

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DE
PAVIMENTOS POR MÉTODO VOLUMÉTRICO E POR
ESCANEAMENTO TRIDIMENSIONAL A LASER**

NATÁLIA DA SILVA ROSSI DE RESENDE

JUIZ DE FORA

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DE
PAVIMENTOS POR MÉTODO VOLUMÉTRICO E POR
ESCANEAMENTO TRIDIMENSIONAL A LASER**

NATÁLIA DA SILVA ROSSI DE RESENDE

JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

2017

**COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DE
PAVIMENTOS POR MÉTODO VOLUMÉTRICO E POR
ESCANEAMENTO TRIDIMENSIONAL A LASER**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Área de conhecimento: Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Goliatt da Fonseca

Coorientador: Prof. Dr. Geraldo Luciano de O. Marques

JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

2017

**COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DE
PAVIMENTOS POR MÉTODO VOLUMÉTRICO E POR
ESCANEAMENTO TRIDIMENSIONAL A LASER**

NATÁLIA DA SILVA ROSSI DE RESENDE

Trabalho Final de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com o Artigo 9º do Capítulo IV das Normas de Trabalho Final de Curso estabelecidas pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovado em: 07/02/2017

Por:

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Goliatt da Fonseca

Coorientador: Prof. Dr. Geraldo L. de O. Marques

Prof^a. Dr^a. Flávia de Souza Bastos

Prof. Guilherme Soldati Ferreira

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me proveu de todas as ferramentas necessárias para que eu alcançasse meus objetivos.

À minha mãe, Fabiana, exemplo de vida e meu porto seguro nos momentos difíceis. Ao meu padrasto Patrick por todo o apoio. Aos meus irmãos Isabela e Matheus, cujo carinho e amor foram fundamentais. Ao meu padrinho, Fernando César e minha tia, Flávia, por sempre acreditarem no meu potencial. À minha avó, Ana, que tanto fez por mim e ao meu avô José, que sempre levarei no coração.

Aos meus amigos de turma, do PET e de Brunel, que me deram o incentivo pra persistir apesar das adversidades e com quem compartilhei momentos maravilhosos ao longo desses anos. Agradeço especialmente ao Renan, que esteve comigo desde o princípio e à Thais, sua amizade ao longo do último ano foi muito importante pra mim. Às minhas amigas de república, Mariana, Mariane e Thairine, por serem como uma família. E ao Victor, jamais poderei agradecer devidamente pelo seu carinho.

À aluna Gisele, ao meu orientador Leonardo Goliatt e meu coorientador Geraldo Marques, pela sua ajuda e paciência durante a elaboração deste trabalho. Às professoras Flávia Bastos e Michèle Farage por compartilharem seus conhecimentos além da sala de aula. E a todos os demais professores, essenciais para minha formação.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

A caracterização das superfícies de pavimentos mostra-se de extrema importância para garantir a segurança dos usuários e melhor funcionamento dos veículos nas rodovias. O desempenho dos pavimentos é avaliado e classificado a partir de vários parâmetros, sendo a rugosidade um dos principais, pois influencia diretamente a qualidade do contato entre pneu e asfalto. Atualmente, tal caracterização é feita por meio de ensaios indiretos, como o Ensaio de Mancha de Areia, que apresentam um alto nível de imprecisão; ou por meio de equipamentos de medição denominados perfilômetros, os quais apresentam um alto custo e cuja utilização é bastante limitada. Dessa forma, notou-se a necessidade de desenvolver métodos alternativos que sejam eficientes. O presente trabalho apresenta um método desenvolvido com base na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), a qual utiliza-se de equipamentos de escaneamento tridimensional a laser para obter um modelo de um objeto. O método consiste em escanear a superfície de um corpo de prova extraído do pavimento e seccioná-lo por sucessivos planos transversais, obtendo-se perfis representativos da superfície. Posteriormente, o resultado é analisado por um algoritmo que realiza o cálculo da altura média dos perfis, resultando em um parâmetro que pode ser associado à medida de textura superficial obtida em campo. O emprego desta metodologia mostra-se promissor, as alturas de areia encontradas para os pavimentos de concreto e de asfalto foram respectivamente 1,000mm e 1,035mm, sendo condizentes com a análise visual; além disso o coeficiente de determinação (R^2), que relaciona os valores experimentais e computacionais foi de 0,9815, indicando uma alta precisão.

Palavras-chave: pavimento asfáltico; rugosidade; textura superficial; irregularidade; escaneamento tridimensional; mancha de areia;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação do estado dos pavimentos nas rodovias federais brasileiras	13
Figura 2 – Representação das quatro categorias de textura.	18
Figura 3 – Representação dos diferentes níveis de rugosidade.	19
Figura 4 – Representação das superfícies real e efetiva.	19
Figura 5 – Obtenção do perfil de superfície.	20
Figura 6 – Representação da linha média e do comprimento de amostragem. . . .	21
Figura 7 – Representação da altura de pico e profundidade de vale.	21
Figura 8 – Influência da curtose na no perfil de superfície.	23
Figura 9 – Influência das características da superfície no desempenho dos pavimentos.	25
Figura 10 – Escaneamento de corpo de prova de asfalto cilíndrico e de placa de concreto.	29
Figura 11 – Equipamento de escaneamento tridimensional e especificações técnicas.	30
Figura 12 – Descrição da metodologia utilizada	31
Figura 13 – Seção transversal obtida pelo algoritmo.	35
Figura 14 – Área escaneada para o pavimento rígido.	35
Figura 15 – Delimitação da área para análise.	36
Figura 16 – Perfilamento tridimensional com 6 leituras do pavimento asfáltico. . . .	38
Figura 17 – Perfilamento tridimensional com 3 leituras do pavimento asfáltico. . . .	38
Figura 18 – Representação das superfícies escaneadas.	39
Figura 19 – Relação Profundidade Média do Perfil (MPD) e Textura Média do Pavimento (MDT).	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre Altura de Areia e a Textura do Pavimento	32
Tabela 2 – Relação entre a resistência à derrapagem, macrotextura e coeficiente de atrito	33
Tabela 3 – Resultado dos ensaios experimentais de Mancha de Areia.	37
Tabela 4 – Resultados estimados de MTD e erros em relação aos valores experimentais	38
Tabela 5 – Valores estimados para os parâmetros descritivos desvio padrão, mediana e curtose.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ALS	<i>Airborne Laser Scanning</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAL	Coefficiente de Atrito Longitudinal
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HS	<i>Height of Sand</i>
INIR	Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	<i>International Roughness Index</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MLS	<i>Mobile Laser Scanning</i>
MPD	<i>Mean Profile Depth</i>
MTD	<i>Mean Texture Depth Test</i>
MLT	<i>Multistriple Laser Triangulation</i>
PCA	<i>Análise de Componentes Principais</i>
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congresses</i>
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt</i>
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanning</i>

USP Universidade de São Paulo

VRD Valor de Resistência à Derrapagem

LISTA DE SÍMBOLOS

Z_t	altura de um elemento
R_p	altura máxima do pico
Z_p	altura de pico
R_t	amplitude do perfil
R^2	coeficiente de determinação
L	comprimento de amostragem
R_{ms}	desvio quadrático médio
R_{ku}	fator de achatamento ou curtose
LM	linha média
Md	mediana
R_v	profundidade máxima do vale
Z_v	profundidade de vale
R_a	rugosidade média ou amplitude média
MPD	textura média do perfil

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTO HISTÓRICO E RELEVÂNCIA DO TEMA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	APRESENTAÇÃO DO TEMA	16
2.2	CONCEITOS BÁSICOS	17
2.2.1	Textura superficial	17
2.2.2	Rugosidade	18
2.2.3	Superfície	19
2.2.4	Perfil de Superfície	19
2.2.5	Linha Média (LM)	20
2.2.6	Comprimento de Amostragem (L)	21
2.2.7	Altura de pico (Z_p) e profundidade do vale (Z_v)	21
2.2.8	Altura máxima do pico (R_p) e profundidade máxima de vale do perfil (R_v)	22
2.2.9	Rugosidade média ou Amplitude média (R_a)	22
2.2.10	Textura Média do Perfil (MPD)	22
2.3	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	22
2.3.1	Desvio Médio Quadrático (R_{ms})	23
2.3.2	Fator de achatamento ou Curtose (R_{ku})	23
2.3.3	Mediana (M_d)	24
2.4	INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS	24
2.5	EMPREGO DE MÉTODOS DE ESCANEAMENTO PARA ANÁLISE DE PAVIMENTO	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	MATERIAIS	29
3.1.1	Corpos de prova	29
3.1.2	Equipamento de escaneamento tridimensional a laser	29
3.2	MÉTODOS	30
3.2.1	Método experimental: ensaio de Mancha de Areia	31
3.2.2	Método computacional: escaneamento tridimensional	33

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	37
4.2	RESULTADOS COMPUTACIONAIS	37
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO E RELEVÂNCIA DO TEMA

No Brasil, o modal rodoviário é o que possui a maior representatividade entre os existentes e ainda hoje se encontra em constante expansão. No período de 2001 a 2015, as rodovias pavimentadas cresceram 23,2% e em 2015 a extensão de rodovias pavimentadas no país chegou a 210,6 mil quilômetros. No mesmo período, a frota de veículos aumentou 184,2%, segundo dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Apesar de este cenário indicar a necessidade de um crescente investimento no setor, o que se observa na realidade é que as verbas destinadas a ele estão estagnadas ou até mesmo em queda. Sem investimentos e com uma solicitação crescente, os pavimentos das rodovias brasileiras apresentam em geral uma qualidade bastante comprometida. A situação das rodovias federais é especialmente delicada, uma vez que grande parte da malha já superou a vida útil dos projetos originais. Segundo uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2016), 48,3% das rodovias avaliadas apresenta algum tipo de problema, tendo classificação regular, ruim ou péssima (Figura 1).

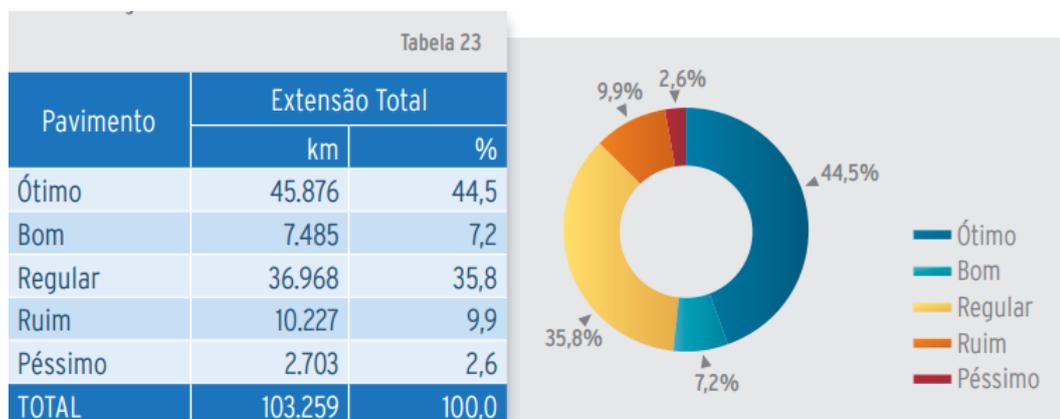


Figura 1 – Classificação do estado dos pavimentos nas rodovias federais brasileiras

Fonte: Confederação Nacional do Transporte (2016)

Sabe-se que problemas de diversas naturezas decorrem da ausência de manutenção das rodovias e várias pesquisas já foram realizadas no sentido de quantificar esses prejuízos, como Bartholomeu & Filho (2008), que estudou os impactos econômicos e ambientais do estado de conservação das rodovias. A CNT (2016) estima que o custo operacional possa ser até 91,5% mais alto nas vias em que o pavimento é considerado péssimo. O aumento do custo é referente a gastos com a manutenção dos veículos, de lubrificantes, de pneus e de freios além do aumento no consumo de combustível. Outro aspecto afetado é o ambiental, visto que a emissão de gases poluentes como o CO_2 está diretamente ligada ao consumo de

combustíveis fósseis. Além disso, vias com características impróprias de textura também podem gerar um aumento significativo no desgaste de pneus, uma questão importante a ser considerada, uma vez que a borracha da qual eles são fabricados não é biodegradável.

Há ainda o comprometimento de outros aspectos, como o conforto e a segurança dos usuários. De acordo com a *World Road Association* (Čelko; Kováč; Kotek, 2016) uma redução do coeficiente de atrito abaixo de 0,45 ocasiona até 20 vezes mais acidentes, quando este atinge um índice menor que 0,30 o risco aumenta cerca de 300 vezes.

Em um cenário mais amplo podemos relacionar também a condição das rodovias ao preço final dos produtos comercializados. No Brasil, o transporte de cargas é realizado em sua grande maioria por meio de rodovias, desta forma, todos os aumentos dos custos operacionais citados anteriormente são embutidos no preço final dos produtos que utilizam este modal. Isso implica na perda de competitividade dos produtos brasileiros no mercado internacional, afetando a economia do país.

Tendo em vista os fatores referidos acima, podemos compreender a importância de se tratar com seriedade a questão de avaliação e reparo das rodovias do país. Ao identificar esta necessidade crescente, constatou-se a insuficiência dos métodos existentes até o presente momento, os quais são bastante limitados, seja por sua complexidade, alto custo dos equipamentos ou pela imprecisão dos ensaios. Acredita-se, portanto, ser de fundamental importância o desenvolvimento de métodos rápidos e econômicos para que se possa avaliar a condição dos pavimentos de forma eficiente, sem inferir em altos custos.

Neste cenário, propõe-se um método alternativo para a avaliação da rugosidade de pavimentos através de equipamentos de escaneamento tridimensional a laser, os quais vêm se tornando cada vez mais acessíveis e podem ser encontrados inclusive, em diversas universidades brasileiras.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principais objetivos:

- Demonstrar a aplicação da técnica de escaneamento tridimensional a laser para classificação da textura de pavimentos;
- Comparar os resultados computacionais com os dados obtidos experimentalmente e verificar a precisão do método;
- Esclarecer as vantagens e insuficiências do método e abrir espaço para que outras propostas possam surgir, propiciando a difusão dos meios de controle da qualidade dos pavimentos no país.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 traz uma revisão de literatura, abordando a definição de alguns conceitos essenciais para viabilizar o entendimento do método e a descrição de estudos anteriores pertinentes ao tema.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados neste trabalho, são descritas as especificações técnicas dos equipamentos utilizados, além da descrição dos ensaios realizados;

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos métodos experimental e computacional e realiza uma comparação entre eles. São calculadas as variações entre os resultados como forma de verificar sua precisão;

O Capítulo 5 traz as conclusões inferidas a partir dos resultados obtidos e analisa possibilidades de expansão deste tema em futuros trabalhos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem (Bernucci *et al.*, 2008) e pode ser classificado tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Os pavimentos podem ainda ser classificados como mistos, quando forem compostos pela combinação dos tipos citados anteriormente. A utilização de um ou outro tipo depende de fatores como o clima da região, a função desempenhada e a carga à qual ele será submetido. Dentre as rodovias brasileiras, a maior parte é composta por pavimentos flexíveis (asfálticos), já os pavimentos aeroviários são em geral rígidos (concreto) ou mistos.

A estrutura de um pavimento flexível é formada por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, sendo que uma ou mais camadas podem estar ausentes dependendo da intensidade do tráfego e dos materiais disponíveis. O revestimento é a camada superior e destina-se a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores (Bernucci *et al.*, 2008), desempenhando papel fundamental na estrutura da via. São as propriedades dos materiais de revestimento que irão definir aspectos importantes para os usuários, tais como: aderência entre o pneu e o pavimento, projeção de água de chuva, o desgaste dos pneus e o ruído no exterior e no interior do veículo. Portanto, é de fundamental importância quantificar essas propriedades e estudar maneiras de melhorar seu desempenho.

As características dos agregados que compõem o asfalto exercem grande influência nas propriedades do pavimento. Por isso, identificar o tipo de agregado utilizado na mistura asfáltica é uma forma confiável de prever algumas características da superfície. Bernucci *et al.* (2008) descreve as composições granulométricas dos pavimentos de Concreto Asfáltico (CA), também denominados Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), a saber:

- Graduação densa: curva granulométrica contínua e bem-graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores;
- Graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores. Tem o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: mistura

asfáltica drenante, conhecida no Brasil por Camada Porosa de Atrito (CPA);

- Graduação descontínua: curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras(...). Exemplo: Matriz Pétreo Asfáltica (Stone Matrix Asphalt – SMA); mistura sem agregados de certa graduação (gap-graded).

2.2 CONCEITOS BÁSICOS

Com o objetivo de melhor viabilizar o entendimento das propriedades do revestimento asfáltico e do método de avaliação de pavimento proposto, faz-se necessária a apresentação e distinção de alguns conceitos específicos que surgem na literatura.

2.2.1 Textura superficial

A EN ISO 113473-1:1997 apresenta a seguinte definição de textura de um pavimento: “Desvio entre uma superfície de um pavimento e uma superfície completamente plana de referência dentro dos limites das escalas de comprimento de ondas definidos [...]”; tradução livre. Dagnall (apud Machado, 2009) afirma que a textura superficial é: “Um conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície”. Entende-se, portanto, que a textura corresponde a qualquer tipo de desvio na superfície do pavimento, podendo ocorrer em maior ou menor escala. Wambold & Henry (1994) classifica os níveis de textura em:

- Microtextura: corresponde às rugosidades, cujos comprimentos de onda variam entre 0 a 0,5mm e amplitude de 0 a 0,2mm. Está relacionada à própria superfície do agregado mineral e faz o pavimento parecer mais ou menos áspero, sendo muito pequena para ser percebida a olho nu;
- Macrotextura: corresponde às rugosidades com comprimento de onda de 0,5 a 50mm e amplitude de 0,2 a 10mm. Representa as asperezas superficiais do pavimento causadas pelas protuberâncias do agregado, é da ordem de grandeza da área de contato pneu/pavimento;
- Megatextura: corresponde às rugosidades cujos comprimentos de onda variam entre 50 e 500mm e amplitude entre 10 a 500mm. Essa textura é da mesma ordem de grandeza dos pneus e implica em falhas no pavimento;
- Irregularidade: corresponde a desvios maiores que 500mm, com comprimentos de onda superiores a 500mm. A irregularidade é uma ocorrência indesejável.

Os quatro níveis de textura identificados acima estão representados na Figura 2, abaixo:

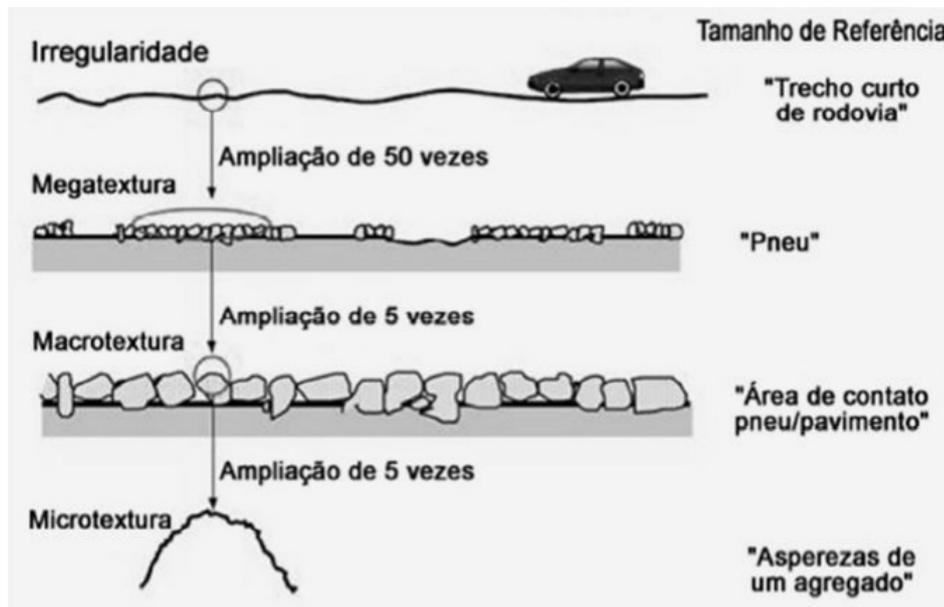


Figura 2 – Representação das quatro categorias de textura.

Fonte: baseado em Kuchiishi *et al.* (2014)

2.2.2 Rugosidade

Piratelli Filho (2011) define o conceito de rugosidade como o conjunto de desvios microgeométricos caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície. Para Scheers *et al.* (apud Machado, 2009) a rugosidade é o conjunto de oscilações de alta frequência ou de ondas curtas.

Há uma grande similaridade entre as definições de rugosidade e textura, que por vezes chegam a se confundir. Entendemos aqui, a rugosidade como a ocorrência de desvios na superfície e textura como o efeito causado por esses desvios. Os diferentes níveis de rugosidade, corresponderiam portanto, aos diferentes níveis de textura descritos anteriormente, quando os desvios são de ordem de grandezas maiores, caracterizam ondulação e erro de forma (Figura 3).

A diferença entre rugosidade, ondulação e erro de forma é baseada no comprimento de onda da superfície analisada ou no espaçamento entre picos (Mare *et al.*, 1997 apud Machado, 2009) porém a fronteira entre rugosidade e ondulação é questionável e deve-se especificar numericamente o comprimento da frequência de onda acima ou abaixo do qual uma das componentes da superfície (rugosidade ou ondulação) é eliminada (Machado, 2009).

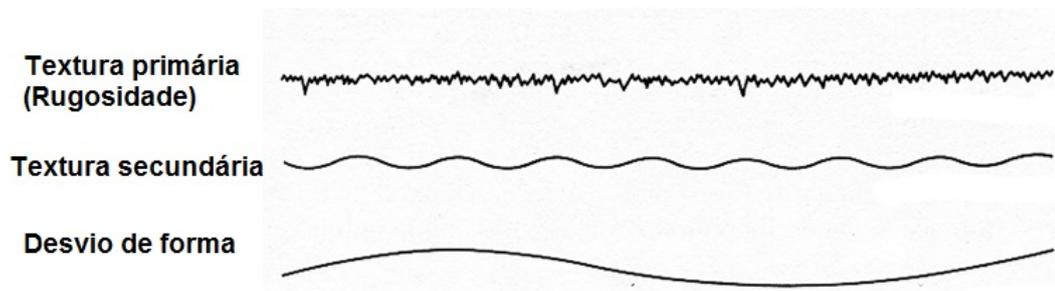


Figura 3 – Representação dos diferentes níveis de rugosidade.

Fonte: Piratelli Filho (2011)

2.2.3 Superfície

A superfície real de um objeto é definida pela NBR ISO 4287:2002 como a superfície que limita o corpo e o separa do meio ambiente, ela pode ser representada pela superfície efetiva que é aquela obtida por meio das técnicas de medição. Estes conceitos estão representados na Figura 4.

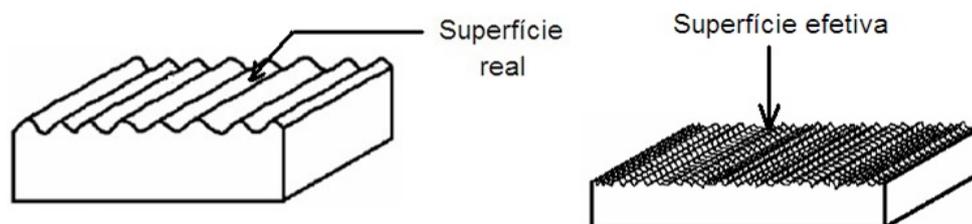


Figura 4 – Representação das superfícies real e efetiva.

Fonte: Adaptado de Piratelli Filho (2011)

2.2.4 Perfil de Superfície

O perfil de superfície é uma representação bidimensional geralmente orientada em um eixo x-y. Ele é resultante da interseção da superfície real e um plano específico NBR ISO 4287:2002, como representado na Figura 5.

Na prática é usual escolher um plano onde a normal é teoricamente paralela à superfície real e em uma direção apropriada (NBR ISO 4287:2002).

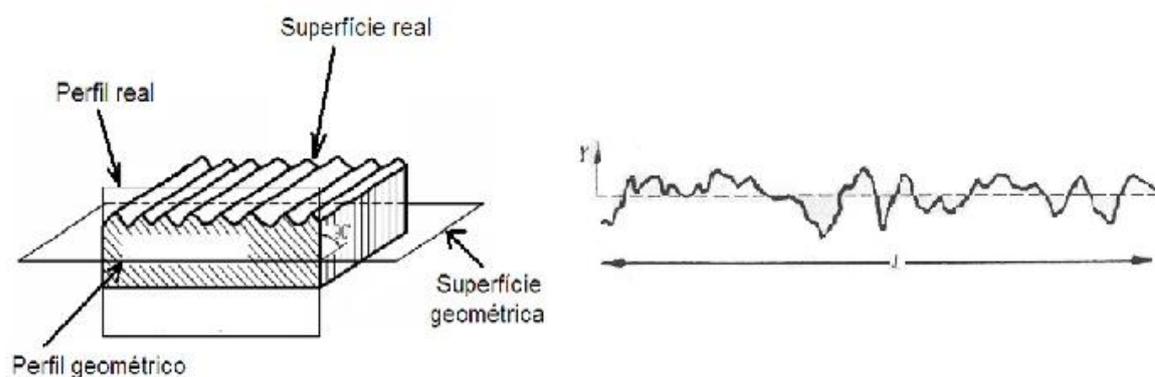


Figura 5 – Obtenção do perfil de superfície.

Fonte: Adaptado de Piratelli Filho (2011)

Para obtenção de um perfil que represente a superfície efetiva existem vários ensaios e equipamentos, contudo alguns métodos como os perfilométricos acabam gerando um perfil composto por todos os níveis de textura, o que nem sempre é prático para a análise que se deseja realizar. Para permitir a separação entre os perfis de rugosidade e de ondulação, a norma propõe uma correção que consiste na filtragem do perfil primário. Assim, temos que a definição do perfil de rugosidade é a seguinte: "perfil derivado do perfil primário pela eliminação dos componentes de comprimento de ondas longas, usando o filtro de perfil λc " (NBR ISO 4287:2002). No presente trabalho, esta correção não se fez necessária, uma vez que as dimensões dos corpos de prova utilizados são pequenas, assim os desvios no nível das ondulações e desvios de forma não foram representados.

A partir dos perfis medidos podem ser realizadas caracterizações de parâmetros superficiais específicos (Machado, 2009), alguns elementos do perfil devem ser analisados para que se obtenham estes parâmetros. A seguir estão apresentadas as definições compiladas a partir das normas EN ISO 113473-1:1997 e NBR ISO 4287:2002, foram ainda acrescentadas as definições de outros autores quando necessário.

2.2.5 Linha Média (LM)

De acordo com Machado (2009) a linha média, identificada na Figura 6 pode ser determinada de duas maneiras: linha média dos mínimos quadrados, referente ao perfil primário; e linha média filtrada, referente aos perfis de rugosidade e de ondulação.

A primeira definição é apresentada pela NBR ISO 4287:2002, que define a linha média do perfil como a linha determinada pelo ajuste dos mínimos quadrados à linha da forma nominal do perfil. Ou seja, essa linha acompanha o perfil nominal, de forma que a soma dos quadrados dos desvios do perfil na direção vertical seja minimizado.

A definição da linha média filtrada consta no trabalho de Piratelli Filho (2011), segundo a qual a linha média divide o perfil tal que a soma das áreas acima é igual à soma das áreas abaixo, ao longo do comprimento de medição.

2.2.6 Comprimento de Amostragem (L)

O comprimento de amostragem está identificado na Figura 6, a norma o define como sendo o comprimento na direção do eixo X, usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação; ou seja, é o comprimento do trecho a ser avaliado.

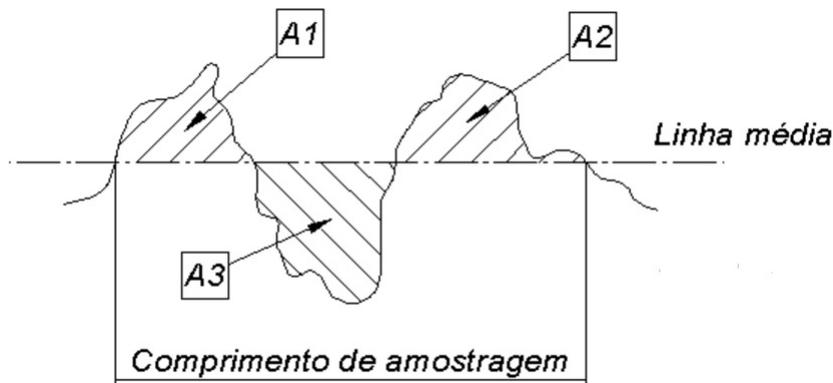


Figura 6 – Representação da linha média e do comprimento de amostragem.

Fonte: Unicamp (2011)

2.2.7 Altura de pico (Z_p) e profundidade do vale (Z_v)

São respectivamente as distâncias verticais entre o eixo x e o ponto mais alto dos picos do perfil e entre o eixo x e o ponto mais baixo dos vales do perfil. A soma da altura do pico e profundidade do vale é denominada altura de um elemento do perfil (Z_t), como representado na Figura 7. Conforme Machado (2009), a avaliação dos picos é importante quando se consideram as propriedades de fricção e desgaste e a interação entre concentração de superfícies.

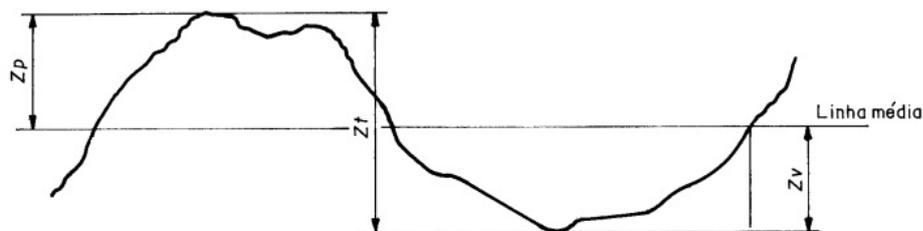


Figura 7 – Representação da altura de pico e profundidade de vale.

Fonte: Adaptado de NBR ISO 4287:2002

2.2.8 Altura máxima do pico (R_p) e profundidade máxima de vale do perfil (R_v)

Os parâmetros de amplitude máxima de picos e vales correspondem ao valor de maior altura de pico (Z_p) e de maior profundidade de vale (Z_v), no comprimento de amostragem. O somatório do mais alto pico (R_p) com o mais profundo vale (R_v) é chamado de amplitude de perfil (R_t).

2.2.9 Rugosidade média ou Amplitude média (R_a)

O parâmetro de amplitude média de perfil, também é conhecido como média aritmética, média da linha central ou desvio médio aritmético do perfil. É o valor médio das alturas dos elementos do perfil (Z_t) no comprimento de amostragem, obtido pela Equação (2.1).

$$R_a = \frac{\sum A_i}{L} \quad (2.1)$$

As variáveis A_i , L representam respectivamente a área sob a curva entre dois pontos nulos e o comprimento de amostragem, como indicado na Figura 6.

De acordo com Machado (2009), este parâmetro corresponde à área entre o perfil de rugosidade e a linha média, ou ainda, a integral dos valores absolutos das amplitudes do perfil de rugosidade dentro de um comprimento de amostragem.

2.2.10 Textura Média do Perfil (MPD)

É o valor médio da rugosidade do perfil dentro de um comprimento de amostragem. Diferença entre a média aritmética de dois picos (Z_1 e Z_2) e a linha média (LM)¹ em uma distância de 100m. Este parâmetro é obtido pela Equação 2.2:

$$MPD = \frac{Z_1 + Z_2}{L} - LM \quad (2.2)$$

2.3 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

O algoritmo utilizado, além de retornar a medida da rugosidade média e o erro percentual em relação aos dados experimentais, também calcula alguns parâmetros estatísticos descritivos como Desvio padrão, Mediana e Curtose. Estes parâmetros possibilitam a análise quantitativa dos dados.

¹ Observe que a Linha Média não corresponde necessariamente ao eixo coordenado x, quando isso ocorre, o valor de LM na equação é zero.

2.3.1 Desvio Médio Quadrático (Rms)

É uma medida gerada a partir do Desvio Padrão, fornece informações referentes à dispersão dos dados, permitindo analisar como as alturas se comportam quando distantes da média. É definido como a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas $Z(x)$, oferecendo uma medida do desvio padrão dos dados analisados. Este parâmetro é obtido pela Equação 2.3.

$$Rms = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2.3)$$

2.3.2 Fator de achatamento ou Curtose (Rku)

A curtose indica a facilidade de se obter valores que não se aproximam da média, representando que a distribuição dos resultados tem achatamento semelhante ao da distribuição normal quando esta medida de dispersão se aproxima de zero (Magalhães; Lima, 2004). É definida como o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas $Z(x)$ à quarta potência e o valor de Rms à quarta potência. Este parâmetro é obtido pela Equação 2.4.

$$Rku = \frac{1}{Rms^4} \left[\sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^4(x) dx} \right] \quad (2.4)$$

Como enfatizado na NBR ISO 4287:2002, a curtose é um parâmetro fortemente influenciado por picos isolados ou vales isolados. Bernucci *et al.* (2008) destaca que, em pavimentos asfálticos, as alturas das asperezas podem não ser normalmente distribuídas, apresentando assim valores distintos de Rku, o que faz com que as superfícies do pavimentos apresentem configurações variadas, como mostra a Figura 8.

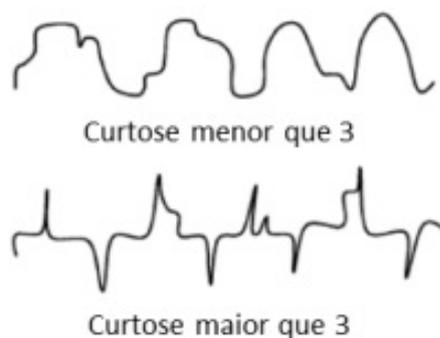


Figura 8 – Influência da curtose na no perfil de superfície.

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

2.3.3 Mediana (Md)

A mediana é o valor central de um conjunto de dados, dividindo-o em duas partes iguais. É um parâmetro menos sensível a valores atípicos. Este parâmetro é obtido pela Equação 2.5.

$$Md = L_i + \left(\frac{\frac{n}{2} - \sum f'}{f_{Md}} \right) C_{Md} \quad (2.5)$$

Onde L_i é o limite inferior da classe mediana; n é o total de frequência; $\sum f'$ é soma de todas as frequências das classes inferiores à mediana, f_{Md} é a frequência da classe mediana e C_{Md} é a amplitude da classe mediana.

2.4 INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

Os desvios na superfície do pavimento são de fundamental importância para garantir condições de segurança e conforto nas rodovias. Para avaliar o estado de conservação dos pavimentos, diversos indicadores foram desenvolvidos ao longo dos anos. O Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (INIR), em sua disposição técnica Azevedo (2009) cita parâmetros de avaliação das características superficiais e estruturais, baseados na rugosidade. São eles:

- Textura Superficial;
- Irregularidade Longitudinal;
- Perfil Transversal.

Cada nível de textura está relacionado à uma propriedade física do pavimento. O atrito no clima seco, por exemplo, é influenciado pelos níveis de macrotextura e microtextura, ou seja, por rugosidades compreendidas no intervalo entre $1\mu\text{m}$ e 10mm , como representado na Figura 9.

A macrotextura garante a resistência à derrapagem, principalmente em velocidades elevadas ou quando o pavimento encontra-se molhado, contribui também para melhorar a visibilidade em condições de pista molhada, elimina ou atenua a reflexão da luz melhorando a percepção das marcas de sinalização horizontal e reduz o barulho gerado pelo contato entre pneu e pavimento. A microtextura, ou a aspereza do pavimento, por sua vez, é necessária para se conseguir uma boa aderência a baixas velocidades e no pavimento seco, além de regular o desgaste dos pneus.

A megatextura e a irregularidade superficial são características indesejáveis, de qualquer ponto de vista. Incidem negativamente sobre o conforto e aumentam o ruído 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	Irregularidade		
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 9 – Influência das características da superfície no desempenho dos pavimentos.

Fonte: Bitelli *et al.* (2012)

rolamento, os gastos com a manutenção dos veículos e os gastos com a conservação do pavimento (Azevedo, 2009).

Observa-se que os níveis que predominantemente afetam o atrito são a microtextura e a macrotextura, por isso, essas características são os principais objetos de estudos que relacionam a rugosidade e o desempenho de pavimentos. Dentre eles podemos citar o de Boscaïno, Praticò & Vaiana (2005), que correlacionou propriedades de superfícies asfálticas, como a textura superficial, com a absorção acústica dos pavimentos. O mesmo tema foi abordado por Callai (2011), que realizou um estudo de caso na cidade de São Paulo, analisando a emissão de ruído em diferentes tipos de revestimento.

Outro estudo de caso foi conduzido por Pulugurtha, Patel & Kusam (2011) na Carolina do Norte, Estados Unidos. Ele associou o efeito da macrotextura com o aumento da segurança da pista, provando uma forte relação entre ambos. No Brasil, estudos semelhantes foram desenvolvidos, como o de Silva *et al.* (2011), em São Paulo, o qual avaliou a redução de acidentes na rodovia Fernão Dias com a troca do revestimento da pista. Os resultados demonstraram que após a substituição do Concreto Asfáltico, que apresenta uma textura fina, pelo Microrrevestimento cuja textura varia de média a grossa, houve uma significativa redução dos acidentes.

Segundo Bitelli *et al.* (2012), os indicadores de performance são, em geral, relacionados às diferentes condições de medição (velocidade de deslizamento, estado da superfície, ângulo entre as direções de deslocamento e os pneus, etc.), cada uma possui uma técnica de medição específica, geralmente regulamentada por padrões nacionais ou internacionais. Dentre os ensaios e aparelhos criados para aferição dos parâmetros superficiais de um pavimento, classificam-se os métodos em perfilométricos ou estáticos.

Nas medições estáticas, destaca-se o Ensaio de Mancha de Areia, que mede a

rugosidade em nível de macrotextura. A eficiência deste ensaio foi objeto de pesquisa como Specht *et al.* (2007) e Kuchiishi *et al.* (2014). Outro ensaio é o chamado Pêndulo Britânico, destinado à medição da rugosidade à nível da microtextura como estudado por Lee, Fwa & Choo (2005). Há ainda pesquisas que utilizam processamento de imagens como método de caracterização da textura (Slimane *et al.*, 2008), (Khoudeir *et al.*, 2004).

Em relação aos métodos perfilométricos há diversos tipos de equipamentos disponíveis. No nosso país, os equipamentos empregados em maior escala são os do tipo resposta, que fornecem um somatório de desvios do eixo de um veículo em relação à suspensão ou até mesmo por meio de levantamentos topográficos. Um destes aparelhos é o chamado rugosímetro BPR, porém ele apresentou falhas como indicado por Perera & Kohn (2002), uma vez que estava sujeito à variações de temperatura além de produzir algumas frequências ressoantes que provocaram resultados incorretos. O Maysmeter, foi outro equipamento amplamente utilizado entre os anos de 1960 e 1980, inclusive no Brasil, pelo antigo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem). Contudo, este acabou sendo substituído no país pelo perfilômetro inercial desenvolvido em parceria pelo IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias) e pela USP (Universidade de São Paulo). Este equipamento consiste em um veículo de passeio no qual são acoplados um sensor de deslocamentos verticais e um quantificador de irregularidade, o desenvolvimento e utilização deste equipamento foi descrito por Barella (2008).

2.5 EMPREGO DE MÉTODOS DE ESCANEAMENTO PARA ANÁLISE DE PAVIMENTO

Nos últimos anos, os dispositivos de escaneamento a laser têm sido difundidos e se tornado mais acessíveis, assim, diversas aplicações para este equipamento vem sendo estudadas. O sistema de escaneamento com uso de laser é um dos tipos de técnicas denominadas LiDAR (Light Detection and Ranging). Nesta classificação podemos discernir ainda os escaneamentos dos tipos ALS, TLS e MLS, respectivamente: escaneamento aéreo a laser, escaneamento terrestre a laser e escaneamento móvel a laser, em tradução livre. Dentre os usos já explorados para essa tecnologia, podemos citar estudos nas áreas de: gerenciamento florestal (Means *et al.*, 2000), (Giongo *et al.*, 2010), mapeamento de regiões (Schwarz, 2010) e na indústria automotiva (Rasshofer; Gresser, 2005).

A caracterização da textura superficial de pavimentos por meio de escaneamento tridimensional conforme proposto neste trabalho, já foi realizada por outros autores como Bitelli *et al.* (2012), cujo procedimento foi uma das referências para esta pesquisa. Ressalta-se dentre as similaridades, o uso de corpos de prova extraídos em campo, além de outros moldados in-loco e também o uso do mesmo equipamento, o Next Engine® laser scanner.

Os parâmetros obtidos foram agrupados em duas classes: a primeira leva em consideração parâmetros “geométricos” relacionados à morfologia da amostra analisada; a segunda classe inclui indicadores estatísticos do desempenho(...), que analisam os aspectos da interação entre o pneu e a superfície do pavimento (Bitelli *et al.*, 2012).

A conclusão do experimento de Bitelli *et al.* (2012) foi bastante satisfatória, a análise dos diferentes tipos de pavimento: DGAC (concreto asfáltico de graduação densa); SMA (concreto asfalto de graduação descontínua), e OGAC (concreto asfáltico de graduação aberta); correspondeu às expectativas, caracterizando o DGAC como um pavimento menos rugoso e o OGAC como o de maior rugosidade.

Sengoz, Topal & Tanyel (2012) utilizaram o scanner Metris Model Maker D100 3D e comparam os resultados com o tradicional ensaio de Mancha de Areia. O equipamento utilizado foi montado sobre uma base móvel e conectado à um computador para realizar a coleta de dados. Para análise dos resultados, foi traçada uma curva MPD (profundidade média do perfil) versus MTD (profundidade média da textura) e foi encontrado o coeficiente de correlação bastante elevado de $R^2 = 0.97$. Baseando-se nas conclusões da PIARC (congresso internacional sobre rodovias, produzido pela *World Road Association*) de que o melhor parâmetro para determinação do coeficiente de atrito seria o MPD, eles verificam que o a a partir do MTD pode-se também prever de forma satisfatória este coeficiente.

Praticò, Vaiana & Iuele (2016) conduziram outro estudo focado na relação entre no MPD e no MTD. Porém, este utilizou um equipamento de escaneamento bidimensional. Foram considerados os seguintes tipos de revestimentos: DGFC (revestimento de graduação densa), SMA (revestimento de graduação descontínua), OGFC (revestimento de graduação aberta) e PEM (mistura porosa). Verificou-se que para rugosidades inferiores a 1,5mm, uma função linear era bem representativa. Contudo, para valores acima de 1,5mm, houve uma visível divergência de resultados. O estudo concluiu que a correlação entre o MPT e a medida do ensaio de mancha de areia apresenta algumas complexidades e que a divergência encontrada baseia-se essencialmente no fato de que o ensaio é tridimensional, enquanto o escaneamento realizado era bidimensional. Para associar os resultados, foi adaptada uma curva e apesar das ressalvas, a conclusão deste estudo foi um modelo satisfatório para correlacionar as grandezas, e que representa uma boa parte dos pavimentos asfaltos em uso.

Čelko, Kováč & Kotek (2016) em sua pesquisa, medem a macrotextura e realizam uma comparação minuciosa entre medições feitas a partir do Método Volumétrico (MTD) e do perfilômetro GE (MPD) com medições do ZScanner[®] 800, também é feita a medição e comparação do coeficiente de atrito por diferentes métodos. As medições obtidas pelo scanner são processadas por meio de um algoritmo desenvolvido no MATLAB[®]. É

interessante ressaltar que em todas as comparações foram obtidos resultados razoavelmente próximos, principalmente, entre os valores do scanner 3D e do método volumétrico, para a qual foi obtido o coeficiente de correlação $R^2 = 0.94$. A diferença entre o método aqui apresentado e o proposto por Čelko, Kováč & Kotek (2016) consiste principalmente no fato de que o foi utilizado um scanner fixo, sendo necessária a extração de amostras para que fosse possível realizar o escaneamento. Ainda assim, espera-se que seja possível comparar os resultados como forma de validação do método.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Corpos de prova

Para elaboração deste estudo, foram consideradas amostras de dois tipos de pavimentos, com diferentes composições sendo um deles classificado como flexível e outro como rígido. Para análise dos pavimentos asfálticos, foram utilizados dois corpos de prova cilíndricos com 15cm de diâmetro, extraídos em campo. Para a análise dos pavimentos rígidos utilizou-se uma placa de concreto moldada com dimensões 30cm x 50cm, que foi dividida nas regiões superior e inferior. Assim, analisou-se um total de quatro amostras, sendo duas representativas para cada tipo de pavimento refFig:amostras.



Figura 10 – Escaneamento de corpo de prova de asfalto cilíndrico e de placa de concreto.

3.1.2 Equipamento de escaneamento tridimensional a laser

Neste estudo, foi utilizado o Next Engine[®] laser scanner, cujas especificações técnicas estão descritas na Figura 11, a seguir:

De acordo com as especificações, não há definição de limite para o tamanho do objeto a ser escaneado. No caso de objetos cujas dimensões excederem o campo de alcance do equipamento pode ser feita uma captura em várias etapas por meio de um *software* fornecido.

O tempo de escaneamento de cada face é estimado em cerca de dois minutos, a partir da velocidade de aquisição dos dados que consta na tabela acima.

Sobre as condições do ambiente, o equipamento pode ser utilizado em condições normais de iluminação, não sendo necessário nenhum requisito especial.



Dimensões	224 x 91 x 277 mm	
	Macro	Wide
Área de Captura	129,54 x 96,52mm	342,9 x 256,54mm
Densidade de Captura	41.540 pontos/cm ²	4.495 pontos/cm ²
Densidade de Textura	500 DPI	200 DPI
Precisão	±2,54µm	±7,62 µm
Velocidade de Aquisição	50.000 pontos/seg	

Figura 11 – Equipamento de escaneamento tridimensional e especificações técnicas.

Fonte: Adaptado de Next Engine (2016)

O equipamento utiliza o MLT (*Multistriple Laser Triangulation*) que é uma técnica estereoscópica¹ baseada no Método da Interseção², a qual permite determinar a posição de um ponto no espaço a partir de um sistema de coordenadas referenciado.

Como descreve Bitelli *et al.* (2012), o equipamento emite um feixe de energia (laser) com um ângulo α , previamente conhecido no processo de calibração; ao atingir a superfície do objeto localizado no Ponto A, sua posição é medida. A flexão do feixe de energia depende do tipo de material que compõe a superfície; parte do sinal refletido atinge o sensor (usualmente CCD ou CMOS) posicionado à uma distância conhecida, chamada de linha de referência (b), do emissor. O ângulo β do raio refletido é desconhecido, porém pode ser inferido aplicando-se relações trigonométricas e tendo-se conhecimento da distância focal (c) e a posição do equipamento. Repetindo-se essa operação para vários pontos, podem ser determinadas suas coordenadas e a superfície em questão pode ser representada por meio de uma nuvem tridimensional de pontos.

3.2 MÉTODOS

O estudo foi conduzido de acordo com a metodologia esquematizada na Figura 12. As etapas podem ser classificadas em: ensaios experimentais, ensaios computacionais e análise dos resultados. A primeira consiste no Ensaio de Mancha de Areia e posterior extração dos corpos de prova (no caso dos pavimentos asfálticos), a segunda consiste

¹ A estereoscopia é uma técnica antiga que utiliza imagens capturadas de um objeto em ângulos diferentes que permite através do uso de dispositivos de apreciação da imagem capturada a percepção das dimensões de altura largura e profundidade (3D) (Coutinho; Petry; Cardoso, 2007).

² O Método da Interseção também é conhecido como método das Coordenadas Bipolares. Este tipo de levantamento é usado em pequenas áreas que possuam um relevo um tanto quanto acidentado (Espartel, 1975).

no escaneamento dos corpos de prova em laboratório e processamento dos dados pelo algoritmo e por fim, a análise consiste na comparação dos dados obtidos em ambos os procedimentos e na determinação do erro relativo.

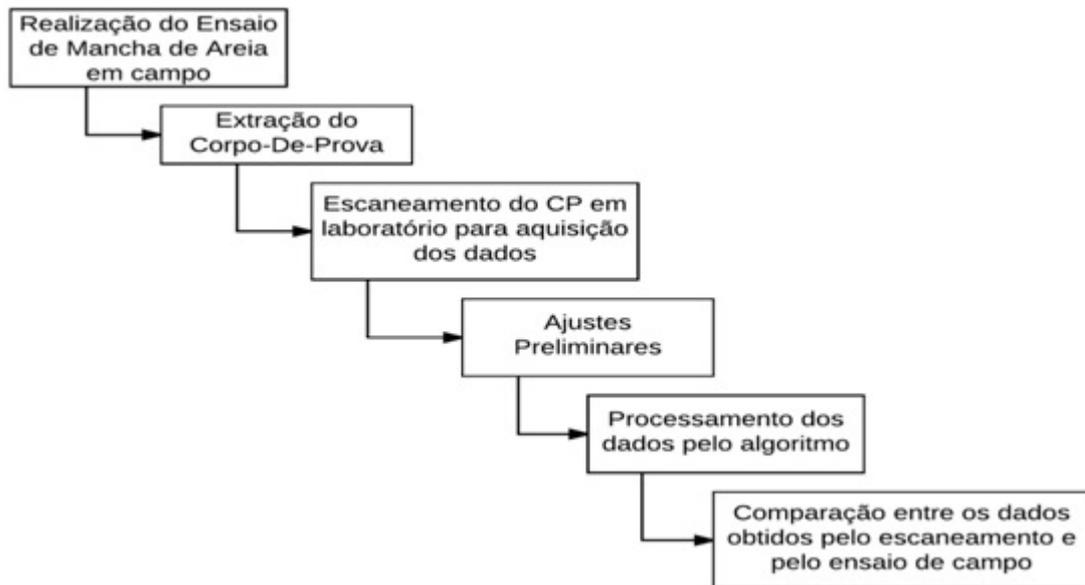


Figura 12 – Descrição da metodologia utilizada

3.2.1 Método experimental: ensaio de Mancha de Areia

Vários podem ser os parâmetros adotados para a análise da rugosidade dos pavimentos; optou-se pela utilização da “textura superficial”, sendo esta medida intuitiva e amplamente utilizada pelo DNIT.

Um dos métodos de medição da textura de pavimentos é o ensaio da Mancha de Areia, que determina mais especificamente a macrotextura da superfície. Este ensaio é válido para pavimentos betuminosos e pavimentos rígidos de concreto cuja profundidade de textura seja maior que 0,25mm e é diretamente afetado pela constituição da mistura (distribuição de vazios, forma, tortuosidade) conforme afirma o estudo de Praticò, Vaiana & Iuele (2016).

O Ensaio de Mancha de Areia é normatizado pela ASTM E965:2006 e foi realizado conforme suas especificações. A seguir, descreve-se o procedimento para sua realização:

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. Enche-se o reservatório de areia, nivelando a areia com a borda do reservatório com auxílio de uma régua;
4. Verte-se o volume de areia na superfície do pavimento a ser avaliado;
5. Espalha-se o volume conhecido de material sobre a superfície 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;
6. Efetua-se por meio de régua ou trena, quatro medições do diâmetro da mancha, tomando-se a média aritmética como o valor a ser adotado;
7. Calcula-se a profundidade Média da Macrotextura do Pavimento (MDT) por meio da Equação 3.1:

$$MDT = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (3.1)$$

Onde V é volume de areia utilizado no ensaio e D é média dos diâmetros obtidos através do círculo formado pela areia.

O parâmetro obtido pelo ensaio de Mancha de Areia é o MTD (*Mean Texture Depth*) ou HS (*Height of Sand*), o qual representa a rugosidade por meio da altura média de areia que preenche os vazios de um pavimento. Esse parâmetro obtido pode ser associado à textura do pavimento de acordo com a Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 – Comparação entre Altura de Areia e a Textura do Pavimento

Altura de Areia HS	Textura Superficial
HS < 0,20mm	Muito fina ou Muito fechada
0,20mm < HS < 0,40mm	Fina ou fechada
0,40mm < HS < 0,80mm	Média
0,80mm < HS < 1,20mm	Grosseira ou Aberta
HS > 1,20mm	Muito grosseira ou Muito aberta

Fonte: DER-MG (2005)

Como citado anteriormente, a textura exerce grande influência nas características da superfície do pavimento. A resistência à derrapagem é uma destas características, que está associada à segurança dos usuários. A relação entre os valores de MTD e as classes de resistência à derrapagem está descrita na Tabela 2, também estão descritas as correlações com o Coeficiente de Atrito Longitudinal (CAL) e Valor de Resistência à Derrapagem (VRD).

Tabela 2 – Relação entre a resistência à derrapagem, macrotextura e coeficiente de atrito

Classes de Resistência à Derrapagem	Macrotextura do pavimento	CAL	VRD
Perigosa	-	<0,24	<25
Muito Lisa	Muito Fina ou Muito fechada	0,24-0,30	25-31
Lisa	Fechada	0,31-0,37	32-39
Pouco Rugosa	Fechada	0,38-0,44	40-46
Medianamente Rugosa	Média	0,45-0,51	47-64
Rugosa	Grosseira ou Aberta	0,52-0,72	65-75
Muito Rugosa	Muito Grosseira ou Muito Aberta	>0,72	>75

Fonte: DER-MG (2005)

Segundo a especificação da norma DNIT 031:2006 , para atender às condições de segurança, o revestimento de concreto asfáltico acabado deve apresentar uma Altura de Areia dentro do intervalo $1,20\text{mm} \geq HS \geq 0,60\text{mm}$. Ou seja, sua textura deve ter classificação média ou grosseira. Valores acima ou abaixo dos limites estabelecidos indicam que o pavimento não está em condições adequadas ao uso.

O método volumétrico da Mancha de Areia mostrou-se adequado às necessidades desta pesquisa por ser um ensaio de fácil execução e requerer aparatos simples. Além disso, justifica-se sua aplicação, uma vez que o parâmetro de textura obtido (MTD) pode ser facilmente correlacionado com os resultados computacionais.

Contudo, como descrito por Kuchiishi *et al.* (2014), este procedimento está sujeito a erros, provenientes por exemplo da imprecisão do operador que manipula o disco espalhador e efetua as medidas necessárias. Além disso, ele não fornece uma análise completa da superfície do pavimento, pois a partir do valor médio de MTD não é possível inferir se a textura é positiva ou negativa, limitação que não ocorre no processo computacional.

Para minimizar os erros de operação, este ensaio foi realizado sucessivamente cinco vezes em cada pavimento analisado, antes da extração do corpo de prova nessa região. Adotou-se o MTD do pavimento como a média aritméticas das medidas, sendo excluídas aquelas cujo desvio tenha sido $\pm 10\%$ em relação à média.

3.2.2 Método computacional: escaneamento tridimensional

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 permite a determinação automática de parâmetros de difícil medição manual como a textura.

Os erros que ocorrem no processo de escaneamento a laser são ocasionados por

desvios das condições ideais. Há uma variedade de aspectos que podem influenciar negativamente o desempenho dos equipamentos, reduzindo sua precisão ou até mesmo culminando em falha na medição. Alguns destes aspectos principais são: iluminação insuficiente do ambiente, formato e cor do objeto, trepidações da superfície em que se encontra o equipamento. Os problemas derivados destas falhas costumam estar relacionados ao desvio da posição geométrica da nuvem de pontos em relação à sua posição real, o que gera um modelo impreciso. Por essa razão, durante a fase de aquisição dos dados todas as precauções devem ser tomadas a fim de que se obtenha a representação mais exata possível.

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;
2. Orientação correta dos dados. Em alguns casos o conjunto de pontos pode apresentar um ângulo em relação ao plano x-y, 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)³ 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 centroide 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 centroide separados por 9° entre si. Para cada ponto $p = (px, py, pz)$ da nuvem de pontos é verificada a distância d do plano ao ponto de forma o ponto pertence à seção se $|d| < \Delta y$. Na Figura 13 podemos ver a representação em duas dimensões de uma das seções utilizadas pelo algoritmo;

³ A Análise de Componentes Principais é uma técnica da estatística que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais (Varela, 2008).

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 possa ser encontrada diretamente através da Equação 3.2 do volume deste prisma.

$$h = \frac{V}{AB} \quad (3.2)$$

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

6. Posteriormente o algoritmo calcula a média das alturas obtidas para cada seção e retorna o valor aproximado para a profundidade média do perfil (MPD).



Figura 13 – Seção transversal obtida pelo algoritmo.

Os pontos foram projetados no plano-xz para visualização em 2 dimensões.

Para o caso do pavimento rígido, em que foi utilizada uma placa de concreto, foi necessário uma etapa extra que consistiu na extração de uma região circular a partir da área total escaneada (Figura 15). Este procedimento foi necessário para que as áreas analisadas fossem similares para ambos os pavimentos.

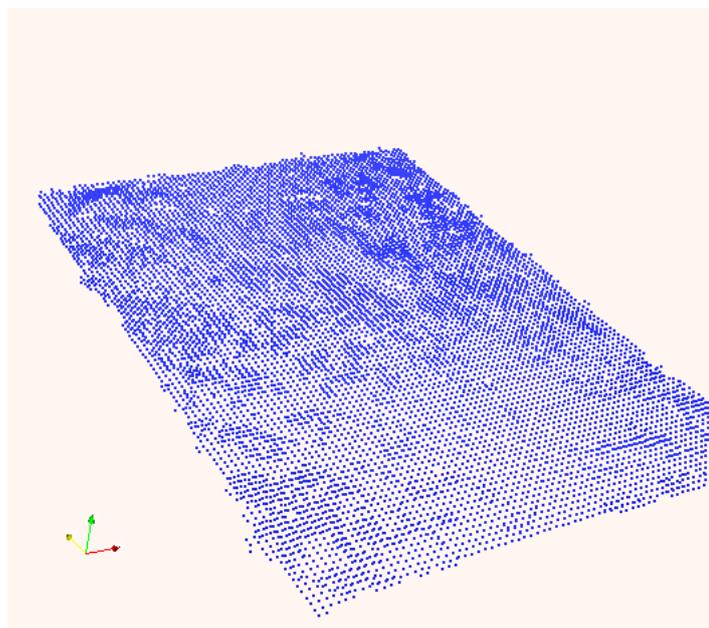


Figura 14 – Área escaneada para o pavimento rígido.

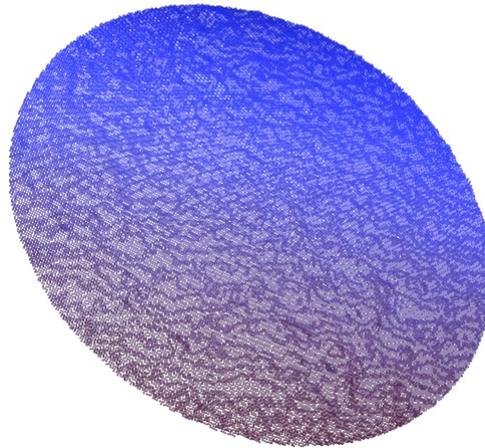


Figura 15 – Delimitação da área para análise.

Foram realizados testes com a aquisição de 3 e de 6 leituras por corpo de prova. A cada leitura a amostra foi rotacionada, para que nenhuma área ficasse encoberta e todos os pontos fossem escaneados. O *software ScanStudio*, fornecido pelo próprio fabricante realizou a sobreposição destas, por meio de pontos referência nas superfícies dos corpos de prova, gerando um modelo final único para cada uma das quatro amostras.

O escaneamento foi realizado nos modos “*Macro*” e “*Wide*” e o equipamento foi ajustado para a melhor qualidade. Nestes parâmetros, cada escaneamento levou em torno de 180 segundos. Ao final do processo de escaneamento da amostra obtêm-se um arquivo no formato **.xyz*.

O arquivo obtido foi processado por um algoritmo desenvolvido na linguagem *Phyton*, o mesmo utilizado por Neves *et al.* (2016). Além de retornar a rugosidade média e o erro percentual em relação aos dados experimentais, o algoritmo também calcula alguns parâmetros estatísticos como desvio padrão, mediana e curtose, definidos na seção 2.2, que foram utilizados para verificar a precisão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais obtidos para o ensaio de Mancha de Areia estão contidos na Tabela 3, a seguir. Os valores médios de MDT encontrados foram 1,000 e 1,035 para concreto e asfalto, respectivamente.

Tabela 3 – Resultado dos ensaios experimentais de Mancha de Areia.

Corpo de Prova	MDT
1	0.998
2	1.002
3	0.770
4	1.300

Foi realizada a classificação da macrotextura de acordo com a Tabela 1 extraída do DNIT (2006), concluindo-se que ambos os pavimentos apresentam textura grosseira ou aberta. Observou-se também que os valores de MDT encontram-se dentro dos limites sugeridos pelo DNIT ($1,20\text{mm} \geq \text{HS} \geq 0,60\text{mm}$), atendendo aos requisitos de segurança. Quanto a resistência à derrapagem, os pavimentos apresentam classificação rugosa (Tabela 2).

4.2 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O scanner conseguiu representar de forma satisfatória as superfícies dos pavimentos, como pode ser observado nas Figuras 16 e 17. Os dados retornados pelo escaneamento apresentam detalhes visualmente precisos em relação textura os corpos de prova, de forma que o algoritmo possa ajustar as profundidades próximas das experimentais.

As representações das superfícies dos quatro pavimentos obtidas a partir do escaneamento tridimensional estão representadas na Figura 18. Por meio de uma avaliação visual das representações das superfícies obtidas, nota-se que o pavimento asfáltico é significativamente mais rugoso do que pavimento rígido de concreto.

O algoritmo realizou as aproximações das Profundidades Médias do Perfil (MPD) cujos resultados constam na Tabela 4, assim como os erros em relação aos resultados experimentais.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As respostas do algoritmo foram bastante próximas dos valores experimentais. Embora tenha-se observado uma grande variação nos erros relativos, estes apresentaram

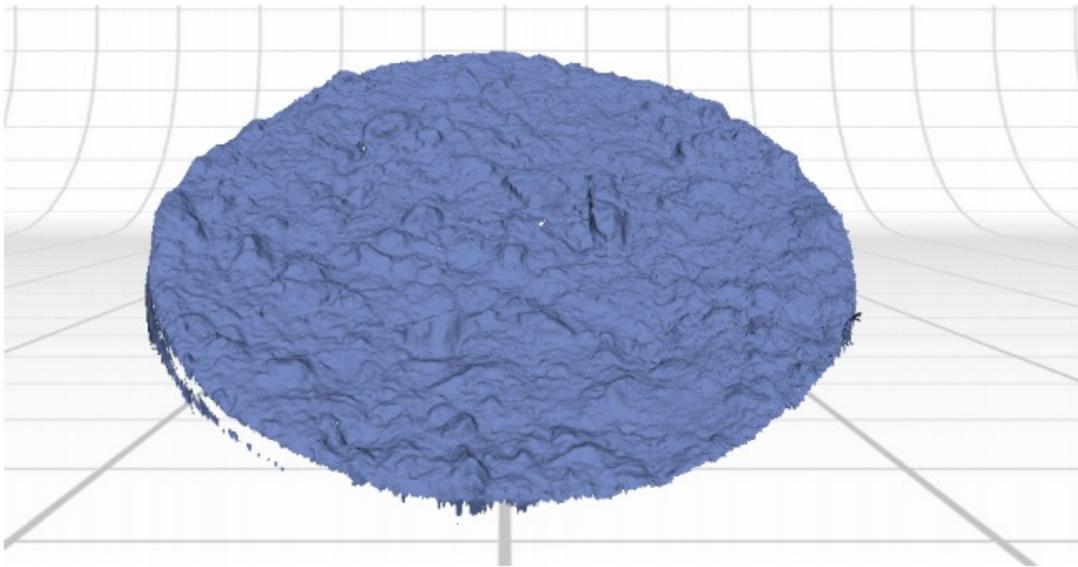


Figura 16 – Perfilamento tridimensional com 6 leituras do pavimento asfáltico.
Representação da nuvem de pontos retornada pelo scanner.

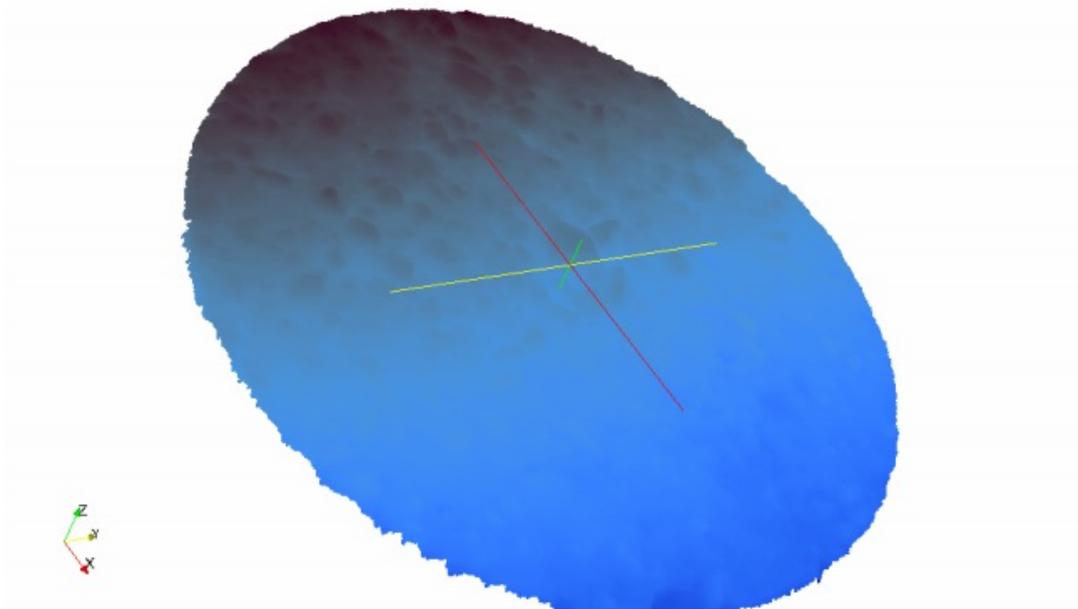


Figura 17 – Perfilamento tridimensional com 3 leituras do pavimento asfáltico.
Representação após o tratamento para retirada de pontos atípicos.

Tabela 4 – Resultados estimados de MTD e erros em relação aos valores experimentais

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

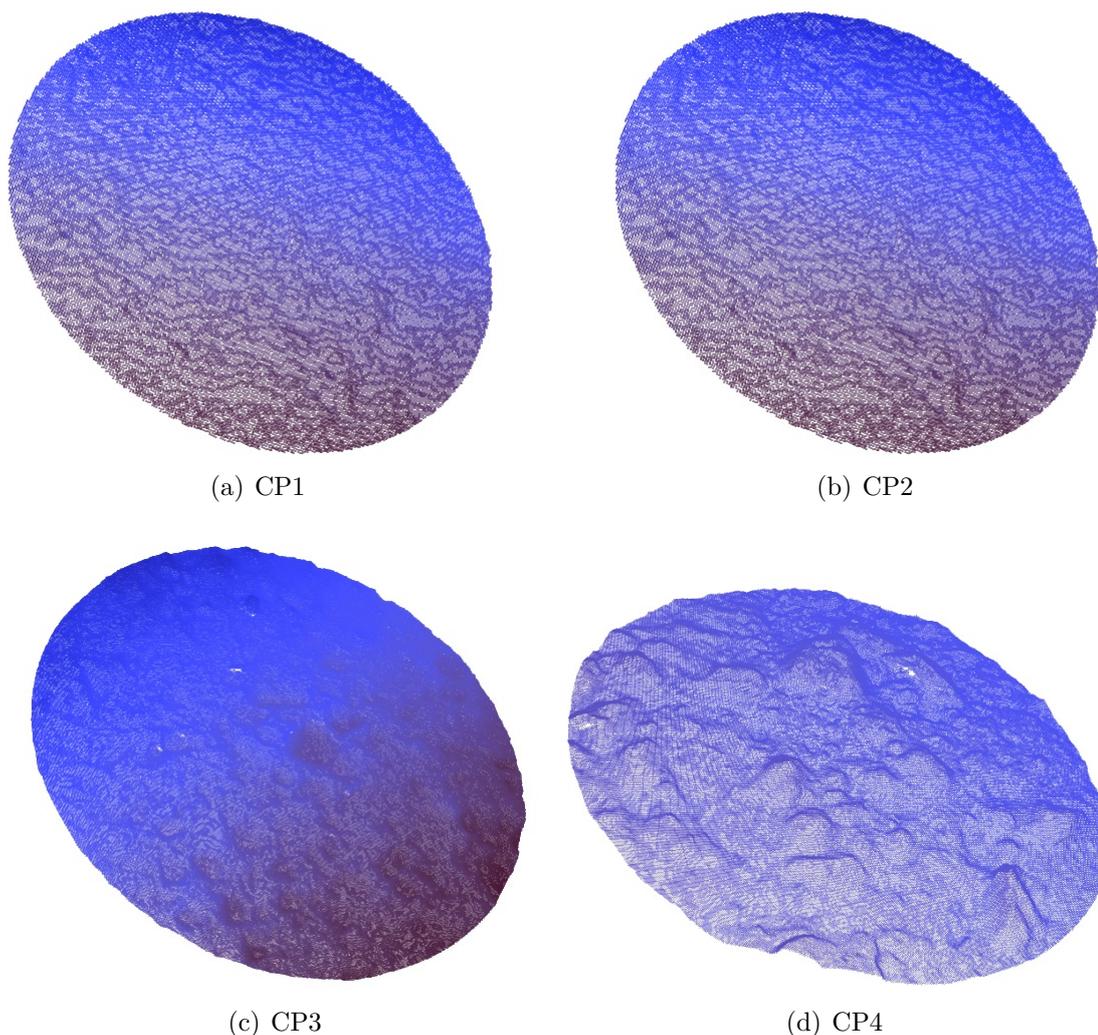


Figura 18 – Representação das superfícies escaneadas.

(a) e (b) referem-se às amostras de concreto; (c) e (d) às amostras de asfalto.

valores aceitáveis, sendo o máximo erro 2,83% para 3 leituras e 5,41% para 6 leituras.

Observou-se também que os resultados foram condizentes entre si. Contudo, nos ensaios experimentais foi encontrada uma grande variação entre valores de MTD para os corpos de prova de asfalto (aproximadamente 70%), indicando que este resultado médio não é muito apurado. Também cabe ressaltar que apesar da análise visual indicar que o pavimento asfáltico é bem menos rugoso que o pavimento de concreto, a diferença numérica entre os valores de MTD não foi tão significativa. Assim, presume-se que caso mais medidas fossem realizadas o valor de MTD para os pavimentos asfálticos seria reduzido.

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; Lima, 2004).

Tabela 5 – Valores estimados para os parâmetros descritivos desvio padrão, mediana e curtose.

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

Para melhor visualização dos resultados, foi traçado o gráfico da Profundidade Média do Perfil (MPD), parâmetro obtido computacionalmente *versus* Textura Média do Pavimento (MDT), obtida experimentalmente (Figura 19). Os dados contidos no gráfico referem-se a cada um dos oito ensaios realizados.

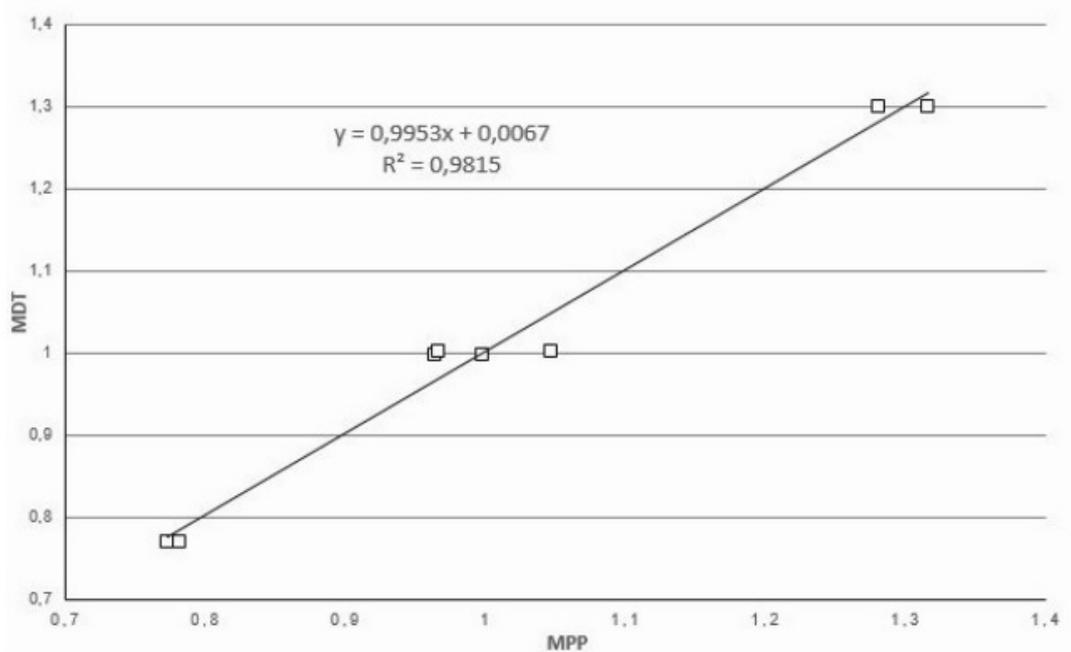


Figura 19 – Relação Profundidade Média do Perfil (MPD) e Textura Média do Pavimento (MDT).

A equação representativa dos resultados encontra-se representada e o coeficiente de correlação encontrado foi ($R^2 = 0,9815$), o que indica uma forte correlação entre MPD e MDT.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados comparativos obtidos foram bastante satisfatórios, o que pode ser comprovado em um primeiro momento pelo alto coeficiente de correlação obtido e a precisão dos resultados pode ser considerada elevada. Os erros relativos médios foram de aproximadamente de 1,02% no caso de 3 leituras e de 2,43% para 6 leituras, sendo razoavelmente baixos. Ressalta-se também que estes valores são próximos dos encontrados na literatura, o que é favorável à validação do método. Contudo, uma conclusão definitiva sobre a precisão não pode ser realizada, devido a limitações no estudo. A dificuldade em se obter amostras de pavimentos rígidos, por exemplo, impossibilitou uma padronização do ensaio o que causou diversas inconsistências na análise.

Dentre as principais vantagens do método proposto destaca-se a facilidade de execução e a possibilidade de adaptação do procedimento, é possível por exemplo, realizar o escaneamento em campo evitando a extração de amostras. No caso de ser necessário extrair ou moldar corpos de prova, há também flexibilidade de tamanhos e formatos possíveis, uma vez que tanto a configuração cilíndrica quanto a placa foram adequadas. Contudo, para situações que exijam classificações quantitativas mais específicas, este procedimento mostrou-se insuficiente, uma vez que o parâmetro retornado refere-se somente à macrotextura, não sendo possível analisar os demais níveis de rugosidade.

De uma forma geral conclui-se que os resultados pretendidos neste trabalho foram alcançados. Apesar de os resultados ainda serem insuficientes, o método analisado mostra-se promissor. Dessa forma, recomenda-se que seja definida uma padronização do procedimento e que mais medições venham a ser realizados a fim de confirmar a tendência observada. Sugere-se também a extensão de aplicação deste método a outros tipos de pavimento, como pavimentos mistos ou que façam uso de materiais alternativos.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. ISO 4287.** [S.l.]: Brasil, 2002.

ASTM, American Society for Testing Materials. **Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. ASTM E965.** [S.l.]: Estados Unidos, 2006.

AZEVEDO, M. Construção e reabilitação de pavimentos - indicadores de estado de conservação dos pavimentos. **Documento Base, INIR, Lisboa, 2009.**

BARELLA, Rodrigo Maluf. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.

BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi; FILHO, José Vicente Caixeta. Impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras: um estudo de caso. **Revista de Economia e Sociologia Rural, SciELO Brasil, v. 46, n. 3, p. 703–738, 2008.**

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, LMG da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. **Rio de Janeiro, p. 504, 2008.**

BITELLI, Gabriele; SIMONE, Andrea; GIRARDI, Fabrizio; LANTIERI, Claudio. Laser scanning on road pavements: a new approach for characterizing surface texture. **Sensors, Molecular Diversity Preservation International, v. 12, n. 7, p. 9110–9128, 2012.**

BOSCAINO, Gabriele; PRATICÒ, Filippo Giammaria; VAIANA, Rosolino. Tyre/road noise on different road pavements: synergetic influence of acoustical absorbing coefficient and surface texture. In: **EAEC-European Automotive Congress—Environmental impact of road transport session, Beograd (Belgrado), 30th May-1st June ISBN.** [S.l.: s.n.], 2005. p. 978–160423604.

CALLAI, Sérgio Copetti. **Estudo do ruído causado pelo tráfego de veículos em rodovias com diferentes tipos de revestimentos de pavimentos.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

ČELKO, Ján; KOVÁČ, Matúš; KOTEK, Peter. Analysis of the pavement surface texture by 3d scanner. **Transportation Research Procedia, Elsevier, v. 14, p. 2994–3003, 2016.**

CNT, PESQUISA RODOVIÁRIA. **Confederação Nacional do Transporte.** [S.l.]: Brasília: SEST/SENAT, 2016.

COUTINHO, Henrique José Souza; PETRY, Alexander; CARDOSO, Fernanda Caetano. Avaliação da utilização de técnicas de estereoscopia para apresentação de conceitos de geometria descritiva. **Graphica Curitiba, Paraná, Brasil, 2007.**

DAGNALL, Henry. **Exploring surface texture.** [S.l.]: Rank Taylor Hobson, 1980.

DER MG, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais. **Avaliação da macro textura de pavimentos viários através do ensaio de mancha de areia.** [S.l.]: Brasil, 2005.

DNIT, Departamento Nacional de Infraest de Transportes. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. DNIT 031.** [S.l.]: Brasil, 2006.

ESPARTEL, Lelis. **Curso de topografia.** [S.l.]: Globo, 1975.

GIONGO, Marcos; KOEHLER, Henrique Soares; MACHADO, Sebastião do Amaral; KIRCHNER, Flavio Felipe; MARCHETTI, Marco. Lidar: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231, 2010.

ISO, International Organization for Standardization. **Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 1: Determination of Mean Profile Depth. ISO 113473-1.** [S.l.]: Estados Unidos, 2004.

KHOUDEIR, Madji; BROCHARD, Jacques; LEGEAY, Vincent; DO, M-T. Roughness characterization through 3d textured image analysis: contribution to the study of road wear level. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, Wiley Online Library, v. 19, n. 2, p. 93–104, 2004.

KUCHIISHI, André Kazuo; CALLAI, Sérgio Copetti; VIEIRA, Tiago; BERNUCCI, Liedi Bariani. Estudo da macrotextura do pavimento a partir de ensaios de mancha de areia e drenabilidade em conjunto com análise da superfície por estereoscopia. **XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, 2014.

LEE, Yang Pin Kelvin; FWA, Tien Fang; CHOO, Yoo Sang. Effect of pavement surface texture on british pendulum test. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, Eastern Asia Society for Transportation Studies, v. 6, p. 1247–1257, 2005.

MACHADO, A. **Avaliação da rugosidade em superfície complexas.** [S.l.]: Sociedade Educacional de Santa Catarina. Instituto Superior Tupy., 2009.

MAGALHÃES, Marcos N.; LIMA, Antônio C. P. **Noções de probabilidade e estatística.** 6 ed.. ed. [S.l.]: Edusp, Universidade de São Paulo, São Paulo., 2004.

MARE, C De; SCHEERS, J; LAMBERT, F; VERMEULEN, M; GRAEF, L; GADEYNE, Y. Development of the sibtex sheet having excellent drawability and paint appearance. **Revue de Metallurgie, Cahiers d'Informations Techniques(France)**, v. 94, n. 6, p. 827–836, 1997.

MEANS, Joseph E; ACKER, Steven A; FITT, Brandon J; RENSLOW, Michael; EMERSON, Lisa; HENDRIX, Chad J *et al.* Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, ASPRS AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND, v. 66, n. 11, p. 1367–1372, 2000.

NEVES, Gabriel; GOULART, Gisele; GOLIATT, Leonardo; BASTOS, Flávia; RESENDE, Natália; MARQUES, Geraldo; FARAGE, Michèle. Determinação dos parâmetros de rugosidade de pavimentos asfálticos via escaneamento tridimensional a laser. **XII Simpósio de Mecânica Computacional**, 2016.

- NEXT ENGINE. **Next Engine Laser Scanner**. 2016. Disponível em: <<https://www.nextengine.com/products/scanner/specs>>.
- PERERA, RW; KOHN, SD. Issues in pavement smoothness. **Transportation Research Board, Washington, DC**, 2002.
- PIRATELLI FILHO, Antonio. Rugosidade superficial. **Seminário de Metrologia**, v. 3, 2011.
- PRATICÒ, Filippo Giammaria; VAIANA, Rosolino; IUELE, Teresa. Surface performance characterization of single-layer surface dressing: A macrotexture prediction model. In: SPRINGER. **8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials**. [S.l.], 2016. p. 459–470.
- PULUGURTHA, Srinivas Subrahmanyam; PATEL, Kuvleshay J; KUSAM, Prasanna. Pavement macrotexture thresholds to enhance safety: Case study using i-40 data in durham county, north carolina. In: **Transportation Research Board 90th Annual Meeting**. [S.l.: s.n.], 2011.
- RASSHOFER, RH; GRESSER, K. Automotive radar and lidar systems for next generation driver assistance functions. **Advances in Radio Science**, Copernicus GmbH, v. 3, n. B. 4, p. 205–209, 2005.
- SCHEERS, J; VERMEULEN, Michel; MARÉ, C De; MESEURE, K. Assessment of steel surface roughness and waviness in relation with paint appearance. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 38, n. 5-6, p. 647–656, 1998.
- SCHWARZ, Brent. Lidar: Mapping the world in 3d. **Nature Photonics**, Nature Publishing Group, v. 4, n. 7, p. 429, 2010.
- SENGOZ, Burak; TOPAL, Ali; TANYEL, Serhan. Comparison of pavement surface texture determination by sand patch test and 3d laser scanning. **Periodica Polytechnica. Civil Engineering**, Periodica Polytechnica, Budapest University of Technology and Economics, v. 56, n. 1, p. 73, 2012.
- SILVA, Amanda Helena Marcandali da; BERNUCCI, Liedi Legi Bariani; ARANHA, Ana Luisa; SUZUKI, Carlos Yukio; CHAVES, José Mário. Avaliação da redução de acidentes em pavimentos com microrrevestimento a frio. 2011.
- SLIMANE, Anis Ben; KHOUDEIR, Majdi; BROCHARD, Jacques; DO, Minh-Tan. Characterization of road microtexture by means of image analysis. **Wear**, Elsevier, v. 264, n. 5, p. 464–468, 2008.
- SPECHT, Luciano P; ROZEK, Thiago; HIRSCH, Fábio; SANTOS, Reginaldo T dos. Avaliação da macrotextura de pavimentos através do ensaio de mancha de areia evaluation of pavement macrotexture by sand patch technique. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 10, p. 30–38, 2007.
- UNICAMP. **Unicamp Rugosidade Superficial**. 2011. Disponível em: <<http://www-fem.unicamp.br/~sergio1/graduacao/EM335/rugosidade.htm>>.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. Análise de componentes principais. **Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**, 2008.

WAMBOLD, James C; HENRY, JJ. International piarc experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurement. **Nordic Road and Transport Research**, 1994.