



**Relatório Final - TRIUNFO|CONCEPA**

**Compatibilização dos valores de IRI e QI para correspondência de nível de  
irregularidade em rodovias tipo freeway**

Maio de 2011



**Preparado por: Rodrigo Barella**

---

Rodrigo Barella

---

A CIBERMÉTRICA considera que o conteúdo exposto neste relatório pode ser considerado apropriado até a data de sua edição, levando em consideração as mudanças que o pavimento sofre ao longo do tempo. Lembre-se que, os tópicos referenciando normas e/ou legislações devem ser sempre verificados para a sua versão mais atual.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4</b>
1.1 Descrição da Pesquisa .....	4
1.2 Objetivos .....	5
1.3 Justificativas.....	5
1.4 Estrutura da Pesquisa.....	6
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Os anos 80 e os índices de irregularidade atuais .....	23
2.2 Os índices que representam a irregularidade de um pavimento .....	39
2.3 O cálculo dos índices de irregularidade QI e IRI a partir de um perfil longitudinal.....	44
2.4 A verificação dos modelos atuais de correlação entre IRI e QI.....	45
2.5 A proposição de um novo modelo de correlação .....	47
<b>3. MÉTODO.....</b>	<b>50</b>
<b>4. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Descrição da Pesquisa

O presente relatório de pesquisa foi desenvolvido pela empresa Ciber métrica juntamente com a CONCEPA e é um dos produtos financiados através dos RDT's – Recursos de Desenvolvimento Tecnológico. A pesquisa foi iniciada no segundo semestre de 2010 e está agora sendo apresentado em sua versão final, o relatório contém todo o subsidio teórico para a pesquisa proposta, que além de justificá-la, permite concluir todos os cálculos dos índices de irregularidade que foram gerados pelos processamentos e reproprocessamentos dos dados históricos de irregularidade que foram medidos.

A demanda do estudo de compatibilização entre índices de irregularidade é hoje realidade para que se possam adequadamente avaliar diversos tipos de pavimentos e tipos de rodovias de uma maneira homogênea, sem que haja discrepância dos valores limitados para condições adequadas de conforto ao usuário e o valor medido pelas diferentes metodologias existentes.

Considerando-se que os órgãos e agências reguladoras de rodovias brasileiras nem sempre contemplam o mesmo índice - alternando entre QI - Quociente de Irregularidade e IRI - *International Roughness Index* - é imprescindível que se conheçam os aspectos de suas equivalências, se possível, e a que condicionantes tal equivalência está restrita. Para tanto, a pesquisa foi proposta com a finalidade de deflagrar a correspondência de um IRI adequado ao índice QI hoje limitado contratualmente a Concessionária CONCEPA.

O desenvolvimento de diversos modelos de previsão de desempenho de pavimentos, muito utilizados em projetos de restauração, ou mesmo pavimentos novos, utilizam a irregularidade do pavimento como parâmetro de entrada. Assim, extensos bancos de dados necessários à calibração de modelos, frequentemente requer que sejam utilizados correlações para equivaler os índices registrados. Tipicamente, no Brasil, IRI é muitas vezes referido como sendo equivalente ao

número de contagens por km determinado pelo QI a uma razão de treze avos ( $IRI = QI/13$ ).

## 1.2 Objetivos

Com base nas características dos perfis longitudinais encontrados nos pavimentos sob concessão à CONCEPA, a presente pesquisa teve como objetivo determinar qual é o índice de irregularidade IRI mais correto que corresponderia ao valor do índice  $QI = 35$  cont/km, encontrado no contrato de concessão.

## 1.3 Justificativas

Este estudo, avaliou especificamente para os trechos rodoviários administrados pela CONCEPA se há uma correlação para estes parâmetros, qual então seria a melhor correlação, haja visto que estes são fortemente influenciados pela geometria da via, principalmente variação de perfil longitudinal - raios de concordância, existência de obras de arte especial, a resolução com que o parâmetro é medido, o tipo de equipamento, entre outros. Este estudo mostra-se uma importante ferramenta também para as análises de monitorações de pavimento que podem inadvertidamente se valer de correlações entre os índices IRI e QI inapropriados, muitas vezes limitando o índice em níveis equivocados, ou seja, a que IRI corresponde um QI máximo de 35 contagens/km? Este estudo responde a este questionamento avaliando um extenso banco de dados da rodovia BR-290/RS em conjunto com uma análise paramétrica de uma avaliação estendida realizada para determinação do que seria o adequado parâmetro que afeta o rolamento suave dos pavimentos.

Analisando tecnicamente este estudo é pertinente, uma vez que os índices IRI e QI levam em conta um espectro diferente de comprimentos de onda, ou seja, eles são afetados diferentemente e não linearmente pelas diversas "ondulações" que afetam o rolamento suave dos pavimentos.

## 1.4 Estrutura da Pesquisa

O relatório final da pesquisa está organizado da seguinte forma:

- Neste primeiro capítulo, apresenta-se a descrição da pesquisa, seguida dos objetivos e justificativas.
- No segundo capítulo, a partir do referencial teórico, são comentados temas que envolvem o estudo, apontando bem as diferenças entre os dois índices que terminam por não permitir uma correlação genérica entre eles, que apresente baixa dispersão dos resultados.
- No terceiro capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada, o método escolhido para o estudo, a forma de coleta de dados e os procedimentos efetuados.
- No quarto capítulo, são apresentados e analisados os resultados da pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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 2.1.



**Figura 2.1** – 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.

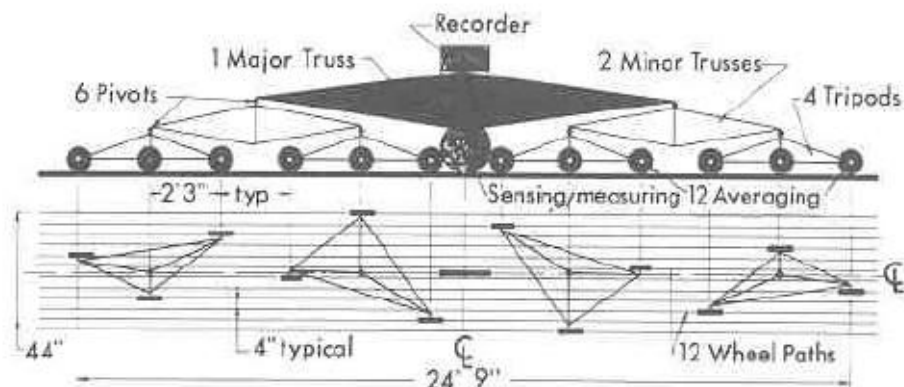
Alguns dos problemas do Viagraph, como por exemplo, o desgaste da régua provocado pelo arraste, foram superados com a adição de duas rodas ao equipamento. O que aconteceu neste caso é que somente com dois pontos de apoio nas extremidades da régua, a resposta do equipamento tornou-se variável de acordo 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 2.2 e 2.3), o *Rolling Straightedge*, o equipamento inglês conhecido como perfilógrafo RRL, o perfilógrafo *Ames* e o perfilógrafo Califórnia.



**Figura 2.2** – Desenho esquemático do Perfilógrafo Rainhart. Fonte: Perera e Kohn (2002a).



**Figura 2.3** – 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).

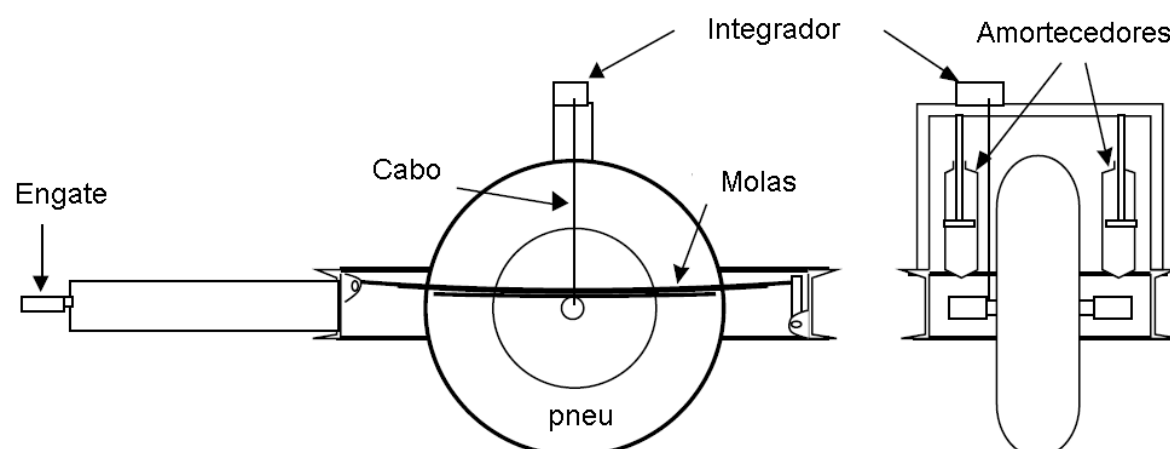
Seguindo esta linha, Perera e Kohn (2002b) revelam que em 1925 foi lançado o equipamento que se tornou a evolução do Via-log. Trata-se do equipamento *BPR Roughometer*, que ganhou a configuração mostrada na figura 2.5 em 1941, segundo

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 2.4** – 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*.

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*.

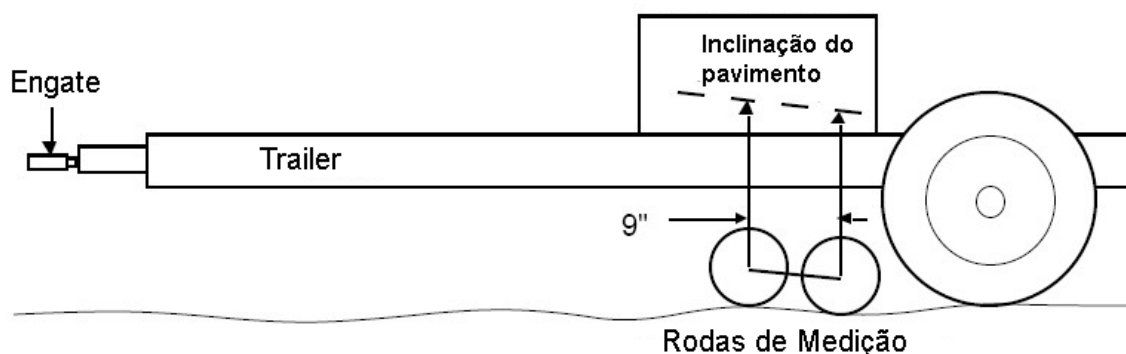
O estudo concebido e patrocinado pela *American Association of Highway State Officials* visava determinar e entender o desempenho de estruturas de pavimentos com camadas de características conhecidas sob a ação de cargas conhecidas, deslocando-se em frequências controladas. A ação do tráfego sobre a 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 Sivaneswaran (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 2.5 traz um desenho deste perfilômetro.



**Figura 2.5** – 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.

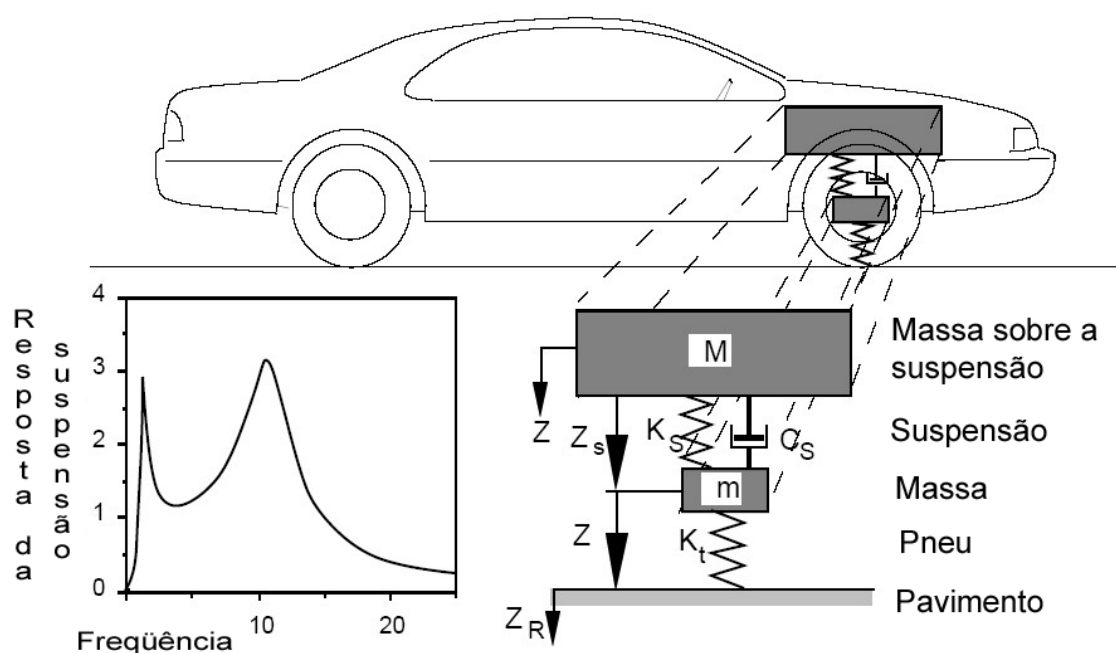
O princípio de funcionamento é muito similar ao dos perfilômetros inerciais fabricados e usados atualmente, com a diferença principal que o modelo original usava, no veículo de medição, duas rodas apalpadoras para a coleta dos dados referentes à superfície do pavimento, trabalho que atualmente é feito 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 2.6, 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 2.6** – Esquema de um quarto de carro, com o respectivo gráfico de resposta da suspensão a diferentes frequências. Fonte: Sayers e Karamihis (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 claro<sup>1</sup>.

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.

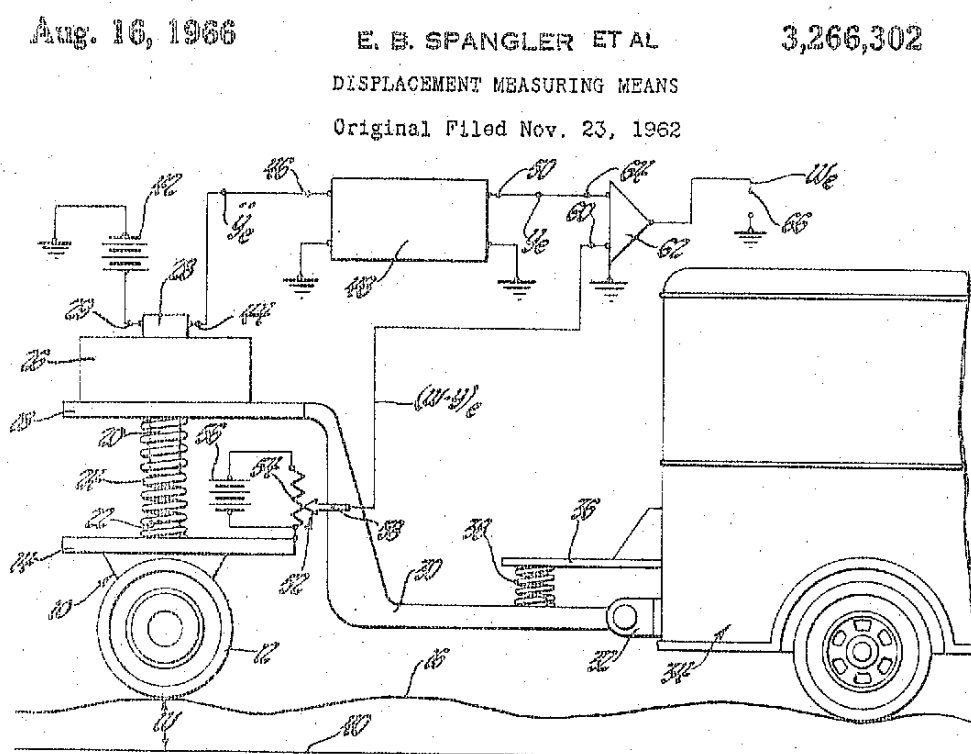
Uma consulta ao *site* do órgão do governo dos Estados Unidos que registra as patentes americanas revelou que o invento de Spangler e Kelley foi patenteado em 29 de agosto de 1966 sob o número 3.266.302, sendo que os inventores deram entrada no pedido no dia 23 de novembro de 1962. A figura 2.7 contém 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 2.8 contém o desenho presente na segunda patente.

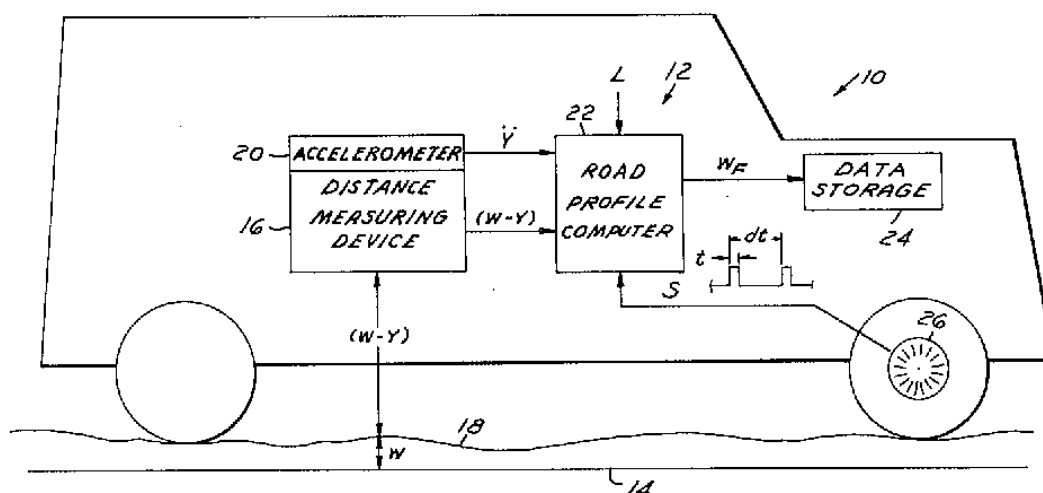
---

<sup>1</sup> 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.

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



**Figura 2.7** – Desenho original presente no primeiro pedido de patente dos EUA de um perfilômetro inercial, sob o número 3.266.302.



**Figura 2.8** – Desenho original presente no segundo pedido de patente dos EUA de um perfilômetro inercial, sob o número 4.422.322.

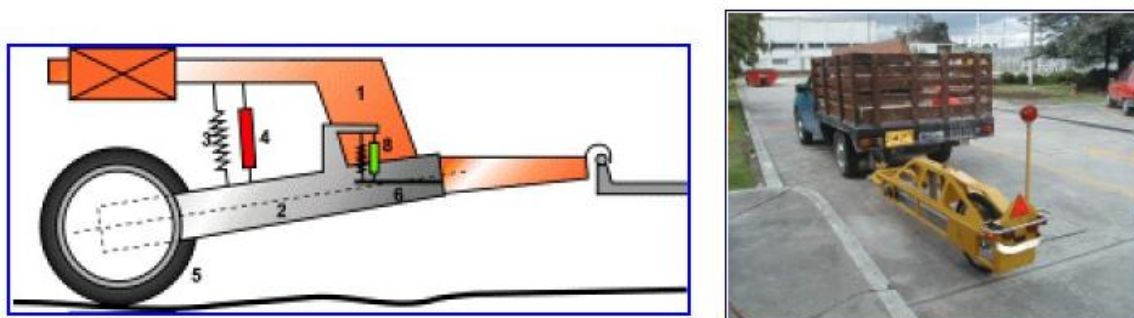
O APL foi desenvolvido pelo tradicional LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) como um equipamento rebocável de uma roda só, capaz de gerar como resultado a influência do perfil longitudinal do pavimento sobre o equipamento, segundo Sayers et al. (1986a) e Caicedo et al. (2003).

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

## 2.1 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 2.10.

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 2.10** – 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\*, índice<sup>2</sup> 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

---

<sup>2</sup> Os dados originais de custos da PICR que envolvem irregularidade longitudinal foram obtidos com base no QI\*

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 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.

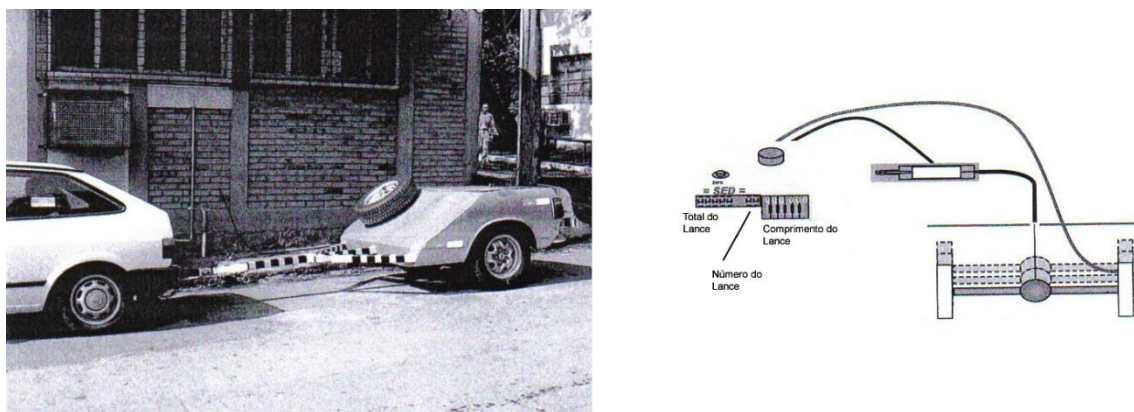
O equipamento ficou conhecido como Integrador IPR/USP e foi ele o precursor nacional de outros equipamentos destinados à medida da irregularidade. Em síntese, as características funcionais deste equipamento não o distanciavam dos

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 2.11 ilustra tais equipamentos.



**Figura 2.11** – 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 – GEIPOP 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 Sayers et al. (1986a), 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: RARS<sub>80</sub>.

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 RARS<sub>80</sub>, 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 RARS<sub>80</sub> 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 RARS<sub>80</sub> 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 RARS<sub>80</sub> 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:

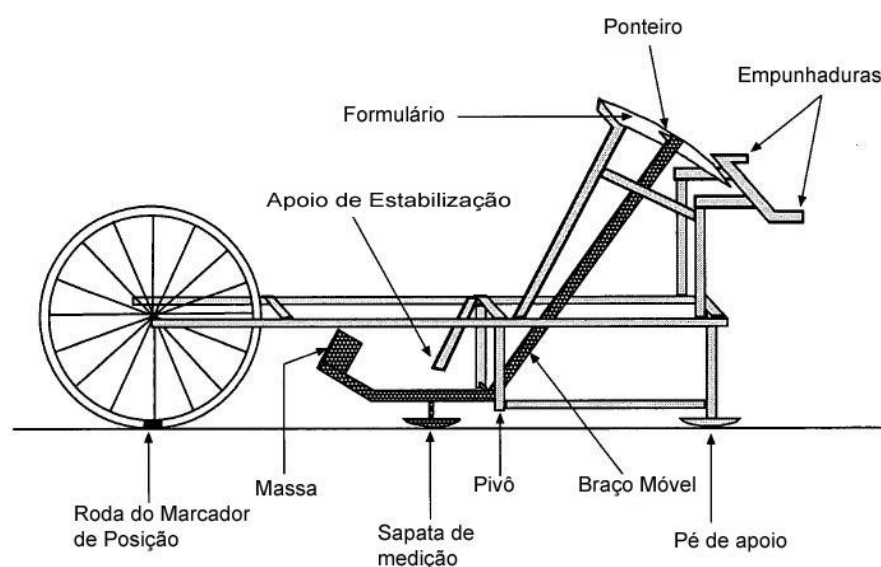
- Promover um encontro informal por ano;
- Trocar idéias e informações de maneira informal;
- Promover treinamentos;
- Ser um fórum tanto para os operadores de perfilômetros, quanto para outros interessados;
- Ser um fórum de discussão para pesquisas em andamento;
- Manter o foco nas últimas iniciativas 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 2.12** – Desenho esquemático do equipamento Merlin. Fonte: Cundill (1996).

Com um desenho parecido com o de uma bicicleta, conforme ilustra a figura 2.12, 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 2.13. 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 2.13** – 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 2.14.

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 2.14** – 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, muito embora os medidores do tipo resposta já tenham praticamente desaparecido de cena, tendo sido substituídos pelos perfilômetros inerciais laser.

## 2.2 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 2.15), 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.

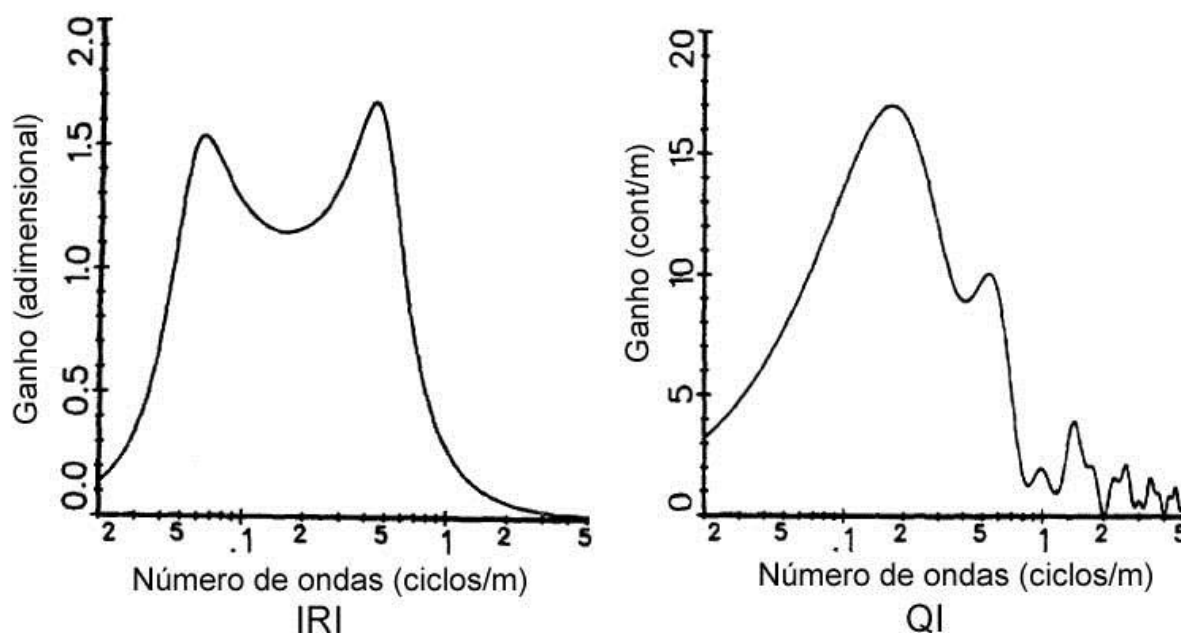
Diagramas de ganho de filtros, conforme evidencia a figura 2.15, não são traçados normalmente em termos de frequência e amplitude das ondas, pois se tornaria um

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 2.15 em conjunto, é possível verificar que as faixas de comprimentos de onda de inclinações mais importantes para ambos os índices não são idênticas, embora possa ser extraída alguma semelhança. São justamente essas diferenças que causam divergências em qualquer modelo de correlação direta que se pretenda fazer entre eles, conforme restou demonstrado em BARELLA (2007).



**Figura 2.15** – 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).

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

Ambos os índices objeto deste estudo são calculados a partir de perfis longitudinais. Não será abordado aqui o cálculo dos índices, pois a literatura é bastante abundante a este respeito, portanto mencionaremos as normas algumas peculiaridades apenas. Mais detalhes e exemplos de cálculo podem ser encontrados em BARELLA (2007).

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 vigentes aqui e nos EUA respectivamente, os índices de irregularidade QI e IRI, que sintetizarão em um número apenas a condição de rolamento de determinado trecho de pavimento.

O QI é calculado partindo-se de um perfil longitudinal medido de 50 em 50 centímetros. O método de cálculo do QI está previsto na norma brasileira DNER ES-173/86, sendo que seu cálculo final é dado pela fórmula:

$$QI = -8,54 + 6,17.VA_{1,0} + 19,38.VA_{2,5} \quad (2.1)$$

Onde  $VA_{1,0}$  e  $VA_{2,5}$  são os valores das acelerações verticais médias quadráticas para cada um dos comprimentos de base  $b = 1,00$  m e  $b = 2,50$  m

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).

É importante lembrar que o IRI 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.

No caso do IRI, as normas recomendam que ele seja calculado a partir de um perfil com no máximo 25 cm de espaçamento entre os pontos. O algoritmo do IRI em si permite o cálculo do índice a partir de qualquer espaçamento uniforme.

## **2.4 A verificação dos modelos atuais de correlação entre IRI e QI**

BARELLA (2007) avaliou os erros que podem estar embutidos nos modelos de correlação mais comumente usados pelos engenheiros rodoviários brasileiros a partir dos resultados do QI e do IRI calculados (conforme os algoritmos originais) de 37 perfis longitudinais com 200 metros de comprimento, medidos de 50 em 50 cm. Os perfis utilizados apresentaram uma grande diversidade de valores de irregularidade. Os modelos verificados estão dispostos a seguir:

$$IRI = \frac{QI + 10}{14} \quad (2.2)$$

$$IRI = \frac{QI^*}{13} \quad (2.3)$$

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 (2.2), 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 (2.3) 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 (2.2) 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 resultados de BARELLA (2007) para essa verificação, ainda que ela tenha sido executada com poucos trechos, demonstram bem os problemas de tais modelos: o modelo (2.2) chegou a adicionar às conversões um erro superior a 50%; o modelo (2.3), embora melhor que o anterior, também não pôde ser considerado adequado por ter apresentado erros superiores a 20%, principalmente para os valores mais elevados de irregularidade.

Esses resultados levaram a um aprofundamento da pesquisa com um número muito maior de segmentos para verificar se era possível se estabelecer algum outro modelo de correlação entre os dois índices.

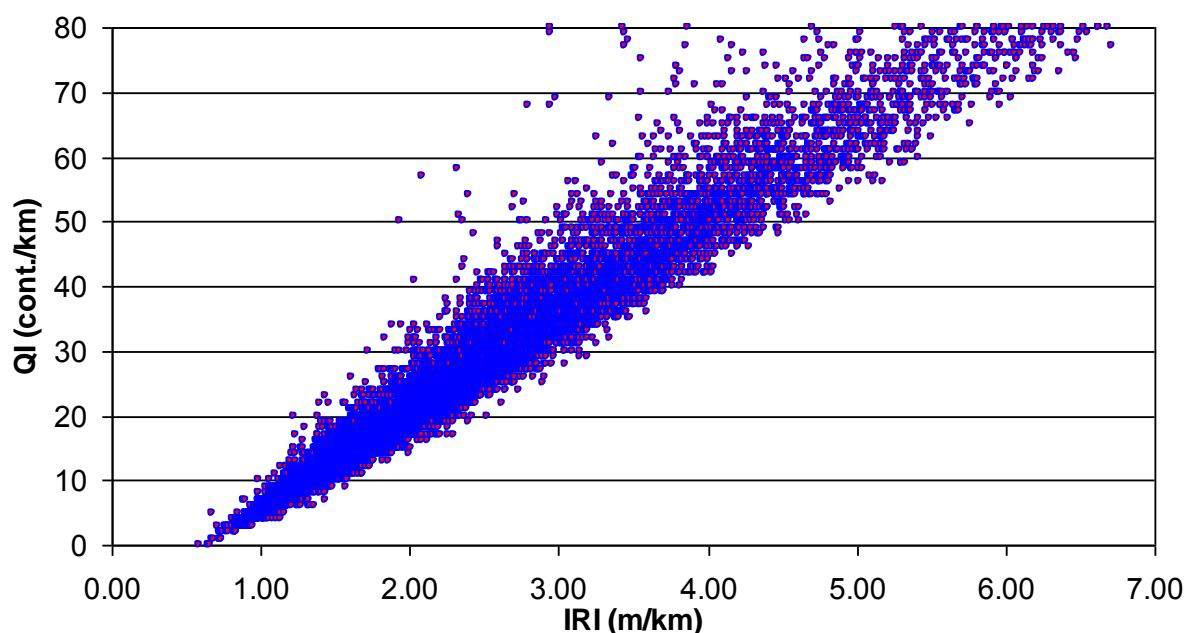
## **2.5 A proposição de um novo modelo de correlação**

Usando-se como subsídio os resultados discutidos no item anterior que evidenciam as falhas dos modelos de correlação mais usados atualmente para se converter o IRI em QI e vice-versa, aliado ao fato de que o número de segmentos utilizados no IRRE para se chegar ao modelo (2.2) ter sido reduzido, BARELLA (2007) reuniu 4000 km de perfis de trilhas de roda de diversas rodovias e calculou os índices QI e IRI para cada um dos trechos de 200 metros.

Ao todo foram usados pouco mais de 20.900 perfis longitudinais de 200 metros, cujas elevações foram registradas a cada 50 cm, em décimos de milímetros. 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.

O QI dos trechos variou de -1 a 80 cont/km e o IRI variou de 0,59 a 6,71 m/km, sendo que a figura seguinte ilustra a relação gráfica obtida. Lembra-se que o QI médio não variou acima de 33 cont/km.



**Figura 2.16** – Representação cartesiana de todos os pares de QI x IRI calculados.

Após a aplicação de ferramentas estatísticas diversas para tentar trabalhar os dados obtidos, BARELLA (2007), chegou a um modelo de correlação abaixo:

$$QI = 15,42 \cdot IRI - 10 \quad (2.4)$$

O modelo deve, em 95% das vezes, apresentar um valor que pode na realidade ser 20% maior ou 20% menor.

A principal conclusão e legado deste extenso estudo da relação entre os índices de irregularidade IRI e QI não foi 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.**

O uso incorreto destas correlações poderia levar a demanda de intervenção em um pavimento ainda que não houvesse a necessidade iminente para tanto. Quando se



consideram extensas malhas rodoviárias cujo valor de manutenção são bastante elevados, uma cautelosa análise é necessária para que não haja ônus a nenhuma das partes interessadas, seja da parte responsável pela manutenção, ou da fiscalizadora, ou, ainda, mais importante, do usuário da via.

Em adição o emprego de índices correlacionados, por exemplo, para a gerência de uma grande malha pavimentada também é fortemente afetado. Dá para se imaginar quantas decisões erradas e quantos milhões de reais em prejuízos dados ruins poderiam causar o uso incorreto de uma parametrização inadequada.

Embora o modelo de Barella (2007) 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 o banco de dados do segmento em análise. Pelo perfil longitudinal da rodovia ser peculiar, a formulação apresentada varia.

Embora o modelo de BARELLA (2007) 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.

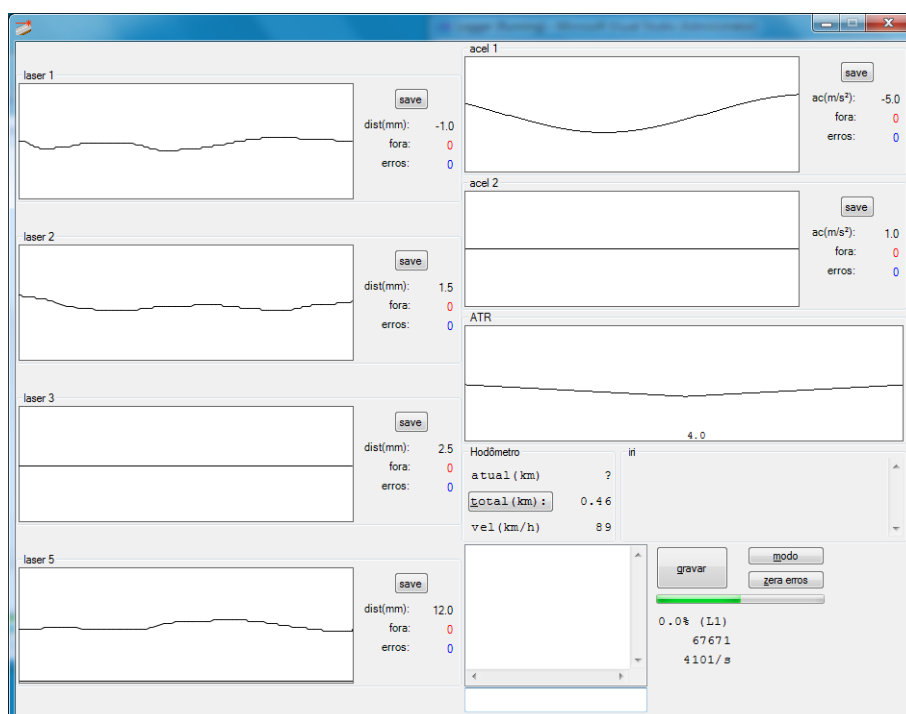
### 3. MÉTODO

Conforme relacionado no cronograma e no método propostos para esta pesquisa, foi realizado um novo levantamento de todos os perfis longitudinais das faixas de rolamento sob concessão da CONCEPA com a utilização de equipamentos mais precisos do que o tradicionalmente utilizado para uma calibração paramétrica do programa utilizado, assim como foram acessados e reprocessados os perfis longitudinais dos levantamentos de irregularidade dos anos de 2007, 2008, 2009 e 2010.

O equipamento utilizado para se fazer o novo levantamento esta apresentado na figura 3.1, seu princípio de funcionamento não é complexo: o veículo que contém o equipamento trafega sobre o pavimento e um computador registra concomitantemente: o deslocamento longitudinal, a altura do veículo até o pavimento e a aceleração vertical do mesmo (figura 3.2).

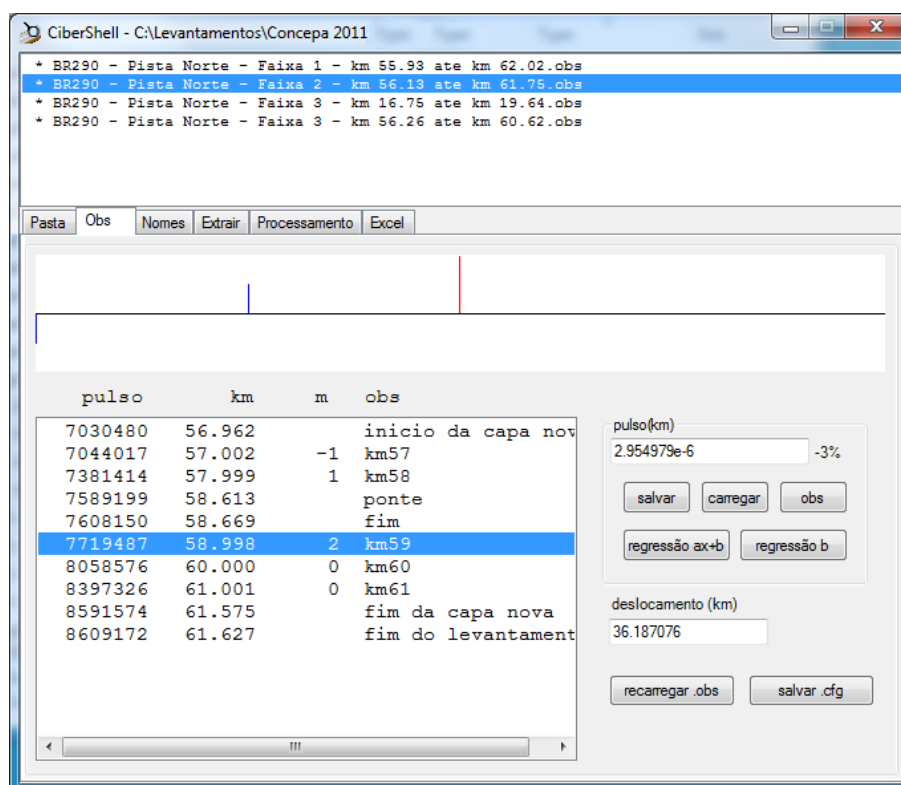


**Figura 3.1** – Equipamento utilizado para realização do novo levantamento.

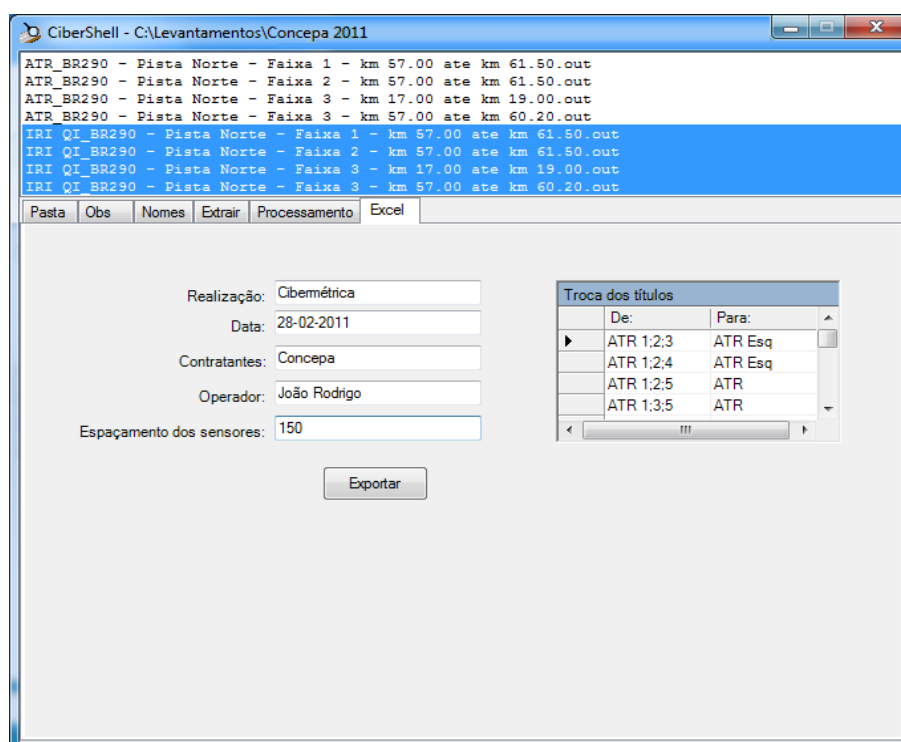


**Figura 3.2** – Dados sendo registrados no andamento do levantamento.

Simultaneamente, o sistema processa os dados para que a aceleração vertical registrada seja transformada em deslocamento vertical. A “transformação” da medida da aceleração em deslocamento vertical é feita através de duas integrações sucessivas. Com o valor do deslocamento calculado, consegue-se traçar o perfil para medição das irregularidades, o processamento é feito através de *software*, onde o mesmo está apresentado nas figuras 3.3 e 3.4.



**Figura 3.3 – Software para processamento dos dados.**



**Figura 3.4 – Software para processamento dos dados.**

Diferentemente do estudo realizado por BARELLA (2007), no qual foram usados perfis com o espaçamento de 50 cm tanto para o cálculo do IRI quanto para o

cálculo do QI, neste estudo visando atender as duas normas vigentes, foram calculados para cada segmento de 200 metros um perfil com espaçamento de 50 centímetros para o cálculo do QI e outro perfil com espaçamento de 25 centímetros para o cálculo do IRI.

Com base nos perfis longitudinais destes 5 anos, foram então calculados o QI e o IRI para cada trilha de roda de cada segmento, independentemente.

A massa de dados totalizou pouco mais de 37500 mil pares (IRI x QI).

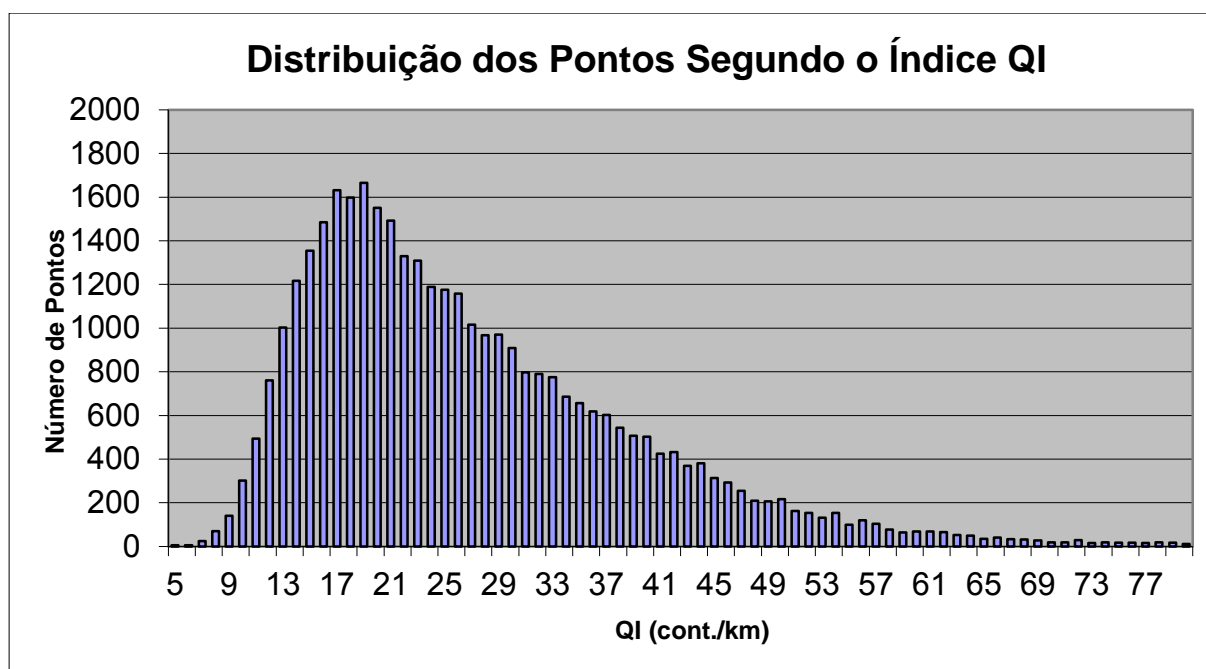
As principais observações feitas em campo durante os levantamentos reprocessados e realizados foram analisadas, para que se pudesse excluir pares com dados que pudessem não representar perfis corretos de pavimentos. Foram subtraídos pontos referentes à paradas na pista, umidade, objetos da pista, sujeira, desvios, saídas, ultrapassagens, etc.

Após tal análise restaram 36.263 pares de valores de QI e IRI, ambos referentes aos mesmos segmentos de 200 metros. Nessa massa de dados restante o QI variou de 4,6 a 250,2 cont/km e o IRI variou de 0,97 a 9,19 m/km.

Foi realizada em seguida uma análise estatística similar àquela desenvolvida por BARELLA (2007), que resumidamente consistiu em arredondar os dados do QI visando eliminar a casa decimal para que fosse possível determinar a variação dos valores do IRI para cada valor inteiro de QI.

Como foi verificado que os valores de QI acima de 80 cont/km eram muito poucos, eles também foram cortados da análise, pois as médias de IRI para cada QI em tais valores não seriam representativas. Restaram para esta análise inicial 36.137 pares de pontos.

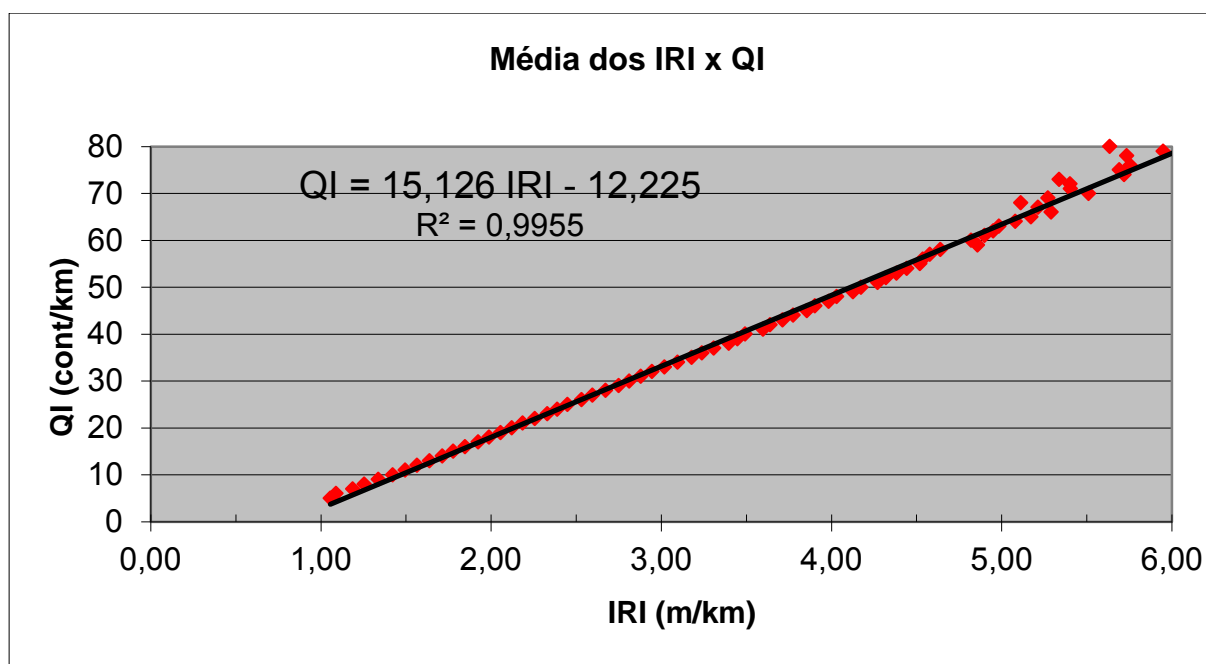
Em seguida, calculou-se para cada valor de QI arredondado entre 5 e 80 cont/km, as seguintes estatísticas referentes aos valores do IRI: mediana, primeiro quartil, o terceiro quartil, o mínimo, o máximo, o máximo menos o mínimo, o coeficiente de variação, a média, o desvio padrão e a quantidade de valores de IRI referente a cada QI arredondado.



**Figura 3.5** – Distribuição da quantidade de segmentos de 200 m em função do QI.

O gráfico da figura 3.5 representa a distribuição da quantidade de medidas observadas em cada valor arredondado de QI, entre 5 e 80 m/km. Como pode ser observado há um número substancial de medidas para os valores de QI entre 10 e 45 cont/km.

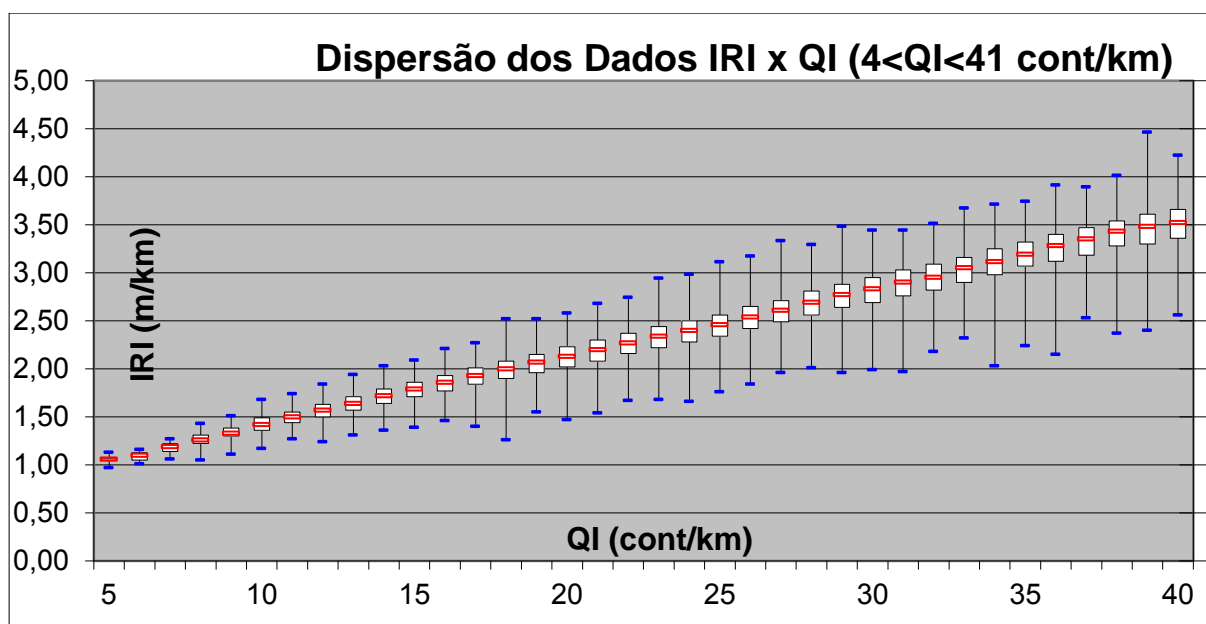
A figura 3.6 ilustra o alinhamento existente entre os valores médios de IRI para cada unidade de QI e inclui a regressão linear desta relação.



**Figura 3.6** – Representação gráfica e regressão linear (média do IRI por valor de QI)

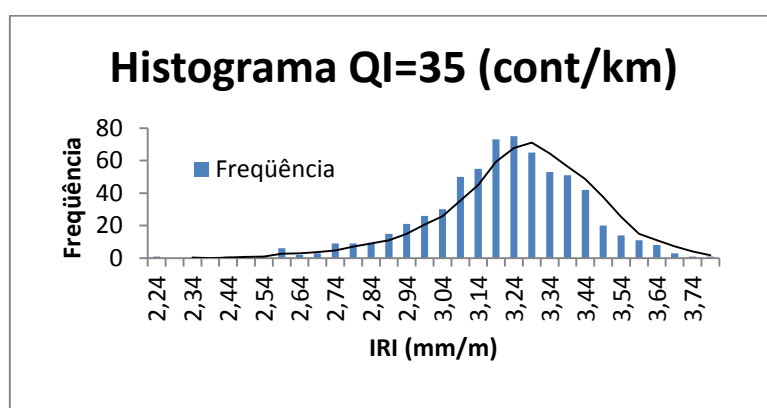
É possível observar uma pequena variação entre a regressão linear obtida por BARELLA (2007), entretanto a tendência e o alinhamento são muito semelhantes, o que valida inclusive o estudo anterior com um base de dados completamente diferente.

O gráfico tipo *box plot* que concentra diversas das informações estatísticas levantadas também mostra resultados muito similares aos da pesquisa citada e permite a mesma conclusão de que existe uma grande variação de valores de IRI para cada valor de QI, muito embora possa ser observada uma concentração maior ao redor do valor médio do IRI.



**Figura 3.7** – Gráfico *box plot* da variação do IRI em função de cada valor de QI, para QI < 41 cont/km.

Para uma análise mais pragmática, cabe a determinação do IRI equivalente ao valor limite da Concessionária para a irregularidade longitudinal, QI = 35 cont/km. Assim, foi levantado o histograma dos valores de IRI (figura 5), agrupados em faixas de 0,05 m/km, em que o valor de QI arredondado foi igual a 35 cont/km.



**Figura 3.8** – Histograma dos valores de IRI para QI = 35 cont/km.

O histograma evidencia as mesmas conclusões da pesquisa anterior que validam o cálculo da média da figura 3.6, vez que a linha de tendência incluída por meio de



média móvel demonstra que a distribuição dos valores do IRI para um mesmo valor de QI segue uma distribuição próxima da normal.

A análise estatística dos 656 valores de IRI que geraram um valor de QI arredondado igual a 35 cont/km, revela os seguintes resultados:

<i>QI = 35 cont/km</i>	
Média	3,179771341
Erro padrão	0,008324221
Mediana	3,19
Modo	3,19
Desvio padrão	0,213204076
Variância da amostra	0,045455978
Intervalo	1,5
Mínimo	2,24
Máximo	3,74

Em uma primeira análise, pode-se afirmar que o valor justo de IRI que representa nos segmentos de perfis longitudinais de 200 metros, o valor inteiro de QI = 35 cont/km, seria o valor médio de 3,18 m/km.

Com esse dado em mãos, passamos ao segundo método de análise proposto, que foi de se verificar em toda a série de dados levantada, com base no QI original, não arredondado para um valor inteiro, o número de pares ordenados que conteria valores de QI maiores que 35,0 cont/km. Em seguida, organizando-se a série de dados pelo valor do decrescente do IRI, contando o mesmo número de pares ordenados, chega-se ao valor do IRI justo, ou seja, o IRI que deixa o mesmo número de segmentos fora do limite estabelecido.

Organizou-se então os 36.263 pares ordenados originais por ordem de QI e em seguida foi verificado que 8.003 pares possuíam valores de QI maiores ou iguais a 35,1 cont/km.

Em seguida, organizou-se os mesmos pares em ordem decrescente de IRI e contou-se 8.003 pares para se chegar então ao par de número 8.004, cujo valor de IRI também foi igual a 3,18 m/km.

## CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Como já explicitado, após as análises e estudos com os dados dos levantamentos, pode-se inferir que o índice de irregularidade IRI que corresponde ao valor do índice QI = 35 cont/km é de 3,18 m/km.

O primeiro método validou o segundo e vice-versa, não deixando dúvidas portanto, que para os pavimentos medidos, com base nos milhares de segmentos de perfis longitudinais analisados o valor de IRI de 3,18 m/km representa adequadamente o valor de QI de 35 cont/km, podendo portanto ser utilizado como um índice de equivalência. Isto auxilia na interpretação das monitorações efetuadas pela Concessionária quando em análise comparativa a outros pavimentos cuja medição da irregularidade é feito com uso do IRI. Da mesma forma, facilita o uso de modelos internacionais já desenvolvidos para a análise do desempenho de pavimentos embasados no índice internacional.

A conclusão acima não quer dizer que tal relação permanecerá fixa por tempo indefinido, pois diferentes conformações de irregularidades podem alterar a relação com tempo, visto que os índices se comportam de forma diferente em relação aos diferentes comprimentos de onda que compõem a irregularidade de um pavimento. Também é importante salientar que o valor correspondente de IRI determinado nesta pesquisa não pode ser estendido a outras rodovias sem que um estudo individualizado como este seja realizado.

## REFERÊNCIAS

AHLIN, K.; GRANLUND, J. **Calculation of Reference Ride Quality, Using ISO 2631 Vibration Evaluation**. 36<sup>th</sup> 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/RPUGPresentationspdf/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. **Contribuição para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetros Inerciais.** Tese (Doutorado) apresentada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

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. **Contribuição para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetros Inerciais.** Tese (Doutorado) apresentada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

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](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](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](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 Profilors.** 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](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 Profilors (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](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](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](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](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](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](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](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](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/JPUGPresentationspdf/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](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](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](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](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](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/2002/1Laboratory%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](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](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.