

IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS: SENSIBILIDADE DE PERFIS, COMPARAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E CORRELAÇÃO ENTRE QI E IRI

Rodrigo Maluf Barella
Sergio Orlando Massara Filho
José Tadeu Balbo
Universidade de São Paulo

RESUMO

O trabalho apresenta 3 verificações sobre a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos. A primeira indicou que existe um sensível aumento nos valores da irregularidade quando ela é calculada com base em perfis longitudinais medidos em décimos de milímetros em comparação com medidas em milímetros. Com os mesmos trechos foi feita ainda uma verificação dos modelos usados para converter os valores de QI em IRI e concluiu-se que o modelo $IRI=(QI+10)/14$ é melhor que $IRI=13.QI$. Por fim, o comparou-se avaliações de irregularidade feitas com um medidor do tipo resposta com avaliações feitas com um perfilômetro inercial. Constatou que o medidor tipo resposta sobreestimou as irregularidades baixas e subestimou os valores altos.

ABSTRACT

This paper presents 3 verifications about road roughness. The first one indicated that there is an increase in the roughness values when it is calculated from profiles with elevation measured in 0.1mm, instead of it in millimeters. Using the same data, the two common models correlating IRI and QI were checked and the results showed that the model $IRI=(QI+10)/14$ is better than $IRI=13.QI$. At the end there is a comparison of measurements taken with two pieces of equipment: a response type and an inertial profilometer. The analysis indicated that the response type overestimated the lower roughness values and underestimated the higher ones.

1. INTRODUÇÃO

Foi possível notar nos últimos dois anos uma mudança no comportamento de muitos técnicos do setor rodoviário no que tange à importância da medida da irregularidade longitudinal dos pavimentos. Especialmente para grandes concessionárias que investiram em um sistema de gestão de pavimentos e alimentaram adequadamente seus bancos de dados, a evolução de mentalidade é bastante contundente.

A explicação para isto está calcada provavelmente nos benefícios que tais empresas conseguiram computar com o emprego racional dos recursos destinados à manutenção dos pavimentos e também à importância que a medida da irregularidade longitudinal tem dentro do sistema decisório, que deriva da análise das informações armazenadas nos bancos de dados.

A sensibilização recente que pôde ser notada no meio técnico envolve entre outras coisas a crescente utilização de perfilômetros inerciais, que deixaram de ser vistos com desconfiança e atualmente tem merecido a devida credibilidade, seja através da realização de trechos experimentais, seja pela completa mudança no tipo de avaliação aceitável para malhas inteiras.

Na mesma direção, foram publicados trabalhos recentes por BARELLA et al (2004) e SEVERO et al (2004) sobre este tema, que colaboraram com a divulgação da importância da medida da irregularidade longitudinal e também validaram a tecnologia dos perfilômetros inerciais, enfatizando suas características, limitações e sua capacidade de produzir medidas de irregularidade comparáveis àquelas que podem ser determinadas com métodos estáticos.

Esta pesquisa, por sua vez, é diferente dos trabalhos mencionados e está dividida em duas partes. A primeira trata da comparação entre resultados de irregularidade que podem ser obtidos a partir de perfis medidos com equipamentos de diferentes sensibilidades. Assim, determinaram-se os índices QI e IRI de acordo com os modelos normalizados pelo DNER-ES 173/86 e ASTM E 1926-98, e verificou a importância da sensibilidade do equipamento utilizado. Foi possível também verificar, ainda que de forma incipiente, os modelos de correlação entre os índices para diferentes valores de irregularidade.

Na segunda parte foram feitas comparações de avaliações de irregularidade feitas na Avenida dos Bandeirantes, cidade de São Paulo, em vários momentos, sobre 30 bases de 100 metros cada uma, usando-se tanto um medidor do tipo resposta (*Bump Integrator*, de procedência Australiana), quanto um perfilômetro laser (*Ciberlaser*, de procedência nacional). A comparação não visou testar o funcionamento do perfilômetro, que já se provou satisfatório em outras oportunidades, mas sim verificar se existia alguma tendência nos resultados obtidos com o medidor do tipo resposta para diferentes valores de irregularidade.

1.1. O perfil longitudinal dos pavimentos, a irregularidade longitudinal e sua avaliação

Já foi bastante estudada a relação entre o perfil longitudinal de um pavimento e a irregularidade nele presente, e é bastante lógico relacionar os quatro principais parâmetros funcionais de um pavimento (economia, rapidez, segurança e conforto) com o seu perfil longitudinal. Com isto em mente, é mais simples apresentar a diferenciação básica entre os dois tipos de equipamentos mais utilizados atualmente no Brasil para a medida da irregularidade longitudinal.

Os equipamentos do tipo resposta, que ainda são o tipo de equipamento mais largamente empregado em nosso país, buscam medir a resposta do veículo às imperfeições do pavimento através da somatória da variação da distância entre eixo e carroceria do veículo. Tais somatórios obtidos são correlacionados com algum índice de irregularidade levando-se em conta modelos de correlação elaborados especificamente para aquele equipamento e também a velocidade constante com a qual ele deveria ter trafegado. De acordo com a norma DNER-PRO 182/94, o índice oficial de irregularidade em nosso país é o QI, medido em contagens/km.

Refletindo-se sobre o princípio de funcionamento de um medidor do tipo resposta se pode concluir que não se trata de um medidor de perfil longitudinal. Além disso, conforme já foi disposto em BARELLA et al (2004), tal tipo de equipamento possui uma série de outras limitações que os tornaram muito raros nos países mais desenvolvidos, principalmente no século atual, muito embora seu custo de aquisição não seja considerado alto.

São justamente as mencionadas limitações que impulsionaram a substituição dos medidores do tipo resposta, com maior intensidade na década de 90 nos países mais desenvolvidos, por medidores de perfil a partir dos quais é possível o cálculo de irregularidade sem o uso de um modelo de correlação. Este tipo de equipamento trabalha com os mesmos três elementos de outros medidores de perfil: ponto de referência, altura em relação à referência e distância (figura 1). Seu conceito foi desenvolvido pela General Motors em 1960, mas foi somente na década de 80 que ele tornou-se disponível comercialmente.

O princípio de funcionamento não é complexo: o veículo contendo o equipamento trafega sobre o pavimento e um computador registra simultaneamente: o deslocamento longitudinal, a altura do veículo até o pavimento e a aceleração vertical do veículo. Concomitantemente, o sistema processa os dados para que a aceleração vertical registrada seja transformada em deslocamento vertical do veículo, uma vez que diferentemente dos outros métodos, neste a altura de referência está se movimentando. A “transformação” da medida da aceleração em deslocamento vertical é feita através de duas integrações sucessivas. Com o valor do deslocamento calculado, basta corrigir todas as medidas de altura feitas e obter-se-á um perfil que tem boa relação com o perfil verdadeiro, especialmente para o cálculo da irregularidade.

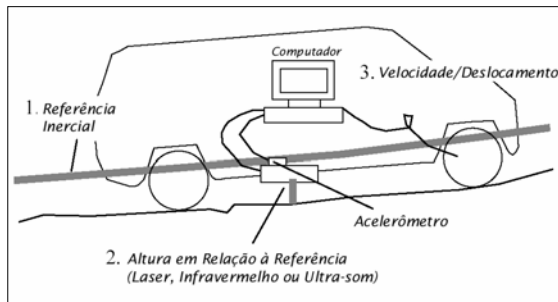


Figura 1: Os três elementos de medição dos perfis identificados em um Perfilômetro Inércia, conforme idealizado pela GM em 1960. (Sayers e Saramihas, 1998).



Figura 2: Detalhe do perfilômetro inercial utilizado, montado na dianteira de um veículo de passeio.

Atualmente existem no mundo muito mais fabricantes de perfilômetros inerciais do que de medidores do tipo resposta, muito embora um perfilômetro possa custar mais de 10 vezes o que custa um medidor do tipo resposta. Aqui no Brasil, pelo que se tem notícia existe atualmente um fabricante de cada tipo de equipamento. Em operação estão tanto equipamentos nacionais quanto importados, seja do tipo resposta, seja dos perfilômetros.

Normalmente, perfilômetros são capazes de obter perfis bem relacionados com os perfis que podem ser obtidos estaticamente e em muitos casos, os perfilômetros podem inclusive ser mais precisos que os métodos estáticos, e demonstrar isto é um dos desafios deste trabalho.

Conforme foi mencionado, a melhoria da qualidade das rodovias, principalmente aquelas concedidas à iniciativa privada, fez crescer o interesse por avaliações mais exatas e consistentes de irregularidade longitudinal. Isto fez decrescer o valor da irregularidade média em muitos trechos, fazendo com que passassem a ser medidos valores considerados ‘muito baixos’, especialmente quando se utilizava perfilômetros. Em consulta a alguns técnicos com bastante vivência neste ramo e após buscas bibliográficas, não foi encontrado registro de publicações que mencionassem, por exemplo, QI menor do que 10 cont./km.

Duas razões podem explicar essa escassez, a primeira é que realmente demos um salto grande de qualidade com as concessões rodoviárias recentemente e a segunda pode estar ligada ao

fato de limitações mecânicas/eletrônicas dos equipamentos do tipo resposta ou mesmo limitações quanto à sua “calibração” em bases com irregularidade muito baixas. Visando trazer mais elementos a esta discussão, foram realizadas medições com os dois equipamentos em uma série de bases localizadas na cidade de São Paulo e os resultados estão dispostos a seguir.

2. A IMPORTÂNCIA DA SENSIBILIDADE DAS MEDIDAS DOS PERFIS

A norma brasileira DNER-ES 173/86 que trata da calibração dos medidores de irregularidade do tipo resposta através de bases cujas medidas do perfil são obtidas por nível e mira, preconiza o uso de perfis com elevações aproximadas para milímetros.

Seguramente, para os medidores do tipo resposta o método preconizado pelo DNER é suficientemente bom, pois os medidores do tipo resposta têm limitações muito mais sérias que esta. Tendo em vista a recente conscientização brasileira de que os medidores do tipo resposta podem não gerar medidas confiáveis e repetíveis o bastante, motivo este que tem levado tanto concessionárias de rodovias, quanto departamentos de estradas de rodagem a utilizar cada vez mais os perfilômetros inerciais, a questão que se coloca é se a sensibilidade do nível e mira presente na norma do DNER é suficiente para se *verificar* uma medida obtida com um perfilômetro inercial. É importante ressaltar que o uso da palavra “verificar” é o correto, pois perfilômetros inerciais não são calibrados desta maneira e sim pela calibração de cada um dos seus componentes, conforme SEVERO et al (2004).

Para responder à pergunta é preciso determinar qual é a influência no resultado da irregularidade determinado a partir de perfis com sensibilidade de 0,1mm e também determinado a partir dos mesmos perfis com medidas de elevação arredondadas para milímetros. É importante se alertar que para este estudo não importa muito se tais perfis espelham exatamente o perfil de campo, pois a irregularidade de cada perfil será comparada com a irregularidade do mesmo perfil, apenas com as elevações “arredondadas”.

Para tal verificação, selecionou-se 37 segmentos de rodovias paulistas diversas com 200 metros de comprimento cada um. Todos os segmentos tiveram seus perfis determinados com um perfilômetro inercial em ambas as trilhas de roda. Como neste caso não era importante a medida feita em cada uma das trilhas de roda, foi usada somente a medida sobre uma delas. O perfilômetro usado gera perfis que tem 0,1mm de resolução nas elevações e frequência de gravação de dados de aproximadamente 2000 medidas por segundo.

De acordo com norma da calibração dos medidores do tipo resposta, foram gerados a partir dos perfis coletados, perfis que têm uma medida a cada 50cm. Para evitar o efeito da macrotextura, cada ponto representado no novo perfil calculado representa a elevação média dos pontos dos 75mm anteriores e dos 75mm posteriores a ele. Com isso, chegou-se a 37 perfis de 200 metros de comprimento, que têm medida de elevação a cada 50cm. Os perfis não foram escolhidos aleatoriamente, ao contrário, foram escolhidos segmentos com QIs variando de -0,3 (um dos menores valores já medidos com o equipamento usado) até 42,7 cont./km, vide tabela 1.

A partir desses perfis originais foram calculados os índices QI e IRI, usando-se os modelos normalizados pelo DNER-ES 173/86 e pela ASTM E 1926 – 98. Em seguida as medidas de elevação dos perfis foram arredondadas de décimos de milímetros para milímetros e os

cálculos foram repetidos e com isso foi possível determinar as diferenças nos resultados, apenas diminuindo a sensibilidade do perfil. Os resultados dos cálculos estão dispostos tanto na tabela 2, quanto nas figuras 3 e 4, para maior facilidade de visualização.

Tabela 1: Irregularidade QI (cont./km) das seções utilizadas.

Faixa de QI (cont./km)	Número de Seções
-0,3 a 0,4	2
1,9 a 2,2	5
4,3 a 5,1	5
9,4 a 12,7	5
13,7 a 14,9	5
18,9 a 20,3	5
28,0 a 30,4	5
38,6 a 42,7	5

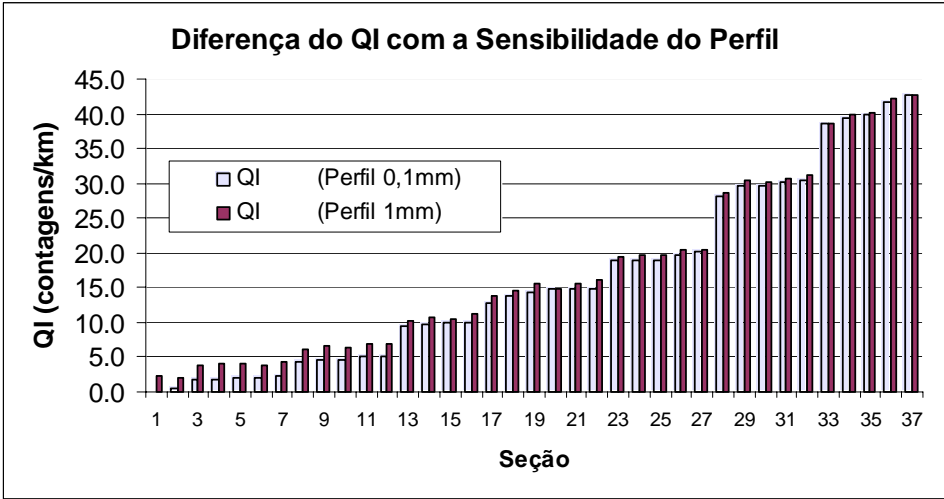


Figura 3: Diferenças entre valores de QIs (cont./km), calculados sobre as mesmas seções, alterando-se somente a sensibilidade das medidas de elevação do perfil.

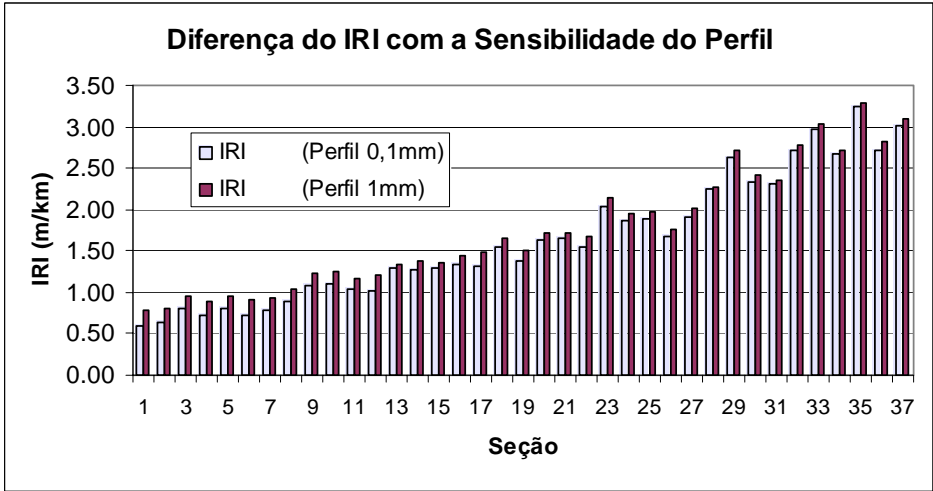


Figura 4: Diferenças entre valores de IRIs (m/km), calculados sobre as mesmas seções, alterando-se somente a sensibilidade das medidas de elevação do perfil.

Tabela 2: Resultados dos Cálculos de QI e IRI a partir dos perfis originais e arredondados.

Seção	QI Perfil 0,1mm	QI Perfil 1mm	Diferença entre QIs	% de Aumento (QI) - corrigido	IRI Perfil 0,1mm	IRI Perfil 1mm	Diferença entre IRIs	% de Aumento (IRI)
1	-0.3	2.2	2.5	30%	0.60	0.79	0.19	32%
2	0.4	2.0	1.6	18%	0.64	0.81	0.17	27%
3	1.9	3.8	1.9	18%	0.81	0.96	0.15	18%
4	1.9	4.2	2.3	22%	0.72	0.88	0.17	23%
5	2.0	4.2	2.2	21%	0.81	0.96	0.15	19%
6	2.1	3.9	1.8	17%	0.72	0.91	0.19	26%
7	2.2	4.4	2.2	20%	0.78	0.94	0.16	20%
8	4.3	6.1	1.8	14%	0.89	1.05	0.16	18%
9	4.6	6.7	2.1	16%	1.08	1.22	0.14	13%
10	4.6	6.4	1.8	14%	1.09	1.25	0.15	14%
11	5.0	6.8	1.8	13%	1.05	1.18	0.13	12%
12	5.1	6.9	1.8	13%	1.02	1.21	0.20	19%
13	9.4	10.1	0.7	4%	1.29	1.34	0.04	3%
14	9.8	10.7	0.9	5%	1.28	1.38	0.10	8%
15	9.9	10.4	0.5	3%	1.30	1.37	0.06	5%
16	10.0	11.3	1.3	7%	1.34	1.45	0.11	8%
17	12.7	13.9	1.2	6%	1.31	1.48	0.18	14%
18	13.7	14.7	1.0	4%	1.54	1.66	0.12	8%
19	14.4	15.5	1.1	5%	1.38	1.50	0.12	9%
20	14.8	14.8	0.0	0%	1.64	1.73	0.09	5%
21	14.8	15.7	0.9	4%	1.66	1.72	0.06	4%
22	14.9	16.0	1.1	5%	1.55	1.67	0.12	8%
23	18.9	19.5	0.6	2%	2.03	2.14	0.12	6%
24	18.9	19.7	0.8	3%	1.87	1.95	0.09	5%
25	19.0	19.6	0.6	2%	1.89	1.97	0.08	4%
26	19.6	20.4	0.8	3%	1.68	1.77	0.09	5%
27	20.3	20.5	0.2	1%	1.91	2.02	0.11	6%
28	28.0	28.6	0.6	2%	2.26	2.28	0.02	1%
29	29.6	30.4	0.8	2%	2.64	2.71	0.08	3%
30	29.7	30.1	0.4	1%	2.32	2.42	0.10	4%
31	30.2	30.7	0.5	1%	2.32	2.35	0.03	1%
32	30.4	31.2	0.8	2%	2.72	2.77	0.05	2%
33	38.6	38.7	0.1	0%	2.98	3.04	0.06	2%
34	39.4	39.9	0.5	1%	2.68	2.72	0.03	1%
35	40.0	40.2	0.2	0%	3.24	3.30	0.06	2%
36	41.6	42.2	0.6	1%	2.72	2.83	0.11	4%
37	42.7	42.8	0.1	0%	3.02	3.09	0.07	2%

Na tabela 2, para que se possa calcular de forma correta a variação percentual dos dois índices quando se muda a sensibilidade das medidas de elevação do perfil, é necessário para as medidas do QI se acrescentar 8,54 antes do cálculo. Isto é indispensável, pois mesmo considerando que os índices se correlacionem de forma linear, um perfil livre de imperfeições gera um QI = -8,54 cont./km e um IRI = 0 m/km. Se isto não fosse feito, o resultado do cálculo da simples diferença percentual entre os dois valores de QI seria muito diferente.

Pela análise dos resultados, são grandes as diferenças percentuais apresentadas pelo QI e IRI, para os valores menores de irregularidade, principalmente para $QI < 10$ cont./km. Sendo assim, sempre que se for verificar o funcionamento de um perfilômetro que utilize elevações em décimos de milímetro no cálculo dos índices de irregularidade é preciso ter em mente o quanto da diferença observada pode ser devida somente às diferentes sensibilidades de perfis, se este for o caso. Isto é pronunciado nas irregularidades baixas devido ao erro adicionado pelo arredondamento feito no aparelho. Esse erro apenas depende de sua sensibilidade e quanto menor a irregularidade mais esse “ruído” se torna significativo em cima do perfil (a razão ruído/sinal aumenta).

Uma outra observação que pode ser feita com base nos resultados apresentados pela tabela 2, usando uma simples calculadora de mão e tendo em mente os dois modelos mais usados no Brasil de correlação entre os índices IRI e QI, é que pode haver diferenças significativas entre os resultados apresentados pelas correlações e os cálculos feitos a partir dos perfis. Por isso, foi investigada no item seguinte a consistência de tais correlações.

2.1. A consistência dos modelos de conversão entre QI e IRI

Em nosso país, dada a normalização do DNER que fixa o QI como sendo o índice de irregularidade longitudinal oficial é de se esperar que ele seja realmente o índice mais utilizado e medido. Isto é verdade muito embora em algumas vezes, não só concessionárias como também órgãos oficiais solicitem os resultados em IRI.

Como o modelo de cálculo e conseqüentemente de calibração de um medidor do tipo-resposta em IRI não é muito difundido por não haver norma nacional, o que a maioria dos prestadores de serviço faz para determinar o IRI é realmente usar um dos modelos de correlação mais conhecidos e “converter” o valor do QI em IRI. Até onde se sabe, os modelos disponíveis são bastante acreditados pelos técnicos e ao que parece, eles não foram verificados recentemente – com as tecnologias atuais.

Os dois modelos de correlação mais usados no Brasil e que foram objeto desta verificação estão em PATERSON (1986) e PATERSON (1987). Os modelos são: $IRI = (QI+10)/14$ e $IRI = QI/13$. 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, com base no modelo disponível na norma DNER-ES 173/86, o único modelo de correlação válido segundo os trabalhos citados é o primeiro – que seguindo esta interpretação é o adequado para uso com equipamentos calibrados pela metodologia brasileira. O segundo modelo foi determinado usando-se como referência o valor do QI (cont./km) medido com o equipamento *Roadmeter* (um equipamento do tipo resposta). Mesmo sabendo disto, ambos os modelos foram testados.

Os mesmos segmentos da tabela 2 foram utilizados e para esta comparação foram usados os resultados provenientes dos perfis em milímetros - a tabela 3 contém os resultados. A própria tabela 3 e a figura 5 evidenciam que o modelo “ $IRI = (QI+10)/14$ ” é muito melhor que o modelo “ $IRI = QI/13$ ”, especialmente para valores de irregularidade menores. Nestes valores menores ($IRI < 2$ m/km, por exemplo), o segundo modelo pode apresentar erros significativos, o que vai ao encontro das observações de PATERSON (1987) sobre os modelos.

Pode-se concluir desta verificação que o melhor a se fazer é reestudar os modelos de correlação em um número bem maior de trechos, levando-se em conta não o QI e IRI

calculados tanto com base em perfis em milímetros, como com base em perfis em décimos de milímetros.

É difícil precisar o porquê, mas embora uma verificação deste tipo não seja complexa de ser realizada, ela não é divulgada claramente, talvez pela dificuldade de cálculo do valor do IRI com base em um perfil, cálculo que não é tão simples de ser feito quanto no caso do QI.

Tabela 3: Cálculo QI e IRI de acordo com os modelos de correlação mais utilizados.

QI Medido (cont./km)	$QI = IRI \cdot 13$	$QI = (14 \cdot IRI) - 10$	IRI Medido (m/km)	$IRI = QI/13$	$IRI = (QI+10)/14$	Erro % $IRI = QI/13$	Erro % $IRI = (QI+10)/14$
2.2	7.79	-1.61	0.79	0.17	0.87	-78.6%	10.2%
2.0	8.26	-1.10	0.81	0.15	0.86	-81.0%	5.9%
3.8	10.58	1.39	0.96	0.29	0.99	-69.6%	2.6%
4.2	9.33	0.05	0.88	0.32	1.01	-63.5%	14.7%
4.2	10.48	1.29	0.96	0.32	1.01	-66.2%	6.1%
3.9	9.32	0.04	0.91	0.30	0.99	-66.9%	9.5%
4.4	10.19	0.98	0.94	0.34	1.03	-64.1%	9.0%
6.1	11.53	2.42	1.05	0.47	1.15	-55.3%	9.7%
6.7	14.01	5.09	1.22	0.52	1.19	-57.8%	-2.2%
6.4	14.23	5.32	1.25	0.49	1.17	-60.6%	-6.2%
6.8	13.64	4.69	1.18	0.52	1.20	-55.6%	1.9%
6.9	13.23	4.25	1.21	0.53	1.21	-56.3%	-0.5%
10.1	16.79	8.08	1.34	0.78	1.44	-41.8%	7.5%
10.7	16.68	7.96	1.38	0.82	1.48	-40.5%	6.9%
10.4	16.93	8.24	1.37	0.80	1.46	-41.5%	6.6%
11.3	17.42	8.76	1.45	0.87	1.52	-39.9%	5.3%
13.9	16.99	8.30	1.48	1.07	1.71	-28.0%	15.0%
14.7	20.05	11.59	1.66	1.13	1.76	-32.0%	6.0%
15.5	17.98	9.36	1.50	1.19	1.82	-20.6%	21.3%
14.8	21.27	12.91	1.73	1.14	1.77	-34.0%	2.6%
15.7	21.57	13.23	1.72	1.21	1.84	-29.7%	6.8%
16.0	20.09	11.63	1.67	1.23	1.86	-26.1%	11.5%
19.5	26.35	18.38	2.14	1.50	2.11	-30.0%	-1.7%
19.7	24.28	16.15	1.95	1.52	2.12	-22.5%	8.6%
19.6	24.57	16.46	1.97	1.51	2.11	-23.6%	7.1%
20.4	21.79	13.47	1.77	1.57	2.17	-11.2%	22.8%
20.5	24.83	16.74	2.02	1.58	2.18	-21.8%	8.0%
28.6	29.33	21.59	2.28	2.20	2.76	-3.5%	20.9%
30.4	34.28	26.92	2.71	2.34	2.89	-13.8%	6.3%
30.1	30.20	22.52	2.42	2.32	2.86	-4.4%	18.2%
30.7	30.15	22.47	2.35	2.36	2.91	0.4%	23.6%
31.2	35.40	28.12	2.77	2.40	2.94	-13.3%	6.3%
38.7	38.72	31.70	3.04	2.98	3.48	-2.1%	14.4%
39.9	34.85	27.53	2.72	3.07	3.56	13.0%	31.3%
40.2	42.12	35.37	3.30	3.09	3.59	-6.2%	8.7%
42.2	35.30	28.01	2.83	3.25	3.73	14.9%	31.9%
42.8	39.28	32.30	3.09	3.29	3.77	6.7%	22.2%

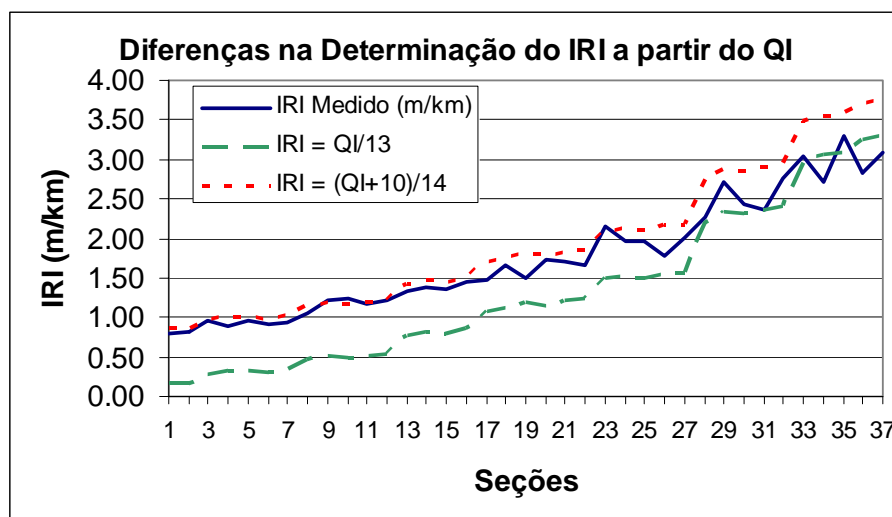


Figura 5: IRI (m/km) medido a partir do perfil, com o mesmo índice calculado com base no QI (cont./km) medido, convertido através dos modelos de correlação mais usados no Brasil.

3. COMPARAÇÃO DE AVALIAÇÕES DE IRREGULARIDADE REALIZADAS COM EQUIPAMENTOS DIFERENTES

Conforme foi salientado na parte introdutória, já foram apresentados anteriormente trabalhos que compararam as medidas de irregularidade obtidas com um perfilômetro inercial com os valores de irregularidade obtidos a partir de um perfil determinado com nível e mira. Embora se saiba que claramente esse tipo de comparação é o melhor a se fazer, pois se está comparando com uma referência os valores determinados por um tipo equipamento que se estava à época querendo conhecer melhor, não se pode esquecer que a norma brasileira vigente sobre o assunto ainda apregoa a utilização de medidores do tipo resposta.

Sendo assim, planejou-se um estudo comparativo na Avenida dos Bandeirantes, na cidade de São Paulo, onde já estavam em curso medições periódicas da irregularidade em 30 bases de 100 metros de comprimento cada uma, realizadas com um medidor de irregularidade do tipo resposta (*Bump Integrator*). Assim, aproveitaram-se parcialmente os dados que se estavam levantando para o outro estudo e fez-se 3 medições de irregularidade nas mesmas bases com o perfilômetro laser. As medidas foram realizadas em ambos os sentidos da avenida, nas faixas direita (FD) e central-direita (FCD).

Deve ser apontado que pelo fato das medidas terem sido feitas numa avenida bastante movimentada, mesmo no período noturno, não é possível se garantir exatamente a igualdade dos pontos de início e fim das bases. Em ambos os equipamentos os pesquisadores registraram no computador o ponto de início com o veículo em movimento. O ponto final foi calculado utilizando-se o hodômetro do equipamento, com a informação da extensão da base.

O intuito desta comparação, não foi evidenciar o funcionamento do perfilômetro, o que se buscou realmente era se na análise comparativa dos dados poderia ser observada alguma tendência nos resultados do medidor tipo resposta em relação aos valores de irregularidade do perfilômetro, assumindo como corretas as medidas feitas pelo perfilômetro.

As medidas com os dois equipamentos foram realizadas na mesma época, mas não nos mesmos dias. De acordo com a tabela 4, as diferenças entre as medidas individuais dos dois

equipamentos e também das médias das bases em cada um dos sentidos da pista avaliada são evidentes; entretanto, para o propósito pretendido os dados foram analisados em conjunto. A figura 6 ilustra o IRI médio das seções em cada uma das pistas da avenida analisada, com ambos os equipamentos. É possível notar que os valores medidos por ambos os métodos aumentaram com o decorrer do tempo, já que não houve intervenções no período.

Tabela 4: Resultado das avaliações de irregularidade longitudinal realizadas com medidor do tipo resposta e com o perfilômetro laser, em 30 bases na Av. dos Bandeirantes, São Paulo, SP.

Sentido			IRI (m/km) <i>Bump 1</i>	IRI (m/km) <i>Bump 2</i>	IRI (m/km) <i>Bump 3</i>	IRI (m/km) <i>Bump 4</i>	IRI (m/km) Laser 1	IRI (m/km) Laser 2	IRI (m/km) Laser 3
	Seção	Ext. (m)	Março 2004	Julho 2004	Setembro 2004	Janeiro 2005	Maio 2004	Setembro 2004	Dezembro 2004
Rodovia dos Imigrantes	1FD	100	2,91	3,51	4,00	4,53	4,35	4,23	4,96
	1FCD	100	2,26	2,41	2,43	2,60	2,85	2,27	1,77
	2FD	100	2,29	2,82	2,84	3,74	2,15	2,00	1,96
	2 FCD	100	2,13	2,00	2,26	2,31	1,92	2,65	3,38
	3 FD	100	2,13	2,37	2,30	2,78	1,65	2,62	2,38
	3 FCD	100	1,91	2,00	2,08	2,51	2,38	2,46	2,58
	5 FD	100	2,53	2,70	2,61	2,99	1,81	1,62	1,69
	5 FCD	100	2,52	2,53	2,29	2,46	2,46	1,92	2,12
	5b FD	100	2,32	2,49	2,71	2,84	1,19	1,85	1,27
	5b FCD	100	2,32	2,25	2,18	2,21	1,77	1,65	1,73
	6 FD	100	2,44	2,53	2,40	2,89	2,27	2,77	4,65
	6 FCD	100	2,23	2,22	2,15	2,44	1,31	1,42	1,42
	6b FD	100	2,19	2,09	2,27	2,38	1,35	1,27	1,23
	6b FCD	100	2,32	2,34	2,30	2,41	1,73	1,77	1,77
Média			2,32	2,45	2,49	2,79	2,09	2,18	2,35
Marginal Pinheiros	7 FD	100	2,69	2,06	3,04	3,39	3,50	2,50	3,23
	7 FCD	100	1,96	2,60	2,54	2,72	4,88	4,65	6,31
	7B FD	100	3,27	3,57	3,08	3,75	3,88	3,96	7,31
	7B FCD	100	2,30	2,65	2,82	2,91	2,92	2,62	6,31
	7Bb FD	100	2,44	3,47	3,37	4,02	3,08	2,88	2,85
	7Bb FCD	100	2,31	2,23	2,15	2,30	6,08	5,46	8,38
	7Bc FD	100	2,02	2,34	2,42	2,87	3,31	2,69	3,38
	7Bc FCD	100	-	2,34	2,39	2,49	1,69	1,12	1,38
	7Bd FD	100	-	2,47	2,52	2,93	1,27	1,65	1,62
	7Bd FCD	100	-	3,17	2,82	3,29	2,08	3,12	2,77
	8 FD	100	4,65	4,31	4,30	4,98	1,54	1,58	1,38
	8 FCD	100	2,48	2,85	2,82	2,70	1,77	1,73	1,85
	9 FD	100	2,59	3,05	3,01	3,33	3,23	4,27	2,85
	9 FCD	100	2,22	2,26	2,33	2,92	2,35	3,12	2,85
	10 FD	100	2,03	2,00	2,02	2,12	2,62	3,12	3,69
	10 FCD	100	2,06	2,08	2,03	2,20	1,27	1,58	1,00
Média			2,54	2,72	2,73	3,06	2,84	2,88	3,57

Para que fosse possível verificar se havia alguma tendência nos resultados de irregularidade determinados com o equipamento do tipo resposta usado, selecionou-se as medições do mês de setembro/04 de ambos os equipamentos e também as medições de dezembro/04 do perfilômetro e as medições de janeiro/05 do medidor do tipo resposta. Desprezou-se a diferença de pouco mais de um mês entre as últimas medidas e assim, apurou-se 60 pares de pontos. Para normalizar os resultados em função da medição do perfilômetro, foi calculada a diferença ponto a ponto das medições entre os dois equipamentos e elaborou-se a figura 7, onde tal diferença foi apontada em função do valor da irregularidade do perfilômetro.

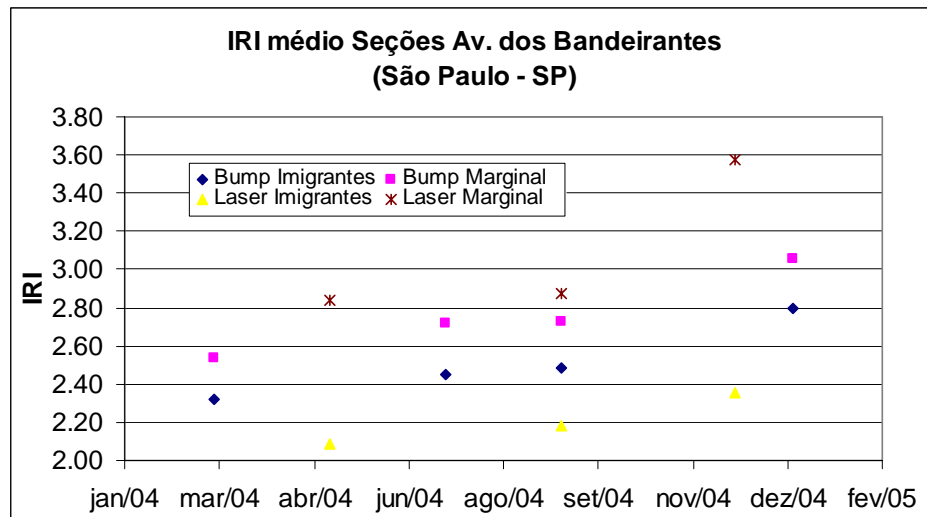


Figura 6: Resultado médio da irregularidade longitudinal das bases de cada uma das pistas da Av. dos Bandeirantes, cidade de São Paulo, avaliadas com o auxílio de diferentes tecnologias.

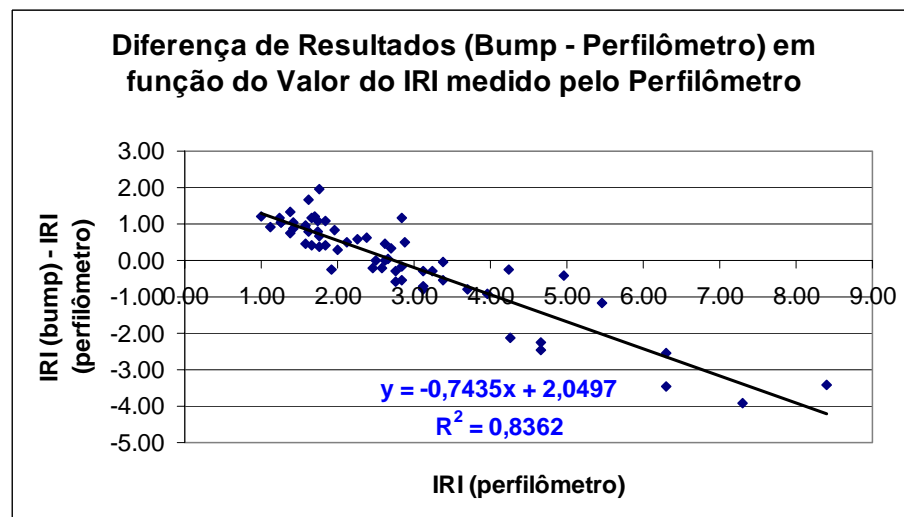


Figura 7: Correlação existente entre a diferença das medidas de irregularidade de um medidor tipo resposta e de um perfilômetro, em 60 bases de 100 metros de comprimento, em função das medidas obtidas pelo perfilômetro.

A figura 7 evidencia que para os equipamentos estudados existiu uma correlação significativa entre o valor da irregularidade medido pelo perfilômetro e a diferença apurada entre as medidas dos dois equipamentos. Em outras palavras, com base nos dados, assumindo-se que

ambos os equipamentos foram calibrados e usados de acordo com as especificações de seus fabricantes, fica evidenciado que medidores do tipo resposta – particularmente do tipo *Bump Integrator*, tendem a sobreestimar suas medições quando a irregularidade existente é menor do 2m/km (IRI), chegando a sobreestimá-la em 100%, quando a irregularidade existente é da ordem de 1m/km (IRI). Quanto menor o valor da irregularidade, maior tende a ser a diferença entre as medidas resultantes através da avaliação feita com os dois equipamentos.

O comportamento evidenciado muda para valores altos, $IRI > 3,5$ m/km. Para estes valores de irregularidade houve uma subestimação da irregularidade quando ela foi avaliada com um *Bump Integrator*, tal subestimação cresce com o valor da irregularidade. O efeito pode explicar os motivos pelos quais técnicos experientes se surpreendem com valores baixos de irregularidade medidos com perfilômetros inerciais, pois se os resultados obtidos nesta comparação realmente espelharem a realidade dos medidores do tipo resposta, seria realmente muito difícil a obtenção de medidas de irregularidade muito baixas com estes equipamentos.

Naturalmente, não é possível se fazer uma afirmação conclusiva a respeito dos resultados encontrados, pois parte deles pode ser também derivada de uma calibração deficiente do medidor do tipo resposta utilizado, por exemplo, sem a inclusão de bases de referência que tivessem índices de irregularidade muito altos ou muito baixos.

4. CONCLUSÕES

A primeira parte do trabalho revelou que a sensibilidade da medida do perfil longitudinal usado para o cálculo de índices de irregularidade causa diferenças importantes, principalmente para valores mais baixos de irregularidade. Deve-se portanto, levar isto em conta quando da verificação de perfilômetros inerciais e da comparação entre medidas de diferentes equipamentos. Sobre a correlação entre QI e IRI, os resultados e a bibliografia consultada indicam que dentre os modelos verificados, o modelo $IRI = (QI+10)/14$ é bastante superior, principalmente para valores de irregularidade mais baixos. Há indícios que tal modelo pode ser melhorado, mas para tanto seria necessária a utilização de mais trechos. A respeito das medições com equipamento do tipo resposta, a pesquisa mostrou indicativos que o equipamento *Bump Integrator* utilizado sobreestima a irregularidade quando ela é menor do que 2m/km e subestimá-la quando os valores são maiores do que 3,5 m/km (IRI). Mais estudos são necessários para comprovar as causas e verificar a ocorrência do efeito observado em outros equipamentos do tipo resposta, controlando-se de forma cuidadosa sua calibração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARELLA, Rodrigo et al. (2004) *A Avaliação de Irregularidade com Perfilômetros Inerciais de Sensores Laser: Resultados Comparativos e Vantagens Técnicas*. 35ª RAPv. Rio de Janeiro.
- PATERSON, William D. O. (1986) *International Roughness Index: Relationship to Other Measures of Roughness and Riding Quality*. Transportation Research Record, n. 1084. Washington.
- PATERSON, William D. O. (1987) *Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management*. The highway design and maintenance standard series. The World Bank. Washington.
- SAYERS M. W. e KARAMIHAS S. M. (1998) *The Little Book of Profiling*.
- SEVERO, Luis E. P. et al. (2004) *Utilização De Perfilômetro Laser Para A Medida De Irregularidade Longitudinal E do Afundamento Em Trilhas De Roda*. 9º ENACOR. Natal.

Rodrigo Maluf Barella (rodrigo@malufbarella.com.br)

Sergio Orlando Massara Filho (cibermetrica@cibermetrica.com.br)

José Tadeu Balbo (jotbalbo@usp.br)