

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP



PTR3521 - Avaliação e Reabilitação de Pavimentos

Trabalho 1

Avaliação da Irregularidade Longitudinal

Uso de Dados de Smartphones para Avaliação da Irregularidade Longitudinal

Celso Ribeiro - 8995096

Flávio de Falcão - 8995012

Flávio Tapajós - 8992412

Rafael Kobayashi - 8991582

São Paulo, abril de 2018

SUMÁRIO

1. RESUMO.....	2
2. INTRODUÇÃO.....	2
2.1. Origem.....	2
2.2. Métricas.....	3
3. METODOLOGIA.....	5
3.1. Tipos de Equipamentos.....	5
3.2. Equipamentos.....	6
3.3. Uso de dados de smartphone.....	8
3.4. Técnica.....	8
4. CONCLUSÃO.....	10
5. REFERÊNCIAS.....	10

1. RESUMO

De acordo com a norma brasileira DNER 164/94, a Irregularidade Longitudinal é definida como: o desvio da superfície da rodovia, em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via.

A Norma ASTM E 867-82, define esse defeito como "... os desvios da superfície de uma superfície planar original com dimensões características que afetam a dinâmica do veículo, a qualidade do rolamento, a dinâmica das cargas e a drenagem. "A irregularidade longitudinal, conforme citado na literatura por diversos autores, é o parâmetro mais utilizado internacionalmente, para a avaliação funcional de pavimentos.

Essa irregularidade do pavimento tem como razão, entre outras causas: problemas de construção, falta de manutenção, defeitos oriundos da ação do tráfego e do clima, principalmente das deformações permanentes do revestimento e subleito.

2. INTRODUÇÃO

Uma vez definido o conceito de irregularidade longitudinal, é válido observar a sua importância, uma vez que afeta a qualidade do rolamento, reduzindo a vida útil do pavimento, o que se reflete em maiores custos para órgãos públicos e privados que administram as rodovias, além de impactar o conforto dos usuários. Com esta motivação, o presente relatório tem como objetivo inicial descrever a origem desse conceito e a metodologia de medição, o que inclui as formas de avaliação e diferentes índices. Posto isso, são mencionados diferentes equipamentos, classificados quanto à forma de obtenção dos dados e, finalmente, introduz-se o uso de dados de smartphone como um método inovador, explica-se a metodologia de medição e os cálculos envolvidos. Finalmente, avaliam-se suas vantagens e seus principais desafios.

2.1. Origem

Um dos primeiros métodos sistemáticos de medida de serventia de pavimentos foi o "AASHO Road Test". Foi uma série de experimentos realizados pela American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), para determinar como o tráfego contribui para a deterioração dos pavimentos nas rodovias. Oficialmente, o Road Test tinha como objetivo "... estudar o desempenho de estruturas de pavimento de espessura conhecida sob cargas móveis de magnitude e frequência conhecidas". Este estudo, realizado no final da década de 1950 e início da década de 1960 em Ottawa, Illinois, é frequentemente citado como fonte pioneira de dados experimentais quando se considera o desgaste de veículos em rodovias, para fins de projeto de estradas, tributação de veículos e custeio.

O "Road Test" consistiu em seis loops de duas pistas ao longo do futuro alinhamento da Interstate 80. Cada pista foi submetida a cargas repetidas por um veículo com peso e características específicas. A estrutura do pavimento dentro de cada ciclo foi variada, de modo que a interação das cargas do veículo e da estrutura do pavimento pudessem ser investigadas.

Os resultados do teste de estrada AASHO foram usados para desenvolver um guia de projeto de pavimento, publicado pela primeira vez em 1961 como o "Guia Provisório da AASHO para o Projeto de Pavimentos Rígidos e Flexíveis", com grandes atualizações publicadas em 1972 e 1993. A versão de 1993 ainda é em uso generalizado nos Estados Unidos. Um novo guia, originalmente planejado para ser lançado em 2002, mas ainda em desenvolvimento, é a referência mais recente sobre o tema.

Um ponto interessante desse teste é que se permitiu comprovar empiricamente, por meio do fator de equivalência de carga, que os veículos mais pesados reduziram a usabilidade em um tempo muito mais curto que os veículos leves.

O conceito de serventia pode ser aplicado mais amplamente e ser usado, a partir da opinião de diferentes tipos de usuários, para determinar a qualidade de rolagem para um veículo específico. A partir da aferição do nível de qualidade da pista de rolagem, pode-se definir limites de aceitação, a partir dos quais seria necessário tomar providências de reparo ou substituição do pavimento em questão.

A mensuração contínua da condição do pavimento é importante não apenas para determinar a sua qualidade, mas também para permitir que as alterações sejam feitas nos momentos mais adequados. Como mostra a figura a seguir, a queda na qualidade do pavimento não é proporcional ao tempo e, por isso, postergar apenas alguns anos pode causar multiplicação de 5 ou até 10 vezes no valor de reparo.

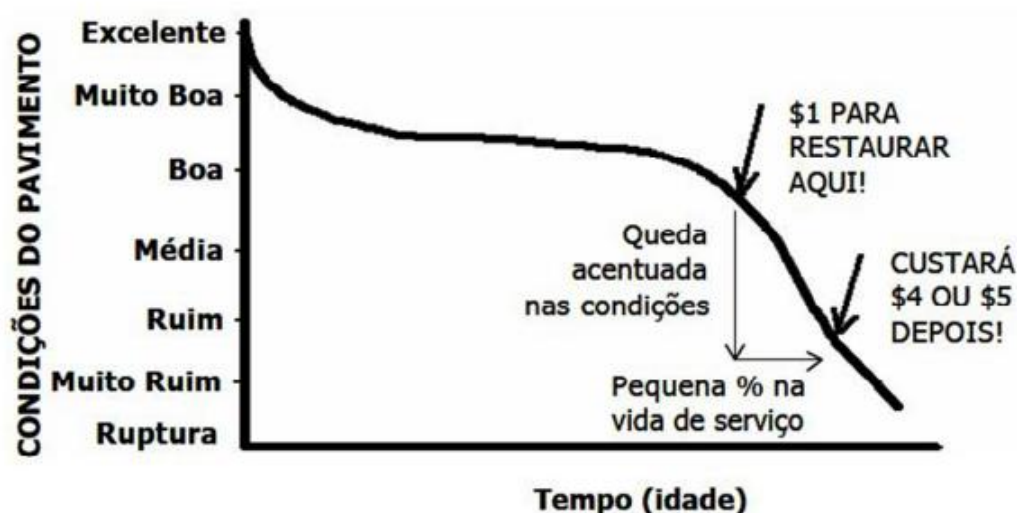


Figura 1 - Momento ótimo para restauração

2.2. Métricas

Atualmente, diferentes métricas de avaliação das irregularidades longitudinais nos pavimentos são adotadas, dentre elas destacam-se os índices QI e IRI de acordo com os modelos normalizados pelo DNER-ES 173/86 e ASTM E 1926-98.

De acordo com a norma DNER-PRO 182/94, o índice oficial de irregularidade em nosso país é o QI (Quociente de Irregularidades), medido em contagens/km. Já o IRI (International Roughness Index) é um índice de irregularidade utilizado com frequência no resto do mundo e medido em m/km.

Tais índices são obtidos a partir de leituras de campo, com a utilização de equipamentos específicos, que são correlacionadas com os supracitados índices de irregularidade levando-se em conta modelos de correlação elaborados especificamente para aquele equipamento e também a velocidade constante com a qual o equipamento deveria ter trafegado, sendo assim as mudanças de sentido e outras imperfeições decorrentes de variações no ato da medição podem ser eliminadas.

A tolerância para tais índices tem sido tema de diversas discussões, com diferentes países adotando diferentes faixas de tolerabilidade. A OCDE, menciona como parâmetros de referência os seguintes valores, de acordo com as velocidades adotadas na via:

Tabela 1 - Classificação funcional para rodovias pavimentadas (OCDE)

IRI (m/km)	QI (cont/ km)	V ^(a) (km/h)	Condição funcional	Categoria OCDE
≤ 3	≤ 39	>120	Excelente	1
>3 e ≤ 6,5	> 39 e ≤ 84,5	100-120	Aceitável	2
>6,5 e ≤8,5	> 84,5 e ≤ 110,5	70-90	Tolerável	3
>8,5 e ≤10,5	>110,5 e ≤136,5	50-60	Intolerável	4
>10,5	>136,5	< 50	Péssima	5
<i>V ^(a) = velocidade de tráfego “confortável”</i>				

Devido ao fato de, tanto o QI quanto o IRI, ao medirem basicamente a mesma forma de variação na superfície do pavimento, cabe a indagação se há modelos de conversão e compatibilidade entre os dois índices. No nosso país, pela fixação através do DNER (atual DNIT) da normatização pelo Quociente de Irregularidade, é esperado que esse índice seja o mais utilizado, no entanto, diversas concessionárias privadas de rodovias, bem como órgãos oficiais utilizam o IRI em seus relatórios.

Pelo mesmo motivo de se adotar o QI como índice oficial, os equipamentos utilizados para se obter as medidas, muitas vezes estão calibrados para fornecer valores apenas de tal índice, se fazendo necessário um modelo de conversão que seja confiável.

Dessa forma, existem dois modelos que oferecem uma alta confiabilidade para a conversão e são os mais utilizados no Brasil, são encontrados em PATERSON (1986) e PATERSON (1987). Os modelos são: $IRI = (QI+10)/14$ e $IRI = QI/13$, respectivamente. Em ambos os modelos o QI está na unidade de contagens/km e o IRI em m/km. A figura a seguir mostra essa correlação.

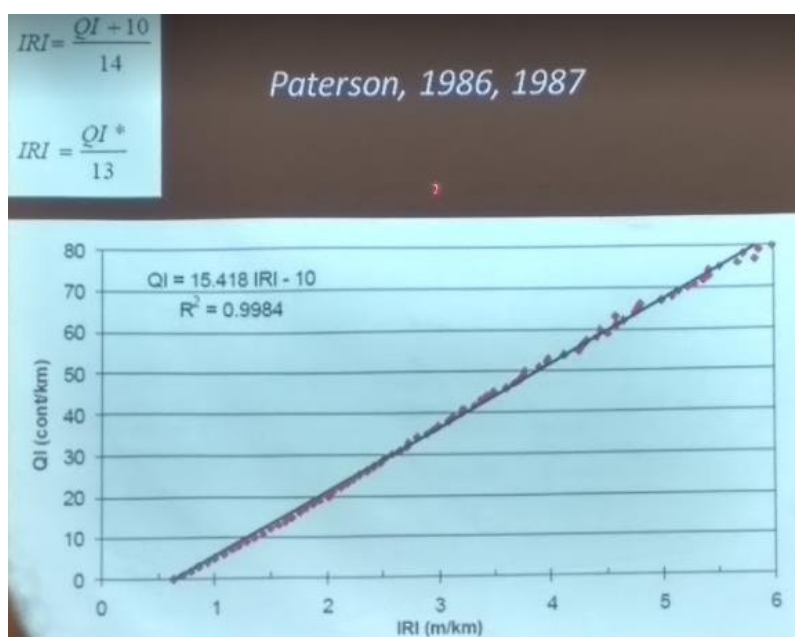


Figura 2 - Correlação entre IRI e QI (Paterson, 1986, 1987)

3. METODOLOGIA

Neste item, são mencionados os diferentes tipos de equipamentos e seus principais exemplos, o que inclui, hoje, o smartphone. Em seguida, descrevem-se as técnicas de aferição empregadas.

3.1. Tipos de Equipamentos

No Brasil, existem basicamente dois tipos de equipamentos que são os mais utilizados: Os equipamentos do tipo resposta, que são de baixo custo de aquisição e a maioria no país, e os perfilômetros inerciais, que são equipamentos mais caros e maioria no mundo desenvolvido.

Os equipamentos do tipo resposta, procuram medir a reação (resposta) do veículo às imperfeições do pavimento, realizando somatórias que contam a variação e o deslocamento relativo entre o eixo e a carroceria do veículo. Esses valores obtidos são então correlacionados com algum dos dois índices de irregularidade. A figura a seguir ilustra um mecanismo desse tipo de equipamento.

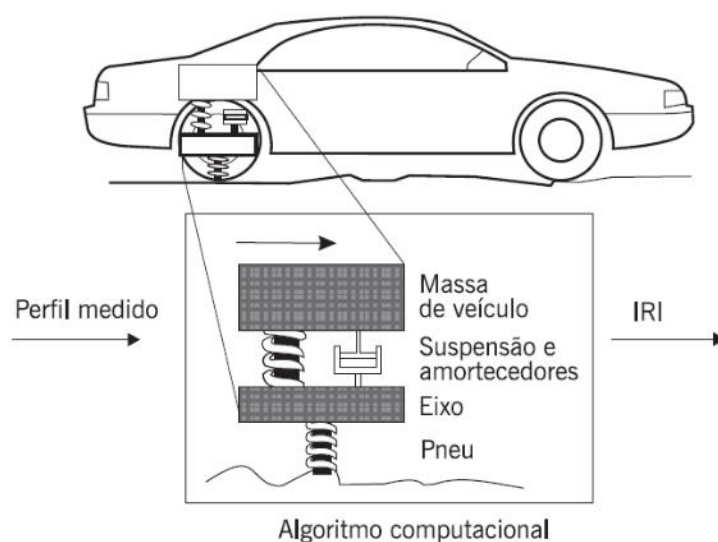


Figura 3 - Equipamento do tipo resposta

Já nos anos 90, tais equipamentos começam a serem substituídos pelos perfilômetros inerciais, que são de fato equipamentos que medem o perfil longitudinal da superfície do pavimento.

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. Dessa forma, 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 figura a seguir esquematiza esse sistema.

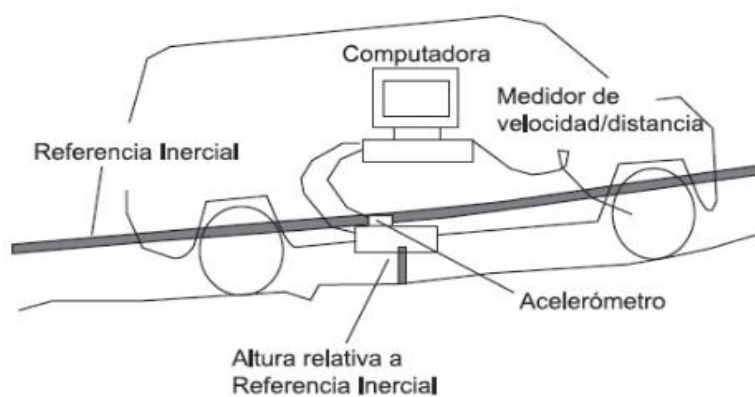


Figura 4 - Perfilômetro inercial

3.2. Equipamentos

Entre os equipamentos para medição de irregularidade, podem-se citar principalmente:

- Rugosímetro (medidor do tipo resposta, útil para grandes levantamentos)
- Nível e mira (geralmente utilizado em trechos de calibração para medidores do tipo resposta)
- Dipstick (usado em piso industrial, pavimentos de concreto, trechos de calibração para medidores do tipo resposta, trechos curtos em pistas de aeroportos)
- Merlin: *Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumental* (pavimentos em execução ou em restauração, pequenas extensões)



Figura 5 - Rugosímetro



Figura 6 - Nível e mira



Figura 7 - Dipstick



Figura 8 - Merlin (Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumental)

3.3. Uso de dados de smartphone

O smartphone possui um acelerômetro integrado e, portanto, seu uso como equipamento de medição do tipo resposta pode ser discutido. Esta técnica já está em uso e estudos realizados apresentaram resultados consistentes, embora ainda discutíveis do ponto de vista da qualidade dos dados. Para levantamentos em nível de rede, trata-se de uma boa alternativa. As vantagens e os principais desafios serão avaliados no item 4.

3.4. Técnica

O uso consiste em fixar o aparelho internamente ao automóvel (painel, para-brisas, saída de ventilação) e medir as acelerações verticais. Esta medida, por sua vez, é correlacionada ao IRI. Para isso, existem aplicativos de celular (*AndroSensor*, *Accelerometer Analyser*, *Roadroid*) que processam esses dados e podem até classificar a condição do pavimento.

De acordo com Wei e Fwa (2004) e Farias e Souza (2009), a Aceleração Vertical (VA) é um sinal a partir do qual é possível obter índices correlacionados com a irregularidade longitudinal da via. Seu uso é conveniente, uma vez que ele pode ser facilmente medido por meio de acelerômetros de *smartphones*. Paralelamente, é possível calculá-lo analiticamente, caso se disponha de dados de perfilometria, por meio da Equação:

$$VA_i = \frac{Y_{x-b} + Y_{x+b} + 2Y_x}{b^2}$$

A VA varia fortemente conforme a largura da base considerada b . Em termos práticos, é possível dizer que diferentes sinais são obtidos a depender da frequência de amostragem e da velocidade em que o aparelho responsável pelas medições percorre a pista.

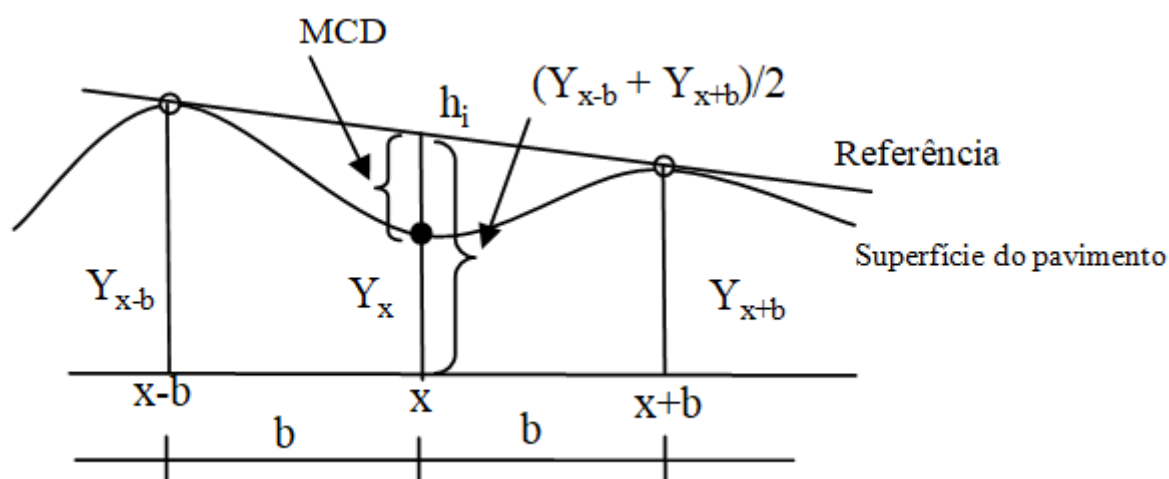


Figura 9 - Perfil para cálculo da aceleração vertical (VA) (FARIAS; SOUZA, 2009, p. 412)

Para que esse sinal seja traduzido em um índice, existem várias alternativas. A média desse sinal, chamada de *Mean Absolute Vertical Accelerations* (MAVA). De acordo com Wei e Fwa (2004), a correlação entre esses valores e o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) é de 0,123 para pavimentos flexíveis e 0,253 para pavimentos de concreto. Esses valores podem ser explicados pelo fato de esse índice possibilitar que acelerações negativas compensem as positivas, que não é um comportamento desejado para medição de irregularidades longitudinais.

O valor RMS desse sinal, por outro lado, chamado de Root-Mean-Square Vertical Accelerations (RMSVA), tem correlação de 0,958 para regressão linear multivariável com VA com comprimentos de base 1m, 2,5m, 3m e 3,5m, de acordo com Farias e Souza (2009, p. 403). Esse valor é contradito por Wei e Fwa (2004), que encontrou uma correlação com o IRI de 0,181 para pavimentos flexíveis e 0,303 para pavimentos rígidos. No entanto, esse autor realizou uma regressão de uma variável apenas para $b = 1,52\text{m}$. Em função dos artigos realizados considerando a medida do RMSVA por meio de smartphones, é possível afirmar que, de fato existe uma correlação significativa com o IRI.

Um desses exemplos é Forslöf (2013), que desenvolveu um aplicativo de nome roadroid. Ele classifica a serventia em quatro categorias: bom, satisfatória, insatisfatória e ruim, apresentando uma correlação com o IRI de 0,5154 que, apesar tão adequada, indica a possibilidade de realizar uma boa gestão de pavimentos, motivo pelo qual esse aplicativo foi utilizado por Aydin, Yildirim e Forslöf (2017) e Oliveira (2017).

Aydin, Yildirim e Forslöf (2017) avaliam 3259km de vias urbanas e rurais da Turquia chegando à conclusão que, de acordo com o aplicativo, 84,4% são boas, 7,9% são satisfatórias, 3,8% são insatisfatórias e 4% necessitam urgentemente de manutenção.

Oliveira et al. (2017) realizam a mesma avaliação para rodovias no estado do Ceará e classificam as diversas vias em função do IRI avaliado pelo aplicativo.

Para ilustrar a possibilidade de realizar uma correlação com o IRI e o RMSVA é possível apontar o artigo de Bisconsini et al. (2018) como um caso bem-sucedido para pistas com maior irregularidade longitudinal, onde foi obtido um coeficiente de Pearson entre 0,95 e 0,97. No entanto, para pistas irregulares, essa correlação não foi observada. Em uma pista aeroportuária, eles obtiveram um coeficiente de Pearson de, no máximo 0,3.

4. CONCLUSÃO

Com o avanço da tecnologia, o uso de dados de smartphone para medição de irregularidade longitudinal se tornou possível. Esta metodologia se mostrou aplicável e seus resultados foram consistentes em comparação a resultados de demais equipamentos, porém com certas limitações. A principal vantagem a ser destacada é o baixo custo, especialmente em comparação aos perfilômetros. A produtividade também é maior, por ser um equipamento do tipo resposta, bem como a flexibilidade é melhor, pois não exige habilidade dos operadores. Contudo, vale lembrar que equipamentos do tipo resposta precisam ser calibrados, pois os valores medidos dependem do modelo do aparelho, do aplicativo, do veículo e da sua velocidade, para uma dada medição. Ressalta-se também a limitação do próprio smartphone, que não apresenta um resultado preciso quando a frequência de obtenção dos dados é muito alta (maior que 100 Hz), pois os acelerômetros estão sujeitos a ruídos e a velocidade do processamento de dados pode ser insuficiente. Tanto a necessidade de calibração, quanto a limitação do aparelho chamam atenção para os principais desafios atuais para que esse método seja cada vez mais usado e com resultados mais confiáveis. Espera-se que o uso em larga escala traga consigo métodos de referência padronizados para calibração dos dados e o avanço tecnológico permita uma maior taxa de aquisição de dados, com smartphones que vem sendo aperfeiçoados constantemente, o que inclui seus sensores.

5. REFERÊNCIAS

- https://en.wikipedia.org/wiki/AASHO_Road_Test
- http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/33_AC.pdf
- <http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp/download/Perfil%C3%B4metro%20e%20Irregularidade%202005.pdf>
- 803-Noticias_da_construcao_sinduscon_dezembro_de_2012.pdf
- Shahin, Mohamed Y. Pavement management for airports, roads, and parking lots. 1994.
- <http://novo.arteris.com.br/wp-content/uploads/2016/10/ME-Medic%C3%A7%C3%A3o-da-Irregularidade-Longitudinal-de-Pavimentos-com-Equipamento-MERLIN-.pdf>
- FORSLÖF, L. Roadroid: Continuous Road Condition Monitoring with Smartphones. Ljusdal, jun. 2013.
- FARIAS, M. M. de; SOUZA, R. O. de. Correlations and analyses of longitudinal roughness indices. Road Materials and Pavement Design, Taylor & Francis, v. 10, n. 2, p. 399–415, 2009
- Fonte: WEI, L.; FWA, T. Characterizing road roughness by wavelet transform. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, n. 1869, p. 152–158, 2004