

**RODRIGO MALUF BARELLA**

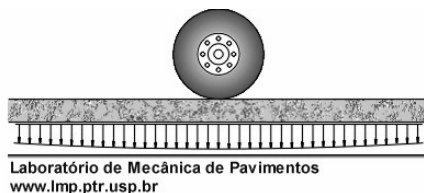
Engenheiro Civil, FEI, 1997  
Mestre em Engenharia, EPUSP, 2001

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

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

Área de Concentração:  
Engenharia de Transportes

Orientador:  
Prof. José Tadeu Balbo



São Paulo  
2008

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

**São Paulo, 16 de janeiro de 2008.**

**Assinatura do autor** \_\_\_\_\_

**Assinatura do orientador** \_\_\_\_\_

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Barella, Rodrigo Maluf**

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

**362 p.**

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

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

À Desirée e aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

À **Deus** pela vida.

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

## RESUMO

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

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

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

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

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

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

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

## ABSTRACT

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

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

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

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

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

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

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



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

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

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

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

