



Escaneamento tridimensional a laser como alternativa para aquisição de parâmetros de rugosidade de pavimentos - estudo de técnica computacional

Gisele Goulart Tavares, Natália da Silva Rossi de Resende,

Leonardo Goliatt da Fonseca, Flávia de Souza Bastos,

Gabriel Henrique Carvalho Neves, Geraldo Luciano Marques, Michèle Farage

`giselegoulart@ice.ufjf.br`

`{natalia.resende, gabriel.neves2011}@engenharia.ufjf.br`

`{leonardo.goliatt, flavia.bastos, geraldo.marques, michele.farage}@ufjf.edu.br`

Universidade Federal de Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia. Campus Universitário, 36036-330, Juiz de Fora, MG, Brasil

Abstract. *A caracterização da superfície de pavimentos mostra-se de extrema importância para garantir a segurança nos sistemas de locomoção rodoviário e mesmo no transporte aeroviário. A performance dos pavimentos é avaliada e classificada a partir de vários parâmetros, sendo a rugosidade um dos principais, pois influencia diretamente a qualidade do contato entre pneu e pista. Atualmente, tal caracterização é feita por meio de ensaios indiretos, como o de Mancha de Areia, o qual consiste em avaliar a rugosidade a partir da sua correlação com a altura média de areia que preenche os vazios de um pavimento. O presente trabalho tem como objetivo propor uma alternativa para a avaliação das características de superfícies asfálticas e de concreto de cimento Portland, utilizando escaneamento tridimensional a laser. O método consiste em escanear a superfície de um corpo-de-prova extraído do pavimento e seccioná-lo por sucessivos planos transversais até que toda a superfície seja representada. Posteriormente, o algoritmo realiza o cálculo da altura média dos perfis, obtendo um parâmetro que pode ser associado ao valor de rugosidade obtido experimentalmente. O emprego desta metodologia mostra-se promissor, pois além de minimizar os erros também agiliza o processo de análise permitindo um maior controle sobre a qualidade do pavimento.*

Keywords: *Escaneamento Tridimensional, Pavimento Asfáltico, Rugosidade, Mancha de Areia*

1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário ainda é de longe o predominante no Brasil. Ele é constituído por 485625 km de rodovias que correspondem a 61.10% da matriz de transportes do país (ABCR, 2016). Com a crescente demanda dos usuários e legislações mais restritivas, é cada vez maior a necessidade por parte das concessionárias que administram as rodovias brasileiras, de manter um alto padrão de conforto e segurança.

O transporte aeroviário é outro modal em que as condições do pavimento são fundamentais, embora sua participação seja extremamente menor, representando apenas cerca de 0.40% da matriz (ABCR, 2016). Como as cargas e velocidade das aeronaves são significativamente maiores que as dos veículos rodoviários, as condições do pavimento devem sofrer um controle ainda mais rigoroso para garantir um bom desempenho na decolagem e pouso.

O pavimento é definido como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem (Bernucci et al., 2006) e este pode ser classificado tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. A utilização de um ou outro tipo depende da carga a que ele estará submetido, sendo que a grande maioria dos pavimentos rodoviários brasileiros são constituídos por revestimentos flexíveis (asfálticos) e os aeroviários por revestimentos rígidos (concreto) ou mistos (concreto asfáltico). Como o revestimento é destinado a resistir diretamente as ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores (Bernucci et al., 2006), deve-se dar atenção especial às suas propriedades tais como: resistência ao rolamento, desgaste do pneu e barulho interior e exterior.

Uma importante ferramenta na análise de superfícies dos pavimentos é a medição do atrito. As propriedades diretamente relacionadas ao atrito dependem das características da textura superficial, a qual é definida como o desvio da superfície do pavimento em relação a uma superfície perfeitamente plana (Sengoz et al., 2012). A textura é um componente que pode estar sujeito a diversos níveis de investigação. O parâmetro que mede a textura é a rugosidade, que é definido pelo comprimento de onda (distância mínima entre pontos que se repetem periodicamente em uma curva) (Bitelli et al., 2012).

Cada nível de textura está relacionado à uma característica física do pavimento, como representado pela Figura 1 extraída de Bitelli et al. (2012). Os níveis que predominantemente afetam o atrito são a micro-textura e a macro-textura, como estudado por Henry (2000) e Sahaf and Rahimi (2014). A micro-textura corresponde a comprimentos de onda menores que 0.5 mm e amplitude pico-pico de perfil entre 1 μm e 0.2 mm, estando relacionada aos minerais agregados utilizados e a cada agregado presente no limite da superfície. A microtextura, ou aspereza do pavimento, atua principalmente a baixas velocidades e em condições de pista seca, proporcionando aderência entre pneu e pista e regulando o desgaste dos pneus. A macrotextura corresponde a comprimentos de onda da ordem de 0.5 mm a 50 mm e amplitude pico-pico de perfil entre 0.2 mm e 10 mm e está relacionada diretamente a curva granulométrica e a técnica de pavimentação. A macrotextura é responsável por evitar a separação entre o pneu e a pista devido a aquaplanagem, conferindo resistência à derrapagem principalmente em velocidades elevadas. Também contribui para a melhora da visibilidade em condições de pista molhada, atenuando a reflexão da luz e melhorando a percepção das marcas de sinalização horizontal, além de reduzir o barulho gerado pelo contato entre o pneu e pavimento.

Atualmente, os principais ensaios destinados à medição da rugosidade no Brasil são o ensaio de Mancha de Areia e do Pêndulo Britânico. Embora apresentem a vantagem de serem de

Comprimento de onda	1 μm	10 μm	100 μm	1 mm	10 mm	100 mm	1 m	10 m	100 m
Categoria PIARC	Microtextura				Macrotextura		Megatextura	Rugosidade	
Influência da característica da superfície do pavimento					Resistência à rolagem				
					Qualidade de passeio (suavidade)				
				Atrito clima húmido					
	Atrito clima seco								
				Respingos e spray					
	Desgaste do pneu						Desgaste do veículo		
					Barulho no interior do veículo				
				Barulho contato pneu- pavimento					

Figura 1: Relação entre a textura e as características do pavimento.

simples execução, os ensaios experimentais não apresentam resultados de grande acurácia, uma vez que estão sujeitos a diversas influências externas que ocasionam incertezas. Nesse contexto, métodos mais eficazes para quantificar as propriedades dos pavimentos tem se mostrado de extrema importância (Praticò et al., 2016). O presente trabalho propõe como alternativa, a determinação da rugosidade por meio da utilização de um *scanner* tridimensional a laser. Este equipamento tem se tornado cada vez mais acessível, possuindo inclusive versões portáteis que permitem a reprodução da superfície e posterior análise por meio de procedimentos computacionais. Através da comparação dos dados experimentais com os resultados computacionais, foram realizados os cálculos de erro relativo, desvio padrão, mediana e curtose, a fim de determinar a acurácia do método desenvolvido e analisar a possibilidade de aplicação em estudos sobre rugosidade de pavimentos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção dos dados

O LiDAR, do inglês *Light Detection and Ranging* é uma técnica de varredura, rastreamento e perfilamento a laser. Uma aplicação comum do LiDAR é nos aparelhos de escaneamento tridimensional (Wulder et al., 2012). A tecnologia de escaneamento tridimensional permite a representação de objetos de grande complexidade. O resultado do escaneamento é uma nuvem de pontos 3D que representa com precisão o objeto escaneado. O processamento da nuvem de pontos resultante do escaneamento tridimensional de pavimentos asfálticos pode permitir a determinação automática de parâmetros de difícil medição manual como a microrrugosidade da textura.

Neste estudo, foi utilizado o NextEngine Laser Scanner 3D, cujas especificações técnicas estão descritas na Tabela 1, a seguir. Os ensaios foram executados em laboratório, sobre uma superfície plana e sem interferências externas. O software ScanStudio, desenvolvido especificamente para o NextEngine Laser Scanner, foi utilizado para a consolidação e processamento inicial das imagens.

Para análise dos pavimentos asfálticos foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 15cm de diâmetro, extraídos em campo. Já para a análise dos pavimentos rígidos, utilizou-se

Tabela 1: Especificações técnicas do NextEngine Laser Scanner 3D no modo macro.

NextEngine Laser Scanner 3D	
Dimensões	224 x 91 x 277 mm
Campo de Visão	13 x 10 cm
Alcance	18 cm
Precisão	± 0.127 mm
Resolução	200 DPI
Velocidade de Aquisição	50000 pontos/segundo



Figura 2: Obtenção dos dados a partir de corpo-de-prova cilíndrico e de placa de concreto.

uma placa de concreto moldada com dimensões 30cm de largura e 50cm de altura. Foram realizadas 3 e 6 varreduras nos corpos-de-prova, a fim de comparar a influência do número de leituras nos resultados computacionais. Dessa forma, pretende-se determinar qual das configurações apresenta aproximações mais acuradas e então conduzir o estudo adotando-se o mais eficaz. A Figura 2 apresenta como os dados foram obtidos dos corpos-de-prova asfálticos e da placa de concreto Portland.

Optou-se pela realização do ensaio de Mancha de Areia por este exigir aparatos simples e ser de fácil execução. Além disso, o parâmetro obtido, a profundidade média da macro-textura do pavimento pode ser facilmente correlacionado com os resultados computacionais.

2.2 Métodos

Ensaio experimental

Os dados experimentais foram obtidos por meio do ensaio de mancha de areia, normatizado pela ASTM E965. Este método de análise descreve um procedimento para a determinação da profundidade média da macrotextura da superfície do pavimento através da aplicação cuidadosa

de um volume conhecido de material na superfície e subsequente medição da área total coberta (ASTM, 2006). O referido procedimento está descrito a seguir:

1. Deve ser escolhido um local protegido pelo vento, sendo possível instalar telas para formarem uma barreira de proteção, se necessário.
2. Realiza-se a limpeza da superfície com o auxílio de uma escova ou pincel, removendo todos os resíduos que possam estar preenchendo os vazios.
3. Despeja-se na superfície o frasco contendo areia fina e espalha-se o volume conhecido de material sobre ela com auxílio de um aparato emborrachado. Essa etapa deve ser feita com movimentos circulares de forma a criar uma forma mais próxima de um círculo possível.
4. O diâmetro do círculo é medido em quatro direções e a média aritmética é calculada.
5. A Profundidade Média da Macrot textura do Pavimento (MTD, do inglês *Mean Texture Depth*) é calculada utilizando a Equação 1.

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (1)$$

onde V representa o volume de areia utilizado no ensaio e D a média dos diâmetros obtidos através do círculo formado pela areia.

Método Computacional

Para a análise computacional dos dados obtidos através do escaneamento tridimensional a laser foi realizado o procedimento computacional de forma que toda a superfície fosse utilizada para aproximação da rugosidade. O método consiste nas seguintes etapas:

1. Leitura do conjunto de dados e o processamento para a retirada da superfície de interesse. O tratamento dos dados provenientes do *scanner* foi necessário pela presença de valores atípicos e partes que não pertencem ao objeto influenciarem de forma negativa no cálculo dos parâmetros de rugosidade. Para isso, o algoritmo filtra e retira os pontos que estiverem fora de uma distância radial estabelecida, informada através de parâmetros previamente.
2. Orientação correta dos dados. Em alguns casos o conjunto de pontos pode apresentar um ângulo em relação ao plano xy , o que impossibilita a análise efetiva da rugosidade. Com o objetivo de orientar os pontos na direção de maior variação, foi utilizada a técnica Análise de Componentes Principais (PCA) de forma que a direção de maior variação fique orientada no eixo- x e a de menor variação no eixo- z que será utilizado para o cálculo da profundidade.
3. Separação da superfície por meio de planos transversais. Para que todos os dados capturados pelo *scanner* fossem utilizados, o centróide da superfície é determinado através das médias das distâncias dos eixos coordenados, sendo utilizado como referência para a divisão dos planos radiais.
4. Determinação dos pontos pertencentes a cada seção. A superfície foi cortada por 19 planos radiais rotacionados em torno do centróide separados por 9° entre si. Para cada ponto $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ da nuvem de pontos é verificada a distância d do plano ao ponto de forma que o ponto pertence a seção se $|d| < \Delta y$. Na Figura 3 podemos ver a representação em

2 dimensões de uma das seções utilizadas pelo algoritmo.

5. Cálculo do volume da seção. O algoritmo determina o volume abaixo da superfície para cada seção definida anteriormente e interpreta como aproximação do volume de um prisma de base retangular. Dessa forma, a altura pode ser encontrada diretamente através da Equação do volume deste prisma (Equação 2).

$$h = \frac{V}{AB} \quad (2)$$

onde h , V , A e B se referem a altura do prisma, volume, comprimento e profundidade respectivamente.

6. Posteriormente é realizado o cálculo da altura média da superfície. O algoritmo calcula a média das alturas obtidas para cada seção e retorna o valor aproximado para a profundidade média da perfil (MPD, do inglês *Mean Profile Depth*).

O algoritmo, além de retornar a rugosidade média e o erro percentual em relação aos dados experimentais, também calcula alguns parâmetros estatísticos descritivos como desvio padrão, mediana e curtose que possibilitam a análise quantitativa dos dados. O desvio padrão fornece informações referentes à dispersão dos dados, permitindo analisar como as alturas se comportam quando distantes da média. A mediana é menos sensível a valores atípicos, divide o conjunto de dados em duas partes iguais possibilitando a análise do centro da distribuição. A análise da facilidade de se obter valores que não se aproximam da média é feita através da curtose, representando que a distribuição dos resultados tem achatamento semelhante ao da distribuição normal quando esta medida de dispersão se aproxima de zero (Magalhães and Lima, 2004).



Figura 3: Seção transversal cortada pelo algoritmo do Pavimento 3. Os pontos foram projetados no plano-xz para visualização em 2 dimensões.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais obtidos para o ensaio de Mancha de Areia estão contidos na Tabela 2, a seguir. Os corpos-de-prova 1 e 2 referem-se a amostras de concreto, 3 e 4 a amostras de asfalto. Os valores médios de MTD encontrados foram 1.000 e 1.035 para concreto e asfalto, respectivamente. Foi realizada a classificação da macrotextura de acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (BRASIL, 2006), concluindo-se que ambos os pavimentos apresentam textura grosseira ou aberta. E ambos se encontram dentro dos limites sugeridos para MTD ($0.6\text{mm} < \text{MTD} < 1.2\text{mm}$).

Tabela 2: Resultado dos ensaios experimentais de Mancha de Areia.

Corpo-de-Prova	Experimental
1	0.998
2	1.002
3	0.770
4	1.300

3.2 Resultados Computacionais

O *scanner* conseguiu representar de forma satisfatória as superfícies dos pavimentos, como pode ser observado nas Figuras 4 e 5. Os dados retornados pelo escaneamento apresentam detalhes visualmente precisos em relação à textura dos corpos-de-prova, de forma que o algoritmo possa ajustar as profundidades próximas das experimentais.

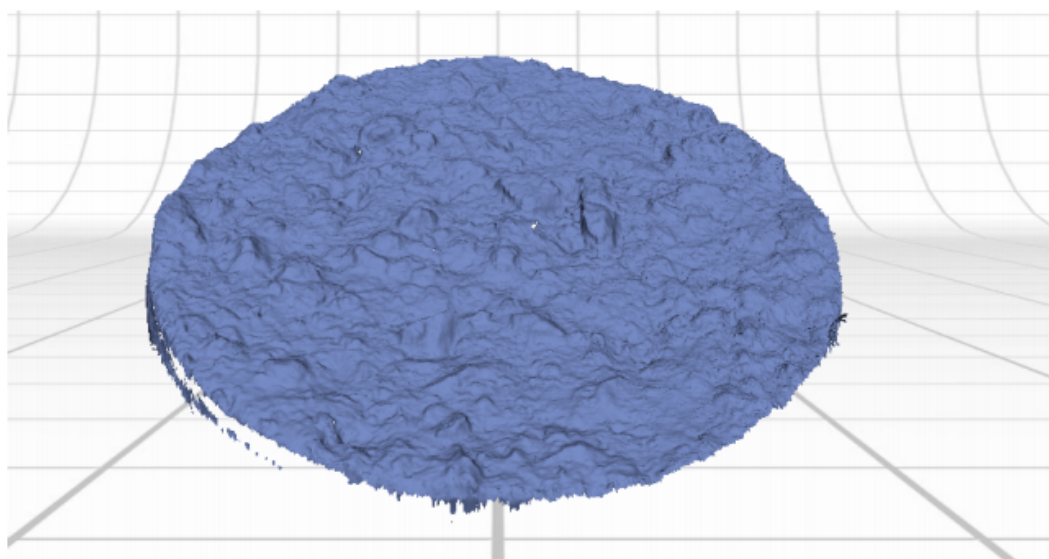


Figura 4: Perfilamento tridimensional com 6 leituras do Pavimento asfáltico 1 antes do processamento para retirada da região de interesse. Representação da superfície retornada pelo *scanner*.

O algoritmo realizou o tratamento dos dados para a retirada dos pontos atípicos e seleção da região de interesse e aproximou as Profundidades Médias do Perfil (MPD) para os corpos-de-prova de asfalto e concreto escaneados em laboratório. Na Tabela 3 constam os valores retornados juntamente com os erros em relação aos resultados experimentais. O método computacional também retorna alguns parâmetros estatísticos descritivos como desvio padrão, mediana e curtose, importantes para uma visualização mais ampla dos resultados. Os valores relacionados aos ajustes computacionais são apresentados na Tabela 4.

3.3 Comparação dos Resultados

As respostas do algoritmo foram bastante próximas dos valores experimentais, sendo importante ressaltar que nos corpos-de-prova asfálticos (3 e 4) o erro relativo em 6 leituras foi

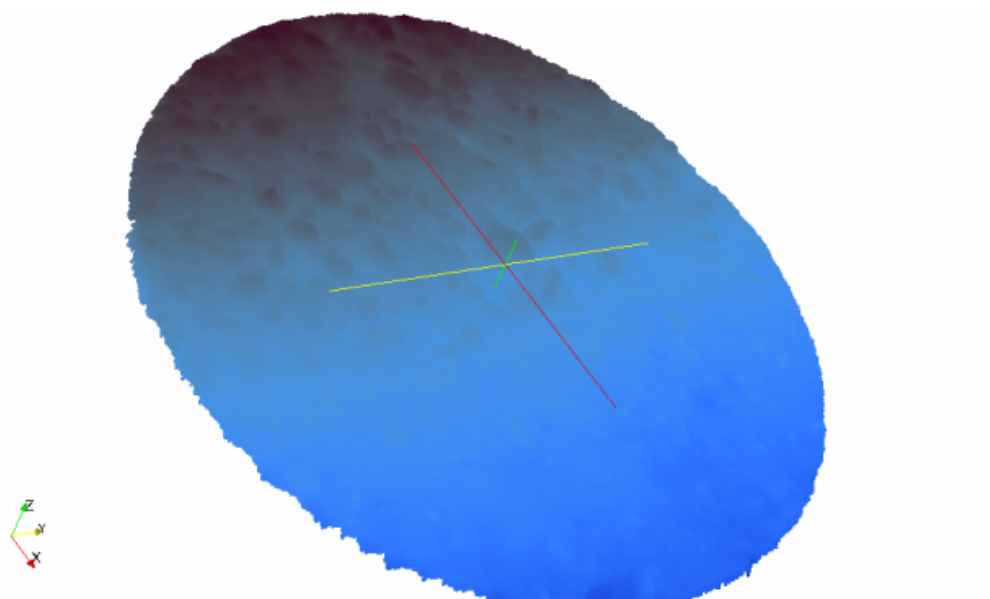


Figura 5: Perfilamento tridimensional com 3 leituras do Pavimento asfáltico de número 2 após o tratamento para retirada de pontos atípicos. Representação da nuvem de pontos retornada pelo escâner.

Tabela 3: Resultados estimados em milímetros e erros em relação aos valores reais para a profundidade média da textura dos corpos-de-prova.

Rótulo	3 leituras		6 leituras	
	Estimado	Erro Relativo (%)	Estimado	Erro Relativo (%)
1	1.012	1.40	1.052	5.41
2	1.001	0.10	1.022	1.99
3	0.792	2.83	0.783	1.70
4	1.285	1.12	1.308	0.61

menor do que em 3 leituras, diferente dos pavimentos de concreto (1 e 2), onde o erro em 6 leituras foi superior. Apesar dos erros serem baixos, este resultado pode sugerir que 3 leituras são suficientes para a análise da profundidade da textura dos pavimentos quando se trata de escaneamento de corpos-de-prova rígidos e 6 leituras seria mais indicado para pavimentos asfálticos. A Figura 6 apresenta um gráfico com a relação entre MTD e MPD nos oito ensaios realizados. O coeficiente de correlação da reta ajustada foi de 0.9815, indicando resultados altamente relacionados.

O desvio padrão ficou em torno de 0.25, de forma que os ajustes das profundidades realizados nos planos transversais se distanciam pouco da média. A mediana se aproximou da média estimada pelo algoritmo mostrando que as distribuições das profundidades foram aproximadamente simétricas. A curtose com valores maiores que zero indica uma distribuição mais alta e concentrada do que a curva normal, se tratando de uma função leptocúrtica, enquanto os resultados menores que zero se referem a uma função mais achatada, chamada platicúrtica (Magalhães and Lima, 2004).

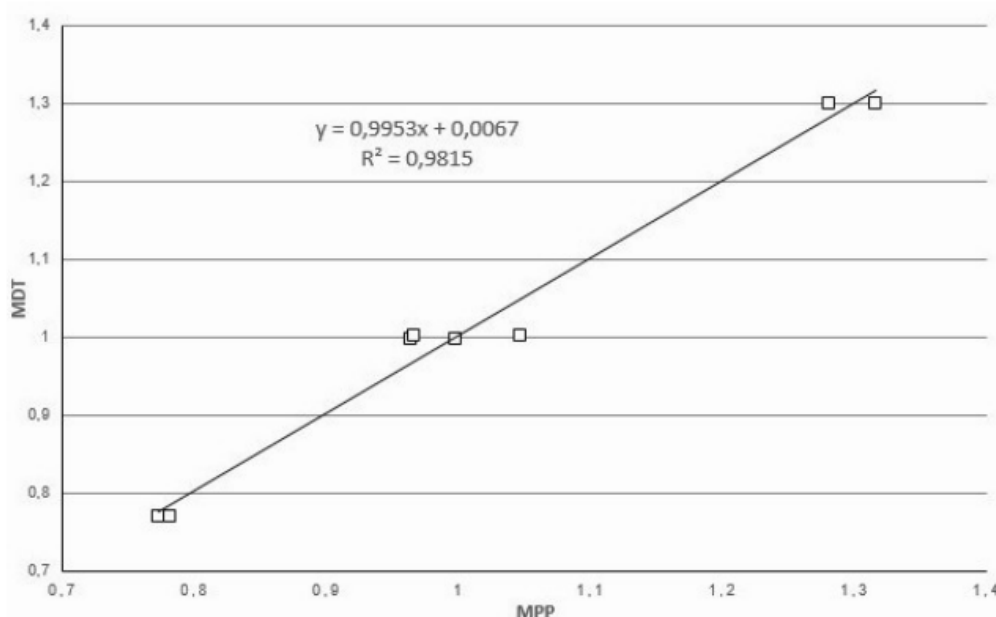


Figura 6: Relação entre MTD e MPD. Os dados se referem a cada um dos oito ensaios realizados.

Tabela 4: Valores estimados para os parâmetros descritivos desvio padrão, mediana e curtose da textura dos pavimentos. Nas colunas são apresentados os valores calculados de acordo com o número de leituras e organizados nas linhas para cada corpo-de-prova.

Corpo-de-Prova	Desvio Padrão		Mediana		Curtose	
	3 leituras	6 leituras	3 leituras	6 leituras	3 leituras	6 leituras
1	0.250	0.323	1.021	0.993	1.051	3.911
2	0.179	0.205	1.010	0.950	-0.204	0.306
3	0.188	0.144	0.782	0.760	-0.253	5.199
4	0.334	0.319	1.239	1.375	-0.948	-0.618

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, realizou-se a comparação de dois tipos de pavimentos (rígidos e flexíveis) com os resultados obtidos através do ensaio de Mancha de Areia e do procedimento computacional desenvolvido. O coeficiente de correlação obtido ($R^2=0.9815$) mostra que a princípio, o método computacional é bastante eficiente para a avaliação da Macrotextura Média, de modo que possa vir a ser utilizado em estudos sobre análise de pavimentos. O método proposto visa tornar a aquisição de parâmetros de rugosidade menos custosa e melhorar o controle da qualidade do pavimento.

Os resultados também evidenciam que ambas as configurações dos corpos-de-prova produzem resultados acurados, possibilitando a utilização daquela que melhor se adequar aos meios do pesquisador. Em relação ao número de escaneamentos realizados, para os pavimentos asfálticos o método obteve melhores resultados com 6 escaneamentos, enquanto nos corpos-de-prova de concreto os erros foram mais baixos em 3 leituras, indicando que o tipo de pavimento

estudado possui influência sobre o número de escaneamentos necessários para a obtenção de resultados satisfatórios.

Futuramente mais ensaios devem ser realizados a fim de confirmar a acurácia do método computacional. Para isso, mais corpos-de-prova devem ser extraídos em campo e diferentes superfícies devem ser testadas, como pavimentos mistos e outros materiais alternativos. Pretende-se ainda realizar a comparação com os resultados obtidos pelo ensaio do Pêndulo Britânico para verificar se a propriedade de Microtextura Média também pode ser estimada computacionalmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (Procad), às agências CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) pelo apoio financeiro, ao Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional e ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABCR (2016). Estatísticas. *Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias*.
- ASTM (2006). *ASTM E965: Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique*.
- Bernucci, L. B., Motta, L. d., CERATTI, J. A., and SOARES, J. B. (2006). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. *Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA*, 504.
- Bitelli, G., Simone, A., Girardi, F., and Lantieri, C. (2012). Laser scanning on road pavements: a new approach for characterizing surface texture. *Sensors*, 12(7):9110–9128.
- BRASIL (2006). Manual de restauração de pavimentos asfálticos. *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT, Rio de Janeiro*.
- Henry, J. J. (2000). *Evaluation of pavement friction characteristics*, volume 291. Transportation Research Board.
- Magalhães, M. N. and Lima, A. C. P. (2004). *Noções de probabilidade e estatística*. Edusp, Universidade de São Paulo, São Paulo., 6 ed. edition.
- Praticò, F. G., Vaiana, R., and Iuele, T. (2016). Surface performance characterization of single-layer surface dressing: A macrotexture prediction model. In *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*, pages 459–470. Springer.
- Sahaf, A. and Rahimi, S. (2014). Investigation of laser system used in pavement management system (pms).
- Sengoz, B., Topal, A., and Tanyel, S. (2012). Comparison of pavement surface texture determination by sand patch test and 3D laser scanning. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 56(1):73.
- Wulder, M. A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, E., Ørka, H. O., Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C. W., and Gobakken, T. (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, 121:196–209.