



CARACTERIZAÇÃO DA MACROTEXTURA DE PAVIMENTOS ATRAVÉS DO MEAN PROFILE DEPTH UTILIZANDO MODELAGEM 3D DA SUPERFÍCIE

José Roberto Pereira dos Santos ¹

Larissa Virgínia da Silva Ribas ¹

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco ¹

¹ Universidade Federal do Ceará

Resumo: A caracterização da macrotextura dos pavimentos é crucial para a avaliação do desempenho viário, influenciando aspectos como segurança, eficiência viária, resistência à derrapagem, consumo de combustível, geração de ruído e desgaste dos pneus. Este estudo investiga a aplicação de técnicas de fotogrametria de curta distância (CRP) em combinação com modelagem 3D para a análise da macrotextura em Corpos de Prova (CPs) fabricados em laboratório. A macrotextura foi avaliada com base no parâmetro Mean Profile Depth (MPD), e os valores de MPD obtidos com a modelagem 3D foram comparados com os valores obtidos pelo equipamento Aggregate Image Measurement System (AIMS). Três tipos de materiais foram analisados: concreto poroso, concreto asfáltico e mistura asfáltica tipo SMA. A análise revelou uma forte correlação entre os valores de MPD obtidos pelos dois métodos, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,983. Isso sugere que a modelagem 3D é uma alternativa viável, eficaz e de baixo custo para a caracterização da macrotextura de pavimentos.

Palavras-chave: Macrotextura, Mean profile depth, Modelagem 3D, Fotogrametria de curta distância.

Abstract: Characterizing pavement macrotexture is crucial for assessing road performance, influencing aspects such as safety, road efficiency, skid resistance, fuel consumption, noise generation, and tire wear. This study investigates the application of close-range photogrammetry (CRP) techniques combined with 3D modeling for analyzing macrotexture in laboratory-fabricated test specimens. The macrotexture was assessed based on the Mean Profile Depth (MPD) parameter, and the MPD values obtained with 3D modeling were compared with those obtained using the Aggregate Image Measurement System (AIMS). Three types of materials were analyzed: porous concrete, asphalt concrete, and SMA asphalt mixture. The analysis revealed a strong correlation between the MPD values obtained by the two methods, with a coefficient of determination (R^2) of 0.983. This suggests that 3D modeling is a viable, effective, and cost-efficient alternative for characterizing pavement macrotexture.

keywords: Macrotexture, Mean profile depth, 3D modeling, Close-range photogrammetry.

1. INTRODUÇÃO

A interação entre o pneu e o pavimento é um fator crucial para avaliar o desempenho das rodovias. As condições da superfície asfáltica afetam diretamente aspectos como segurança, eficiência viária, resistência à derrapagem, consumo de combustível, geração de ruído e desgaste dos pneus (KUCHIISHI *et al.*, 2014). Uma abordagem para estudar a superfície de pavimentos envolve a caracterização de sua macrotextura, que se refere à proeminência das características na superfície do pavimento e à disposição dos grãos de agregados. Essa propriedade torna-se especialmente relevante em velocidades mais altas, acima de 40 km/h (KOVÁČ; KOTEK; DECKÝ, 2015).

De acordo com a classificação proposta por Wambold *et al.* (1995), a macrotextura é definida como a desvio da superfície do pavimento de uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características variando de 0,5 mm a 50 mm. As amplitudes de pico a pico podem variar, normalmente, no intervalo de 0,01 mm a 20 mm, conforme esquematizado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema da macrotextura de superfície asfáltica



Fonte: adaptado de Kováč e Kotek (2014)

A maneira mais difundida de medição da macrotextura é através do ensaio de mancha de areia, normalizado pela ASTM E965-15 (2019) e, no Brasil, pela ABNT NBR 16504 (2016). Esse método mede a profundidade da macrotextura ao espalhar uma quantidade conhecida de areia sobre a superfície do pavimento e medir a área que a areia cobre. Este procedimento fornece uma estimativa direta da profundidade média da macrotextura e é amplamente utilizado devido à sua rápida execução, baixo custo e emprego de equipamentos simples (VIEIRA *et al.*, 2013). Porém, trata-se de uma análise pontual da macrotextura, que não considera variações ao longo de grandes áreas, e altamente dependente da habilidade do operador, o que pode levar a variações nos resultados.

Com os avanços nas técnicas de medição sem contato, é possível substituir as medições de mancha volumétrica por registros de perfis. Um perfil da superfície é uma representação bidimensional obtida por um sensor, como uma agulha ou um laser, que toca ou escaneia continuamente a superfície do pavimento enquanto se move ao longo dela (FREITAS; PEREIRA, 2008). Métodos não destrutivos, como os que usam perfilômetros a laser, são preferidos por preservar a integridade da amostra. Esses perfilômetros têm ganhado popularidade nos últimos anos, principalmente por suas vantagens de portabilidade, rapidez e capacidade de fornecer dados contínuos, além de não exigir a interrupção do tráfego para pavimentos em serviço (POMONI; PLATI; LOIZOS, 2017). No entanto, eles também apresentam algumas desvantagens, como o alto custo dos equipamentos, a necessidade de operadores especializados e a complexidade no processamento dos dados obtidos.



Apesar desses avanços, avaliar a macrotextura de Corpos de Prova (CPs) extraídos de pavimentos ainda é pouco usual e apresenta desafios referente às técnicas empregadas. Em laboratório, o *Aggregate Measurement Image System* (AIMS) é um equipamento que pode realizar a análise da macrotextura de CPs medindo as distâncias entre a câmera e uma amostra de no máximo 30 mm de altura. Araújo, Bessa e Castelo Branco (2014) mostraram que com o AIMS é possível detectar variações nos resultados das análises de macrotextura quando há mudanças na granulometria da mistura asfáltica. No entanto, a análise da macrotextura de misturas asfálticas no AIMS possui limitações, como a leitura restrita a um único perfil, a necessidade de uma geometria específica para a amostra, além de o tempo de execução aumentar consideravelmente conforme a resolução empregada.

A fotogrametria de curta distância (CRP, do inglês *close range photogrammetry*) é uma técnica que utiliza imagens de alta resolução para criar modelos tridimensionais. Na Engenharia Civil, a CRP pode ser eficaz para analisar a macrotextura de pavimentos, permitindo uma visualização detalhada sem contato físico. Além disso, a técnica CRP pode ser usada para gerar perfis de profundidade a partir do modelo 3D criado (MAIA *et al.*, 2024). A CRP oferece vantagens como rapidez na coleta de dados, uso de equipamentos de baixo custo, como câmeras ou até *smartphones*, e menor dependência da habilidade do operador. Com o perfil de profundidade, a macrotextura pode ser avaliada através do parâmetro MPD (do inglês, *mean profile depth*) regulamentado pela norma ASTM E1845-15 (KOVÁČ; KOTEK; DECKÝ, 2015).

Nesse contexto, este estudo tem por objetivo avaliar a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens para análise da macrotextura de pavimentos, utilizando o parâmetro MPD. Para isso, foram empregadas técnicas de CRP, modelagem 3D e desenvolvido um algoritmo em Python para determinar o MPD de perfis com variação angular de 1° em CPs de superfície circular. Foram utilizados CPs com diferentes materiais e níveis de macrotextura, quais sejam: concreto poroso, concreto asfáltico denso e mistura asfáltica de granulometria descontínua. Adicionalmente, o MPD foi obtido com o uso do AIMS, a fim de verificar a consistência e a viabilidade da metodologia proposta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Cálculo do *Mean Profile Depth* (MPD)

De acordo com a norma ASTM E1845 (2015), o MPD é calculado através da média dos valores de *mean segment depth* (MSD) obtidos para cada perfil de profundidade (PD, do inglês *profile depth*) da superfície. Com base na Figura 2, cada MSD é obtido pela seguinte equação:

$$MSD = \frac{P1 + P2}{2} \quad (1)$$

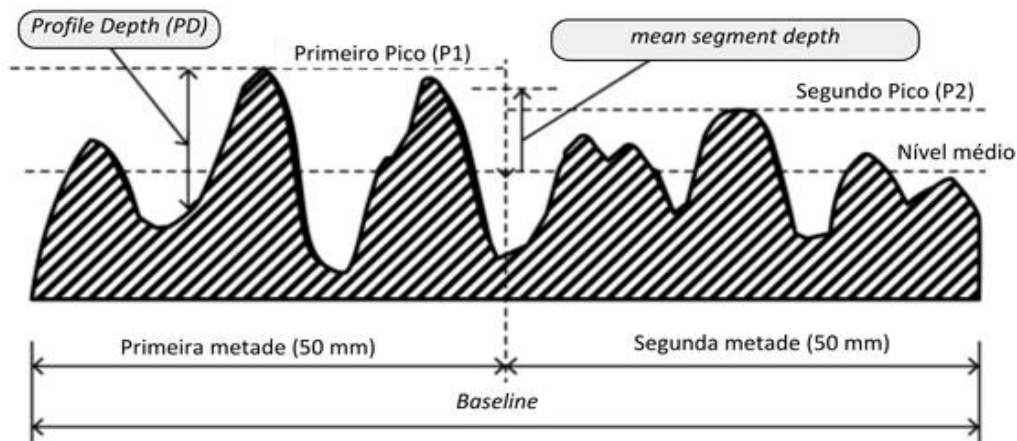
Onde, P1 é o pico de altura da primeira metade do perfil e P2 é o pico de altura da segunda metade.

Assim, o MPD é calculado de acordo com a equação 2:

$$MPD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MSD_i \quad (2)$$

Onde, MPD é expresso em milímetros.

Figura 2 - Cálculo do mean segment depth (MSD)



Fonte: adaptado de ASTM E1845-15

2.2. Materiais - Corpos de Prova (CPs)

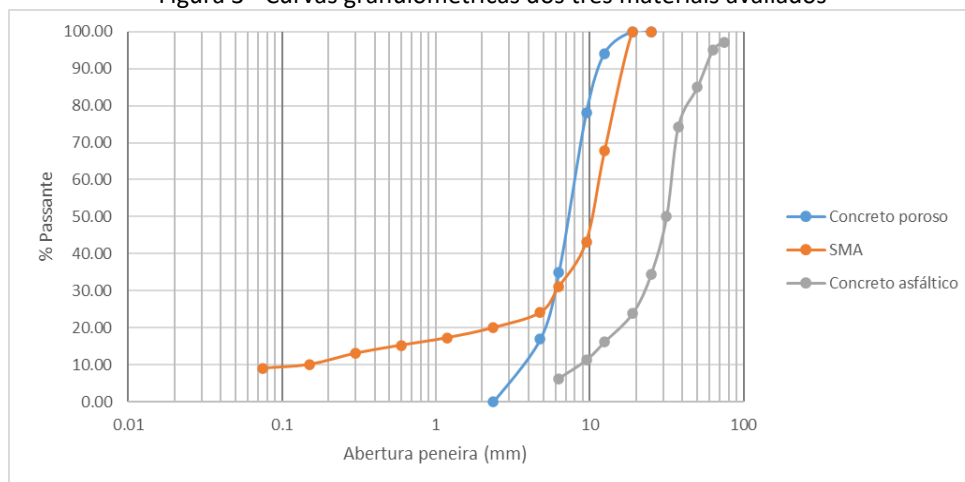
Para obtenção do MPD, três tipos de materiais foram analisados: Concreto Poroso (CPR), Concreto Asfáltico (CA) e mistura asfáltica tipo SMA (do inglês, *stone matrix asphalt*). As análises foram realizadas em CPs cilíndricos, fabricados em laboratório, com 100 mm de diâmetro, utilizando-se duas amostras para cada tipo de material.

As duas amostras de CPR foram produzidas de acordo com os requisitos de permeabilidade e de resistência mecânica propostos pela NBR 16416:2015. A proporção de água, cimento e brita utilizada foi de 1:3,33:7,64 conforme descrito por Lima, Ribas e Branco (2023). As amostras de mistura asfáltica do tipo SMA possuem composição de: 43,1% de brita $\frac{3}{4}$ ", 23,9% de brita $\frac{3}{8}$ " e 33,0% de pó de pedra.

As amostras de CA foram dosadas pela metodologia Marshall (DNIT 031/2006 – ES) com teor de ligante (Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP) de 4,5%. Os CPs utilizados se enquadram na faixa "B" e possuem composição de: 27,0% de brita 1", 33,0% de brita $\frac{1}{2}$ " e 40,0% de pó de pedra.

A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas dos três materiais avaliados.

Figura 3 - Curvas granulométricas dos três materiais avaliados

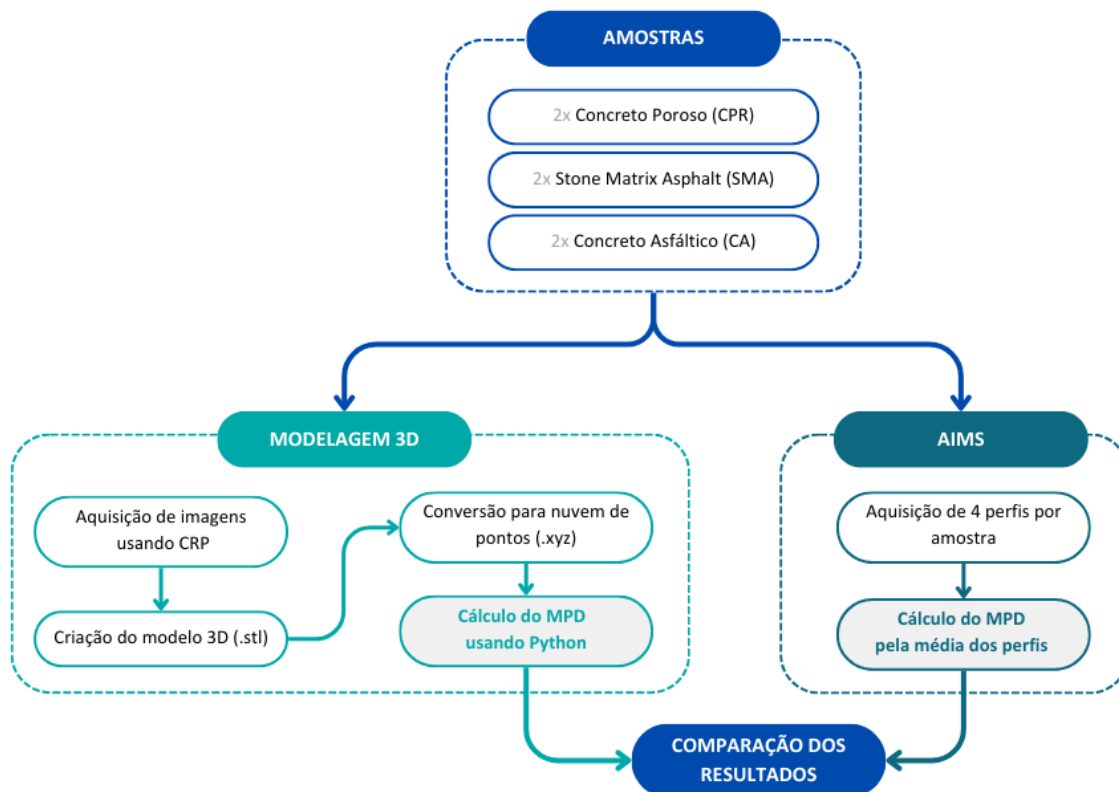


Fonte: elaborada pelo autor

2.3. Etapas metodológicas

A Figura 4 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas adotadas no presente estudo.

Figura 4 - Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: elaborada pelo autor

Na etapa de modelagem 3D das superfícies, foram capturadas pelo menos 20 imagens para cada amostra utilizando a técnica de fotogrametria de curto alcance (CRP) e uma câmera de *smartphone* comum com resolução de 48 *megapixels*. As imagens foram obtidas a partir de diferentes ângulos para cobrir toda a superfície dos CPs, garantindo a captura dos detalhes necessários para a modelagem 3D com a precisão desejada.

As imagens coletadas foram processadas no *software* Recap Photo v25.0 para gerar modelos 3D no formato .stl. Posteriormente, esses modelos 3D foram convertidos em nuvens de pontos no formato .xyz utilizando o *software* MeshLab v2023.12, seguindo a metodologia descrita por Maia *et al.* (2024). A Figura 5 apresenta os três tipos de materiais utilizados, assim como seus respectivos modelos 3D.

Um conjunto de algoritmos em Python foi desenvolvido para calcular o MPD a partir das nuvens de pontos. Seguindo as diretrizes da norma ASTM E1845-15, esses algoritmos incorporam técnicas para eliminar inclinações dos modelos, garantindo que as medições representem as características reais das superfícies.

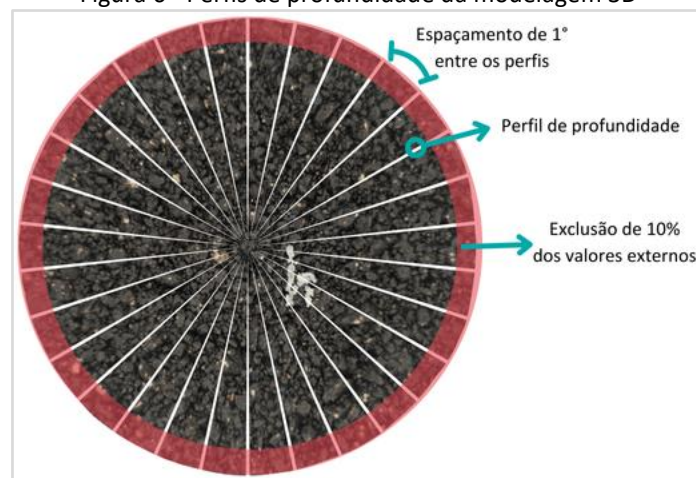
Figura 5 - Corpos de Prova dos diferentes materiais avaliados e seus respectivos modelos 3D



Fonte: elaborada pelo autor

O cálculo do MPD das amostras foi realizado com base nos perfis de profundidade medidos ao longo do diâmetro dos CPs, utilizando uma tolerância de 0,5 mm e um deslocamento angular de 1° entre os perfis. Para minimizar os efeitos de borda, 10% dos valores mais externos foram excluídos da análise, conforme ilustrado na Figura 6. No total, foram gerados 180 perfis para cada CP, a partir dos quais foi calculado o valor representativo de MPD para a superfície da amostra.

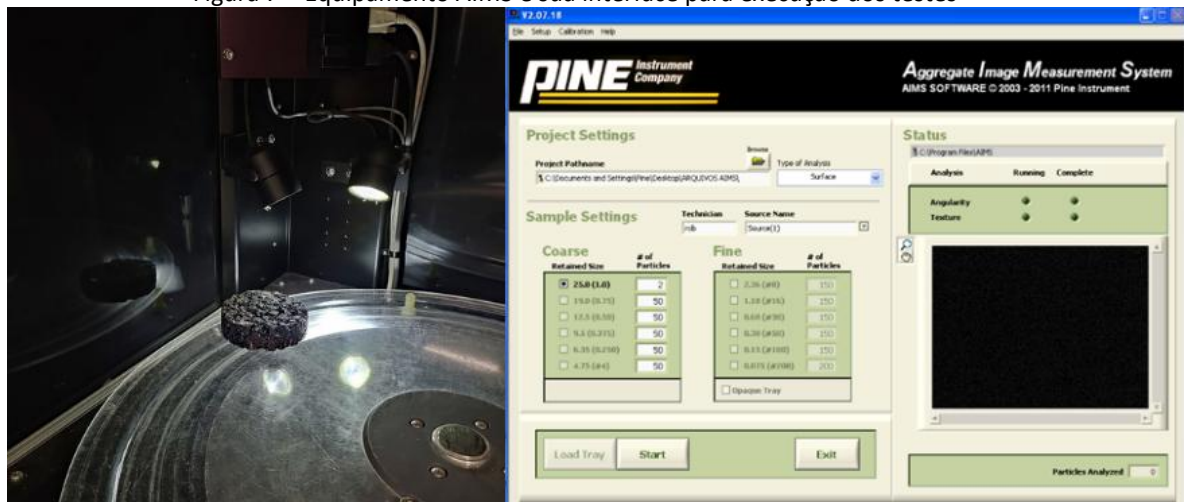
Figura 6 - Perfis de profundidade da modelagem 3D



Fonte: elaborada pelo autor

Paralelamente, os CPs foram avaliados utilizando o equipamento AIMS, que gerou perfis de profundidade com resolução de 0,6 mm. Conforme descrito por Rezaei, Hoyt e Martin (2011), o processo de aquisição de perfis do AIMS funciona da seguinte forma: o CP é posicionado à esquerda do microscópio e uma bandeja gira lentamente para capturar várias medidas de altura ao longo do eixo analisado. A altura inicial é determinada pelo primeiro foco do microscópio, conhecido como altura zero. Em seguida, o microscópio é elevado para capturar imagens de alta resolução em escala de cinza. As diferenças de altura entre a posição inicial e as imagens subsequentes geram um perfil de profundidade da superfície estudada. A figura 7 apresenta o equipamento AIMS adquirindo o perfil de profundidade de uma amostra SMA, juntamente com a interface do software utilizada para execução dos testes.

Figura 7 – Equipamento AIMS e sua interface para execução dos testes



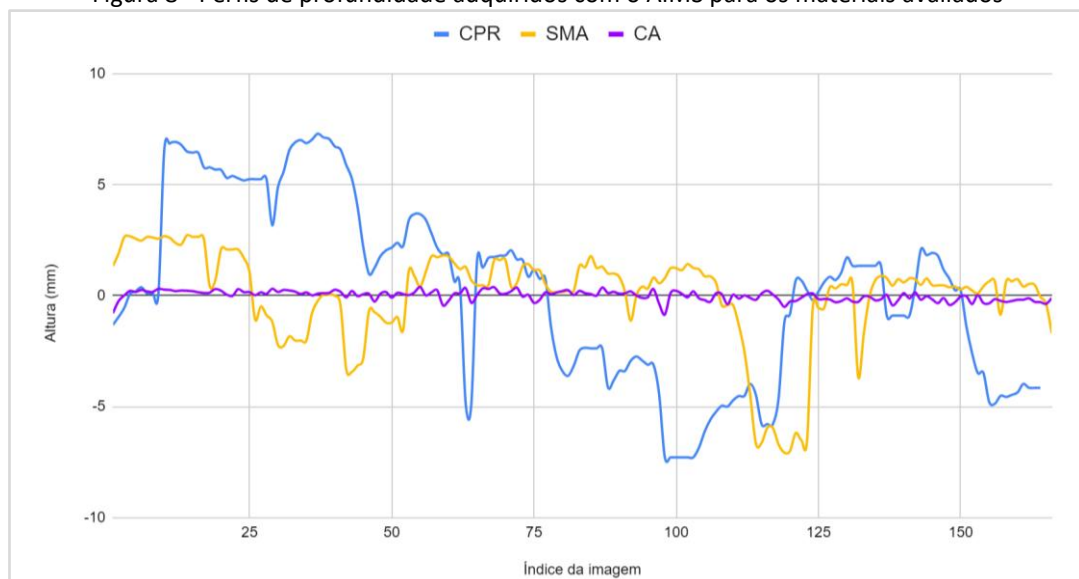
Fonte: elaborada pelo autor

Foram adquiridos quatro perfis por amostra, dispostos a 45° um do outro, conforme a metodologia aplicada por Araújo (2017). Novamente, a partir dos perfis foi calculado o valor de MPD representativo. Por fim, os valores de MTD obtidos pelos dois métodos, modelagem 3D e AIMS, foram comparados a fim de discutir, encontrar relações e validar os resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 8 apresenta uma comparação dos perfis de profundidade obtido com o AIMS para os 3 tipos de materiais. Conforme esperado pela análise visual das amostras, percebe-se que a amostra de CPR apresenta maior oscilação nos valores de altura indicando uma macrotextura superficial significativa. Em contraste, a amostra de CA apresenta a menor oscilação, sugerindo uma macrotextura mais uniforme e homogênea. A Tabela 1 apresenta os valores de MPD obtidos para os dois métodos utilizados: modelagem 3D e AIMS, e variação percentual entre eles.

Figura 8 - Perfis de profundidade adquiridos com o AIMS para os materiais avaliados



Fonte: elaborada pelo autor

Com exceção da amostra CA1, todos os valores de MPD obtidos com o AIMS são superiores aos valores obtidos por meio da modelagem 3D. Isso pode ser explicado pela natureza da coleta de dados: enquanto o AIMS foi utilizado para adquirir apenas quatro perfis para calcular o MPD, o que o torna mais suscetível a valores extremos, a modelagem 3D utilizou 180 perfis, cobrindo toda a superfície da amostra. Dessa forma, a média dos valores tende a ser mais homogênea, refletindo uma visão mais integrada da macrotextura.

É importante destacar que, com as configurações adotadas neste estudo, o AIMS leva aproximadamente 1 hora e 40 minutos para adquirir cada perfil de profundidade. Embora forneça medições de perfis de profundidade com maior precisão em comparação à modelagem 3D, esse tempo prolongado torna inviável a aquisição de um grande número de perfis, como foi possível com a modelagem 3D. Dessa forma, apesar de sua precisão, o AIMS apresenta limitações significativas em termos de eficiência, especialmente quando é necessário analisar várias amostras em um curto período.

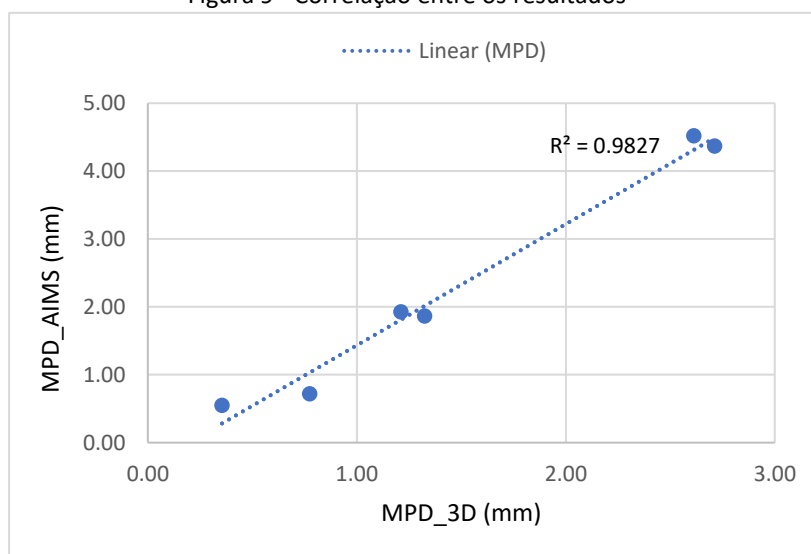
Tabela 1 - Valores de MPD calculados

CP	MPD_3D (mm)	MPD_AIMS (mm)	Varição (%)
CPR1	2,713	4,370	+37,91
CPR2	2,613	4,520	+42,20
SMA1	1,325	1,863	+28,87
SMA2	1,212	1,926	+37,05
CA1	0,775	0,720	-7,64
CA2	0,355	0,547	+35,14

Fonte: elaborada pelo autor

A maior variação entre os valores de MPD obtidos pelos dois métodos foi observada na amostra CPR2, com 42,20%. Apesar disso, o coeficiente de determinação (R^2) calculado com base nos dados da Tabela 1, apresentou um valor de 0,983, indicando uma forte correlação entre os métodos. Isso sugere que, mesmo com variações individuais, os resultados são consistentes no geral. No entanto, o número limitado de amostras pode comprometer a robustez dessa correlação. A Figura 9 ilustra essa correlação visualmente.

Figura 9 - Correlação entre os resultados



Fonte: elaborada pelo autor

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que a modelagem 3D é uma ferramenta eficaz para caracterizar a macrotextura de pavimentos, oferecendo uma visão abrangente e detalhada, especialmente em amostras com superfícies mais irregulares, como o concreto poroso (CPR).

A maior variação observada entre os métodos ocorreu na amostra CPR2 (com 42,2%), porém a forte correlação ($R^2 = 0,983$) entre os dois sugere que, apesar das diferenças, os métodos fornecem resultados consistentes. No entanto, a limitação no número de amostras e a diferença nos métodos de aquisição de dados indicam a necessidade de estudos futuros com um número maior de perfis e amostras, a fim de validar as conclusões de forma mais robusta.

A análise de tempo e eficiência entre os métodos destaca a vantagem da modelagem 3D em termos de cobertura e precisão, especialmente em estudos que exigem a coleta de uma grande quantidade de dados. Entre outros fins, a metodologia apresentada pode ser utilizada para estudo da macrotextura de pavimentos funcionalizados, assim como para analisar o comportamento da macrotextura sob diferentes condições de tráfego e clima.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FUNCAP - Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico apoio financeiro concedido para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, V. M. C. **Avaliação da textura de misturas asfálticas para uso em revestimentos aeroportuários a partir do uso do processamento digital de imagens**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/28428>. Acesso em: 31 ago. 2024.

ARAÚJO, Victor Mosca de Carvalho; BESSA, Iuri Sidney; CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco. Avaliação da textura de misturas asfálticas para uso em revestimentos aeroportuários a partir do uso do processamento digital de imagens. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E1845-15**: Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E965-15**: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. 2019.

FREITAS, Elisabete; PEREIRA, Paulo. Análise da qualidade funcional e do impacto ambiental de uma estrada urbana. In: 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia e 2º Congresso de Engenharia de Moçambique, Maputo, 2008. **Artigo** REF: 26A002.

KOVÁČ, Matúš; KOTEK, Peter. The usability of different skid resistance characteristics in road assessment. **Civil And Environmental Engineering**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 80-87, 1 dez. 2014.



KOVÁČ, Matúš; KOTEK, Peter; DECKÝ, Martin; Conventional and non-conventional equipment for pavement surface macrotexture measuring. **Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava**, Civil Engineering Series, v. 15, n. 1, p. 17-22, 2015.

KUCHIISHI, André Kazuo *et al.* Estudo da macrotextura do pavimento a partir de ensaios de mancha de areia e drenabilidade em conjunto com análise da superfície por estereoscopia. In: XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2014, Curitiba, **Anais**. Curitiba.

LIMA, Karina; RIBAS, Larissa Virgínia da Silva; BRANCO, Veronica Teixeira Franco Castelo. Análise do comportamento térmico de pavimentos de concreto poroso com diferentes níveis de colmatção. In: 20º Rio de Transportes, 2023, Rio de Janeiro, **Anais**, Rio de Janeiro.

MAIA, Renan Santos; HAJJ, Ramez M.; CUNTO, Flávio José Craveiro; CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco. Safety-oriented urban pavement design and evaluation: integrating microscopic simulation and tyre-pavement friction. **International Journal of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 25, n. 1, 3 maio 2024.

POMONI, Maria; PLATI, Christina; LOIZOS, Andreas. How can sustainable materials in road construction contribute to vehicles' braking? **Vehicles**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 55-74, 17 jan. 2020.

REZAEI, A.; HOYT, D.; MARTIN, A. E. Simple Laboratory Method for Measuring Pavement Macrotexture. **Transportation Research Record**, p. 146-152, 2011.

VIEIRA, Tiago *et al.* Avaliação da macrotextura média de superfícies de pavimentos: comparação entre as técnicas com drenômetro e com mancha de areia. In: XXVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2013.

WAMBOLD, J. C. *et al.* International experiment to compare and harmonize skid resistance and texture measurements. **PIARC report**, 1995.