

Avaliação do desempenho acústico e das características de superfície de camada porosa de atrito em meio urbano

Evaluation of the acoustic performance and surface characteristics of porous friction courses in urban environments

Carla Marília Cavalcante Alecrim¹, Verônica Teixeira Franco Castelo Branco²,
Nara Gabriela de Mesquita Peixoto³, Alessandro Alves⁴, Gleidson Martins Pinheiro⁵

¹Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, cmariliac.civil@gmail.com

²Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, veronica@det.ufc.br

³Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, nara@det.ufc.br

⁴Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul – Brasil, alessandro.alves@ufms.br

⁵Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, gleidsonmartins@gmail.com

Recebido:

15 de março de 2021

Aceito para publicação:

20 de dezembro de 2021

Publicado:

26 de abril de 2022

Editor de área:

Kamilla Vasconcelos

Palavras-chave:

Camada Porosa de Atrito.

Ruído pneu-pavimento.

Textura.

Vias urbanas.

Keywords:

Porous Friction Courses.

Tire-pavement noise.

Texture.

Urban roads.

DOI:10.14295/transportes.v30i1.2581



RESUMO

A Camada Porosa de Atrito (CPA) é utilizada, dentre outros locais, em rodovias ou em pistas de pouso e decolagem, para promover melhorias funcionais no pavimento. Em Fortaleza, a CPA está sendo utilizada em vias urbanas. O objetivo desse artigo é avaliar o desempenho acústico e de superfície das CPAs aplicadas nessas vias. Para isso, foram realizados ensaios acústicos (método da passagem controlada) em vias com revestimentos em CPA e em Concreto Asfáltico (CA). Foram realizados ensaios tradicionais de micro e macrot textura, além da utilização da técnica de *Close-Range Photogrammetry* (CRP) para a obtenção de parâmetros da superfície. A CPA mostrou-se eficiente na redução do ruído no meio urbano (até 5,6 dB (A)). A micro e a macrot texturas das CPAs não foram melhores do que um CA convencional nessas vias. A técnica de CRP possibilitou a obtenção de parâmetros que caracterizam melhor revestimentos de textura negativa como a CPA.

ABSTRACT

Porous Friction Courses (PFC) are used, among other places, on highways or runways to promote functional improvements to the pavement surface. In Fortaleza, PFCs are used in urban roads. The aim of this paper is to evaluate the acoustic and surface performance of PFCs in these types of roads. In order to achieve this purpose, acoustic tests (controlled pass-by method) were performed on roads where PFCs and dense Asphalt Concrete (AC) were used as wearing courses. Traditional micro and macrot texture tests were performed and, in addition, the *Close-Range Photogrammetry* (CRP) technique was used to obtain surface parameters. PFCs were found to be efficient in reducing noise in the urban environment (up to 5.6 dB (A)). The micro and macrot textures for PFCs were similar to those of a conventional AC. The CRP technique allowed the obtention of parameters that better characterize negative texture surfaces, which is the case of PFCs.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento dos centros urbanos, que podem contemplar diversos tipos de uso do solo, associado à necessidade de mobilidade das pessoas, traz consigo problemas relacionados ao ruído de tráfego. Segundo dados do projeto piloto multinacional *Environmental Burden of Disease in Europe* (EBoDE, 2010), o ruído ambiental e a poluição atmosférica são as principais causas da

parcela ambiental de doenças em alguns países da Europa. De acordo com pesquisas realizadas em grande escala sobre a percepção de incômodo, em países da Europa, o ruído do tráfego rodoviário é a principal fonte para a população (WHO, 2018). Vianna (2014) observou que a chance de as pessoas relatarem incômodo com o ruído do tráfego rodoviário é quatro vezes maior em áreas expostas a este ruído do que nas não expostas. Dentro da faixa de frequência audível pelo ouvido humano (20 Hz e 20 KHz), este é mais sensível na faixa de 1 kHz a 5 kHz, que é, coincidentemente, a mesma na qual ocorre o ruído pneu-pavimento (FEHRL, 2006).

No Brasil, a NBR 10151 (2000) determina as condições de avaliação e aceitabilidade do ruído em áreas habitadas. O método de avaliação se dá por medições do nível de pressão sonora equivalente, referente a dado intervalo de medição. Para uma área mista, com vocação comercial e administrativa, o Nível de Critério de Aceitação (NCA) é de 60 e 55 dB(A) nos horários diurnos e noturnos, respectivamente. A adoção de medidas mitigadoras de ruído pode auxiliar no atendimento desses critérios.

Internacionalmente, algumas das formas de mitigar os ruídos do tráfego são as barreiras acústicas, os chamados pavimentos silenciosos e até mesmo uma combinação de ambas. Outras estratégias, no âmbito da Engenharia de Transportes, são a implantação de áreas de redução da velocidade e o controle do tráfego. De acordo com a *Permanent International Association of Road Congresses* (PIARC, 2013), uma superfície, para ser considerada silenciosa, deve reduzir no mínimo 3 dB (A) em relação a uma camada padrão de referência. No Brasil, Strufaldi *et al.* (2010) relatam a combinação do uso de barreiras acústicas com um revestimento do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) para mitigação de ruídos oriundos do tráfego em um anel viário urbano de grande porte que cruza uma área altamente habitada na cidade de São Paulo.

A CPA também é amplamente conhecida por proporcionar outros benefícios funcionais, como melhor aderência pneu-pavimento. Esse tipo de revestimento é utilizado normalmente em rodovias de alto volume de tráfego e em pistas de pouso e decolagem, mas na literatura encontram-se relatos da utilização desse tipo de revestimento em áreas urbanas (GIBBS *et al.*, 2005). De acordo com Gibbs *et al.* (2005), misturas porosas tendem a colmatar em áreas urbanas, sob a ação de tráfego lento e, conseqüentemente, perder os benefícios funcionais.

Na cidade de Fortaleza, a CPA está sendo empregada em vias urbanas (PMF, 2018). Esse trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho acústico de revestimentos do tipo CPA em vias urbanas de Fortaleza-CE. A realização dos ensaios acústicos é feita com a utilização do método *controlled pass-by* (CPB), em vias com entornos abertos e adensados. Além disso, as características de superfície (micro e macrotextura) dos revestimentos são avaliadas por meio dos métodos do pêndulo britânico, do ensaio da mancha de areia e da modelagem 3D da superfície com o uso da técnica de *Close-Range Photogrammetry* (CRP).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ruído pneu-pavimento

O ruído veicular pode ter duas origens básicas: a unidade de força do veículo (motor, entrada de ar, escape, transmissão) e a interação pneu-pavimento (Sandberg, 1987). De acordo com Hanson e James (2004), para veículos de passeio, trafegando em velocidades superiores a 40 km/h, a fonte geradora de ruído predominante é o contato na interface pneu-pavimento. Abaixo dessa velocidade, a principal fonte de ruído é o motor dos próprios veículos.

Os principais fatores da superfície que influenciam a geração e a propagação do ruído pneu-pavimento são a textura da superfície, o padrão de textura (positivo ou negativo) e o grau de porosidade da superfície. Além desses, a impedância mecânica (relacionada à rigidez do revestimento) também é relevante para o fenômeno (FEHRL, 2006). Ceratti, Bernucci e Soares (2015) sugerem revestimentos que podem contribuir para a redução do ruído ao rolamento. Dentre eles, revestimentos em CPA, *Gap-graded* e misturas delgadas (como as *Bétons Bitumineux Très Minces*) e ultra delgadas são recomendados para tráfego alto e muito pesado. Os referidos autores apontam as misturas de maior macrotextura e de menor tamanho máximo nominal como aquelas que tendem a ser menos ruidosas.

Specht *et al.* (2009) realizaram medições de ruído em rodovias brasileiras de diferentes tipos de revestimentos, que foram: Concreto Asfáltico (CA), tratamento superficial duplo, CPA, concreto de cimento Portland e microrrevestimento. O método de medição empregado foi o *Statistical Pass-by* (SPB). O maior valor de *Statistical Pass-by Index* (SPBI) encontrado foi de 84,31 dB (A) para o concreto de cimento Portland, seguido de 82,52 dB (A) para o CA, 82,19 dB (A) para o tratamento superficial, 79,29 dB (A) para a CPA e 78,51 dB (A) para o microrrevestimento.

Knabben (2012) avaliou o ruído pneu-pavimento nos seguintes tipos de revestimento: CA denso comum com 30 anos de idade, mistura densa com asfalto-borracha de 6 meses de idade, CPA com 5 anos de idade e microrrevestimento com 2 anos de idade. Foram feitas medições de nível de ruído máximo ($L_{Amáx}$) com apenas um veículo (de passeio), utilizando algumas diretrizes do método CPB. Foram feitas de 6 a 9 passagens do veículo em cada velocidade testada (60, 80 e 100 km/h). A distância horizontal do sonômetro ao eixo do veículo foi de 2,8 m. Os resultados mostraram menores ruídos para a CPA em todas as velocidades ensaiadas, com diferenças de até 2,7, 5,9 e 6,9 dB(A) em relação aos revestimentos em asfalto-borracha, CA e microrrevestimento, respectivamente.

O método da proximidade imediata (*Close-Proximity* – CPX) foi utilizado no Brasil por Albuquerque *et al.* (2013) e Knabben *et al.* (2019), que desenvolveram equipamentos próprios para as pesquisas. Em ambos os estudos também foi utilizado o método CPB, sendo constatada por Knabben *et al.* (2019) boa correlação ($R^2 = 0,94$) entre este e o método CPX para a velocidade de 80km/h, considerando medições em revestimentos em CA denso comum, em CA com asfalto-borracha e em CPA. Nesse estudo, utilizando o primeiro trailer CPX desenvolvido no Brasil, em comparação aos CA densos investigados, a maior redução de ruído que a CPA promoveu foi de 4,8 dB(A).

No estudo de Albuquerque *et al.* (2013) o equipamento utilizado não chega a ser um trailer CPX e consiste de 2 microfones acoplados a um dispositivo instalado na roda do veículo de teste. As velocidades utilizadas nas medições foram 40, 60 e 80 km/h, e os revestimentos investigados foram do tipo CA convencional e com asfalto-borracha, em áreas residenciais da cidade de Aracaju (SE). Os maiores níveis de ruído obtidos foram de 93,3 dB (A) para o CA e de 93,7 dB (A) para o asfalto borracha. O trabalho também utilizou o método CPB para a medição do ruído na lateral da via (15 m de distância do veículo), para as velocidades já mencionadas. Os níveis de ruído obtidos para o asfalto-borracha nas velocidades de 40, 60 e 80 km/h foram de 58,9, 66,8 e 69,1 dB (A), respectivamente; já para o CA convencional os valores foram de 61,4, 65,2 e 68,2 dB(A), respectivamente.

Alves (2019) avaliou o ruído em três trechos com revestimentos em CPA e seus respectivos trechos de referência com CA em rodovias do Rio Grande do Sul, utilizando o método SPB. Os resultados de SPBI obtidos para as CPAs construídas em dez/2014, dez/2016 e por volta de

2005 foram de 78,3, 77,3 e 78,3 dB (A), respectivamente. Já nos respectivos trechos de referência, os valores foram 83,8, 83,0 e 85,4 dB(A), respectivamente. Em um dos trechos, o autor também observou a influência das precipitações no local no desempenho dos revestimentos quanto ao ruído, constatando que não houve mudança significativa no nível de ruído ao longo de 3,5 anos na CPA nem no CA monitorados, provavelmente devido à limpeza dos poros das CPA pela ação das chuvas.

2.2. Textura superficial

Algumas faixas de comprimento de onda da textura do revestimento influenciam as características da superfície relativas ao ruído pneu-pavimento (macro e megatextura), à resistência ao rolamento (macro e megatextura e irregularidades) e à derrapagem (micro e macrotexturas) (PIARC, 1987). A microtextura pode ser definida como a textura de escala fina na superfície dos agregados graúdos do revestimento asfáltico, que interage com a borracha do pneu a nível molecular e proporciona adesão (FLINTSCH *et al.*, 2012). O ensaio do pêndulo britânico (ASTM D 303-93, 2018) é bastante utilizado no Brasil para avaliar essa propriedade. Esse equipamento mede o Valor da Resistência à Derrapagem (VRD).

A macrotextura normalmente compreende a forma e o tamanho dos agregados na superfície do pavimento. O arranjo e o espaçamento das partículas de agregados graúdos também afetam essa propriedade (KOGBARA *et al.*, 2016). Um dos métodos mais utilizados para a caracterização da macrotextura de pavimentos asfálticos é o método da mancha de areia (ASTM E965-15, 2019). Trata-se de um método volumétrico de determinação da profundidade média de macrotextura superficial ou *Mean Texture Depth* (MTD). Alves (2019) chama a atenção para o fato de que, em superfícies mais porosas, como a CPA, o material padronizado utilizado no ensaio de mancha de areia preenche os poros da camada asfáltica, o que torna esse ensaio não adequado para superfícies desse tipo.

Métodos 3D de medição de textura, que fornecem uma ampla gama de informações e representam melhor as características de textura da superfície, estão cada vez ganhando mais atenção (KOGBARA *et al.*, 2018). Dentre esses métodos está a fotogrametria de curta distância ou CRP, que envolve o uso de uma câmera portátil para capturar múltiplas imagens da superfície do pavimento, e dispositivos a laser (WOODWARD, MILLAR e MCQUAID, 2014). Alguns trabalhos utilizaram essa técnica para caracterização de micro, macro e megatextura (MCQUAID, MILLAR e WOODWARD, 2015; MEDEIROS *et al.*, 2016; KOGBARA *et al.*, 2018).

A técnica de CRP é baseada na estimativa das coordenadas 3D dos pontos em um objeto por meio da utilização de medições em imagens múltiplas, capturadas de diferentes posições com o uso de uma câmera comum. A partir dessas imagens, modelos 3D da textura da superfície são criados e analisados com a utilização de *softwares* como *3D Flow Zephyr Pro*, *Digital Surf MountaionsMap*, dentre outros (Kogbara *et al.*, 2016). Para a caracterização 3D da textura da superfície, esses programas fornecem uma série de parâmetros da norma ISO 25178-2 (2012), que especifica termos, definições e parâmetros para a determinação de textura superficial de área. Dentre os parâmetros da referida norma, os mais comumente utilizados para caracterizar revestimentos são os de altura e de volume.

Quanto à finalidade desses parâmetros, Kogbara *et al.* (2018) consideraram três parâmetros para a caracterização 3D da textura do revestimento. Um relacionado à altura (S_q – raiz quadrada média da altura, representando uma medida geral da textura), um ao volume (V_{mp} – volume de pico, caracterização da zona de contato entre o pneu e a superfície) e outro à

distribuição de picos (Spd – densidade de picos, afeta a maneira pela qual os picos sofrem deformação sob carga). Em Medeiros *et al.* (2016), a assimetria (parâmetro S_k , para perfis) foi indicada como uma possibilidade de caracterização do nível de aleatoriedade da orientação dos agregados, e de detecção de segregação de agregados ao se comparar diferentes seções de um mesmo pavimento. Maia (2020) utilizou o parâmetro V_{mp} como variável em um modelo de previsão de atrito.

3. TRECHOS AVALIADOS E MÉTODOS UTILIZADOS

3.1. Trechos avaliados no estudo

Foram escolhidos dois pares de trechos, cada um deles constando de uma via com revestimento em CPA e de outra com um revestimento de referência, em CA denso. Esses locais são mostrados na Figura 1. O presente trabalho avaliou dois tipos de entornos das vias: um que visava obedecer às restrições da NF S31-119-2 (2000) (primeira etapa) e outro que contemplou vias com entornos mais adensados, típicos do meio urbano (segunda etapa). Os demais ensaios foram realizados nos mesmos locais de realização dos ensaios acústicos.

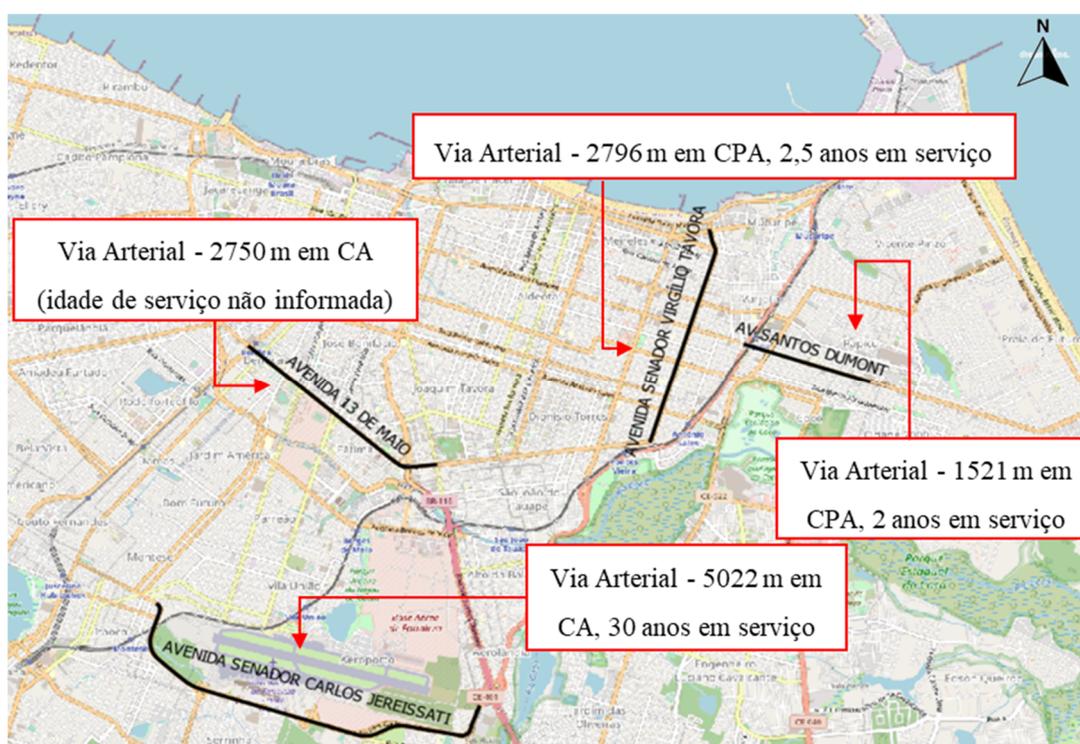


Figura 1. Localização das avenidas avaliadas no mapa da Fortaleza

As vias avaliadas na primeira etapa foram as avenidas Santos Dumont (CPA_M1) e Senador Carlos Jereissati (CE-401) (CA_M1), com revestimentos em CPA e em CA, respectivamente. Esses locais permitem atender aos seguintes quesitos da NF S31-119-2 (2000): distância de 7,5 m do eixo de passagem do veículo ao sonômetro, ausência de obstáculos em raio de 2 m, ausência de fachadas, consideração de velocidades acima de 70 km/h (valor mínimo estabelecido pela norma). As vias avaliadas na segunda etapa foram as avenidas Senador Virgílio Távora (CPA_M2) e 13 de Maio (CA_M2), com revestimentos em CPA e em CA, respectivamente. Essas vias tinham duas faixas de tráfego por sentido, canteiro central, e entornos caracterizados pela presença de prédios próximos à via. A distância entre o sonômetro e o eixo de passagem do

veículo foi de 5,2 m para este caso. Avenidas com essa configuração de entorno são comuns na cidade de Fortaleza e em outras grandes cidades.

A passagem do veículo para todos os casos ocorreu entre duas faixas de tráfego, para que o motorista tivesse um auxílio visual do local de passagem, como mostra a Figura 2. A altura do sonômetro foi de 1,2 m em relação à superfície da via, como determina a norma NF S31-119-2 (2000). Na primeira etapa, na via CA_M1, o sonômetro ficou entre meios-fios de concreto que delimitavam uma ciclofaixa, e, na via CPA_M1, livre de quaisquer obstáculos. Já na segunda etapa, atrás do sonômetro ficaram fachadas de construções e objetos como orelhão e poste em ambas as vias.

Foi utilizado um veículo de passeio, modelo ONIX LTZ, e os ensaios foram realizados durante o período noturno, de forma que o nível de ruído medido não fosse influenciado por outras fontes. Os pneus utilizados no veículo são da marca Fuzion, tamanho 185/65 R15 (M+S) e suas ranhuras principais tinham profundidade superior à 2/3 da profundidade original, conforme determinação da norma. Antes do início de cada coleta os pneus eram calibrados com 32 libras, conforme recomendação da fabricante. O sonômetro utilizado foi classe 1, da marca Criffer, modelo Octava, número de série 018062621, devidamente calibrado.

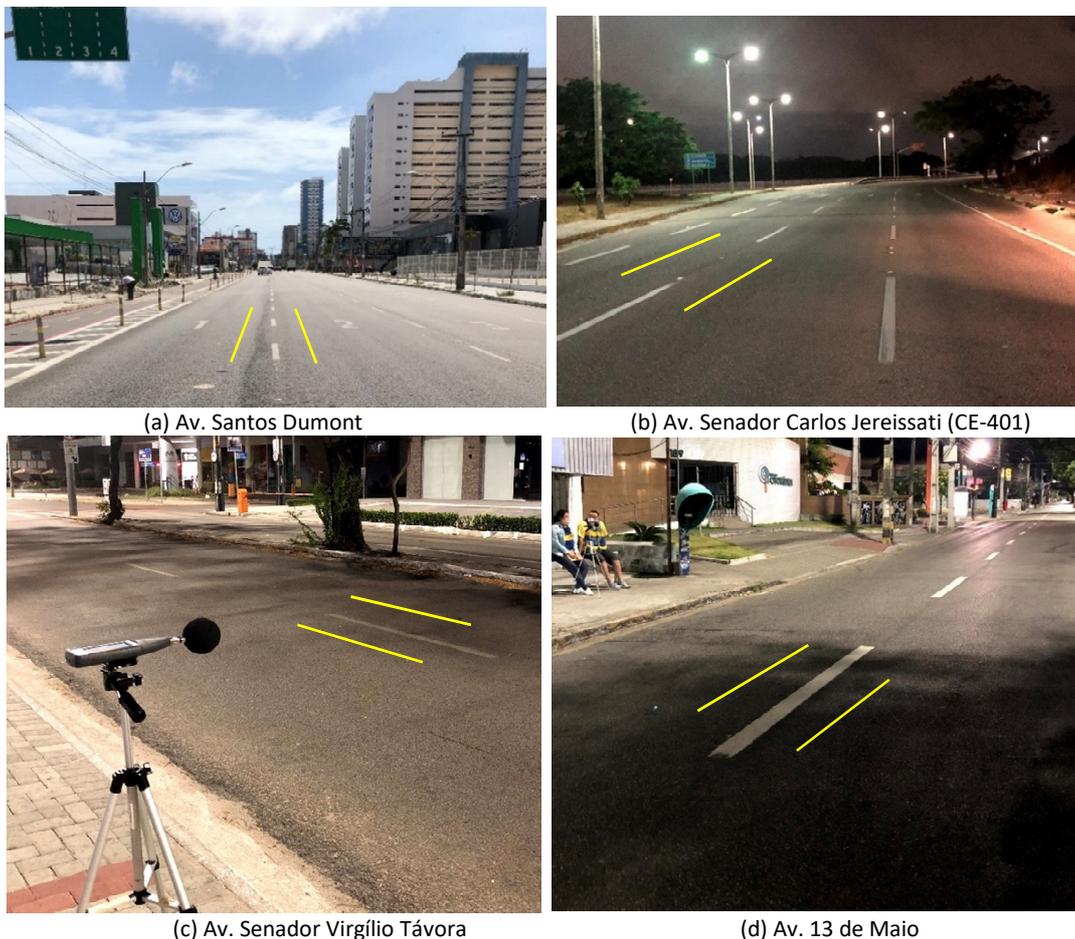


Figura 2. Locais de passagem do veículo na pista durante as medições

As velocidades de passagem foram definidas com base nos seguintes fatores condicionantes: os limites possíveis de serem desenvolvidos nas vias e as velocidades que são relevantes para o

fenômeno (≥ 40 km/h). Como cada par de via tinha suas particularidades, foram escolhidas diferentes velocidades para cada etapa do estudo. Para a primeira etapa foram realizadas 9 passagens com o veículo em cada velocidade (50, 60, 70 e 80 km/h). Já para a segunda etapa foram realizadas 6 passagens para cada velocidade (40, 50, 60 km/h). A cada passagem, o nível de ruído máximo ($L_{Amáx}$) e a velocidade do veículo foram registrados. Durante a realização dos ensaios a temperatura do pavimento foi de cerca de 29 °C, a temperatura do ar foi de 27 °C e a velocidade do vento ficou abaixo de 5 m/s, conforme preconiza a norma.

3.2. Pêndulo britânico e mancha de areia

Os ensaios de superfície foram realizados nas trilhas de roda por onde o veículo passou nos ensaios acústicos, que foram as trilhas de roda externa da faixa mais à esquerda e interna da faixa à direita da primeira. Além disso, para que se considerasse ambas as trilhas de roda de uma das faixas de tráfego, alguns pontos também foram ensaiados na trilha de roda externa da faixa da direita. Os trechos, de 50 m, foram ensaiados a cada 10 m, em zigue-zague. Ao todo, em cada trecho, foram ensaiados 9 pontos.

3.3. Close-Range Photogrammetry (CRP)

Para esse método, foram considerados dois pontos por trilha de roda, totalizando 6 pontos por trecho. A sequência de etapas seguida desde a obtenção das fotos em campo à obtenção dos parâmetros de área da ISO 25178-2 (2012) é resumida na Figura 3. A régua graduada é colocada sobre um dos lados do quadrado para guiar a definição da escala no processamento das imagens. No *software* Gwyddion, operações de nivelamento e remoção de fundo polinomial foram aplicadas. Além disso, 0,5% da área do material foi removida das extremidades da superfície para que os valores extremos fossem eliminados.

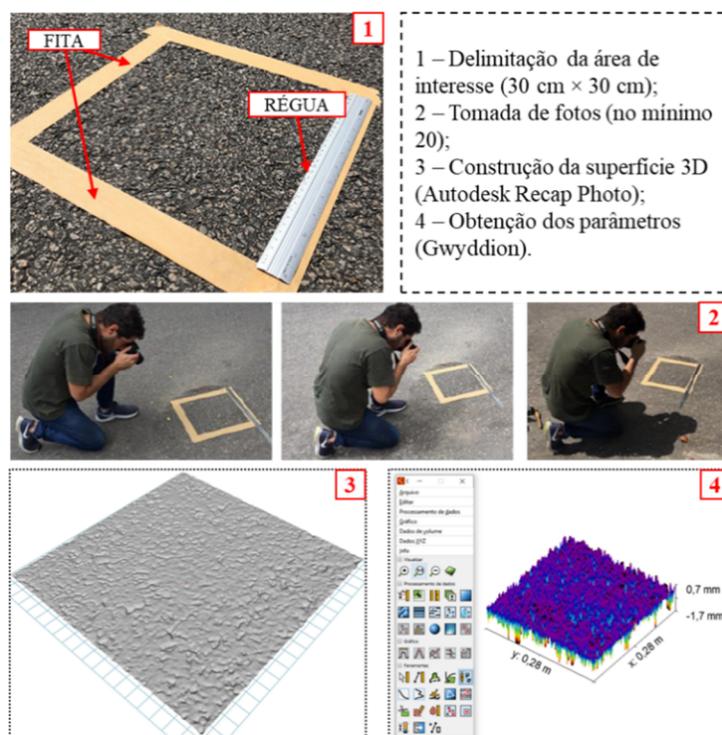
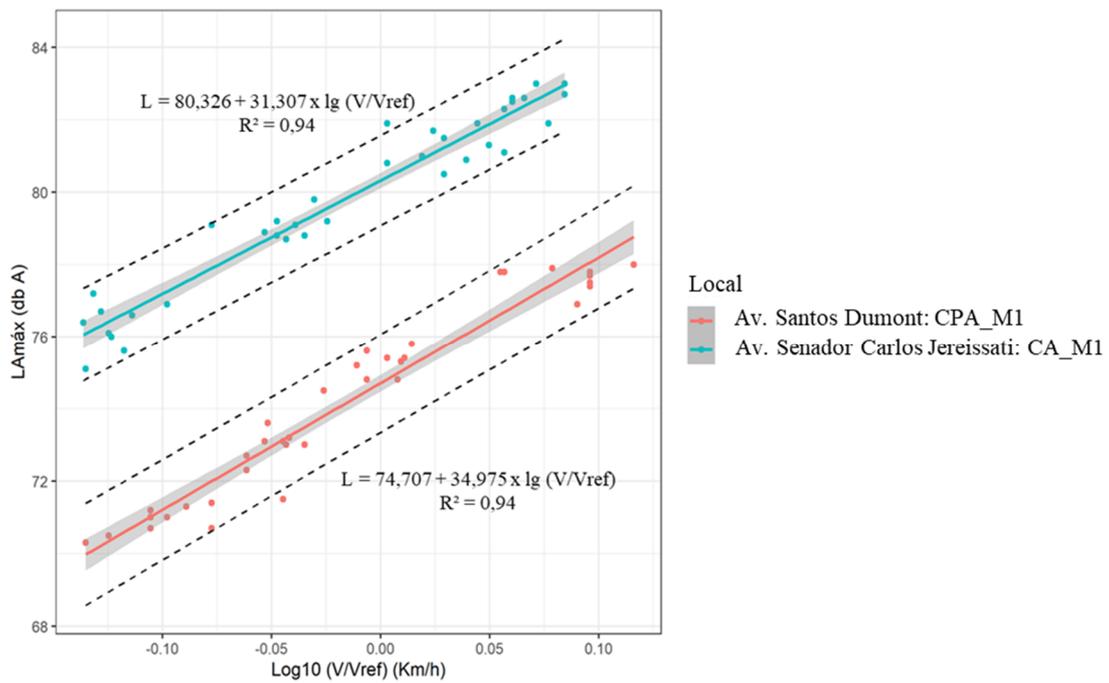


Figura 3. Etapas da modelagem 3D utilizando a técnica de CRP

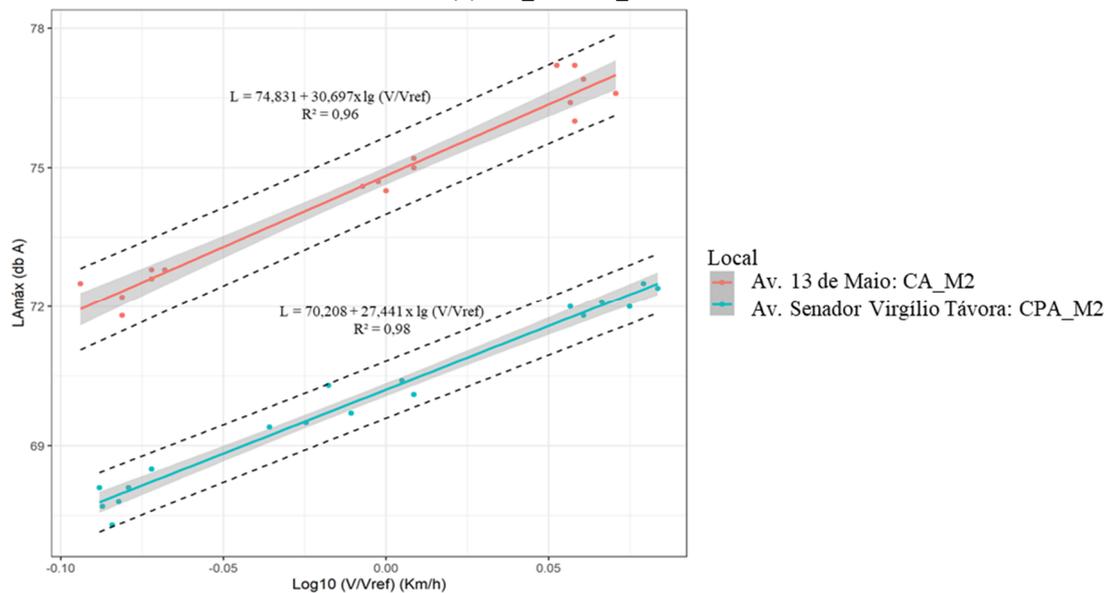
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização acústica

A caracterização acústica é expressa em termos de níveis de ruído de referência (L_{ref}), reportados para velocidades de referência (V_{ref}), associados a um Intervalo de Confiança (IC) de 95%, bem como em termos de uma reta de regressão linear de $L_{Amáx}$ em função do logaritmo decimal da velocidade. As V_{ref} são, respectivamente, 65 km/h e 50 km/h para a primeira e segunda etapas, valores escolhidos por serem próximos das médias das velocidades (63 km/h e 50 km/h) dos trechos avaliados na primeira e na segunda etapa, respectivamente. A NF S31-119-2 (2000) estabelece que é indispensável que a média das velocidades difira pouco da V_{ref} , mas não quantifica essa diferença.



(a) CPA_M1 e CA_M1



(b) CPA_M2 e CA_M2

Figura 4. $L_{Amáx}$ em função do logaritmo decimal da velocidade

Nas Figuras 4a e 4b são mostrados os resultados para as vias estudadas na primeira e na segunda etapas, respectivamente. Para o tratamento dos dados e construção das referidas figuras foi utilizado o *software* R. São mostrados os valores de R^2 , além dos respectivos ICs e Intervalos de Previsão (IP). Em ambas as figuras é possível perceber a correlação da velocidade de passagem com o $L_{Amáx}$, como esperado. Os níveis de referência - que correspondem aos coeficientes lineares das retas de regressão - para os revestimentos CPA_M1 e CA_M1 foram, respectivamente, 74,7 e 80,3 dB (A), o que resulta em uma diferença de 5,6 dB (A). Na segunda etapa, os níveis de referência foram de 70,2 e 74,8 dB (A) para os revestimentos CPA_M2 e CA_M2, respectivamente. Dessa forma, a diferença entre os $L_{Amáx}$ das duas vias é 4,6 dB (A). É possível afirmar que as diferenças entre os $L_{Amáx}$ nas vias analisadas, para ambas as etapas do estudo, são estatisticamente significantes, com confiança de 95%, já que os IP e IC não se interceptam.

4.2. Caracterização da superfície

O valor médio, o Desvio Padrão (DP) e o Coeficiente de Variação (CV) das macro e microtexturas dos revestimentos estudados são mostrados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. A classificação da macrotextura, dentro de uma mesma via, variou entre duas categorias para os revestimentos em CA, enquanto que para aqueles em CPA a classificação se manteve similar em todos os pontos. Para esses últimos e para o CA_M2, a macrotextura foi classificada como média. Para o CA_M2, no entanto, alguns pontos tiveram sua macrotextura classificada como fechada. Já para o CA_M1, a classificação geral da macrotextura foi aberta, embora a maioria dos seus pontos tenha sido classificada como muito aberta.

Tabela 1 – Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia nos trechos estudados

Trecho/Revestimento	Diâmetro médio (mm)	MTD (mm)	DP (mm)	CV (%)	Classificação (DNIT, 2006)
CPA_M1 – Av. Santos Dumont	246,1	0,53	0,05	10,18	Média
CA_M1 – Av. Senador Carlos Jereissati	164,2	1,19	0,10	8,36	Aberta
CPA_M2 – Av. Senador Virgílio Távora	218,9	0,67	0,08	11,76	Média
CA_M2 – Av. 13 de Maio	258,6	0,49	0,09	17,70	Média

Oliveira, Arantes e Fontenele (2019) realizaram ensaios de mancha de areia em uma das vias estudadas (CPA_M2) cerca de oito meses após a execução desta. Os pontos ensaiados tiveram MTD médio de 1,00 mm (macrotextura aberta). Gurjão (2020) realizou ensaios em ambas as vias em CPA aqui estudadas, as idades de CPA_M1 e CPA_M2 à época da realização dos ensaios eram de aproximadamente 3 meses e 1,5 anos, respectivamente. No referido trabalho, os valores médios de MTD encontrados foram de 1,31 mm para CPA_M1 (muito aberta) e de 0,99 mm para CPA_M2 (aberta). Diante dos resultados da literatura e encontrados no presente trabalho, percebe-se que a macrotextura da CPA fechou ao longo do tempo, o que pode indicar que a utilização desse tipo de revestimento em meio urbano perde alguns de seus benefícios funcionais mais rapidamente do que em rodovias.

Tabela 2 – Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico nos trechos estudados

Trecho/Revestimento	VRD médio (BPN)	DP (BPN)	CV (%)	Classificação (DNIT, 2006)
CPA_M1 – Av. Santos Dumont	40,4	2,6	6,5	Lisa
CA_M1 – Av. Senador Carlos Jereissati	53,9	6,8	12,6	Medianamente rugosa
CPA_M2 – Av. Senador Virgílio Távora	32,8	3,1	9,4	Lisa
CA_M2 – Av. 13 de Maio	32,2	3,1	9,5	Lisa

Para o CPA_M1, a classificação da microtextura variou entre lisa e insuficientemente rugosa. Já para o CPA_M2, a microtextura variou entre lisa e muito lisa, que também foi o caso do CA_M2. Por fim, para o CA_M1, a microtextura variou principalmente entre as classificações medianamente rugosa e rugosa, tendo também um dos pontos classificados como microtextura insuficientemente rugosa. Novamente, a classificação geral da microtextura dos revestimentos em CPA coincidiu com a classificação do revestimento em CA_M2. A microtextura desses revestimentos foi classificada como lisa, enquanto que a do CA_M1 teve sua microtextura classificada como medianamente rugosa.

Não se teve acesso ao projeto das misturas asfálticas do tipo CA nem ao histórico de manutenção dos pavimentos onde foram empregadas. Acredita-se, no entanto, que no revestimento CA_M1 pode ter havido aumento da macrotextura devido ao desgaste na película de ligante asfáltico (Pomoni *et al.*, 2020). Segundo informações de servidores da Superintendência de Obras Públicas, não foram realizadas manutenções no revestimento CA_M1 pelo menos nos últimos 5 anos. Por outro lado, esse desgaste expõe os agregados ao polimento, o que tende a diminuir sua microtextura. No entanto, os valores encontrados para esse parâmetro em CA_M1 foram altos comparados aos demais revestimentos estudados. Uma possível explicação para isso seria a origem mineralógica dos agregados e sua granulometria.

Ainda com relação à com relação à microtextura, é possível que nas demais vias aqui estudadas, as ações mais frequentes de frenagem, aceleração e desaceleração e as conversões tenham contribuído para o polimento dos agregados e a conseqüente diminuição da microtextura em menos tempo. Em revestimentos do tipo CPA, especificamente, Costa, Castelo Branco e Freitas (2017) ressaltam que seu baixo teor de ligante asfáltico (os referidos autores avaliaram CPAs com teor de ligante entre 3,5% e 4,5%) pode acarretar no rápido desgaste superficial, com remoção da película de ligante asfáltico que envolve os agregados e, portanto, os expõe ao polimento.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) recomenda $0,6 \text{ mm} < \text{MTD} < 1,2 \text{ mm}$ e $\text{VRD} \geq 55$, o que foi atendido por apenas um dos revestimentos (CA_M1) considerados nesse estudo. Esse revestimento é referente a um trecho de uma rodovia estadual (CE-401) que passa pelo interior da cidade de Fortaleza (na Figura 1 é possível ver que essa via é mais periférica em relação às demais), cuja velocidade permitida é de 80 km/h, diferente dos demais trechos avaliados (60 km/h). Portanto, as características do tráfego dessa via (composição dos veículos, velocidade permitida, manobras realizadas) são diferentes daquelas das demais vias urbanas analisadas nesse estudo. É possível que essa seja a razão pela qual as micro e macrotexturas do revestimento dessa via são diferentes das demais vias analisadas.

4.3. Modelagem 3D da superfície

A partir dos modelos 3D obtidos pela técnica de CRP foram calculados alguns parâmetros de altura da ISO 25178-2 (2012): S_a (altura média aritmética), S_q (raiz quadrada média da altura), S_p (altura máxima do pico), S_v (profundidade máxima do vale), S_{sk} (assimetria da curva de distribuição das alturas) e S_{ku} (curtose - grau de achatamento do pico da curva de distribuições das alturas). Os parâmetros S_a , S_q , S_p e S_v são mostrados na Figura 5. Observa-se que os parâmetros S_a e S_q apresentam a mesma tendência para a diferença entre as vias, e que os respectivos CV (percentual dentro das barras) foram praticamente idênticos, o que é devido ao fato de ambos serem relacionados à distribuição das alturas de todos os pontos em relação à um plano médio.

A diferença entre esses parâmetros é que S_a é calculado a partir da soma dos valores absolutos das diferenças de dados em relação à média, em vez de seus quadrados, como é calculado o parâmetro S_q .

Na Figura 5 os revestimentos de textura positiva apresentam os maiores valores para o parâmetro S_p , que representa o pico de maior altura na superfície, com 2,6 mm e 1,10 mm para CA_M1 e CA_M2, respectivamente. Para os demais revestimentos, o valor de S_p foi maior para a CPA_M2 (0,98 mm), com 6 meses a mais de tempo de serviço em relação a CPA_M1, cujo valor de S_p foi 0,79 mm. Esses resultados revelam que os revestimentos em CA, de textura positiva, mantêm picos mais altos em comparação aos revestimentos de textura negativa. Por outro lado, o parâmetro S_v , que representa a profundidade do maior vale na área definida, em valor absoluto, foi maior para os revestimentos em CPA (1,81 mm para CPA_M1 e 1,48 mm para CPA_M2). Esse parâmetro assumiu os valores 1,63 e 1,01 mm para CA_M1 e CA_M2, respectivamente. Percebe-se que o parâmetro S_v foi capaz de retratar a textura negativa característica de revestimentos em CPA. No entanto, tanto esse parâmetro quanto S_p são relativos a um valor pontual da superfície, enquanto existem outros parâmetros que consideram a distribuição das alturas, como S_{sk} e S_{ku} , abordados adiante.

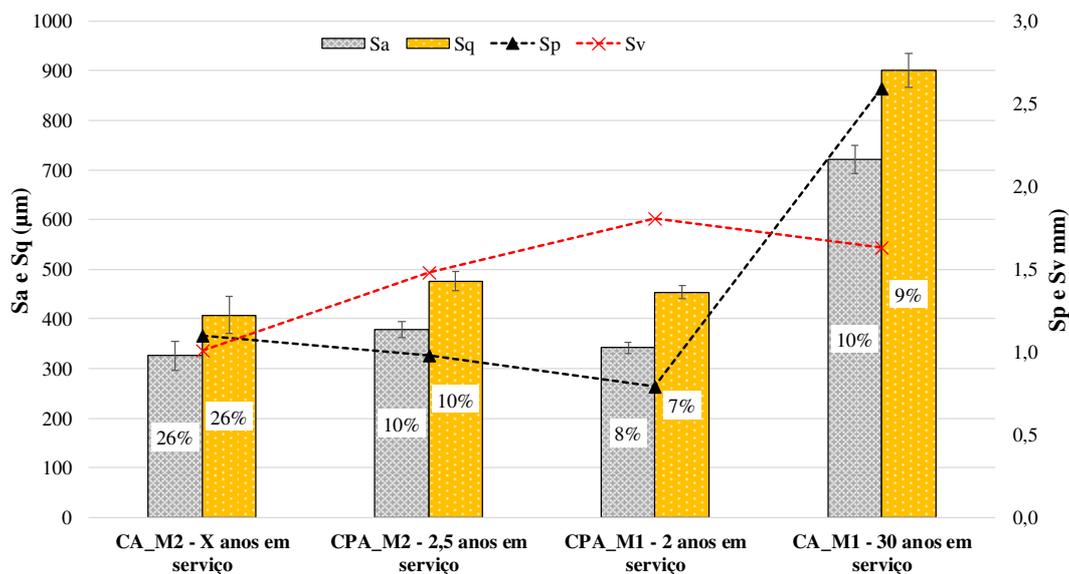


Figura 5. Parâmetros S_a , S_q , S_p e S_v obtidos com o uso do software Gwyddion

Os parâmetros relacionados à forma da curva de distribuição das alturas, S_{sk} e S_{ku} , são mostrados nas Tabelas 3 e 4. Percebe-se que a assimetria negativa ($S_{sk} < 0$) ocorreu para todos os pontos dos revestimentos em CPA, ao passo que o contrário ocorreu para os demais pontos (em CA). Esse resultado está de acordo com o conceito de textura negativa, característica de revestimentos em CPA.

O parâmetro S_{ku} revela que, em três (CPA_M2, CA_M1 e CA_M2) dos quatro revestimentos estudados, as alturas estão normalmente distribuídas, o que é sugerido pelos valores médios assumidos por S_{ku} , próximos a 3. Esse resultado sugere a coexistência de picos mais altos e/ou vales profundos com partes livres desses valores extremos. Por outro lado, a CPA_M1 apresentou um valor alto para esse parâmetro ($S_{ku} = 5,108$, em média), o que significa que há predominância de picos extremamente altos ou vales profundos.

Tabela 3 – Parâmetros S_{sk} e S_{ku} para os revestimentos em CPA

Revestimento							
CPA_M1				CPA_M2			
Ponto	Posição	S_{sk}	S_{ku}	Ponto	Posição	S_{sk}	S_{ku}
01	F. 2 / L.E.	-1,426	5,815	01	F.D. / L.D.	-0,336	2,670
02	F. 2 / L.E.	-1,337	5,481	02	F.D. / L.E.	-0,364	2,703
04	F. 1 / L.E.	-1,300	5,057	04	F.D. / L.E.	-0,595	3,315
05	F. 1 / L.D.	-1,420	5,523	05	F.D. / L.D.	-0,640	3,391
08	F. 1 / L.E.	-0,808	3,608	07	F.E. / L.D.	-0,658	3,619
09	F. 1 / L.D.	-1,261	5,162	09	F.E. / L.D.	-0,696	3,257
	Média	-1,258	5,108		Média	-0,548	3,159
	DP	0,230	0,783		DP	0,157	0,386
	CV (%)	-18,305	15,333		CV (%)	-28,690	12,229

Tabela 4 – Parâmetros S_{sk} e S_{ku} para os revestimentos em CA

Revestimento							
CA_M1				CA_M2			
Ponto	Posição	S_{sk}	S_{ku}	Ponto	Posição	S_{sk}	S_{ku}
-	-	-	-	01	F.D. / L.D.	0,589	3,210
-	-	-	-	02	F.D. / L.E.	0,087	2,765
02	F.D. / L.E.	0,727	2,784	03	F.D. / L.D.	0,060	2,582
03	F.D. / L.D.	0,985	3,390	04	F.D. / L.E.	0,083	2,858
04	F.D. / L.E.	0,953	3,360	05	F.D. / L.D.	0,091	2,824
05	F.D. / L.D.	0,969	3,325	06	F.D. / L.E.	0,048	3,032
07	F.E. / L.D.	0,713	2,981	07	F.E. / L.D.	0,077	2,887
08	F.E. / L.D.	0,688	2,917	08	F.E. / L.D.	0,250	2,864
	Média	0,839	3,126		Média	0,161	2,878
	DP	0,143	0,263		DP	0,184	0,184
	CV (%)	17,055	8,409		CV (%)	114,597	6,405

Foi verificada a correlação entre os resultados dos parâmetros obtidos pela modelagem 3D com aqueles obtidos com os ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico. De forma geral, percebeu-se que houve maiores correlações entre os parâmetros S_a , S_q e S_p da modelagem 3D e MTD (R^2 em torno de 0,9) em comparação às correlações entre esses parâmetros e o VRD obtido pelo pêndulo britânico, que apresentaram R^2 da ordem de 0,7. O parâmetro S_v , por sua vez, foi o parâmetro da modelagem 3D que apresentou menor correlação com os ensaios tradicionais, com R^2 de 0,11 e 0,20 para correlação com MTD e VRD, respectivamente.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foram avaliados os desempenhos acústico e de superfície de revestimentos em CPA utilizados em vias urbanas. Na avaliação acústica, para o par de vias com condições de entorno mais restritas, foram encontrados valores de L_{ref} de 74,71 dB (A) e 80,33 dB (A) para os revestimentos em CPA e CA, respectivamente. Para o par de vias com entorno adensado, os valores assumidos por L_{ref} para os revestimentos em CPA e CA foram 70,21 e 74,83 dB (A), respectivamente. Portanto, a avaliação do desempenho acústico dos revestimentos em CPA no meio urbano mostrou que esse tipo de revestimento promoveu redução de ruído ambiental de até 5,6 dB (A).

Levantou-se a hipótese de que as velocidades mais baixas (limite de 60 km/h) e as manobras nas vias em CPA e na CA_M2 contribuem para o polimento (prematuro, no caso da CPA) dos agregados do revestimento, o que diminui sua microtextura. Ao longo de 2,5 anos a macrotextura dos revestimentos em CPA, passou de aberta ($0,80 \leq MTD \leq 1,20$ mm) ou muito aberta

(MTD > 1,20 mm) para média ($0,40 \leq \text{MTD} \leq 0,80$ mm), o que indica que no meio urbano e em locais secos (pouca precipitação) a CPA está sendo colmatada. Também é possível que, devido ao maior tempo em serviço e consequente desgaste do ligante asfáltico do revestimento CA_M1, sua macrotextura tenha aumentado (POMONI *et al.*, 2020). Informações sobre os revestimentos, tais como idade, histórico de manutenções, granulometria ou mineralogia dos agregados poderiam auxiliar na explicação do comportamento das micro e da macrotexturas encontrados em campo. No entanto, estas não estavam disponíveis.

A utilização da modelagem 3D por meio da técnica de CRP e da utilização de *softwares* permitiu a retratação da textura negativa dos revestimentos em CPA, por meio de alguns parâmetros da ISO 25178-2 (2012) (S_v , S_{sk} e S_{ku}). Os resultados também mostraram que outros parâmetros da referida norma (S_a , S_q e S_p) correlacionam-se bem com os ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico (R^2 em torno de 0,9 e 0,7, respectivamente), mas a avaliação de uma maior gama de texturas é necessária para melhor compreensão da relação entre esses métodos.

Para trabalhos futuros, destaca-se que a consideração de diferentes tipos de revestimentos e macrotexturas, sobretudo em entornos semelhantes aos aqui estudados, seria uma importante contribuição para a compreensão do impacto do tipo de revestimento na geração do ruído pneu-pavimento nos meios urbanos. Além disso, recomenda-se a realização de avaliações do impacto do tipo de revestimento no ruído global da via.

Recomenda-se fortemente o monitoramento, desde a execução, de revestimentos do tipo CPA em vias urbanas, sob aspectos funcionais como ruído, textura e drenabilidade. Quanto aos parâmetros de superfície, recomenda-se a realização de uma amostragem maior, que contemple uma extensão maior da via e que permita a avaliação dos dados quanto ao atendimento de premissas necessárias à realização de testes estatísticos. A obtenção de outros parâmetros da ISO 25178-2 (2012) (V_{mp} , V_{mc} , dentre outros), por meio de *softwares* que os calculem, também é encorajada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsas de produtividade e de mestrado, fundamentais ao desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alves, A. (2019) *Comportamento Mecânico, Funcional e Ambiental de Misturas Asfálticas Porosas*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- ASTM E303-93 (2018) *Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E965-15 (2019) *Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ABNT NBR 10151 (2000) *Acústica - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas, Visando o Conforto da Comunidade - Procedimento*. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- AFNOR NF S31-119-2 (2000) *Acoustique – Caractérisation in Situ des Qualités Acoustiques des Revêtements de Chaussées – Mesurages Acoustiques au Passage – Partie 2: Procédure Véhicule Maîtrisé*. Paris: Association Française De Normalisation.
- Ceratti, J.A.P.; L.B. Bernucci e J.B. Soares (2015) *Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação* (1ª ed.). Rio de Janeiro: ABEDA.
- Costa, S.L.; V.T.F. Castelo Branco e E. F. Freitas (2017) 'Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento para Diferentes Tipos de Pavimentos Utilizando o International Friction Index (IFI)'. In *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Recife, PE)*. Rio de Janeiro: ANPET, p. 1205-1216.
- DNIT (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos* (2ª Ed.). Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- EBoDE (Environmental Burden of Disease in Europe) (2010) *Ranking of Environmental Stressors by Health Impact in Europe (EBoDE pilot)*. Disponível em: <<http://en.opasnet.org/w/Ebode>> (Acesso em 22/12/2021).
- FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories) (2006) *FEHRL Report 2006/02: Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces*. Bruxelas, Bélgica: Transportation Research Laboratory.

- Flintsch, G.W.; K.K. McGhee; E.L. Izeppi e S. Najafi (2012) *The Little Book of Tire Pavement Friction* (Version 1.0). Blacksburg, VA: Virginia Tech Transportation Institute. Disponível em: <https://secure.hosting.vt.edu/www.apps.vtti.vt.edu/1-pagers/CSTI_Flintsch/The%20Little%20Book%20of%20Tire%20Pavement%20Friction.pdf> (Acesso em 22/12/2021).
- Gibbs, D.; R. Iwasaki; R. Bernhard; J. Bledsoe; D. Carlson; C. Corbisier; K. Fults; T. Hearne Jr; K. McMullen; D. Newcomb; J. Roberts; J. Rochat; L. Scofield e M. Swanlund (2005) *Report number FHWA-PL-05-011: Quiet Pavement Systems in Europe*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.
- Gurjão, N.O. (2020) *Análise do Desempenho da Camada Porosa de Atrito por Meio dos Ensaios da Mancha de Areia e Permeabilidade*. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil, Centro Universitário Christus. Fortaleza, CE.
- Hanson, D.I. e R. S. James (2004) *Report No. CDOT-DTD-R-2004-5: Colorado DOT Tire/Pavement Noise Study*. Denver, CO: Colorado Department of Transportation.
- ISO 25178-2 (2012) *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface Texture: Areal - Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*. Genebra: International Organization for Standardization.
- Knabben, R.M. (2012) *Estudo do Ruído Pneu Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimentos de Pavimento*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.
- Knabben, R.M.; G. Trichês; E.F. Vergara; S.N.Y. Gerges e W. van Keulen (2019) 'Characterization of Tire-Road Noise from Brazilian Roads Using the CPX Trailer Method'. *Applied Acoustics*, v. 151, p. 206–214. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.03.013.
- Kogbara, R.B.; E.A. Masad; E. Kassem; A. Scarpas e K. Anupam (2016) 'A State-of-the-Art Review of Parameters Influencing Measurement and Modeling of Skid Resistance of Asphalt Pavements'. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 602–617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.
- Kogbara, R.B.; E.A. Masad; K. Anupam e A. Scarpas (2018) 'Griptester measurements and texture-friction relationship' in Masad, E.; A. Bhasin; T. Scarpas; I. Menapace e A. Kumar (eds.) *Advances in Materials and Pavement Performance Prediction - Proceedings of the International AM3P Conference*. London: CRC Press / Balkema - Taylor & Francis Group, p. 287-291. DOI: 10.1201/9780429457791.
- Maia, R.S. (2020) *Contributions to the Tire-Pavement Friction Characterization from the Traffic Safety Perspective*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- McQuaid, G.; P. Millar e D. Woodward (2015) 'Use of 3D Modeling to Assess Pothole Growth' in Nikolaides, A.F. (ed.) *Bituminous Mixtures and Pavements VI: Proceedings of the 6th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*. 1st ed. London: Taylor & Francis Group, p. 161–166. DOI: 10.1201/B18538-26.
- Medeiros, M.S.; B.S. Underwood; C. Castorena; T. Rupnow e M. Rawls (2016) '3D Measurement of Pavement Macrotecture Using Digital Stereoscopic Vision'. In *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*. Washington, DC.
- Oliveira, F.H.L.; A.E. Arantes e P.S. Fontenele (2019) Análise da Macrotectura de Camada Porosa de Atrito em Serviço por Processamento Digital de Imagens. In *Anais do XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Balneário Camboriú, SC)*. Rio de Janeiro: ANPET, p. 1363-1372.
- PIARC (1987) Technical Committee Report on Surface Characteristics. In *Permanent International Association of Road Congress (PIARC) XVIII World Road Congress*. Bruxelas, Bélgica: World Road Association.
- PIARC (World Road Association) (2013) *Report of the Technical Committee D.2 – Road Pavements: Quiet Pavement Technologies*. Disponível em: <<https://www.piarc.org/ressources/publications/7/19692,2013R10-EN.pdf>>. (Acesso em 22/12/2021).
- Pomoni, M.; C. Plati; A. Loizos e G. Yannis (2020) 'Investigation of Pavement Skid Resistance and Macrotecture on a Long-Term Basis'. *International Journal of Pavement Engineering*, p. 1-10. DOI: 10.1080/10298436.2020.1788029.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (PMF) (2018) *Prefeitura de Fortaleza realiza obras de recapeamento asfáltico na Av. Senador Virgílio Távora* <<https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-de-fortaleza-realiza-obras-de-recapeamento-asfaltico-na-av-senador-virgilio-tavora>> (Acesso em 22/12/2021).
- Sandberg, U. (1987) 'Road traffic noise-The influence of the road surface and its characterization'. *Applied Acoustics*, v. 21, n. 2, p. 97–118.
- Specht, L.P.; S.C. Callai; O.A. Khatchaturian e R. Kohler (2009) 'Avaliação do Ruído através do SPBI (Statistical Pass-By Index) em Diferentes Pavimentos'. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 62, n. 4, p. 439–445. DOI: 10.1590/S0370-44672009000400005.
- Strufaldi, E.G.B.; L.L.B. Bernucci; M. Aps; F. Vittorino e D. R. Souza (2010) Traffic Noise Reduction Using Porous Asphalt Course as an Overlay of a Portland Cement Concrete Pavement in Sao Paulo, Brazil. In *Proceedings of 39th International Congress on Noise Control Engineering, INTER-NOISE 2010*. Lisboa.
- Vianna, K.M.P. (2014) *Poluição Sonora no Município de São Paulo: Avaliação do Ruído e o Impacto da Exposição na Saúde da População*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- Woodward, D.; P. Millar e G. Mcquaid (2014) 'Use of 3D Modelling Techniques to Better Understand Road Surface Textures'. In *4th International Safer Roads Conference*, Cheltenham, UK.
- WHO (2018) *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. Copenhagen, Denmark: World Health Organization Regional Office for Europe. Disponível em: <<https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>> (Acesso em 22/12/2021).