

MONITORAMENTO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO EXECUTADO COM CINZAS VOLANTES

Nayara de Oliveira Gurjão

Centro Universitário Christus

José Wémenson Rabelo Chaves

Faculdade Cisne de Quixadá

Lucas Cavalcante de Almeida

Centro Universitário Christus

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Universidade Federal do Ceará

RESUMO

Dentre os parâmetros adotados para avaliação funcional de pavimentos rodoviários, destaca-se a irregularidade longitudinal, que pode ser obtida por meio de um indicador denominado Índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index* - IRI). Tal medição pode ser executada com uso de diversos equipamentos, incluindo aplicativos para *smartphones*, que apresentam relativa confiabilidade na estimação do IRI em pavimentos flexíveis. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo realizar o monitoramento do desempenho funcional por meio da utilização do aplicativo *SmartIRI*, visando a avaliação da irregularidade longitudinal, com uso do IRI. Os levantamentos foram realizados em um trecho rodoviário executado com cinzas volantes, nas camadas de base e sub-base, oriundas de uma usina termelétrica no estado do Ceará. Os resultados mostraram que é viável a utilização do aplicativo, favorecendo o uso dessa nova tecnologia, de modo a auxiliar um Sistema de Gerência de Pavimentos.

ABSTRACT

Among the parameters adopted for the functional assessment of road pavements, the longitudinal roughness stands out, which can be obtained by means of an indicator called the International Roughness Index - IRI. Such measurement can be performed using a variety of equipment, including applications for smartphones, which are relatively reliable in estimating the IRI on flexible pavements. In view of, this paper aims to monitor the functional performance using the *SmartIRI* application, aiming at the evaluation of longitudinal roughness, using the IRI. The surveys were carried out in a road section executed with fly ash, in the base and sub-base layers, from a thermoelectric plant in the state of Ceará. The results showed that the use of the application is feasible, favoring the use of this new technology, to assist a Pavement Management System.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico de um país está associado ao aumento do tráfego de veículos e a conseqüente necessidade de uma infraestrutura capaz de conectar localidades e manter o fluxo de mercadorias, alimentos, animais e pessoas. Os pavimentos devem fornecer aos seus usuários o conforto e a segurança ao trafegar, apresentando uma estrutura desenvolvida o suficiente para suportar as cargas de tráfego e ações de intempéries, mantendo seu desempenho e durabilidade durante o seu período de projeto.

É necessário, portanto, que a segurança viária seja garantida desde a execução do pavimento até as medidas necessárias de manutenção e reabilitação para seu desempenho. A perspectiva do usuário em relação ao pavimento se resume à sua superfície, na qual um defeito ou irregularidade acentuada são facilmente perceptíveis, afetando o conforto ao rolamento, a dinâmica do veículo e a distribuição das cargas no pavimento, influenciando no custo de manutenção tanto da via como do automóvel.

Sendo assim, as condições estruturais e funcionais de um pavimento estão associadas a diversos fatores, entre eles, a irregularidade longitudinal, que, segundo Bernucci *et al.* (2010), pode ser estimada por meio do parâmetro estatístico designado Índice de Irregularidade Internacional

(*International Roughness Index - IRI*), que mede a irregularidade longitudinal existente na superfície do pavimento em relação a um plano de referência. Essa medição pode ser realizada com uso de equipamentos diversos, porém, em sua maioria, são modelos manuais, lentos ou de um elevado custo, fazendo com que essa medição não ocorra com a frequência desejada.

Por conta disso, novos métodos de medições com uso de *softwares* ou aplicativos vêm sendo estudados para facilitar a classificação da via quanto sua qualidade, conforto e segurança. Além disso, o uso de aplicativos torna o processo mais rápido e acessível, tendo como prioridade manter a confiabilidade dos dados obtidos.

Diante do exposto, o objetivo deste artigo é analisar o desempenho funcional de uma via por meio do Índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index - IRI*). O trecho experimental do estudo localiza-se numa usina termelétrica no estado do Ceará e foi executada com acompanhamento da Universidade Federal do Ceará (UFC), sendo utilizadas cinzas volantes nas suas camadas constituintes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A irregularidade longitudinal existente na superfície de um pavimento, pode ser conceituada como o desvio que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade do rolamento e a drenagem superficial da estrada. Tais fatores, provocam a redução da vida útil do pavimento, aumento nos custos operacionais dos veículos, maior consumo de combustível e manutenções requeridas (ARHIN *et al.*, 2015).

Segundo Gillespie (1980), o monitoramento da irregularidade longitudinal de pavimentos, é realizado por meio de diversos equipamentos ou dispositivos, sendo quantificado através da obtenção do IRI. Esse parâmetro foi proposto pelo Banco Mundial em 1986, como um índice estatístico para correlacionar e servir de referência na determinação da qualidade de rolamento das rodovias (SAYERS, 1986).

Pode-se definir o IRI, como o somatório dos movimentos verticais que sofre o sistema de suspensão do veículo em relação a distância percorrida. Expressando os desvios do perfil do pavimento, em um índice numérico, expresso em m/km ou mm/m (PARK *et al.*, 2007). A Figura 1 mostra os diferentes níveis de irregularidades do perfil de um pavimento.

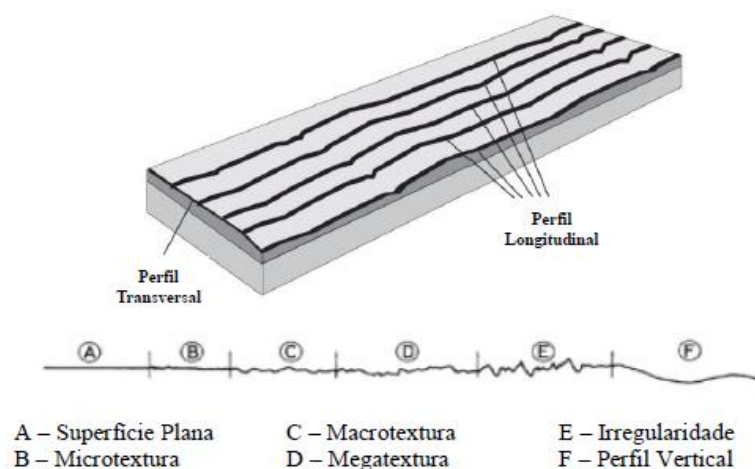


Figura 1: Diferentes níveis de irregularidades (Adaptado de Douangphachanh, 2014).

As medições de irregularidade longitudinal de um pavimento apresentam múltiplas utilidades, sendo um parâmetro utilizado na avaliação de pavimentos, contribuindo com o diagnóstico da situação da via e com a escolha da melhor solução de manutenção e restauração a ser aplicada. Ademais, pode ser subsídio ao cálculo de custos de operação de veículos, controle da qualidade de execução, subsídio às decisões inerentes a sistemas de gerência de pavimentos, atualização e realimentação de modelos de previsão de desempenho de pavimentos e estimativa da serventia de pavimentos (PINTO e PREUSSLER, 2010).

Conforme Lerch (2002), existem vários equipamentos e procedimentos desenvolvidos para medição direta e indireta da irregularidade longitudinal de superfícies, sendo estes agrupados e divididos em quatro classes genéricas (Tabela 1). Para Hirpahuanca (2016), a distinção entre as classes tem relação direta com a precisão e qualidade na obtenção dos valores do IRI.

Tabela 1: Classificação dos equipamentos e métodos medidores de IRI (Adaptado de Bisconsini, 2016 e Gillespie *et al.*, 1986).

| Classe | Descrição | Exemplos de equipamentos ou medição |
|--------|---|---|
| I | Equipamentos que medem o perfil de maneira direta | Nível e Mira; <i>Dipstick</i> ; Perfilômetro do TRL. |
| II | Equipamentos de medição de forma direta ou indireta | Perfilógrafos; Equipamentos com sensores a laser; APL francês. |
| II | Equipamentos do tipo resposta | <i>Merlin</i> ; <i>Maysmeter</i> ; TRL <i>Bump Integrator</i> . |
| IV | Avaliações subjetivas (avaliadores) | Inspeção Visual |

Todavia, alguns dos equipamentos ou métodos utilizados para medição de IRI apresentam um custo elevado ou exigem muito tempo para sua realização, por esta razão, a procura por praticidade torna os medidores do tipo-resposta mais difundidos e utilizados, sendo aqueles que fornecem um somatório dos desvios do eixo de um veículo em relação à sua suspensão, apresentando um baixo custo e alto rendimento (DNIT, 2006).

O desempenho funcional de um pavimento pode ser medido a partir da sua serventia, que está relacionada às condições da superfície da estrutura e ao conforto ao rolamento, determinando os limites aceitáveis para restauração, manutenção e trafegabilidade (BERNUCCI *et al.*, 2010). De acordo com o DNIT (2006), a serventia está associada a diversos parâmetros e índices que geralmente estão correlacionados, entre eles está o IRI, que avalia a irregularidade longitudinal no pavimento e é citado como parâmetro para a análise funcional das vias pelo do Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), sendo ainda o mais frequentemente utilizado.

Os estudos para a realização da medição do IRI nos pavimentos de forma mais rápida e eficiente resultou na utilização do *smartphone* (BISCONSINI, 2016) uma tecnologia móvel considerada como um equipamento do tipo resposta, no qual apresenta baixo custo, alta produtividade e fácil operação. Apesar de não se enquadrar como medidor convencional da classe, esses dispositivos medem as acelerações verticais em um veículo quando acoplado ao mesmo.

Ainda de acordo com Bisconsini (2016), os sinais obtidos por meio do *smartphone* são muito sensíveis à velocidade em que o veículo trafega, por este motivo necessita de calibração para relacionar seus valores de deslocamentos verticais aos valores de referência do IRI. A maioria

dos estudos com utilização do *smartphone* utilizam como principais ferramentas suas funções sensoriais, com destaque para o acelerômetro e o Sistema de Posicionamento Global (GPS), obtendo dados de velocidade, localização, vibração e aceleração vertical.

O uso dessas funções é comprovado para determinar as condições de irregularidade do pavimento, possibilitando ainda a verificação de velocidades que podem interferir nos resultados e informações de coordenadas georreferenciadas do local. Do mesmo modo, suas funções permitem verificar se há existência de demais defeitos que possam interferir nas condições de trafegabilidade da via (GONZÁLEZ *et al.*, 2008; DOUANGPHACHANH, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2018).

No entanto, existem características desfavoráveis ao uso de aplicativo de *smartphone* para estimar o IRI, entre elas, está a necessidade de um processo de calibração, pois seus resultados são influenciados pelo modelo do veículo e a velocidade utilizada na realização da medição, bem como, o modelo do *smartphone* e o tipo de suporte usado para fixar o aparelho no veículo. Apesar das desvantagens, o estudo de novas tecnologias é relevante para a atualização dos sistemas de medição e a possibilidade de comparação com estudos internacionais mais desenvolvidos (BISCONSINI, 2020).

Desta forma, o desenvolvimento de aplicativos de medição de irregularidade longitudinal vem sendo objeto de estudo frequente por apresentar fácil manuseio, comprovação de seus resultados, inovação e acessibilidade. São exemplos dessa nova tecnologia os aplicativos para *smartphone*, *Roadroid*, *RoadLab* e *SmartIRI*, possuindo em comum a utilização de sensores de aceleração vertical para estimação da irregularidade longitudinal da estrada (FORSLÖF e JONES, 2013; WANG e GUO, 2016 e ALMEIDA, 2018).

3. MÉTODO DE PESQUISA

O levantamento em campo foi realizado por meio de um aplicativo denominado *SmartIRI*, desenvolvido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (PETRAN/UFC). A ferramenta foi embarcada em um veículo de passeio por meio de um suporte fixado no para-brisas e baseia-se na utilização dos sensores presentes no *smartphone*, tais como o acelerômetro e o GPS, para a obtenção dos dados de aceleração vertical, velocidade e localização.

Os dados provenientes do acelerômetro e do receptor de GPS foram processados de modo a informar o valor do IRI georreferenciado em tempo real. A velocidade do levantamento foi da ordem de 60 km/h. O modo de suporte do *smartphone* no para-brisas do veículo para captação dos dados e a tela inicial do *SmartIRI*, são ilustrados na Figura 2.

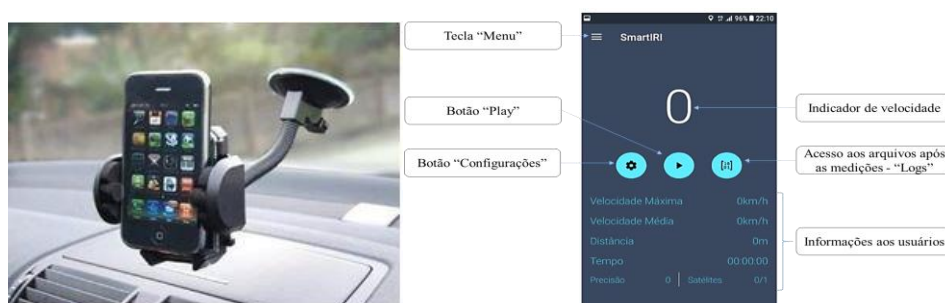


Figura 2: Suporte e tela inicial do aplicativo *SmartIRI*.

Os dados obtidos durante os levantamentos no trecho avaliado foram organizados com base na classificação da Tabela 2. Após o término do levantamento de dados, o próprio aplicativo forneceu uma planilha com os resultados obtidos, em intervalos de medição de aproximadamente 100 metros.

Tabela 2: Classificação da irregularidade do aplicativo *SmartIRI* (Almeida, 2018).

| Condição de Trafegabilidade | <i>SmartIRI</i> |
|-----------------------------|------------------|
| Excelente | $0 < IRI < 2$ |
| Bom | $2 \leq IRI < 4$ |
| Regular | $4 \leq IRI < 6$ |
| Ruim | $IRI \geq 6$ |

O trecho analisado para o estudo está situado no acesso à Usina Termelétrica do Pecém I, na cidade de São Gonçalo do Amarante, estado do Ceará, com Início (I) na rotatória de acesso à portaria da usina e Término (T) na Rodovia Estadual CE-085, como mostra a Figura 3. Os levantamentos do IRI foram realizados nas duas pistas de rolamentos e nas quatro faixas tráfego entre os meses de julho de 2019 e fevereiro de 2020, por meio de uma passagem em cada faixa. As medições foram feitas uma vez em cada mês, sendo possível observar as modificações na superfície de rolamento durante um período aproximado de 30 dias.



Figura 3: Trecho inspecionado e sentido das faixas de tráfego (Adaptado do Google Earth, 2020).

O trecho experimental inspecionado foi acompanhamento da Universidade federal do Ceará (UFC) durante sua execução. O pavimento apresenta cinza volante (50%) e solo (50%) na camada de sub-base, base com composição de cal estabilizado, percentual entre 95% a 98,4 %, e cinza volante, variando entre 1,6% e 5,0%, além de uma camada de ligação (binder) e a camada superficial de rolamento. A Figura 4 ilustra a estrutura do pavimento estudado.

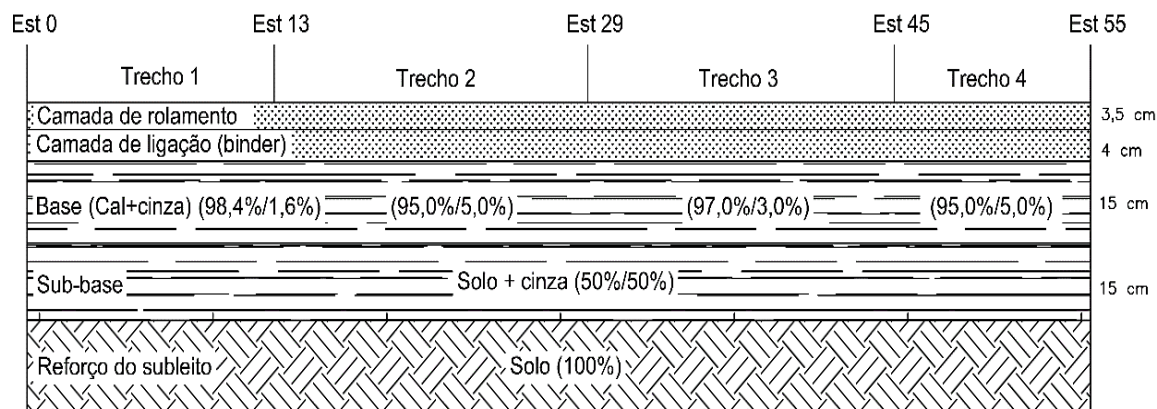


Figura 4: Estrutura do pavimento experimental estudado

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do monitoramento mensal dos valores oriundos do *SmartIRI*, nos trechos inspecionados, elaboraram-se gráficos de linhas para avaliar as alterações e tendência da irregularidade longitudinal por meio do IRI, em m/km, tendo como base os índices apresentados na Tabela 2. Conforme os gráficos das Figuras 5 e 6, que constam os dados obtidos nas faixas externa (F1) e interna (F2) do levantamento, iniciado na rotatória de acesso à portaria da Usina Termelétrica e finalizado na Rodovia CE-085, observou-se que os maiores valores de IRI foram 4,03 m/km e 4,79 m/km, classificados com o conceito regular.

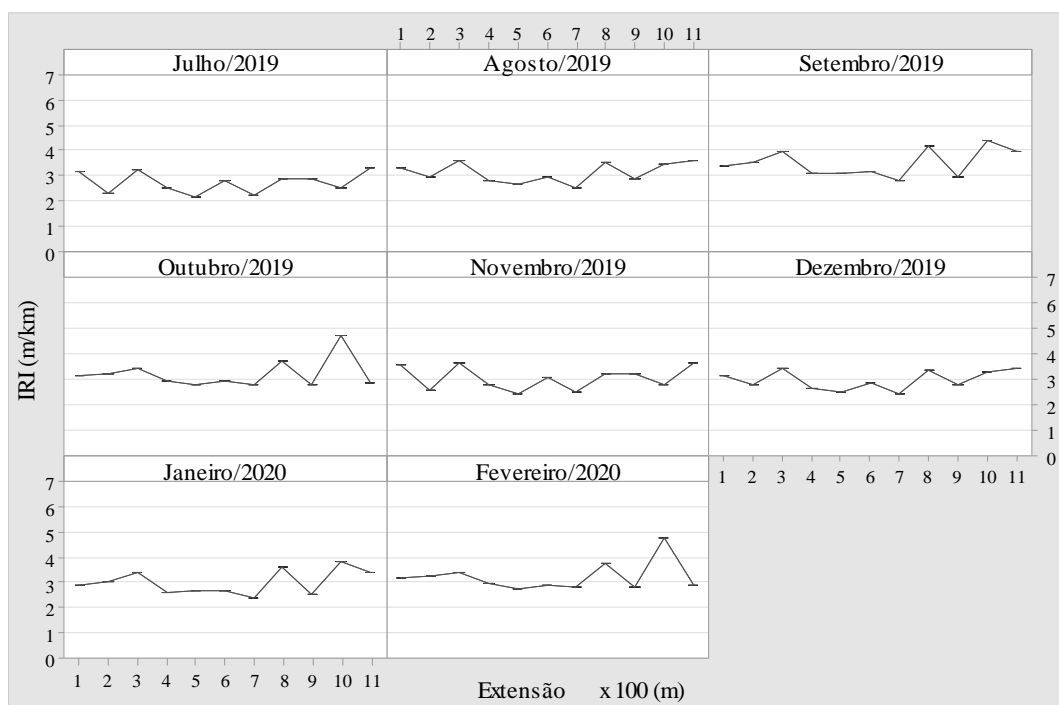


Figura 5: Faixa Externa – F1 (Rotatória/CE-085)

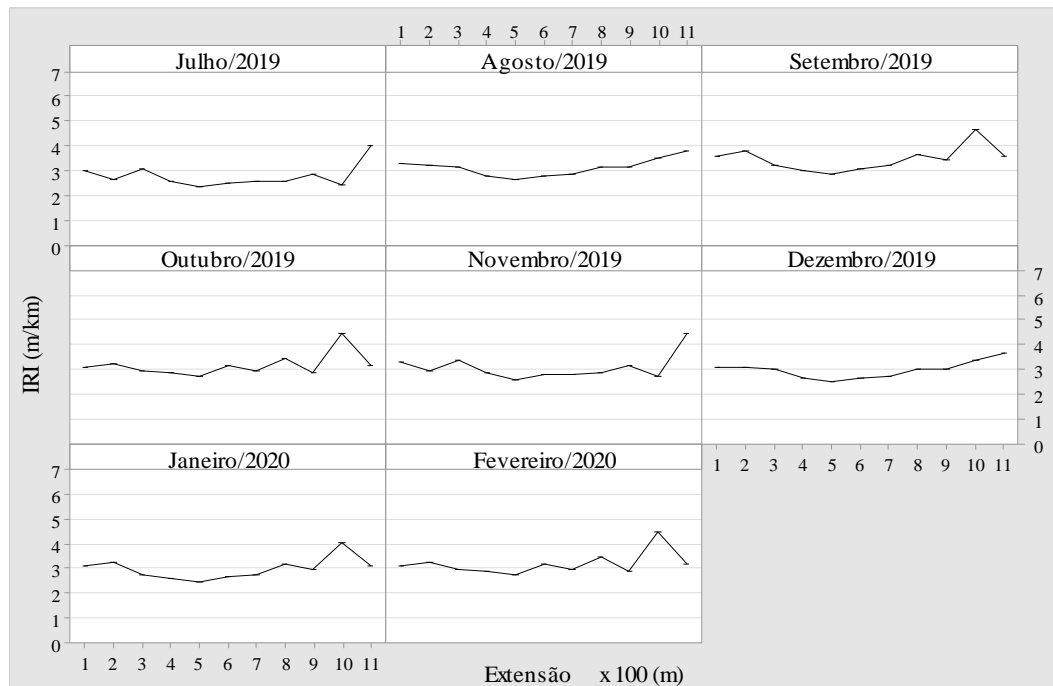


Figura 6: Faixa Interna – F2 (Rotatória/CE-085)

Por sua vez, as Figuras 7 e 8 apresentam os dados referentes aos levantamentos iniciados na Rodovia CE-085 e finalizados na Rotatória de acesso à portaria da Usina Termelétrica, constatando-se que os valores máximos de IRI foram obtidos nos mesmos segmentos (na extensão de 300 m), tanto na faixa externa (F3) quanto na interna (F4), variando entre 4,16 m/km a 5,52 m/km, tais valores são em razão da existência de uma lombada neste segmento. Outra análise que os gráficos fornecem é a semelhança da distribuição dos dados coletados em ambas as faixas na extensão do trecho ao longo dos meses.

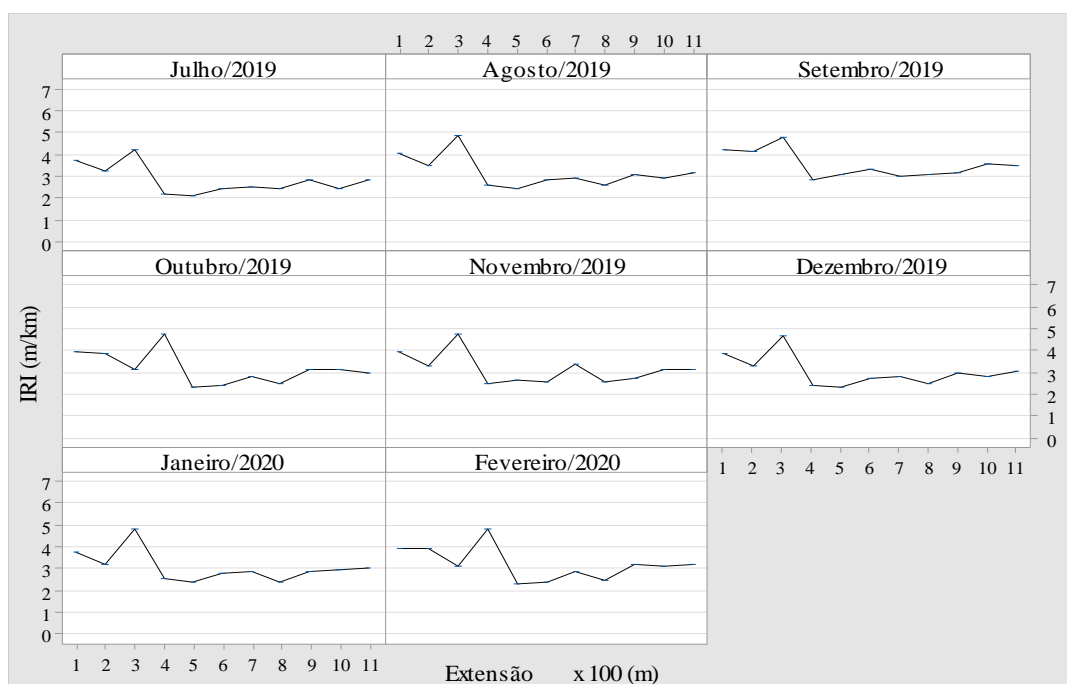


Figura 7: Faixa Externa – F3 (CE-085/Rotatória)

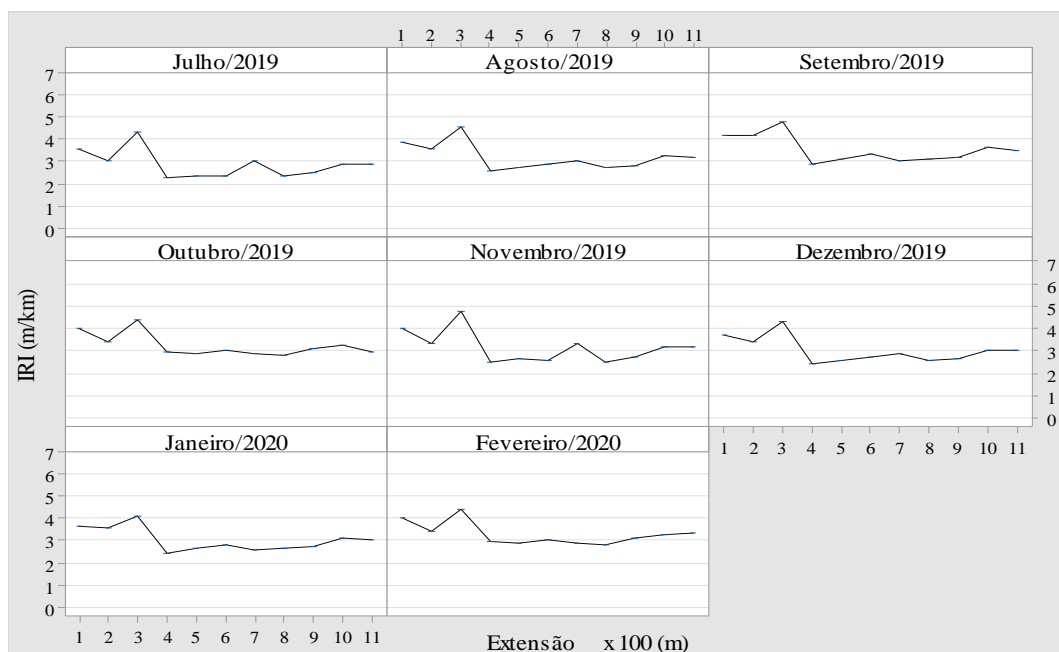


Figura 8: Faixa Interna – F4 (CE-085/Rotatória)

Pode-se destacar ainda, de acordo com os gráficos de linhas das Figuras 5, 6, 7 e 8, que os maiores valores de IRI nos segmentos avaliados apresentaram condições de trafegabilidade classificadas com o conceito regular. De maneira geral, observa-se que, apesar de alguns poucos segmentos apresentarem valores dentro da faixa ‘Regular’ ($4 < IRI < 6$) pode-se afirmar que, conforme a Tabela 3, todos os valores médios de IRI dos trechos podem ser classificados com o conceito ‘Bom’ ($2 \leq IRI < 4$) em todas as faixas de tráfego durante os quatro levantamentos.

Tabela 3: Análise estatística dos valores mensais de IRI, por faixa de tráfego, entre os meses de julho/2019 a fevereiro/2020

| Mês | Faixa F1 | | | Faixa F2 | | |
|----------------|--------------|----------------------|------------------------------|--------------|----------------------|------------------------------|
| | Média (m/km) | Desvio padrão (m/km) | Coefficiente de variação (%) | Média (m/km) | Desvio padrão (m/km) | Coefficiente de variação (%) |
| Julho/2019 | 2,71 | 0,41 | 15,13 | 2,73 | 0,47 | 17,18 |
| Agosto/2019 | 3,09 | 0,40 | 12,94 | 3,07 | 0,35 | 11,45 |
| Setembro/2019 | 3,47 | 0,55 | 15,85 | 3,41 | 0,50 | 14,58 |
| Outubro/2019 | 3,21 | 0,60 | 18,69 | 3,17 | 0,50 | 15,68 |
| Novembro/2019 | 3,03 | 0,45 | 14,85 | 3,06 | 0,53 | 17,19 |
| Dezembro/2019 | 2,93 | 0,38 | 12,97 | 2,95 | 0,34 | 11,44 |
| Janeiro/2020 | 3,04 | 0,48 | 15,79 | 2,99 | 0,43 | 14,50 |
| Fevereiro/2020 | 3,24 | 0,60 | 18,52 | 3,20 | 0,47 | 14,82 |

| Mês | Faixa F3 | | | Faixa F4 | | |
|----------------|--------------|----------------------|------------------------------|--------------|----------------------|------------------------------|
| | Média (m/km) | Desvio padrão (m/km) | Coefficiente de variação (%) | Média (m/km) | Desvio padrão (m/km) | Coefficiente de variação (%) |
| Julho/2019 | 2,77 | 0,70 | 25,14 | 2,82 | 0,67 | 23,69 |
| Agosto/2019 | 3,15 | 0,77 | 24,31 | 3,15 | 0,64 | 20,23 |
| Setembro/2019 | 3,52 | 0,85 | 24,27 | 3,49 | 0,64 | 17,42 |
| Outubro/2019 | 3,18 | 0,75 | 23,60 | 3,24 | 0,52 | 16,04 |
| Novembro/2019 | 3,10 | 0,78 | 25,13 | 3,16 | 0,75 | 23,67 |
| Dezembro/2019 | 3,02 | 0,74 | 24,36 | 3,03 | 0,61 | 20,26 |
| Janeiro/2020 | 3,52 | 0,85 | 24,27 | 3,05 | 0,56 | 18,43 |
| Fevereiro/2020 | 3,24 | 0,80 | 24,64 | 3,24 | 0,52 | 16,04 |

Observando a variável do coeficiente de variação, constatou-se que as Faixas F1 e F2 apresentaram valores homogêneos quando analisadas de forma geral, entre 17% e 19%, ou seja, há pouca dispersão entre os resultados encontrados. Em contrapartida, as Faixas F3 e F4 exibiram elevados valores de coeficiente de variação, entre 20% e 25%, indicando heterogeneidade entre os dados.

Os valores médio e alto de variabilidade (coeficiente de variação), expostos na Tabela 3, podem ser motivados pela presença de uma lombada e um segmento com falhas no processo executivo, conforme a Figura 9, que apresenta remendos na via. Tal defeito advém de um processo de manutenção, no qual objetiva melhorar a condição do pavimento no local, quando este se encontra danificado por efeitos climáticos, elevadas cargas ou uso de materiais de baixa qualidade em sua execução.

Desta forma, os defeitos podem influenciar diretamente na irregularidade longitudinal da via, havendo, assim, a necessidade de atividades de manutenção para melhorar a sua trafegabilidade. No entanto, os valores médios de IRI garantem a funcionalidade das quatro faixas de tráfego, classificando-as com uma boa condição de rolagem quanto à irregularidade longitudinal.



Figura 9: Presença de um remendo de grande extensão no segmento 10 das faixas F1 e F2

Considerando-se todos os levantamentos realizados de julho/2019 a fevereiro/2020, verifica-se o comportamento descrito pelas curvas do gráfico da Figura 10, em que se apresentam os valores médios mensais de IRI, em m/km, por faixas de tráfego. Desta forma, observa-se que os dados de IRI se distribuem, aproximadamente, entre 2,5 m/km e 3,5 m/km no decorrer dos meses, apesar de pequeno, esse aumento dos valores no mês de setembro pode ser justificado pela necessidade de calibração do equipamento, por uma possível falta de controle no ajuste e fixação ao para-brisa do veículo ou até mesmo uma consolidação diferencial nas subcamadas do pavimento. Este último pode ser ocasionado devido à passagem do tráfego, umidade proveniente das chuvas ou materiais que compõem as camadas, neste caso, o uso da cinza volante, no qual pode ter influenciado no aumento da IRI no início da vida útil da estrutura. No entanto, tal variação não minimiza a classificação das vias.

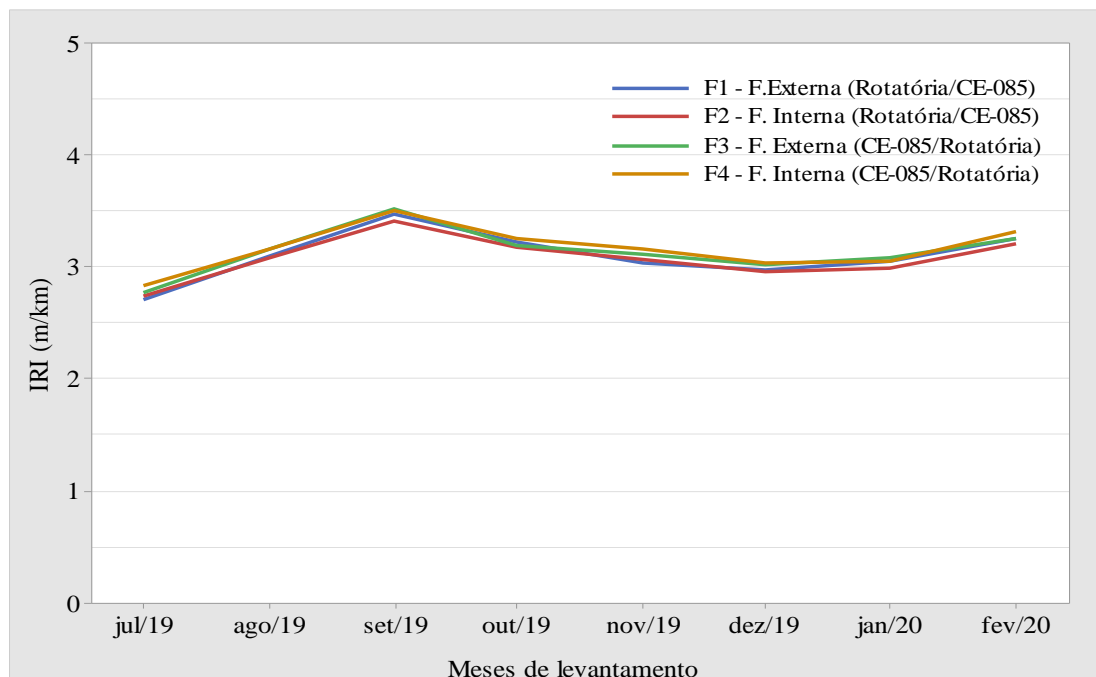


Figura 10: Valores médios mensais do IRI por faixa de tráfego

Observou-se que os menores valores médios de IRI foram obtidos no primeiro levantamento, em julho/2019, com 2,71 m/km da faixa F1, e os maiores valores foram registrados no mês de setembro/2019, com maior média de 3,52 m/km para a faixa F3, seguido de 3,49 m/km para o F4, ou seja, de maneira geral, a pista que se inicia na Rodovia CE-085 com destino à Rotatória tem comportamento pior nas condições de trafegabilidade das duas faixas de tráfego quando comparada à pista do sentido contrário. Além disso, verifica-se que a partir do mês de setembro/2019, há uma tendência de decréscimo dos valores médios até dezembro/2019, com menor média de 2,95 m/km para a faixa F2; nos meses subsequentes (janeiro e fevereiro/2020) os valores elevam-se chegando ao valor máximo de 3,31 m/km na faixa F4.

Verificou-se a variância das médias por faixa no decorrer dos meses e aplicou-se o teste por hipótese da análise da variância (ANOVA) com um fator, pois tem-se diferentes variáveis (meses) associadas à obtenção do IRI. Para critério de hipótese nula, aferiu que as médias gerais são iguais, enquanto a hipótese alternativa possui pelo menos uma média diferente. A Tabela 4 mostra o resultado do teste f das médias verificadas para cada faixa de tráfego.

Tabela 4: Resultado do teste f da ANOVA

| Faixa | f-valor | p-valor | f-crítico |
|-------|---------|---------|-----------|
| F1 | 2,30 | 0,03 | 2,13 |
| F2 | 2,15 | 0,05 | 2,13 |
| F3 | 1,00 | 0,43 | 2,14 |
| F4 | 1,01 | 0,45 | 2,14 |

Conforme o resultado do teste f (Tabela 4), para um nível de significância de 0,05, constatou-se que a hipótese nula foi rejeitada para as medidas das faixas F1 e F2, evidenciando que pelo menos uma média é diferente. Por sua vez, a hipótese nula foi aceita as faixas F3 e F4, não existindo uma diferença significativa.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados das análises gráfica e estatística descritiva, constatou-se que o pavimento apresenta adequadas condições de trafegabilidade e segurança, uma vez que, a maior parte dos segmentos apresentaram o conceito bom atribuído pelo *SmartIRI*, concordando com os índices apresentados por Almeida (2018), na Tabela 2. As análises indicaram que as faixas representadas por F1 e F2, vias com sentido CE-085/Rotatória, obtiveram maiores valores IRI, implicando em uma superfície de rolamento mais instável devido à presença de um remendo de grande extensão.

Observou-se que a utilização de *smartphone* para o levantamento dos valores de IRI em vias com pavimento flexível, mostrou-se uma opção viável de monitoramento mensal das alterações de irregularidade longitudinal devido seu baixo custo e alto rendimento. Ressalta-se que durante a coleta e análise de dados, a interferência humana é mínima, possibilitando uma maior acurácia dos resultados obtidos, além de menos tempo de avaliação quando comparado a outros equipamentos convencionais, desde que seja calibrado e fixado no suporte adequadamente.

Conclui-se que estudos relacionados a utilização de aplicativos para fins de obtenção da irregularidade longitudinal, e, por consequência, do conforto ao rolamento, são importantes para a disseminação dessa nova tecnologia, pois são ferramentas que contribuem no diagnóstico funcional da via, podendo ser auxílio de medição para órgãos rodoviários, banco de dados para o Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) e facilidade na execução de ensaios, visando a medição e restauração periódica de defeitos que possam interferir na segurança dos usuários.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel (órgão regulador), à Energia Pecém e à Eneva pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, L. C. (2018) *Aplicativo para Smartphone Destinado à Medição da Irregularidade Longitudinal em Rodovias*. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Almeida, L. C.; Oliveira, F. H; Ramos, S. P. (2018) *Estudo da condição de superfícies em rodovias por meio do uso de aplicativo para smartphone*. Revista Transportes. vol. 25. n. 2. p. 70-83.
- Arhin, S. A., Williams, L. N., Ribbison, A. e Anderson, M. (2015) Predicting Pavement Condition Index Using International Roughness Index in a Dense Urban Area. *Journal of Transportation Engineering Research*, p. 10-17. DOI: 10.5923/j.jce.20150501.02
- Bernucci, L. B., Mota, L. M. G., Ceratti, J. A. P. e Soares, J. B. (2010) *Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras. Abeda. Rio de Janeiro, RJ.
- Bisconsini, D. R. (2016) *Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones*. 208f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Bisconsini, D. R. (2020) *Monitoramento da Condição Funcional de Pavimentos com Dados de Smartphones*. 2020. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT. (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.
- Douangphachanh, V. (2014) *The Development of a Simple Method for Network-wide Road Surface Roughness Condition Estimation and Monitoring Using Smartphone Sensors*. Tese de Doutorado, Tokyo Metropolitan University. Tokyo, Japão.
- Forslöf, L., Jones, H. (2015) *Roadroid: Continuous road condition monitoring with smart phones*. Journal of Civil Engineering and Architecture, v. 9, n. 4, p. 485-496.
- Gillespie, T. D. (1980) *Calibration of response Type Road Roughness Measuring Systems*. National Cooperative Highway Research Program Report. No. 228.
- Gillespie, T. D.; Paterson, W. D. O.; Sayers, M.W. (1986) Guidelines for Conducting and Calibrating Road

- Roughness Measurements. *World Bank Technical Paper*. Number 46, 87 p.
- González, A., O'Brien, E.J., LI, Y.-Y. e Cashell, K. (2008) The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness. *Vehicle System Dynamics*, v. 46, n. 6, p. 483-499.
- Google Earth (2020). Disponível em: <<https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: maio de 2020.
- Hirpahuanca, D. L. (2016) *Determinación y Comparación de la Regularidad Superficial del Pavimento de la Carretera Cusco-Urcos, Usando Teléfonos Inteligentes y el Rugosímetro de MERLIN*. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidad Andina del Cusco.
- Lerch, R. L. (2002) Previsão de irregularidade pós-recape em rodovias do RS: ajuste do modelo HDM-4. 108 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Park K., Thomas, N., e Lee, K. (2007) Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition. *Journal of Transportation Engineering-asce*:doi:10.1061/(ASCE)0733-947X (2007)133: 12(706).
- Pinto, S., Preussler, E.S. (2010) *Pavimentação rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*. 2ª edição. Rio de Janeiro/RJ: Copiarte.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., e Queiroz, C. A. V. (1986) International experiment to establish correlations and standard calibration methods for road roughness measurements. *World Bank Technical Paper*, No. 45. The World Bank, Washington, D.C
- Wang, W.; Guo, F. (2016) *RoadLab*: revamping road condition and road safety monitoring by crowdsourcing with Smartphone App. Washington: *Transportation Research Board*, 95th Annual Meeting.

Nayara de O. Gurjão (nayaragurjao@hotmail.com)
José Wémenson R. Chaves (wemensonrabelo@gmail.com)
Lucas Cavalcante de Almeida (lucascavalcante@det.ufc.br)
Francisco Heber Lacerda de Oliveira (heber@det.ufc.br)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará