	1.44	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	2.09	20	2.08	24	2.26	29	2.43	37	4.26	50				
1.30	8	1.50	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	1.85	20	2.08	24	2.27	29	2.44	37	3.77	50				
1.31	8	1.51	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	2.06	20	2.08	24	2.28	29	2.47	37	3.83	50				
1.31	8	1.48	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	2.14	20	2.08	24	2.28	29	2.50	37	3.79	50				
1.31	8	1.41	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	1.79	20	2.08	24	2.29	29	2.51	37	3.67	50				
1.31	8	1.38	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	2.02	20	2.09	24	2.29	29	2.55	37	3.87	50				
1.31	8	1.33	11	1.55	14	1.66	16	1.86	18	1.86	20	2.09	24	2.30	29	2.57	37	3.74	50				
1.31	8	1.52	11	1.55	14	1.67	16	1.86	18	1.96	20	2.09	24	2.30	29	2.57	37	3.49	50				
1.31	8	1.22	11	1.55	14	1.67	16	1.86	18	1.95	20	2.09	24	2.31	29	2.61	37	3.98	50				
1.31	8	1.28	11	1.55	14	1.67	16	1.86	18	2.13	20	2.09	24	2.32	29	2.62	37	3.32	50				
1.31	8	1.40	11	1.55	14	1.67	16	1.86	18	2.20	20	2.09	24	2.33	29	2.62	37	3.94	50				
1.32	8	1.42	11	1.55	14	1.67	16	1.86	18	1.90	20	2.09	24	2.33	29	2.65	37	2.76	50				
1.32	8	1.42	11	1.55	14	1.67	16	1.87	18	2.02	20	2.10	24	2.33	29	2.67	37	3.81	50				
1.32	8	1.47	11	1.55	14	1.67	16	1.87	18	2.09	20	2.10	24	2.34	29	2.67	37	4.53	50				
1.32	8	1.27	11	1.55	14	1.67	16	1.87	18	2.15	20	2.10	24	2.34	29	2.67	37	3.21	50				
1.33	8	1.48	11	1.55	14	1.67	16	1.87	18	1.98	20	2.10	24	2.34	29	2.69	37	3.90	50				
1.33	8	1.32	11	1.55	14	1.67	16	1.87	18	1.93	20	2.10	24	2.34	29	2.70	37	3.21	50				
1.33	8	1.45	11	1.55	14	1.67	16	1.87	18	2.03	20	2.10	24	2.34	29	2.70	37	4.27	50				
1.33	8	1.38	11	1.55	14	1.67	16	1.87	18	2.25	20	2.10	24	2.35	29	2.71	37	3.48	50				
1.33	8	1.34	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.13	20	2.10	24	2.35	29	2.71	37	3.60	50				
1.33	8	1.47	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.04	20	2.11	24	2.36	29	2.71	37	3.90	50				
1.34	8	1.59	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.12	20	2.11	24	2.36	29	2.72	37	3.93	50				
1.34	8	1.68	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.10	20	2.11	24	2.38	29	2.72	37	4.32	50				
1.34	8	1.53	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.02	20	2.11	24	2.40	29	2.72	37	4.08	50				
1.34	8	1.56	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.11	20	2.12	24	2.41	29	2.75	37	3.73	50				
1.34	8	1.43	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.23	20	2.12	24	2.41	29	2.76	37	3.88	50				
1.35	8	1.43	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.02	20	2.12	24	2.42	29	2.76	37	3.04	51				
1.35	8	1.34	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	2.00	20	2.12	24	2.42	29	2.79	37	3.23	51				
1.36	8	1.50	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	1.68	20	2.12	24	2.42	29	2.81	37	3.25	51				
1.36	8	1.37	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	1.80	20	2.12	24	2.42	29	2.85	37	3.32	51				
1.36	8	1.32	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	1.80	20	2.12	24	2.42	29	2.88	37	3.51	51				
1.37	8	1.28	11	1.56	14	1.67	16	1.87	18	1.79	20	2.13	24	2.42	29	2.89	37	3.79	51				
1.37	8	1.44	11	1.56	14	1.68	16	1.87	18	1.97	20	2.13	24	2.43	29	2.91	37	3.88	51				
1.37	8	1.52	11	1.56	14	1.68	16	1.87	18	2.05	20	2.13	24	2.43	29	2.91	37	4.12	51				
1.40	8	1.47	11	1.56	14	1.68	16	1.87	18	2.00	20	2.13	24	2.43	29	2.92	37	4.19	51				
1.40	8	1.52	11	1.56	14	1.68	16	1.87	18	1.95	20	2.13	24	2.43	29	2.92	37	3.51	51				
1.40	8	1.44	11	1.56	14	1.68	16	1.87	18	1.90	20	2.13	24	2.43	29	2.94	37	4.16	51				
1.40	8	1.42	11	1.56	14	1.68	16	1.87	18	2.21	20	2.13	24	2.44	29	2.94	37	4.17	51				
1.41	8	1.43	11	1.56	14	1.68	16	1.87	18	1.99	20	2.13	24	2.44	29	2.95	37	4.34	51				
1.43	8	1.41	11	1.57	14	1.68	16	1.87	18	1.73	20	2.14	24	2.45	29	2.98	37	4.02	51				
1.44	8	1.46	11	1.57	14	1.68	16	1.87	18	1.90	20	2.14	24	2.45	29	2.98	37	3.98	51				
1.31	8	1.46	11	1.57	14	1.68	16	1.88	18	1.97	20	2.14	24	2.45	29	2.98	37	3.94	51				
1.14	8	1.50	11	1.57	14	1.68	16	1.88	18	1.83	20	2.14	24	2.46	29	2.99	37	4.18	51				
1.44	8	1.46	11	1.57	14	1.68	16	1.88	18	1.93	20	2.14	24	2.47	29	3.04	37	3.44	51				
1.24	8	1.35	11	1.57	14	1.68	16	1.88	18	2.16	20	2.15	24	2.47	29	3.05	37	3.68	51				
1.08	8	1.43	11	1.57	14	1.68	16	1.88	18	1.97</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.12	9	1.13	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.10	20	2.20	24	2.59	29	3.20	37	4.03	51				
1.13	9	1.17	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.04	20	2.20	24	2.59	29	3.52	37	4.34	51				
1.13	9	1.17	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.10	20	2.20	24	2.59	29	3.26	37	3.79	51				
1.13	9	1.20	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.12	20	2.20	24	2.60	29	3.09	37	4.26	51				
1.14	9	1.21	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	1.84	20	2.20	24	2.60	29	3.13	37	4.09	51				
1.14	9	1.22	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	1.96	20	2.20	24	2.60	29	2.61	37	4.03	51				
1.14	9	1.24	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	1.92	20	2.20	24	2.60	29	3.07	37	3.29	51				
1.15	9	1.24	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	1.96	20	2.21	24	2.60	29	2.81	37	4.10	51				
1.15	9	1.25	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.13	20	2.21	24	2.61	29	3.04	37	3.47	51				
1.15	9	1.26	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.05	20	2.21	24	2.61	29	2.84	37	4.61	51				
1.15	9	1.27	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.04	20	2.21	24	2.61	29	2.90	37	3.28	51				
1.15	9	1.27	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.01	20	2.21	24	2.61	29	2.94	37	4.12	51				
1.16	9	1.28	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	2.08	20	2.21	24	2.62	29	2.91	37	3.37	51				
1.16	9	1.28	12	1.58	14	1.70	16	1.89	18	1.96	20	2.22	24	2.62	29	3.02	37	4.22	51				
1.16	9	1.29	12	1.58	14	1.71	16	1.89	18	1.93	20	2.22	24	2.62	29	3.03	37	4.01	51				
1.16	9	1.29	12	1.59	14	1.71	16	1.89	18	1.95	20	2.22	24	2.63	29	3.12	37	3.67	51				
1.17	9	1.29	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.86	20	2.22	24	2.63	29	3.10	37	4.02	51				
1.17	9	1.30	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.92	20	2.22	24	2.63	29	2.95	37	3.83	51				
1.17	9	1.31	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	2.04	20	2.22	24	2.65	29	3.39	37	4.49	51				
1.17	9	1.31	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.98	20	2.22	24	2.66	29	2.81	37	3.49	51				
1.17	9	1.31	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	2.02	20	2.22	24	2.66	29	3.21	37	3.78	51				
1.18	9	1.31	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.78	20	2.22	24	2.67	29	3.13	37	3.45	51				
1.18	9	1.31	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	2.22	20	2.22	24	2.67	29	3.10	37	4.28	51				
1.18	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	2.18	20	2.23	24	2.68	29	2.84	37	4.26	51				
1.18	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	2.06	20	2.23	24	2.68	29	3.05	37	4.67	51				
1.18	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.64	20	2.23	24	2.68	29	2.98	37	4.31	51				
1.18	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.88	20	2.23	24	2.68	29	3.19	37	4.19	51				
1.18	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.98	20	2.23	24	2.69	29	2.89	37	4.02	51				
1.18	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	2.02	20	2.23	24	2.70	29	3.35	37	3.51	51				
1.19	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	2.15	20	2.23	24	2.71	29	3.35	37	4.07	51				
1.19	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.80	20	2.23	24	2.72	29	3.51	37	4.09	51				
1.19	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.88	20	2.23	24	2.72	29	3.37	37	3.84	51				
1.19	9	1.33	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.22	20	2.23	24	2.72	29	3.03	37	4.31	51				
1.19	9	1.34	12	1.59	14	1.71	16	1.90	18	1.70	20	2.24	24	2.74	29	3.20	37	3.99	51				
1.19	9	1.34	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.02	20	2.24	24	2.74	29	3.22	37	3.00	51				
1.19	9	1.34	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.11	20	2.24	24	2.75	29	3.04	37	4.13	51				
1.19	9	1.34	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	1.89	20	2.24	24	2.75	29	2.94	37	3.81	51				
1.20	9	1.34	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.02	20	2.24	24	2.76	29	3.40	37	4.38	51				
1.20	9	1.34	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.08	20	2.24	24	2.77	29	3.09	37	3.05	51				
1.20	9	1.34	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.22	20	2.24	24	2.77	29	3.48	37	4.16	51				
1.20	9	1.34	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.12	20	2.24	24	2.78	29	2.41	37	4.17	51				
1.20	9	1.35	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.14	20	2.24	24	2.80	29	2.54	37	3.89	51				
1.20	9	1.35	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.09	20	2.24	24	2.80	29	2.84	37	4.26	51				
1.20	9	1.35	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.03	20	2.24	24	2.81	29	2.96	37	3.70	51				
1.20	9	1.35	12	1.59	14	1.72	16	1.90	18	2.06	20	2.24	24	2.82	29	2.26	37	3.24	52				
1.20	9	1.35	12	1.59	14	1.72	16	1.91	18	2.08	20	2.25	24	2.84	29	2.50	37	3.30	52				
1.20	9	1.35	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	2.01	20	2.25	24	2.85	29	2.66	37	3.73	52				
1.21	9	1.35	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.92	20	2.25	24	2.86	29	2.90	37	3.76	52				
1.21	9	1.36	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	2.03	20	2.25	24	3.14	29	2.93	37	3.78	52				
1.21	9	1.36	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	2.15	20	2.26	24	3.20	29	3.21	37	3.90	52				
1.21	9	1.36	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.97	20	2.26	24	2.51	29	3.16	37	3.96	52				
1.21	9	1.36	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	2.01	20	2.26	24	2.65	29	3.06	37	3.97	52				
1.21	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	2.04	20	2.26	24	2.63	29	3.25	37	3.98	52				
1.21	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.60	21	2.27	24	2.56	29	3.16	37	4.02	52				
1.21	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.62	21	2.27	24	2.66	29	2.64	37	4.02	52				
1.21	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.64	21	2.27	24	2.87	29	3.09	37	4.04	52				
1.21	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.65	21	2.27	24	2.58	29	3.29	37	4.08	52				
1.21	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.65	21	2.27	24	2.84	29	3.23	37	4.10	52				
1.22	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.68	21	2.27	24	2.56	29	2.87	37	4.11	52				
1.22	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.70	21	2.28	24	2.61	29	2.55	37	4.25	52				
1.22	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.71	21	2.28	24	2.39	29	3.01	37	3.47	52				
1.22	9	1.37	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.72	21	2.28	24	2.46	29	2.99	37	4.52	52				
1.22	9	1.38	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.72	21	2.28	24	2.20	29	2.90	37	4.25	52				
1.22	9	1.38	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.72	21	2.28	24	2.63	29	2.72	37	3.88	52				
1.22	9	1.38	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.73	21	2.28	24	2.35	29	2.77	37	4.35	52				
1.22	9	1.38	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.73	21	2.28	24	2.06	29	3.12	37	4.59	52				
1.22	9	1.38	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.73	21	2.28	24	2.36	29	2.79	37	4.29	52				
1.22	9	1.38	12	1.60	14	1.72	16	1.91	18	1.76</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.24	9	1.40	12	1.61	14	1.73	16	1.92	18	1.87	21	2.33	24	2.90	29	3.08	37	3.79	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.73	16	1.92	18	1.87	21	2.33	24	2.57	29	3.44	37	4.50	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.73	16	1.92	18	1.88	21	2.33	24	2.45	29	2.85	37	4.15	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.73	16	1.92	18	1.88	21	2.34	24	2.63	29	2.97	37	3.34	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.73	16	1.92	18	1.88	21	2.34	24	2.44	29	2.67	37	4.02	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.73	16	1.92	18	1.88	21	2.34	24	2.54	29	2.63	37	3.90	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.73	16	1.93	18	1.88	21	2.34	24	2.60	29	2.72	37	3.85	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.73	16	1.93	18	1.88	21	2.34	24	2.50	29	2.86	37	4.03	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.73	16	1.93	18	1.89	21	2.34	24	2.81	29	3.32	37	4.40	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.89	21	2.34	24	2.44	29	3.26	37	3.64	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.89	21	2.34	24	2.13	29	2.60	37	4.22	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.89	21	2.35	24	2.55	29	3.47	37	4.51	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.89	21	2.35	24	2.44	29	3.17	37	4.09	52				
1.24	9	1.41	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.35	24	2.68	29	2.88	37	4.12	52				
1.24	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.35	24	2.62	29	3.07	37	3.71	52				
1.24	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.36	24	2.72	29	2.97	37	4.23	52				
1.24	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.36	24	2.59	29	3.27	37	4.40	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.36	24	2.12	29	3.43	37	3.93	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.36	24	2.46	29	2.91	37	4.08	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.36	24	2.35	29	3.27	37	4.33	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.37	24	2.21	29	3.18	37	4.21	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.37	24	2.53	29	2.86	37	3.88	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.37	24	2.57	29	2.35	37	3.59	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.90	21	2.37	24	2.76	29	2.34	38	3.41	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.91	21	2.37	24	2.75	29	2.41	38	4.17	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.91	21	2.38	24	2.46	29	2.42	38	4.09	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.91	21	2.38	24	2.63	29	2.44	38	4.01	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.91	21	2.38	24	2.82	29	2.46	38	4.40	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.91	21	2.38	24	2.87	29	2.46	38	4.39	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.91	21	2.38	24	2.68	29	2.54	38	3.67	52				
1.25	9	1.42	12	1.61	14	1.74	16	1.93	18	1.92	21	2.38	24	2.22	29	2.57	38	4.39	52				
1.25	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.93	18	1.92	21	2.38	24	2.35	29	2.61	38	3.99	52				
1.25	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.93	18	1.92	21	2.38	24	2.75	29	2.67	38	3.29	52				
1.25	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.93	18	1.92	21	2.38	24	2.34	29	2.68	38	4.20	52				
1.25	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.93	18	1.92	21	2.38	24	2.53	29	2.70	38	3.69	52				
1.25	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.92	21	2.39	24	2.71	29	2.70	38	4.20	52				
1.25	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.92	21	2.39	24	2.29	29	2.71	38	4.26	52				
1.25	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.92	21	2.39	24	2.64	29	2.73	38	3.64	52				
1.26	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.39	24	2.27	29	2.73	38	4.12	52				
1.26	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.39	24	2.42	29	2.77	38	3.78	52				
1.26	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.39	24	2.38	29	2.79	38	3.57	52				
1.26	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.40	24	2.33	29	2.83	38	2.77	53				
1.26	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.40	24	2.58	29	2.83	38	3.10	53				
1.26	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.40	24	2.28	29	2.86	38	3.30	53				
1.26	9	1.42	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.40	24	2.34	29	2.92	38	3.58	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.41	24	2.71	29	2.93	38	3.74	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.74	16	1.94	18	1.93	21	2.41	24	2.11	29	2.93	38	3.75	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.41	24	2.31	29	2.93	38	3.79	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.41	24	2.63	29	2.98	38	3.82	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.42	24	2.68	29	2.98	38	3.87	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.42	24	2.47	29	3.01	38	3.88	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.42	24	2.69	29	3.02	38	4.01	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.42	24	2.72	29	3.03	38	4.01	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.42	24	2.54	29	3.04	38	4.03	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.43	24	2.03	29	3.05	38	4.16	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.43	24	2.32	29	3.06	38	4.19	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.43	24	2.63	29	3.06	38	4.28	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.43	24	2.53	29	3.08	38	4.37	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.43	24	2.55	29	3.09	38	4.48	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.44	24	2.39	29	3.12	38	3.59	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.94	18	1.94	21	2.44	24	2.35	29	3.15	38	4.30	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.95	18	1.95	21	2.44	24	2.49	29	3.15	38	3.75	53				
1.26	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.95	18	1.95	21	2.44	24	2.83	29	3.17	38	3.63	53				
1.27	9	1.43	12	1.62	14	1.75	16	1.95	18	1.95	21	2.45	24	2.97	29	3.18	38	4.14	53				
1.27	9	1.43	12	1.63	14	1.75	16	1.95	18	1.95	21	2.45	24	2.80	29	3.18	38	3.88	53				
1.27	9	1.43	12	1.63	14	1.75	16	1.95	18	1.95	21	2.45	24	2.65	29	3.19	38	3.26	53				
1.27	9	1.43	12	1.63	14	1.75	16	1.95	18	1.95	21	2.45	24	2.39	29	3.19	38	3.81	53				
1.27	9	1.43	12	1.63	14	1.75	16	1.95	18	1.95</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.27	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.98	21	2.32	24	2.80	29	3.38	38	3.93	53				
1.27	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.98	21	2.65	24	2.69	29	3.25	38	3.99	53				
1.27	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.24	24	2.58	29	3.30	38	3.91	53				
1.27	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.26	24	2.62	29	3.17	38	3.72	53				
1.28	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.33	24	2.73	29	3.13	38	4.49	53				
1.28	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.53	24	2.68	29	3.50	38	4.29	53				
1.28	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.45	24	2.73	29	3.48	38	4.35	53				
1.28	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.10	24	2.78	29	3.42	38	4.51	53				
1.28	9	1.45	12	1.63	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.28	24	2.62	29	3.20	38	4.22	53				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.31	24	2.49	29	3.31	38	4.06	53				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.06	24	2.78	29	3.09	38	3.13	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	1.92	24	1.93	30	3.07	38	3.36	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.43	24	2.05	30	2.73	38	3.56	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.03	24	2.06	30	3.16	38	3.73	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.25	24	2.10	30	3.14	38	3.85	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.11	24	2.18	30	3.23	38	3.97	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.44	24	2.19	30	3.06	38	4.02	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.20	24	2.20	30	3.01	38	4.05	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	1.99	21	2.27	24	2.21	30	2.95	38	4.09	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	2.00	21	2.25	24	2.26	30	2.61	38	4.09	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.97	18	2.00	21	2.11	24	2.27	30	3.51	38	4.10	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.98	18	2.00	21	2.22	24	2.27	30	3.19	38	4.23	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.98	18	2.00	21	1.91	24	2.29	30	2.85	38	4.23	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.98	18	2.00	21	2.23	24	2.29	30	2.79	38	4.23	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.98	18	2.00	21	2.13	24	2.30	30	2.84	38	4.24	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.77	16	1.98	18	2.00	21	2.14	24	2.31	30	2.67	38	4.28	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.00	21	2.12	24	2.31	30	3.24	38	4.67	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.00	21	2.14	24	2.33	30	2.80	38	4.66	54				
1.28	9	1.45	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.13	24	2.33	30	2.89	38	4.31	54				
1.28	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.47	24	2.33	30	3.02	38	3.44	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.49	24	2.34	30	2.57	38	4.15	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.26	24	2.35	30	2.89	38	4.75	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.29	24	2.38	30	2.97	38	3.94	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.41	24	2.39	30	3.28	38	4.13	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.35	24	2.40	30	3.43	38	3.95	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	1.90	24	2.41	30	3.10	38	4.37	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.37	24	2.43	30	3.27	38	3.87	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.05	24	2.43	30	3.01	38	4.17	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.27	24	2.44	30	3.30	38	4.09	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.33	24	2.44	30	2.99	38	3.93	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.42	24	2.44	30	3.33	38	4.02	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.98	18	2.01	21	2.42	24	2.45	30	3.51	38	4.22	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.99	18	2.01	21	1.85	24	2.45	30	3.54	38	4.59	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.99	18	2.01	21	2.06	24	2.45	30	3.41	38	4.47	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.99	18	2.01	21	2.31	24	2.46	30	2.87	38	4.30	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.99	18	2.01	21	2.37	24	2.47	30	2.75	38	4.74	54				
1.29	9	1.46	12	1.64	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.20	24	2.47	30	3.38	38	4.55	54				
1.29	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.40	24	2.47	30	3.24	38	4.80	54				
1.29	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.24	24	2.47	30	3.26	38	3.91	54				
1.29	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.29	24	2.47	30	2.88	38	4.41	54				
1.29	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.23	24	2.48	30	2.80	38	4.40	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.39	24	2.48	30	3.39	38	4.14	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	1.94	24	2.48	30	3.52	38	3.90	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.32	24	2.48	30	3.02	38	3.92	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.18	24	2.49	30	3.01	38	4.15	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.02	21	2.36	24	2.50	30	3.34	38	4.45	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.78	16	1.99	18	2.03	21	2.39	24	2.51	30	3.32	38	4.05	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.79	16	1.99	18	2.03	21	2.17	24	2.51	30	2.24	38	4.45	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.79	16	1.99	18	2.03	21	2.13	24	2.52	30	3.37	38	4.45	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.79	16	1.99	18	2.03	21	2.34	24	2.52	30	3.19	38	3.99	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.79	16	1.99	18	2.03	21	2.43	24	2.52	30	2.71	38	4.29	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.79	16	1.99	18	2.03	21	2.08	24	2.52	30	3.01	38	4.53	54				
1.30	9	1.46	12	1.65	14	1.79	16	1.99	18	2.03	21	2.16	24	2.52	30	3.03	38	3.25	54				
1.30	9	1.47	12	1.65	14	1.79	16	1.99	18	2.03	21	2.26	24	2.53	30	2.92	38	4.48	54				
1.30	9	1.47	12	1.65	14	1.79	16	2.00	18	2.03	21	2.42	24	2.53	30	2.58	38	3.69	54				
1.30	9	1.47	12	1.65	14	1.79	16	2.00	18	2.03	21	2.26	24	2.53	30	2.63	38	4.65	54				
1.30	9	1.47	12	1.65	14	1.79	16	2.00	18	2.03	21	2.18	24	2.54	30	2.82	38	4.46	54				
1.30	9	1.47	12	1.65	14	1.79	16	2.00	18	2.03</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.31	9	1.47	12	1.66	14	1.80	16	2.02	18	2.05	21	2.22	24	2.65	30	3.37	38	3.79	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.02	18	2.05	21	2.33	24	2.65	30	3.24	38	3.57	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.03	18	2.05	21	2.06	24	2.65	30	3.07	38	4.42	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.03	18	2.05	21	2.17	24	2.65	30	3.22	38	3.89	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.03	18	2.06	21	2.39	24	2.66	30	3.02	38	4.34	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.03	18	2.06	21	2.40	24	2.67	30	3.33	38	4.35	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.03	18	2.06	21	1.90	24	2.67	30	3.29	38	3.67	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.03	18	2.06	21	2.09	24	2.67	30	3.41	38	4.30	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.03	18	2.06	21	1.87	24	2.69	30	2.64	38	3.60	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.03	18	2.06	21	2.44	24	2.70	30	3.18	38	4.04	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.23	24	2.70	30	2.96	38	3.64	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.28	24	2.70	30	3.19	38	4.30	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.34	24	2.71	30	3.17	38	4.07	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.01	24	2.72	30	2.76	38	4.19	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.34	24	2.73	30	2.89	38	4.32	54				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.12	24	2.76	30	3.02	38	3.51	55				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.24	24	2.77	30	3.20	38	4.00	55				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	1.65	24	2.79	30	3.32	38	4.18	55				
1.31	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.03	24	2.79	30	3.43	38	4.24	55				
1.32	9	1.48	12	1.66	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.05	24	2.79	30	3.31	38	4.49	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.41	24	2.79	30	2.72	38	3.95	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.31	24	2.80	30	3.14	38	4.36	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.80	16	2.04	18	2.06	21	2.38	24	2.80	30	2.62	38	4.46	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.80	16	2.04	18	2.07	21	2.27	24	2.80	30	2.86	38	4.63	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.80	16	2.04	18	2.07	21	2.33	24	2.82	30	3.42	38	3.56	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.80	16	2.04	18	2.07	21	2.26	24	2.83	30	3.16	38	4.26	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.80	16	2.04	18	2.07	21	2.29	24	2.85	30	3.08	38	4.33	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.49	24	2.86	30	3.07	38	3.69	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.49	24	2.87	30	3.43	38	3.99	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.13	24	2.88	30	3.37	38	4.89	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.33	24	2.89	30	3.32	38	4.51	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.11	24	2.91	30	3.33	38	4.36	55				
1.32	9	1.48	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.27	24	2.91	30	2.96	38	4.06	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.29	24	2.94	30	3.19	38	4.29	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.24	24	2.96	30	2.41	39	4.28	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.05	18	2.07	21	2.31	24	2.97	30	2.44	39	4.45	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.06	18	2.07	21	2.39	24	2.97	30	2.47	39	4.68	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.06	18	2.07	21	1.71	25	2.13	30	2.50	39	4.39	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.07	18	2.07	21	1.83	25	2.47	30	2.52	39	4.65	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.07	18	2.08	21	1.88	25	2.80	30	2.59	39	4.07	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.08	18	2.08	21	1.89	25	3.05	30	2.59	39	4.38	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.08	18	2.08	21	1.92	25	2.50	30	2.60	39	3.83	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.08	18	2.08	21	1.94	25	2.63	30	2.62	39	4.30	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.09	18	2.08	21	1.95	25	2.69	30	2.62	39	3.20	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.09	18	2.08	21	1.97	25	2.82	30	2.64	39	4.66	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.10	18	2.08	21	1.98	25	2.88	30	2.65	39	4.09	55				
1.32	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.10	18	2.08	21	1.98	25	2.56	30	2.72	39	3.65	55				
1.33	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.10	18	2.08	21	1.99	25	2.56	30	2.73	39	4.45	55				
1.33	9	1.49	12	1.67	14	1.81	16	2.10	18	2.08	21	1.99	25	2.48	30	2.74	39	4.29	55				
1.33	9	1.49	12	1.67	14	1.82	16	2.10	18	2.08	21	2.01	25	3.09	30	2.80	39	4.59	55				
1.33	9	1.49	12	1.67	14	1.82	16	2.11	18	2.08	21	2.01	25	2.82	30	2.80	39	4.35	55				
1.33	9	1.49	12	1.67	14	1.82	16	2.11	18	2.08	21	2.01	25	2.79	30	2.82	39	4.33	55				
1.33	9	1.49	12	1.67	14	1.82	16	2.11	18	2.08	21	2.02	25	2.37	30	2.82	39	4.02	55				
1.33	9	1.49	12	1.67	14	1.82	16	2.17	18	2.08	21	2.02	25	2.21	30	2.83	39	4.24	55				
1.33	9	1.49	12	1.67	14	1.82	16	2.17	18	2.08	21	2.02	25	2.42	30	2.84	39	4.22	55				
1.33	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	2.19	18	2.09	21	2.03	25	2.82	30	2.84	39	3.63	55				
1.33	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	2.26	18	2.09	21	2.03	25	2.80	30	2.85	39	4.10	55				
1.33	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	2.09	18	2.09	21	2.04	25	2.80	30	2.86	39	4.32	55				
1.33	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	1.90	18	2.09	21	2.05	25	2.50	30	2.90	39	4.33	55				
1.34	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	1.89	18	2.09	21	2.05	25	2.75	30	2.90	39	4.49	55				
1.34	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	1.88	18	2.09	21	2.05	25	2.73	30	2.92	39	4.47	55				
1.34	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	1.86	18	2.09	21	2.05	25	2.82	30	2.92	39	3.98	55				
1.34	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	2.02	18	2.09	21	2.06	25	2.60	30	2.92	39	4.28	55				
1.34	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	1.92	18	2.09	21	2.06	25	2.63	30	2.92	39	4.16	55				
1.34	9	1.49	12	1.68	14	1.82	16	2.14	18	2.09	21	2.06	25	2.67	30	2.94	39	4.40	55				
1.34	9	1.50	12	1.68	14	1.82	16	1.78	18	2.09	21	2.07	25	2.88	30	2.99	39	4.68	55				
1.34	9	1.50	12	1.68	14	1.82	16	1.94	18	2.10	21	2.07	25	2.03	30	2.99	39	4.21	55				
1.34	9	1.50	12	1.68	14	1.82	16	1.71	18	2.10</													

IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI	IRI	QI
1.35	9	1.50	12	1.69	14	1.84	16	1.77	18	2.13	21	2.16	25	2.92	30	3.37	39	3.99	56				
1.35	9	1.50	12	1.69	14	1.84	16	2.02	18	2.13	21	2.16	25	2.74	30	3.38	39	4.75	56				
1.35	9	1.50	12	1.69	14	1.84	16	1.77	18	2.13	21	2.17	25	2.75	30	3.42	39	4.77	56				
1.35	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.92	18	2.13	21	2.17	25	2.74	30	3.42	39	4.51	56				
1.35	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.86	18	2.13	21	2.17	25	2.41	30	3.43	39	3.07	56				
1.35	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.89	18	2.14	21	2.17	25	2.79	30	3.48	39	3.65	56				
1.35	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.87	18	2.14	21	2.17	25	2.58	30	3.63	39	4.25	56				
1.35	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	2.02	18	2.14	21	2.18	25	2.67	30	3.70	39	4.15	56				
1.35	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.93	18	2.14	21	2.18	25	2.32	30	3.70	39	4.15	56				
1.35	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.97	18	2.14	21	2.18	25	2.70	30	2.94	39	4.39	56				
1.35	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.88	18	2.14	21	2.18	25	2.39	30	2.60	39	4.58	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.84	18	2.14	21	2.18	25	2.17	30	3.27	39	3.83	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.61	18	2.14	21	2.18	25	2.68	30	3.63	39	4.56	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.86	18	2.14	21	2.19	25	2.13	30	3.36	39	3.86	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.96	18	2.14	21	2.20	25	2.48	30	3.49	39	4.40	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.91	18	2.14	21	2.20	25	2.44	30	3.42	39	4.09	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.72	18	2.14	21	2.20	25	2.46	30	3.34	39	3.88	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.66	18	2.14	21	2.20	25	2.45	30	3.38	39	4.43	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.72	18	2.14	21	2.20	25	2.55	30	2.99	39	3.45	56				
1.36	9	1.51	12	1.69	14	1.84	16	1.76	18	2.14	21	2.21	25	2.92	30	3.11	39	4.29	56				
1.36	9	1.51	12	1.70	14	1.84	16	1.80	18	2.15	21	2.21	25	2.89	30	3.60	39	3.74	56				
1.36	9	1.51	12	1.70	14	1.84	16	1.74	18	2.15	21	2.21	25	2.58	30	3.25	39	4.16	56				
1.36	9	1.51	12	1.70	14	1.84	16	1.77	18	2.15	21	2.21	25	2.63	30	3.28	39	4.65	56				
1.36	9	1.51	12	1.70	14	1.84	16	1.78	18	2.15	21	2.21	25	2.74	30	3.50	39	5.01	56				
1.36	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.74	18	2.15	21	2.22	25	2.73	30	2.72	39	4.07	56				
1.36	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.92	18	2.15	21	2.22	25	2.41	30	3.45	39	4.28	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.72	18	2.15	21	2.22	25	2.88	30	2.88	39	3.95	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.62	18	2.15	21	2.22	25	2.43	30	3.54	39	4.52	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.89	18	2.15	21	2.23	25	2.38	30	3.58	39	4.35	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	2.00	18	2.15	21	2.23	25	2.78	30	2.53	39	4.17	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.70	18	2.15	21	2.23	25	2.47	30	3.22	39	4.38	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.90	18	2.15	21	2.23	25	2.56	30	2.52	39	4.81	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.93	18	2.15	21	2.23	25	2.48	30	2.85	39	4.23	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.91	18	2.15	21	2.23	25	2.70	30	3.43	39	4.62	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.97	18	2.15	21	2.23	25	2.29	30	3.29	39	4.34	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.85	16	1.92	18	2.16	21	2.23	25	2.52	30	3.42	39	4.25	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.86	16	1.57	18	2.16	21	2.23	25	2.79	30	3.22	39	5.18	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.86	16	1.83	18	2.16	21	2.24	25	2.95	30	2.94	39	4.68	56				
1.37	9	1.51	12	1.70	14	1.86	16	1.76	18	2.16	21	2.24	25	1.98	30	2.71	39	4.26	56				
1.38	9	1.51	12	1.70	14	1.86	16	1.95	18	2.16	21	2.24	25	2.30	30	3.45	39	4.39	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.96	18	2.16	21	2.24	25	2.26	30	3.36	39	4.25	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.84	18	2.16	21	2.25	25	2.76	30	3.62	39	4.58	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.86	18	2.16	21	2.26	25	2.75	30	3.32	39	4.56	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.69	18	2.16	21	2.26	25	2.64	30	3.22	39	3.69	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	2.04	18	2.16	21	2.26	25	2.54	30	3.31	39	3.95	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.94	18	2.16	21	2.26	25	2.74	30	3.22	39	4.11	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	2.02	18	2.16	21	2.26	25	2.64	30	3.05	39	4.41	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.87	18	2.16	21	2.27	25	2.45	30	3.37	39	3.12	56				
1.38	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.76	18	2.16	21	2.27	25	2.71	30	3.29	39	3.73	56				
1.39	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.88	18	2.16	21	2.27	25	2.65	30	3.19	39	3.65	56				
1.39	9	1.52	12	1.70	14	1.86	16	1.72	18	2.16	21	2.27	25	2.87	30	3.10	39	4.34	56				
1.39	9	1.52	12	1.71	14	1.86	16	1.88	18	2.16	21	2.27	25	2.49	30	3.66	39	4.38	56				
1.39	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.83	18	2.16	21	2.28	25	2.58	30	3.40	39	4.15	56				
1.39	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.97	18	2.16	21	2.28	25	2.75	30	3.48	39	4.57	56				
1.39	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.91	18	2.16	21	2.28	25	2.44	30	3.05	39	4.14	56				
1.39	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.91	18	2.16	21	2.28	25	2.79	30	2.87	39	4.66	56				
1.39	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.76	18	2.16	21	2.28	25	2.83	30	2.75	39	4.72	56				
1.39	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.92	18	2.16	21	2.28	25	2.73	30	2.60	39	4.48	56				
1.40	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.59	18	2.17	21	2.28	25	2.46	30	2.68	39	4.59	56				
1.40	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.95	18	2.17	21	2.28	25	2.76	30	2.75	39	4.30	56				
1.40	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.80	18	2.17	21	2.28	25	2.75	30	3.39	39	4.67	56				
1.40	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.90	18	2.17	21	2.29	25	2.29	30	2.65	39	4.22	56				
1.41	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.80	18	2.17	21	2.29	25	2.67	30	3.39	39	3.40	57				
1.41	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.82	18	2.17	21	2.29	25	2.76	30	3.37	39	4.30	57				
1.41	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.55	18	2.17	21	2.29	25	2.45	30	2.64	39	4.42	57				
1.41	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.78	18	2.17	21	2.29	25	2.47	30	2.87	39	4.82	57				
1.41	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.91	18	2.18	21	2.29	25	2.58	30	3.16	39	5.13	57				
1.42	9	1.52	12	1.71	14	1.87	16	1.89	18	2.18</													

APÊNDICE D

Descrição do equipamento tipo Dipstick utilizado nesta pesquisa

O perfilômetro manual tipo Dipsick utilizado no âmbito desta pesquisa foi desenvolvido no Brasil pela empresa Ciber métrica. Tal equipamento tem o nome comercial de Ciber PP, sendo que as duas letras “P” significam: perfilômetro portátil.

O desenvolvimento de tal equipamento no Brasil foi possível a partir da caducidade da patente norte-americana do equipamento Dipstick, produzido pelo grupo Face Companies. A principal diferença do equipamento nacional para o equipamento importado está na distância entre os centros dos pés de apoio circulares, que no caso do equipamento Dipstick é de 1 pé (30,48 cm) e no caso do Ciber PP, propositalmente é de 25 cm, para que se pudesse trabalhar com um divisor de metro.

O princípio de funcionamento do equipamento Ciber PP é exatamente o mesmo do equipamento original. O equipamento consiste essencialmente em um sensor de inclinação de precisão, um sistema eletrônico de processamento da leitura desse sensor e um dispositivo eletrônico para visualização e a gravação das leituras que funciona em conjunto com um software que permite a execução de uma medição contínua de perfis longitudinais.

Este tipo de perfilômetro pode ter seu funcionamento verificado no campo mesmo, e tudo de forma bastante simples. O resultado de cada medição de um equipamento desses nada mais é que a diferença de cota, em décimos de milímetros, entre os pés de apoio dianteiro e traseiro.

Sendo assim, para verificar se o equipamento funciona, basta posicioná-lo em uma superfície lisa e efetuar uma leitura da inclinação dela. Após isto, basta usar alguns calços metálicos ou de vidro, de superfície também plana e com espessura conhecida para verificar se o instrumento calcula corretamente sua espessura.

No caso do equipamento utilizado, todas as medidas de campo foram precedidas de uma verificação do equipamento com o uso de calços cujas espessuras foram medidas com micrômetro calibrado por laboratório pertencente à RBC.

A resolução interna do equipamento Ciber PP, nas medidas de elevação é de 0,02 mm. O registro dos perfis longitudinais é realizado em décimos de milímetros.

Tal equipamento além de permitir a gravação do perfil longitudinal para posterior transferência a um microcomputador para análise, ainda calcula simultaneamente com a medição o valor dos índices IRI (m/km) e QI (cont/km).

As figuras abaixo ilustram o equipamento e sua tela operacional, onde estão dispostas as seguintes informações: número de medidas já executadas, em relação o número de medidas programadas, a distância percorrida (m), o valor do IRI (m/km) e o valor do QI (cont/km).

VITA

RODRIGO MALUF BARELLA nasceu em São Paulo em 11 de Janeiro de 1975. Estudou durante o primário, ginásio e colegial no colégio alemão Benjamin Constant, em São Paulo.

Iniciou sua primeira graduação na Faculdade de Engenharia Industrial em 1992. O curso de engenharia civil da FEI tem ênfase na área de transportes, o que levou ao desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso a respeito de gerência de pavimentos. Graduiu-se em engenharia civil em 1997.

Em 1996, começou a trabalhar na empresa Solotest, exercendo atividades de desenvolvimento de produtos, assistência técnica, atendimento a clientes, contatos internacionais e a atualização tecnológica da empresa.

No segundo semestre de 1996, iniciou a faculdade de direito no período noturno, que foi finalizada em 2001.

Em 1998 iniciou seus estudos na pós-graduação (mestrado) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. No primeiro semestre de 2001, obteve o título de Mestre em Engenharia pela EPUSP, com a dissertação intitulada: "Inventário de Defeitos Superficiais de Pavimentos com o Auxílio de Imagens Digitais", orientada pelo Prof. José Tadeu Balbo.

Ainda em 2001 iniciou o Mestrado Profissional em Administração de Empresas da Fundação Getúlio Vargas – FGVSP. Em meados de 2003, obteve o título de Mestre em Administração de Empresas pela FGVSP, com a dissertação intitulada: "Concessão de Rodovias: Uma Análise Crítica", orientada pelo Prof. Michael Paul Zeitlin. No início de 2004 realizou intercâmbio na *London Business School*, Inglaterra, por 3 meses, visando complementar o curso da FGVSP.

Em 2002 foi aceito no curso de curso de Doutorado da EPUSP, tendo iniciado estudos relacionados à avaliação de irregularidade de pavimentos.

Em 2005, com base nos resultados preliminares das pesquisas de doutorado, fundou em sociedade a empresa Cibernétrica, dedicada principalmente a avaliação de irregularidade de pavimentos.