



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**CARLA MARÍLIA CAVALCANTE ALECRIM**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE CAMADA POROSA DE ATRITO EM VIAS DO  
MEIO URBANO**

**FORTALEZA**

**2021**

CARLA MARÍLIA CAVALCANTE ALECRIM

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE CAMADA POROSA DE ATRITO EM VIAS DO  
MEIO URBANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco. Ph.D.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A342a Alecrim, Carla Marília Cavalcante.  
Avaliação da utilização de camada porosa de atrito em vias do meio urbano / Carla Marília Cavalcante Alecrim. – 2021.  
185 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.
1. Camada Porosa de Atrito. 2. Vias urbanas. 3. Mistura reciclada. 4. Análise estrutural. 5. Ruído pneu-pavimento. I. Título.

CDD 388

---

CARLA MARÍLIA CAVALCANTE ALECRIM

AValiação da Utilização de Camada Porosa de Atrito em Vias do  
Meio Urbano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 24/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC-PETTRAN)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Lucimar da Silva Santiago  
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

---

Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht  
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus queridos pais,  
Carlos e Lucileuda, à minha irmã Bianca,  
e a toda a minha família, que me apoia  
e acredita em mim.

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todos aqueles que acompanharam essa minha jornada, em especial à minha família e aos amigos, que sempre me deram forças e me fizeram acreditar no meu potencial para concluir essa etapa tão grandiosa na minha vida. Por todas as palavras de encorajamento, pelo ombro amigo nos momentos mais difíceis, e pela disponibilidade para ajudar em todos os momentos que os procurei.

Agradeço de coração à minha orientadora, que não só me acompanhou no desenvolvimento desse e de outros trabalhos, como também me ofereceu outras oportunidades profissionais. À senhora, minha gratidão também por sempre ter possibilitado desenvolver trabalhos “com a minha cara”, que atendessem aos meus anseios enquanto pesquisadora.

Aos membros da banca, professores Heber e Luciano, e professora Lucimar, por terem aceitado participar da defesa e por disponibilizarem seus tempos à contribuição com esse trabalho. Estendo esse agradecimento aos membros da banca de qualificação, professoras Kamilla Vasconcelos e Sandra Soares, pelas contribuições com o trabalho.

À Insttale Engenharia, pela disponibilização de insumos, do espaço do laboratório e de todo o apoio, essenciais à realização desse trabalho. Minha gratidão, em especial, ao Victor Mosca e ao Geânio, que me deram as boas-vindas na empresa e me ajudaram durante todo o processo. Aos amigos que ajudaram nos ensaios acústicos em horários tão “insalubres”: Bianca, Cassiano, Davi, Gledson e Nara. Ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), pela estrutura e equipamentos disponibilizados para a realização desse trabalho. Ao Rômulo, pela ajuda na condução dos ensaios de campo e laboratório, e à Juceline, por ter disponibilizado o espaço do laboratório e os equipamentos que necessitei. À equipe da AMC (André Bacecos, Taumaturgo e guardas de trânsito), que forneceu todo apoio para a condução dos ensaios de campo em segurança.

Obrigada a todos os amigos que fiz na graduação e que permanecem na minha vida: Geovanny, Gledson, Marina, Renan e Wendy. Obrigada aos amigos do Gttema, por terem me dado as boas vindas e me feito me sentir parte de um ambiente acolhedor, em especial ao Davi e ao Cassiano, hoje grandes amigos. Ao João e ao professor Moraes, pelas ajudas em estatística. Aos amigos de Coworking: Davi, Julie, Talyson e Vanessa. Obrigada à Sara, por ter sido meu maior ponto de apoio durante um ano de pandemia que passei desenvolvendo esse trabalho. Estendo esse agradecimento ao Renan, com suas ajudas técnicas e emocionais durante esse período. Ao meu psicólogo Paulo Henrique, pela caminhada juntos durante esse processo.

A todos aqueles que fazem parte do Departamento de Engenharia de Transportes (DET). Ao CNPq, pela bolsa de mestrado fornecida. Ao meu país, pelo ensino público gratuito e de qualidade.

*“Sou como a haste fina:  
qualquer brisa verga,  
nenhuma espada corta.”*

(Maria Bethânia)



## RESUMO

A sustentabilidade na pavimentação tem ganhado importância, dentre outras razões, devido à necessidade de redução dos impactos ambientais, tais como: esgotamento de recursos naturais, geração de resíduos, poluição atmosférica, poluição sonora, impermeabilização da superfície, criação das ilhas de calor, dentre outros. Nesse contexto, existem inúmeras soluções de pavimentação que oferecem melhor adequação aos requisitos de sustentabilidade, dentre elas a reciclagem de misturas asfálticas, a funcionalização do pavimento, e a utilização de revestimentos porosos. Dentre esses últimos, está o revestimento do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA), que é utilizado, principalmente, em rodovias ou em pistas de pouso e decolagem, e cuja principal função é proporcionar melhorias funcionais ao pavimento. O objetivo do presente trabalho é avaliar a utilização de CPA em vias do meio urbano, nas quais não são comumente empregadas. Para isso, o atendimento às propriedades mecânicas requeridas no Brasil para CPA foi verificado em laboratório, para misturas virgens e recicladas; foi realizada uma análise estrutural do pavimento contendo esse tipo de revestimento, por meio do uso de um *software* de análise estrutural (AEMC-MeDiNa); e, por fim, foi feita análise de desempenho da mesma em campo com relação às propriedades acústicas (por meio do método da passagem controlada), de superfície (por meio dos ensaios de mancha de areia, pêndulo britânico e modelagem 3D da superfície do revestimento) e de drenabilidade. Os resultados sugerem que a incorporação de 15% de fresado em CPA não prejudicou o comportamento da mistura asfáltica se comparado a misturas de referência (virgens), embora ambos os casos tenham apresentado valores de Resistência à Tração (RT) da ordem de 0,47 MPa, que é inferior ao valor mínimo (0,55 MPa) exigido na norma brasileira. A análise estrutural mostrou que a presença da CPA no topo do revestimento diminuiu as deformações de tração na fibra inferior da camada asfáltica subjacente e de compressão no topo do subleito em até 26 e 22%, respectivamente, o que aumentou a quantidade de ciclos até a ruptura por meio dos mecanismos de fadiga e deformação permanente. A análise do desempenho em campo mostrou que houve redução de até 5,6 dB (A) no ruído pneu-pavimento com uso da CPA em relação ao Concreto Asfáltico (CA) tradicional. Os ensaios de superfície tradicionais mostraram que as CPAs, com idade de serviço de 2 a 2,5 anos, apresentaram características semelhantes a um revestimento tradicional em CA, sendo classificadas como média quanto à macrotextura, e lisa quanto à microtextura. A modelagem 3D forneceu melhor sensibilidade à textura negativa característica da CPA, que pode ser melhor avaliada por meio de parâmetros da ISO 25178-2 (2012), como assimetria (Ssk) e curtose (Sku). O ensaio de drenabilidade também mostrou semelhanças entre as CPAs e o CA tradicional.

**Palavras-chave:** Camada Porosa de Atrito. Vias urbanas. Mistura Reciclada. Análise estrutural. Ruído pneu-pavimento.

## ABSTRACT

Sustainability in paving has gained importance, among other reasons, due to the need to reduce the environmental impacts, i.e.: depletion of natural resources, generation of waste, air pollution, noise pollution, waterproofing of surface, creation of heat islands, among others. In this context, there are numerous paving solutions that offer better suitability for sustainability requirements, for instance, the recycling of asphalt mixtures, the functionalization of the pavement, and the use of porous asphalt. Among the latter, there is the Porous Friction Course (PFC), which is a type of wearing course used mainly on highways and on runways. The main function of this type of surface is to provide functional improvements to the pavement. The objective of the present work is to evaluate the use of PFC in urban roads, in which they are not commonly used. In order to achieve this purpose, the compliance with the mechanical properties required in Brazil for PFC was verified in the laboratory, for virgin and recycled mixtures; a structural analysis of the pavement containing this type of wearing course was carried out, using the software MeDiNa (AEMC); and, finally, an analysis of the performance of the PFC in the field regarding the following properties was performed: acoustic (using the controlled pass-by method), surface (using sand patch, British pendulum and 3D modeling methods) and drainability. The results suggest that the incorporation of 15% of reclaimed asphalt in PFC did not affect the behavior of the asphalt mixture when compared to reference virgin mixtures. However, both cases presented Indirect Tensile Strength (ITS) values of 0.47 MPa, which is lower than the minimum value required (0.55 MPa) by the Brazilian standard. The structural analysis showed that the availability of a layer of PFC at the top of the pavement reduces the tensile strain in the lower fiber of the underlying asphalt layer and the compression at the top of the subgrade by up to 26 and 22%, respectively. This allowed an increase in the number of cycles until the rupture of the pavement by the mechanisms of fatigue and permanent deformation. The analysis of the acoustic performance in the field showed that there was a reduction of up to 5.6 dB (A) in the tire-pavement noise with the use of PFC in comparison to the traditional Asphalt Concrete (AC) dense layers. Traditional tests for micro and macrotexture showed that the PFC, with 2 to 2.5 years in service, had similar characteristics of a traditional AC coating. They were classified as medium in terms of macrotexture, and smooth in terms of microtexture. 3D modeling of the asphalt surface provided better sensitivity to the negative texture of PFC, which can be better evaluated using ISO 25178-2 (2012) parameters, e.g., skewness (Ssk) and kurtosis (Sku). The drainability test also showed similarities between PFCs and traditional AC.

**Keywords:** Porous Friction Course. Urban roads. Reclaimed asphalt. Structural analysis. Tire-pavement noise.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Curvas granulométricas de projeto.....	36
Figura 2 — Granulometria das misturas asfálticas CPA_REF e CPA_15%RA .....	38
Figura 3 — Curvas granulométricas dos materiais virgens e do fresado antes e após a extração .....	39
Figura 4 — CPs preparados para pesagem a) ao ar, b) envolvido com fita adesiva e c) envolvido com fita adesiva e parafina para determinação do Vv .....	44
Figura 5 — CP cilíndrico posicionado na prensa utilizada para a realização do ensaio de RT.....	45
Figura 6 — CP posicionado na prensa para a realização do ensaio de MR, com LVDT .....	46
Figura 7 — CP a) antes do início do ensaio e b) durante o ensaio de Vc .....	47
Figura 8 — Temperaturas de condicionamento dos CPs para o ensaio de RT .....	51
Figura 9 — Resultados dos ensaios de RT .....	51
Figura 10 — Curvas granulométricas de algumas CPAs encontradas na literatura.....	55
Figura 11 — Resultados de RT em função do teor de ligante asfáltico para CPAs investigadas nesse trabalho e na literatura.....	57
Figura 12 — Curvas granulométricas avaliadas em Motta <i>et al.</i> (2010) e utilizada para a mistura asfáltica reciclada avaliada no presente estudo.....	58
Figura 13 — Resultados de Vv em função do teor de ligante asfáltico para várias CPAs avaliadas nesse estudo e presentes na literatura.....	60
Figura 14 — Perfis do pavimento avaliados no estudo conduzido por Timm e Vargas-Nordbeck (2012) .....	67
Figura 15 — Resumo das características dos perfis e parâmetros de análise adotados .	69
Figura 16 — Distribuições horárias de viagens na cidade de Fortaleza, relativos a outubro de 2013 .....	79
Figura 17 — Localização da Avenida Dom Luís na cidade de Fortaleza .....	80
Figura 18 — Avenida Dom Luís com indicação das faixas de tráfego.....	80
Figura 19 — Deflexão no topo do revestimento ( $U_z$ ).....	83
Figura 20 — Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento ( $\epsilon_t$ ) ...	83
Figura 21 — Deformação de compressão vertical no topo do subleito ( $\epsilon_z$ ) .....	84
Figura 22 — Ruído total, do contato pneu-pavimento e do motor, emitido por um carro de passageiros com velocidade constante .....	90

Figura 23 — Parâmetros físicos da onda sonora .....	92
Figura 24 — Espectros de frequência em bandas de oitava e 1/3 de oitava.....	95
Figura 25 — Mecanismos de geração do ruído pneu-pavimento.....	96
Figura 26 — Trailer CPX e detalhe da posição dos microfones próximo ao pneu de referência .....	99
Figura 27 — Área que deve estar livre de superfícies refletoras de acordo com o método SPB .....	102
Figura 28 — Posição do microfone em relação ao veículo.....	103
Figura 29 — Zonas de restrição do local de medição .....	104
Figura 30 — Ilustração de termos básicos que descrevem uma superfície.....	107
Figura 31 — Ilustração das faixas de textura .....	107
Figura 32 — Faixas de comprimento de onda da textura e sua influência nas características do pavimento.....	108
Figura 33 — Texturas (a) positiva e (b) negativa.....	109
Figura 34 — Espalhamento da areia padronizada na superfície do pavimento.....	110
Figura 35 — Pêndulo britânico nas posições a) antes do início e b) durante o ensaio...	113
Figura 36 — Exemplo de superfícies em (a) SMA (TMN 14 mm), (b) CA desgastado (TMN 6 mm) e (c) tratamento superficial (14/6 mm) avaliadas por Millar (2013).....	117
Figura 37 — Representação dos parâmetros de superfície $S_{sk}$ (à esquerda) e $S_{ku}$ (à direita).....	118
Figura 38 — Representação do fluxo no drenômetro para as condições (a) não-saturada e (b) saturada (corte no plano de simetria) .....	120
Figura 39 — $L_{Amáx}$ individual para três tipos de revestimentos em função da velocidade e respectivos ICs .....	122
Figura 40 — Curvas de ruído em função da velocidade para diferentes macrotexturas de uma mistura asfáltica densa envelhecida e asfalto-borracha recém- aplicado.....	123
Figura 41 — Localização das avenidas avaliadas no mapa da Fortaleza .....	126
Figura 42 — Entorno do local de medição em revestimento do tipo CPA localizado na Avenida Santos Dumont .....	127
Figura 43 — Entorno do local de medição em revestimento em CA localizado na Avenida Senador Carlos Jereissati.....	128

Figura 44 — Entorno do local de medição com revestimento em CPA localizado na Avenida Senador Virgílio Távora.....	129
Figura 45 — Entorno do local de medição com revestimento em CA localizado na Avenida 13 de Maio.....	130
Figura 46 — Locais de passagem do veículo na pista nas medições realizadas nas avenidas a) CPA_M1, b) CA_M1, c) CPA_M2 e d) CA_M2.....	132
Figura 47 — Pneu utilizado no veículo utilizando durante o ensaio da passagem controlada.....	135
Figura 48 — Plano de amostragem executado para os ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia .....	136
Figura 49 — Local da realização dos ensaios em campo: pontos para realização dos ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia / modelagem 3D .....	137
Figura 50 — Etapas da modelagem 3D utilizando a técnica de CRP .....	138
Figura 51 — Drenômetro utilizado na presente pesquisa.....	139
Figura 52 — Níveis de referência do $L_{Amáx}$ e respectivos ICs para as vias estudadas ...	141
Figura 53 — $L_{Amáx}$ em função do logaritmo decimal da velocidade para as vias estudadas na primeira etapa da caracterização acústica.....	142
Figura 54 — $L_{Amáx}$ em função do logaritmo decimal da velocidade para as vias estudadas na segunda etapa da caracterização acústica .....	142
Figura 55 — Medidas de $L_{Amáx}$ obtidas pelo método CPB no presente trabalho e encontradas por Knabben (2012).....	144
Figura 56 — Dispersão da velocidade calculada para cada velocidade de ensaio em gráficos de: velocidades de passagem <i>versus</i> (a) $L_{Amáx}$ e (b) velocidade de ensaio .....	145
Figura 57 — $L_{ref}$ em função do MTD para o par de vias com $V_{ref}$ de: a) 65 km/h e b) 50 km/h .....	148
Figura 58 — Resultados do teste Tukey para os parâmetros (a) MTD e (b) VRD .....	151
Figura 59 — IFI em função da velocidade e limites da classificação de APS (2006) para o IFI.....	153
Figura 60 — Exemplos dos revestimentos analisados .....	154
Figura 61 — Parâmetro $S_a$ obtido com o uso do <i>software</i> Gwyddion.....	155
Figura 62 — Parâmetro $S_q$ obtido com o uso do <i>software</i> Gwyddion .....	156
Figura 63 — Modelos 3D de pontos na (a) CPA_M1, (b) CPA_M2, (c) CA_M1 e (d) CA_M2 .....	156

Figura 64 — Parâmetros $S_p$ e $S_v$ obtidos com o uso do <i>software</i> Gwyddion.....	157
Figura 65 — Resultados do teste Tukey para os parâmetros (a) $S_a$ , (b) $S_q$ , (c) $S_p$ e (d) $S_v$ .....	158
Figura 66 — Valores médios do parâmetro $S_{sk}$ .....	160
Figura 67 — Valores médios do parâmetro $S_{ku}$ .....	160
Figura 68 — Correlação entre os parâmetros (a) $S_a$ e $S_q$ , (b) $S_p$ e (c) $S_v$ e MTD.....	161
Figura 69 — Correlação entre os parâmetros (a) $S_a$ e $S_q$ , (b) $S_p$ e (c) $S_v$ e VRD.....	161
Figura 70 — Correlação entre os parâmetros (a) $S_a$ e $S_q$ , (b) $S_p$ e (c) $S_v$ e MTD para os revestimentos em CPA.....	162
Figura 71 — Correlação entre os parâmetros (a) $S_a$ e $S_q$ , (b) $S_p$ e (c) $S_v$ e VRD para os revestimentos em CPA.....	163
Figura 72 — Correlação entre os parâmetros (a) $S_a$ e $S_q$ , (b) $S_p$ e (c) $S_v$ e MTD para os revestimentos em CA.....	164
Figura 73 — Correlação entre os parâmetros (a) $S_a$ e $S_q$ , (b) $S_p$ e (c) $S_v$ e VRD para os revestimentos em CA.....	164



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Resumo das especificações para CPA .....	32
Tabela 2 — Composição (%) de agregados das misturas asfálticas CPA_M1 e CPA_M2 .....	36
Tabela 3 — Granulometria das misturas asfálticas avaliadas .....	36
Tabela 4 — Composição (%) de agregados utilizados na composição das misturas asfálticas.....	37
Tabela 5 — Características dos ligante asfáltico utilizado.....	39
Tabela 6 — Vv dos CPs produzidos para dosagem da CPA com 15% de fresado .....	40
Tabela 7 — Teor de projeto, $G_{mm}$ e Vv das misturas asfálticas CPA_15%RA, CPA_REF e CPA_CAMPO.....	41
Tabela 8 — Resumo das misturas asfálticas investigadas em laboratório .....	41
Tabela 9 — Amostragem utilizada para avaliação das misturas asfálticas CPA_REF e CPA_15%RA.....	42
Tabela 10 — Plano experimental de laboratório para as misturas asfálticas CPA_M1 e CPA_M2 .....	43
Tabela 11 — Resultados Vv e $G_{mm}$ para as misturas asfálticas CPA_M1 e CPA_M2..	48
Tabela 12 — Resultados do ensaio de desgaste Cântabro para CPA_M1 e CPA_M2 ..	50
Tabela 13 — Resultados do ensaio de desgaste Cântabro para CPA_CAMPO, CPA_REF e CPA_15%RA.....	50
Tabela 14 — Resultados de RT para as misturas asfálticas CPA_M1 e CPA_M2.....	52
Tabela 15 — Resultados de RT para as misturas asfálticas CPA_15%RA, CPA_REF e CPA_CAMPO.....	52
Tabela 16 — Resultados de RT para as misturas asfálticas CPA_15%RA e CPA_REF .....	53
Tabela 17 — Resultados do ensaio de Vc para as misturas asfálticas do tipo CPA .....	54
Tabela 18 — Resultados das respostas estruturais encontrados no trabalho conduzido por Dresch (2016) .....	70
Tabela 19 — Pontos considerados na análise estrutural.....	72
Tabela 20 — Estrutura do pavimento do trecho Instalado 1 avaliado por Bastos (2016)..	73
Tabela 21 — Estrutura do pavimento do trecho executado pela PMF e avaliado em Bastos (2016) .....	74
Tabela 22 — Cenários considerados na análise estrutural .....	76

Tabela 23 — Volume de veículos diário na Avenida Dom Luís.....	81
Tabela 24 — Volume de veículos diário na faixa exclusiva para ônibus da Avenida Dom Luís .....	81
Tabela 25 — Número N por tipo de veículo na faixa de projeto .....	82
Tabela 26 — Previsão do número de ciclos até a falha com base em modelos de desempenho (FHWA, AI e LCPC).....	84
Tabela 27 — Conversão do número de ciclos até a falha com base em modelos de desempenho (FHWA, AI e LCPC) para o método USACE.....	84
Tabela 28 — Velocidades de referência e fatores de ponderação (Wx) .....	101
Tabela 29 — Nível de critério de avaliação para ambientes externos, em dB (A) .....	106
Tabela 30 — Classes de macrotextura propostas por DNIT (2006b).....	111
Tabela 31 — Classes de macrotextura propostas por Aps (2006).....	111
Tabela 32 — Aplicações de revestimento a depender da altura média da mancha de areia.....	111
Tabela 33 — Classes de microtextura .....	113
Tabela 34 — Parâmetros de textura definidos pela ISO 25178-2 (2012) .....	115
Tabela 35 — Correlações entre MTD e MMTD obtidas por Millar (2013) para diferentes conjuntos de dados .....	116
Tabela 36 — Resumo dos valores de $R^2$ para as correlações entre parâmetros da modelagem 3D e ensaios tradicionais de textura obtidos por Medeiros <i>et al.</i> (2020).....	119
Tabela 37 — Resultados de SPBI encontrados no estudo conduzido por Alves (2019)	124
Tabela 38 — Resumo dos resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia nos trechos estudados .....	146
Tabela 39 — Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia no trecho da Av. Santos Dumont (CPA_M1).....	146
Tabela 40 — Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia no trecho da Av. Senador Carlos Jereissati (CA_M1) .....	146
Tabela 41 — Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia no trecho da Av. Senador Virgílio Távora (CPA_M2) .....	147
Tabela 42 — Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia no trecho da Av. 13 de Maio (CA_M2) .....	147
Tabela 43 — Resumo dos resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico nos trechos estudados .....	149

Tabela 44 — Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico no trecho da Av. Santos Dumont (CPA_M1).....	149
Tabela 45 — Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico no trecho da Av. Senador Carlos Jereissati (CA_M1) .....	149
Tabela 46 — Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico no trecho da Av. Senador Virgílio Távora (CPA_M2) .....	150
Tabela 47 — Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico no trecho da Av. 13 de Maio (CA_M2) .....	150
Tabela 48 — Parâmetros do IFI ( $S_p$ e F60) e sua classificação para os revestimentos avaliados nesse trabalho e presente na literatura .....	152
Tabela 49 — Parâmetros $S_{sk}$ e $S_{ku}$ para os revestimentos em CPA.....	159
Tabela 50 — Parâmetros $S_{sk}$ e $S_{ku}$ para os revestimentos em CA.....	159
Tabela 51 — Resultados do ensaio de drenabilidade .....	166

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AAUQ	Areia Asfáltica Usinada a Quente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Aplicativo de Análise para Estruturas de Múltiplas Camadas
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
AI	<i>Asphalt Institute</i>
AMC	Autorarquia Municipal de Trânsito e Cidadania
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BGS	Brita graduada simples
BPN	<i>British Pendulum Number</i>
BR	Borda da roda
CA	Concreto Asfáltico
CALTRANS	<i>California Department of Transportation</i> (Departamento de Transportes da Califórnia)
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobrás
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
CP	Corpo de prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
CPB	<i>Controlled Pass-by</i>
CPX	<i>Close Proximity</i>
CPXI	<i>Close Proximity Index</i>
CRP	<i>Close-Range Photogrammetry</i>
CTAFOR	Controle de Tráfego em Área de Fortaleza
CV	Coefficiente de Variação
DP	Desvio padrão
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EBoDE	<i>Environmental Burden of Disease in Europe</i>
ER	Eixo da roda
ES	Eixo de simetria
F	<i>Fast</i>

FC	Fator de Carga
FE	Fator de Eixo
FV	Fator de Veículo
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
F60	Coeficiente de Atrito à Velocidade de 60 km/h
G <sub>mm</sub>	Massa específica máxima medida
G <sub>mb</sub>	Massa específica aparente
IC	Intervalo de confiança
IFI	<i>International Friction Index</i>
IP	Intervalo de previsão
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISETH	<i>Institute of Highways, Railroads and Rock Engineering</i>
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
L <sub>Aeq</sub>	Nível de pressão sonora equivalente (ponderação A)
L <sub>Amáx</sub>	Nível de pressão sonora máximo (ponderação A)
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
L <sub>DEN</sub>	Nível de pressão sonora ponderado dia-tarde-noite
L <sub>eq</sub>	Nível de pressão sonora equivalente
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
L <sub>night</sub>	Nível de pressão sonora contínua equivalente quando o intervalo de tempo de referência é a noite
L <sub>ref</sub>	Nível sonoro de referência
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
L <sub>veh</sub>	Nível sonoro do veículo
MEDINA	Método de Dimensionamento Nacional
MeDiNa	<i>Software</i> de dimensionamento do MEDINA
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEPDG	<i>Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide</i>
MNPS	Medidor de Nível de Pressão Sonora
MPD	<i>Mean Profile Depth</i>
MR	Módulo de resiliência
MTD	<i>Mean Texture Depth</i>
NBR	Norma Brasileira
NCA	Nível de Critério de Aceitação

NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NPS	Nível de Pressão Sonora
OGFC	<i>Open-Graded Friction Course</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PA	<i>Porous Asphalt</i>
Pasfor	Plano de Acessibilidade Sustentável de Fortaleza
PEM	<i>Porous European Mixes</i>
PFC	<i>Porous Friction Course</i>
PIARC	<i>Permanent Association of Road Congresses</i>
RA	<i>Reclaimed Asphalt</i>
RT	Resistência à Tração
$S_a$	Altura Média Aritmética
SCSP	Secretaria Municipal da Conservação e Serviços Públicos
$S_{ku}$	Curtose (grau de achatamento do pico da curva de distribuições das alturas)
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
$S_p$	Constante de Velocidade
$S_p$	Altura máxima do pico
SPB	<i>Statistical Pass-By</i>
SPBI	<i>Statistical Pass-By Index</i>
$S_{pd}$	Densidade de picos
$S_q$	Raiz quadrada média da altura
$S_v$	Profundidade máxima do vale
$S_z$	Altura máxima
$S_{sk}$	Assimetria da distribuição das alturas
USACE	Corpo de Engenheiros Norte-Americano
$V_c$	Vazios comunicantes
$V_{mc}$	Volume do material do núcleo
$V_{mp}$	Volume de pico (limite de 10%)
VRD	Valor de resistência à derrapagem
$V_{ref}$	Velocidade de referência
VUC	Veículo Utilitário de Carga
$V_v$	Volume de Vazios
TLPA	<i>Two-Layer Porous Asphalt</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal

TUCs      Temperaturas de Usinagem e Compactação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO (CAPÍTULO 1)</b> .....	<b>26</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema de pesquisa</b> .....	<b>26</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>27</b>
<b>1.3</b>	<b>Questões de pesquisa</b> .....	<b>29</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>29</b>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO RECICLADAS (CAPÍTULO 2)</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos do capítulo</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3</b>	<b>Misturas asfálticas abertas</b> .....	<b>32</b>
<b>2.4</b>	<b>Reciclagem de misturas asfálticas em CPA</b> .....	<b>34</b>
<b>2.5</b>	<b>Materiais e métodos</b> .....	<b>34</b>
<b>2.5.1</b>	<i>Dosagens das misturas asfálticas</i> .....	<b>34</b>
<b>2.5.2</b>	<i>Ensaio mecânicos e funcionais</i> .....	<b>41</b>
<b>2.5.3</b>	<i>Volume de vazios (V<sub>v</sub>)</i> .....	<b>43</b>
<b>2.5.4</b>	<i>Desgaste Cântabro</i> .....	<b>44</b>
<b>2.5.5</b>	<i>Resistência à Tração (RT)</i> .....	<b>45</b>
<b>2.5.6</b>	<i>Módulo de Resiliência (MR)</i> .....	<b>46</b>
<b>2.5.7</b>	<i>Vazios comunicantes</i> .....	<b>47</b>
<b>2.6</b>	<b>Resultados e discussão</b> .....	<b>48</b>
<b>2.6.1</b>	<i>Volume de vazios</i> .....	<b>48</b>
<b>2.6.2</b>	<i>Desgaste Cântabro</i> .....	<b>49</b>
<b>2.6.3</b>	<i>Resistência à Tração (RT)</i> .....	<b>51</b>
<b>2.6.4</b>	<i>Módulo de Resiliência (MR)</i> .....	<b>53</b>
<b>2.6.5</b>	<i>Vazios comunicantes</i> .....	<b>54</b>
<b>2.6.6</b>	<i>Avaliação do comportamento da mistura asfáltica reciclada segundo a variação do método de compactação e do teor de ligante asfáltico</i> .....	<b>56</b>
<b>2.7</b>	<b>Conclusões e sugestões para trabalhos futuros</b> .....	<b>61</b>



<b>3</b>	<b>ANÁLISE ESTRUTURAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO UTILIZADAS COMO REVESTIMENTOS DE VIAS URBANAS (CAPÍTULO 3)</b> .....	<b>64</b>
3.1	Considerações iniciais.....	64
3.2	Revisão bibliográfica .....	66
3.3	Materiais e métodos .....	70
3.3.1	<i>Software de análise estrutural</i> .....	71
3.3.2	<i>Determinação dos parâmetros de entrada: propriedades das camadas</i> .....	72
3.3.3	<i>Determinação do número de repetições de carga até a ruptura do pavimento a partir de modelos de desempenho</i> .....	76
3.3.4	<i>Volume de tráfego em via urbana de Fortaleza</i> .....	77
3.4	Resultados e discussão .....	82
3.5	Conclusões e sugestões.....	87
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO E DAS CARACTERÍSTICAS DE SUPERFÍCIE DE CAMADA POROSA DE ATRITO EM MEIO URBANO (CAPÍTULO 4)</b> .....	<b>89</b>
4.1	Considerações iniciais.....	89
4.2	Objetivos do capítulo .....	91
4.3	Revisão bibliográfica .....	92
4.3.1	<i>Conceitos de acústica</i> .....	92
4.3.2	<i>Ruído pneu-pavimento</i> .....	95
4.3.3	<i>Métodos de avaliação do ruído pneu-pavimento</i> .....	98
4.3.4	<i>Textura superficial do revestimento</i> .....	106
4.3.5	<i>Drenabilidade</i> .....	119
4.3.6	<i>Caracterização acústica de revestimentos</i> .....	120
4.4	Materiais e métodos .....	125
4.4.1	<i>Trechos avaliados no estudo</i> .....	125
4.4.2	<i>Ensaio acústico</i> .....	133
4.4.3	<i>Parâmetros de superfície</i> .....	135
4.4.4	<i>Drenabilidade</i> .....	139
4.5	Resultados e discussão .....	140
4.5.1	<i>Caracterização acústica</i> .....	140
4.5.2	<i>Caracterização da superfície</i> .....	145
4.5.3	<i>Drenabilidade</i> .....	165

<b>4.6</b>	<b>Conclusões e sugestões.....</b>	<b>166</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DA DISSERTAÇÃO (CAPÍTULO 5).....</b>	<b>169</b>
<b>5.1</b>	<b>Principais conclusões .....</b>	<b>169</b>
<b>5.2</b>	<b>Principais recomendações .....</b>	<b>171</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>172</b>

## 1 INTRODUÇÃO (CAPÍTULO 1)

### 1.1 Problema de pesquisa

Atualmente existe crescente preocupação na Engenharia de Transportes quanto à reutilização de materiais, ao uso de técnicas menos danosas ao meio ambiente, como também quanto à segurança viária. Nesse contexto, a comunidade científica se interessa por estudos sobre a funcionalização do pavimento, isto é, a utilização da estrutura do pavimento para o desempenho de funções para além das convencionais - de resistir aos esforços do tráfego e às ações do clima, propiciando superfície de rolamento com conforto e segurança. Como exemplo de pesquisas sobre esse tema, citam-se os trabalhos de Rocha Segundo *et al.* (2019), Saadeh *et al.* (2019), Shaaban, Abdel-Warith e Haddock (2019) e Zhang *et al.* (2019).

O crescimento dos centros urbanos, que podem contemplar diversos tipos de uso do solo, associado à necessidade de mobilidade das pessoas, trazem consigo problemas relacionados ao ruído de tráfego. Este, por sua vez, pode ter duas origens básicas, que são: a unidade de força do veículo (motor, entrada de ar, escape, transmissão) e a interação pneu-pavimento (SANDBERG, 1987). Segundo dados do projeto piloto multinacional *Environmental Burden of Disease in Europe* (EBoDE, 2010), o ruído ambiental e a poluição do ar ambiente são as principais causas da carga ambiental de doenças (seguidos por exposições a radônio, fumo passivo, chumbo e ozônio) em alguns países da Europa.

Os limites aceitáveis e/ou toleráveis para o ruído oriundo do tráfego de veículos variam de país para país. Nos Estados Unidos, a *Federal Highway Administration* (FHWA) estabelece níveis de ruído que devem ser atendidos quando da construção de novas rodovias. Os níveis de ruído são listados de acordo com atividades específicas desenvolvidas em ambientes internos ou externos próximos a rodovias, e esses limites variam de 57 a 72 dB (A) (FHWA, 2017). A Organização Mundial da Saúde (OMS) (WHO, 2018) recomenda, para a Europa, que a exposição média ao ruído produzido pelo tráfego fique abaixo de 53 dB (A), e que a exposição noturna a esse ruído seja reduzida abaixo de 45 dB (A). O ruído ambiental está entre os principais riscos ambientais para a saúde física e mental e para o bem-estar, com uma carga substancial de doenças associada na Europa (HÄNNINEN *et al.*, 2014). A exposição ao ruído pode causar efeitos auditivos e não auditivos na saúde, como doenças cardiovasculares, prejuízo cognitivo para crianças, distúrbios do sono, zumbido e incômodo (BABISCH, 2006; MIEDEMA E VOS, 2007; WHO, 2018).

Na pavimentação, devido aos impactos ambientais relacionados ao esgotamento dos recursos naturais e à discussão quanto à destinação dos resíduos gerados por essa atividade, a reciclagem de misturas asfálticas ganhou grande importância nas últimas décadas. Essa técnica permite a redução de custos e de impactos ambientais, já que o material reciclado, denominado fresado ou, em inglês, *reclaimed asphalt* (RA), contém ligante asfáltico - que é o insumo mais nobre da pavimentação - e agregados (KENNEDY, 1998; AL-QADI, ELSEIFI e CARPENTER, 2007; BARCO CARRIÓN, LO PRESTI E AIREY, 2015). Além disso, este pode oferecer benefícios técnicos, como mostrado por diversos trabalhos que constataram que o uso deste material em misturas asfálticas novas resultou em materiais com comportamento similar ou até mesmo superior ao de misturas produzidas exclusivamente com insumos virgens (MALLICK, KANDHAL E BRADBURY, 2008; COPELAND, 2011; LOPES *et al.*, 2015).

## 1.2 Justificativa

No contexto da preocupação com a minimização dos impactos ambientais e com a potencialização das funções do pavimento, além da funcionalização de pavimentos propriamente dita, existem soluções de pavimentação que foram concebidas com a finalidade de conferir ao pavimento, sobretudo à superfície de rolamento, melhoria das condições de aderência pneu-pavimento, rápido escoamento das águas superficiais para o sistema de drenagem, dentre outras propriedades funcionais. Nesse aspecto, citam-se as misturas asfálticas abertas ou porosas, que podem ser de diversos tipos e recebem diferentes nomenclaturas, sendo amplamente conhecidas pelos benefícios funcionais que propiciam.

Dentre as misturas porosas, está a Camada Porosa de Atrito (CPA), empregada como camada de rolamento com a finalidade funcional de aumento da aderência pneu-pavimento em dias de chuva (BERNUCCI *et al.*, 2010). As CPA, termo que neste trabalho será utilizado para fazer referência a todas as misturas asfálticas abertas, são recomendadas, principalmente, como camadas de superfície para vias de alta velocidade (HUBER, 2000) e pistas de pouso e decolagem (embora com algumas restrições quanto ao número de operações, devido ao acúmulo de borracha dos pneus das aeronaves na pista) (FAA, 1997). No entanto, na literatura encontram-se relatos da utilização desse tipo de revestimento em áreas urbanas (GIBBS *et al.*, 2005; NIELSEN *et al.*, 2005), de tráfego mais lento, e até mesmo em estacionamentos (CAHILL, ADAMS e MARM, 2003). Outro aspecto da CPA que vem sendo investigado recentemente, é sua adequabilidade para utilização enquanto estratégia de diminuição das temperaturas atmosféricas em ilhas de calor (STEMPIHAR *et al.*, 2012;

COSEO e LARSEN, 2015). Além disso, misturas asfálticas do tipo CPA também já foram avaliadas experimentalmente, em Praticò e Vaiana (2012), no que se refere à sua adequabilidade em termos de sustentabilidade do pavimento para áreas urbanas.

Um dos principais problemas relacionados ao uso da CPA é a colmatção dos vazios, que afeta outras propriedades desse tipo de revestimento, como sua permeabilidade e sua eficiência enquanto pavimento silencioso, por exemplo. Pesquisas realizadas no Japão indica que a colmatção da CPA em vias urbanas ocorre geralmente de 3 a 4 anos após a sua construção (NIELSEN *et al.*, 2005). Boving *et al.* (2008) concluíram que a colmatção ocorre principalmente devido à areia trazida de fontes externas. Suresha, Varghese e Ravi Shankar (2010) avaliaram o efeito de ciclos de colmatção e limpeza na permeabilidade de misturas asfálticas do tipo CPA. Em Gibbs *et al.* (2005), é reportado que na Holanda, a perda acústica na CPA é devido à colmatção dos poros e à perda de agregados na superfície (*ravelling*) que é outro principal problema desse tipo de mistura.

Por se tratar de um revestimento com diversas propriedades funcionais, as investigações científicas sobre a CPA contemplam aspectos mecânicos e, também, funcionais, tanto a nível de laboratório quanto relativos ao desempenho em campo. Na cidade de Fortaleza, essa solução vem sendo utilizada para a manutenção de revestimentos em pontos onde é comum a ocorrência de defeitos, focos de frequentes ações de manutenção, e experiências em trechos piloto encorajaram a continuação do seu uso, após a constatação da diminuição da ocorrência de trincas e fissuras (PMF, 2018). Parte da experiência da utilização de CPA na cidade de Fortaleza já foi retratada na comunicação técnica conduzida por Maia *et al.* (2019). No entanto, cabe à comunidade científica investigar, de forma mais aprofundada, os impactos da utilização dessa solução no meio urbano. Assim sendo, propõe-se no presente trabalho a avaliação dessa solução de pavimentação no ambiente urbano sob os aspectos do seu desempenho mecânico e funcional.

Na cidade de Fortaleza, ainda há poucos estudos relacionados ao ruído gerado pelo sistema de transportes. Recentemente, Peixoto e Azevedo Filho (2019) realizaram estudo no âmbito da avaliação do impacto da poluição sonora gerada pela operação do sistema de transportes. O presente estudo também visa contribuir com o tema, porém com o foco no que concerne a engenharia de pavimentação. Outro aspecto abordado no presente estudo é a utilização da fotogrametria para a modelagem da superfície, que já foi objeto de estudo do grupo de pesquisa do qual o presente trabalho faz parte, no trabalho conduzido por Maia (2020).

### 1.3 Questões de pesquisa

Diante do panorama apresentado no que se refere ao uso de CPA em vias do meio urbano, levantam-se as seguintes questões de pesquisa:

- (i) É possível incorporar fresado à mistura do tipo CPA sem prejuízo às propriedades mecânicas e funcionais esperadas desse tipo de mistura?
- (ii) Como o pavimento se comporta estruturalmente com a execução de uma capa como camada de CPA?
- (iii) A utilização de CPA em meio urbano fornece atenuação do ruído pneu-pavimento?
- (iv) No ambiente urbano, que desempenho pode-se esperar de revestimento do tipo CPA no que diz respeito às propriedades de superfície e de drenabilidade?

### 1.4 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral a investigação do uso de revestimentos do tipo CPA em vias do meio urbano, considerando características específicas – de tráfego, entorno, geometria da via - desse ambiente. Para auxiliar o alcance desse objetivo, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- (i) Avaliar a dosagem e as propriedades mecânicas de misturas asfálticas do tipo CPA com a adição de fresado;
- (ii) Realizar a análise estrutural de perfis de pavimentos, típicos de vias do meio urbano, com CPA em seu revestimento;
- (iii) Avaliar o desempenho da CPA na atenuação do ruído pneu-pavimento em vias do ambiente urbano;
- (iv) Avaliar o comportamento da CPA frente às propriedades de superfície e drenabilidade em vias do meio urbano.

### 1.5 Estrutura do trabalho

A presente dissertação de mestrado é composta por três capítulos escritos em forma de artigos científicos, que correspondem aos Capítulos 2, 3 e 4 deste documento. O presente capítulo é introdutório. O Capítulo 2 é referente a um estudo de laboratório de caracterização

mecânica e funcional realizado em misturas asfálticas do tipo CPA; nesse capítulo, são analisadas as misturas asfálticas dosadas para utilização na cidade de Fortaleza, além de ser proposta a dosagem de CPA produzida com 15% de material asfáltico fresado. No Capítulo 3, foi realizada uma análise estrutural em perfis de pavimento típicos utilizados em vias de áreas urbanas, com a presença de revestimento do tipo CPA em seu topo. No 4º capítulo é apresentado um estudo de campo das propriedades acústicas, de superfície, e de drenabilidade de revestimentos compostos por CPA e em Concreto Asfáltico (CA). O 5º e último capítulo resume as principais conclusões da dissertação.

## **2 AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO RECICLADAS (CAPÍTULO 2)**

### **2.1 Considerações Iniciais**

As misturas asfálticas porosas são materiais usados em camadas de revestimento colocadas, normalmente, acima de estruturas regulares de pavimentos com o objetivo de melhorar as condições de segurança do tráfego – aumento da aderência pneu-pavimento e a drenagem da água superficial - durante eventos de chuva e reduzir o ruído ao rolamento. No Brasil, este tipo de mistura é conhecido como CPA e é utilizado principalmente, assim como em outros países, em rodovias de alto volume de tráfego. No entanto, essas misturas asfálticas têm potencial de serem uma alternativa sustentável de pavimentação em ambientes urbanos (devido aos benefícios funcionais de atenuação de ruído, melhor drenabilidade, etc.), especialmente se seu uso for combinado a outras técnicas sustentáveis de pavimentação, como a incorporação de fresado em misturas asfálticas recicladas.

Quanto ao uso de fresado em CPAs, que normalmente requerem utilização de Asfalto Modificado por Polímero (AMP), alguns estudos já foram realizados e demonstraram que esses materiais apresentam comportamento satisfatório. No entanto, de acordo com Frigio *et al.* (2015), especificações técnicas adotadas em muitos países ainda não permitem a utilização de quaisquer materiais reciclados nesse tipo de mistura. Por este motivo, Frigio *et al.* (2015) ressaltam a necessidade do desenvolvimento de técnicas confiáveis que permitam o uso de fresado em novas misturas asfálticas porosas. Não foram encontrados relatos de tal aplicação de fresado em misturas asfálticas porosas no Brasil, mas é comum encontrar na literatura internacional trabalhos que tratam da utilização de fresados advindos de CPAs antigas em novas CPAs (PRATICÒ *et al.*, 2012; PRATICÒ, VAIANA e GIUNTA, 2013; FRIGIO *et al.*, 2013, 2015). No entanto, em alguns lugares, especialmente em centros urbanos onde a utilização de CPA é recente (como é o caso da cidade de Fortaleza), este tipo de revestimento ainda não atingiu o fim da sua vida útil e, portanto, nesses casos este material ainda não está disponível para reutilização.

### **2.2 Objetivos do capítulo**

Dado o contexto no qual se insere a utilização de soluções de pavimentação mais funcionais ou sustentáveis, sobretudo no ambiente urbano, esse capítulo tem como objetivo



principal proposição e avaliação da incorporação de fresado em misturas asfálticas do tipo CPA. Para isso, os seguintes objetivos específicos são propostos: (i) avaliação de misturas asfálticas virgens do tipo CPA, correspondentes àquelas empregadas em revestimentos de vias da cidade de Fortaleza; (ii) avaliação de misturas asfálticas do tipo CPA com a incorporação de 15% de fresado; e (iii) comparação entre as misturas asfálticas do tipo virgens e recicladas.

### 2.3 Misturas asfálticas abertas

As misturas asfálticas abertas consistem de agregados com granulometria uniforme e ligante asfáltico ou ligante asfáltico modificado. Essas, são utilizadas, principalmente, com a função de camada drenante, seja na superfície do pavimento ou na seção estrutural do pavimento (FAA, 2001). Essas misturas asfálticas recebem diferentes nomes em diferentes países (FABB, 1997). Como exemplos dessas misturas asfálticas, podem-se citar as misturas porosas européias (PEMs, do inglês, *Porous European Mixtures*), camada porosa dupla (TLPA, do inglês, *Two-Layer Porous Asphalt*), asfalto poroso (PA, do inglês, *Porous Asphalt*) e as misturas asfálticas abertas americanas *Open-Graded Friction Courses* (OGFC) e *Porous Friction Courses* (PFC). No Brasil, esse tipo de mistura é conhecido como CPA.

A norma brasileira para a CPA, ES 386 (DNER, 1999), determina os valores que o Volume de vazios (Vv) pode assumir, propõe cinco faixas de distribuição granulométrica permitidas, além de determinar a espessura do revestimento e os limites de teor de ligante asfáltico. Essa norma pressupõe a utilização de AMP. Os requisitos de propriedades mecânicas são estabelecidos nesta norma por meio da resistência ao desgaste Cântabro e da Resistência à Tração por compressão diametral (RT). O resumo desses requisitos é encontrado na Tabela 1 — Resumo das especificações para CPA Tabela 1.

Tabela 1 — Resumo das especificações para CPA

Peneira de Malha Quadrada		Faixas					Tolerância
ABNT	Abertura (mm)	Porcentagem Passante em Massa					
		I	II	III	IV	V	
3/4"	19	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,5	100	100	100	100	70-100	±7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	±7
Nº 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	±5
Nº 10	2	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	±5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	±5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	±3

Peneira de Malha Quadrada		Faixas					Tolerância
		Porcentagem Passante em Massa					
ABNT	Abertura (mm)	I	II	III	IV	V	
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	±2
AMP (%)				4-6			±0,3
Espessura da Camada (cm)		3,0		Menor ou Igual a 4,0			
V <sub>v</sub> (%)				18-25			Não se aplica
Desgaste Cântabro (%)				25			
Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)		Mínimo de 0,55					

Fonte: Adaptada de Bernucci *et al.* (2010).

Uma das principais desvantagens das misturas abertas é sua baixa durabilidade e curta vida de serviço (COOLEY *et al.*, 2009), o que implica na necessidade de frequentes ações de manutenção e reabilitação. Vários autores relatam a perda de agregados na superfície da camada como o principal fator que afeta a durabilidade destas misturas (HUBER, 2000; HAGOS *et al.*, 2007; COOLEY *et al.*, 2009). Essa degradação pode ser agravada pela presença de umidade e/ou condições intensas de inverno, além de afetar a qualidade da passagem dos veículos e acelerar o aparecimento e a evolução de outros defeitos (ARÁMBULA-MERCADO *et al.*, 2019). Bolzan, Nicholls e Huber (2001) destacam várias desvantagens da utilização de CPA tais como: custos elevados, capacidade estrutural relativamente baixa devido ao alto V<sub>v</sub>, vida de serviço possivelmente mais curta, manutenção complicada durante o inverno, difícil manutenção de remendos, dentre outras.

Os testes mais utilizados para avaliar misturas porosas, comuns às especificações técnicas de vários países, são o desgaste Cântabro e RT. O primeiro avalia a durabilidade por meio da resistência à perda de agregados, enquanto o segundo avalia a resistência aos esforços de tração. No que se refere à resistência à água, é comum a realização de testes em Corpos de Prova (CP) antes e após a etapa de condicionamento em água ou a realização de ensaios que avaliem o dano por umidade induzida, como o ensaio de dano por umidade induzida. Já para a avaliação do desempenho funcional dessas camadas, ensaios de permeabilidade, afundamento de trilha de roda (ATR) e verificação de textura em campo costumam ser realizados.

Uma característica importante das CPAs é a elevada porcentagem de vazios comunicantes (V<sub>c</sub>), de até 20-28% no momento da execução em campo, que proporciona a circulação da água e a absorção do ruído superficial (FEHRL, 2006). Esses vazios são aqueles que permitem a passagem da água através do revestimento e, por esta razão, quanto maior for sua porcentagem, maior será a permeabilidade da mistura asfáltica. No que diz respeito à

diminuição do ruído, a existência de um elevado teor de Vc permite que o som penetre e flua pelo material com maior facilidade, o que aumenta sua absorção sonora (KNABBEN, 2012).

## **2.4 Reciclagem de misturas asfálticas em CPA**

Devido à ampla utilização de CPA em alguns países, a citar, Japão e Itália, surgiu a necessidade de reutilização de fresado oriundo de revestimentos deste tipo em pavimentos novos. Resultados preliminares obtidos pelo estudo conduzido por Kanou *et al.* (2010) indicam que novas CPAs contendo até 30% de fresado com AMP têm durabilidade equivalente a CPAs virgens. Outros trabalhos também propuseram a incorporação de fresado advindo de CPA em misturas asfálticas desse tipo (PRATICÒ *et al.*, 2012; PRATICÒ, VAIANA e GIUNTA, 2013; FRIGIO *et al.*, 2013, 2015). Além da utilização de fresado em CPA, as técnicas de produção da mistura asfáltica, em si, também podem contribuir para melhorar a sustentabilidade da infraestrutura de transportes, se, por exemplo, for utilizada associada à técnica de mistura asfáltica morna, que permita a redução das temperaturas de aplicação, como o relatado no trabalho realizado por Goh e You (2012).

A reciclagem de misturas asfálticas é uma técnica de suma importância no âmbito da pavimentação sustentável. Nesse contexto, pavimentos asfálticos porosos têm importância como alternativa para melhorar o potencial sustentável de camadas de rolamento (PRATICÒ E VAIANA, 2012). A combinação das técnicas citadas, ou seja, de reciclagem de misturas asfálticas com o uso de CPAs, pode potencializar o atendimento do pavimento com relação a requisitos de sustentabilidade, que consideram aspectos ambientais, econômicos e sociais.

## **2.5 Materiais e métodos**

### **2.5.1 Dosagens das misturas asfálticas**

O presente trabalho contou com o apoio da empresa Insttale Engenharia Ltda., que em 2017 passou a utilizar CPA no meio urbano, que é uma aplicação diferente do uso comum normalmente atribuído a esse tipo de revestimento (em rodovias de alto volume de tráfego ou em pavimentos aeroportuários). Devido à parceria entre o grupo de pesquisa do qual a presente autora é integrante e a referida empresa, obteve-se acesso às dosagens das misturas asfálticas desse tipo, utilizadas em vias da cidade de Fortaleza. Eventualmente, devido a questões logísticas, industriais e ao próprio ganho de experiência na execução desse tipo de revestimento,

a dosagem passou por algumas alterações ao longo do tempo, enquanto que a faixa granulométrica foi mantida. Reposição de britas nas baias, que podem ser de diferentes origens e/ou fornecedores, detecção de problemas corriqueiros na execução do revestimento, utilização de AMPs de diferentes fornecedores e o *feedback* do desempenho em campo são alguns dos fatores que tornaram essas modificações necessárias.

Ao longo de aproximadamente 3,5 anos (tempo decorrido desde a aplicação do trecho piloto) a dosagem da CPA foi modificada, e um dos principais motivos foi a necessidade de implementar melhorias na dosagem piloto. Obteve-se acesso a algumas dessas dosagens e, com isso, as misturas asfálticas desse tipo foram reproduzidas em laboratório para que pudessem ser caracterizadas. As misturas utilizadas são enquadradas na Faixa II da ES 386 (DNER, 1999) e a dosagem foi realizada pelo método Marshall, com 50 golpes em cada face do CP. O teor de ligante asfáltico definido como de projeto pela empresa é aquele que atingir o Vv definido como alvo, 21,5% neste caso. Na dosagem realizada para o uso desta empresa, encontrou-se que esse teor de ligante asfáltico foi de 4,3%. O Vv alvo é correspondente ao valor médio da faixa permitida (de 18% a 25%) para esse parâmetro.

Para a empresa, as misturas asfálticas que serão analisadas neste trabalho diferem entre si, basicamente, na proporção dos agregados utilizados, e foram intituladas CPA\_M1 e CPA\_M2. Essas misturas asfálticas são correspondentes a diferentes trechos executados em campo. Na Tabela 2 são apresentadas as composições dessas misturas asfálticas, enquanto que as granulometrias das curvas de projeto são mostradas na Tabela 3. Vale ressaltar que, a depender da granulometria de novos materiais que chegam aos pátios da empresa, essas composições sofreram algumas alterações para que possam permanecer enquadradas na Faixa II do DNER. Por essa razão, essas misturas asfálticas também foram tratadas separadamente no presente trabalho, e são também consideradas diferentes de uma outra mistura asfáltica que será apresentada a seguir. As curvas de projeto das misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2 são mostradas na Figura 1.

Devido ao fato já relatado, quanto à mudança ao longo do tempo dos insumos disponíveis para a produção das misturas asfálticas, para assegurar que as granulometrias de CPA\_M1 e CPA\_M2, produzidas em laboratório, estejam o mais próximo possível das curvas de projeto, os materiais foram fracionados em cada peneira da faixa granulométrica considerada. A origem da brita (granítica) utilizada para a produção dos CP, foi a mesma daquelas utilizadas na produção das misturas asfálticas que foram aplicadas em campo.

Tabela 2 — Composição (%) de agregados das misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2

Mistura	Brita 3/8" (%)	Brita 1/2" (%)	Pó de pedra (%)
CPA_M1	-	90	10
CPA_M2	45*	55	-

\* Essa brita era preparada a partir da mistura de uma brita 3/8" com 10% de pó de pedra.

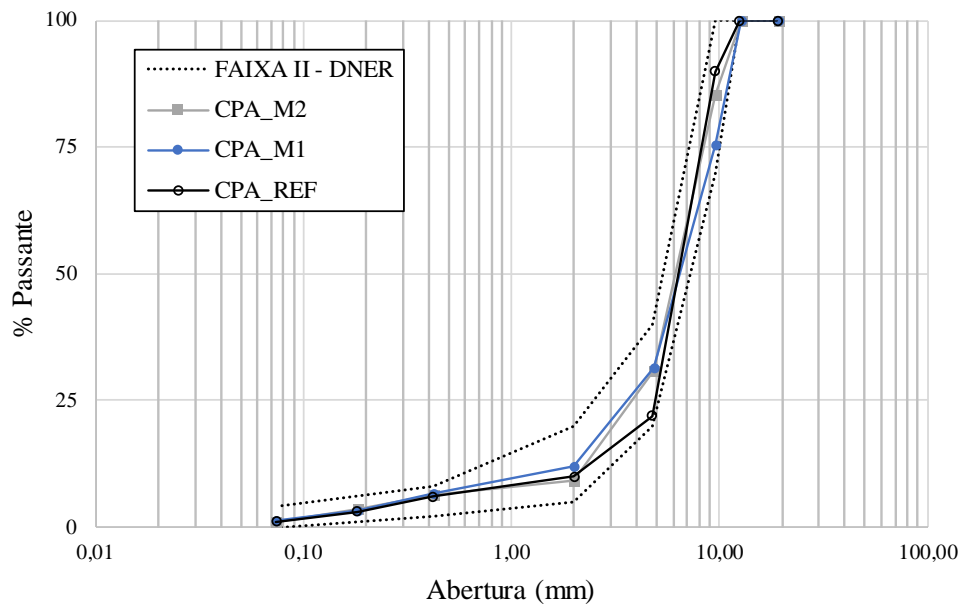
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3 — Granulometria das misturas asfálticas avaliadas

Abertura da peneira ABNT	(mm)	% Passante			
		CPA_M1	CPA_M2	Faixa II	
				Limite inferior	Limite superior
3/4"	19,0	-	-	-	-
1/2"	12,5	100,0	100,0	100	100
3/8"	9,5	75,6	85,5	70	100
Nº 4	4,75	31,4	31,1	20	40
Nº 10	2,00	12,1	9,1	5	20
Nº 40	0,42	6,50	6,3	-	-
Nº 80	0,18	3,32	3,5	2	8
Nº 200	0,075	1,34	1,0	0	4

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 1 — Curvas granulométricas de projeto



Fonte: Elaborado pela autora.

Além das misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2 já apresentadas, uma terceira mistura asfáltica virgem foi produzida em laboratório, denominada CPA\_REF. Estas três misturas asfálticas possuem curvas granulométricas próximas, como pode ser visto na Figura 1. Como já explicado, as misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2 foram produzidas com maior rigor na separação dos materiais porque se pretendia reproduzir as curvas de projeto com maior fidedignidade. A CPA\_REF, no entanto, foi produzida seguindo as proporções das britas

utilizadas em sua composição, conforme apresentado na Tabela 4, e os materiais foram separados de acordo a norma DNER 043/95 (Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall), em frações retidas nas peneiras 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm, e passantes nessa última. A separação dos materiais foi realizada dessa forma para este caso porque no momento da produção dos CP em laboratório, dispunham-se de materiais (pilhas de brita) com a mesma granulometria daqueles que originaram a dosagem dessa mistura asfáltica, diferentemente do que aconteceu para as misturas CPA\_M1 e CPA\_M2.

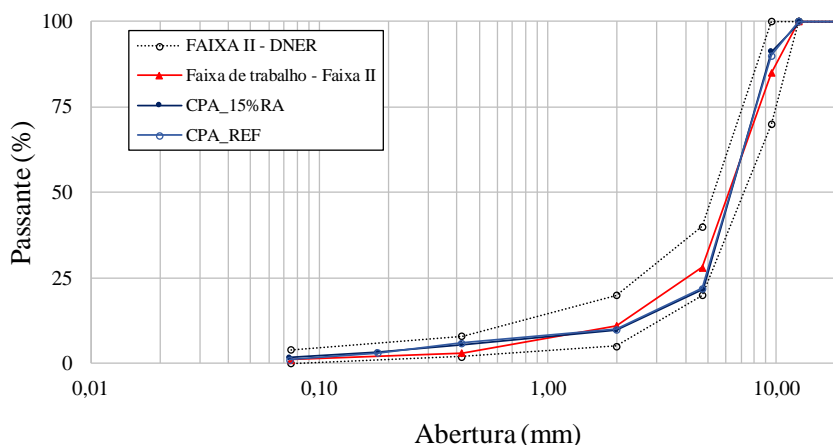
Tabela 4 — Composição (%) de agregados utilizados na composição das misturas asfálticas

<b>Mistura Asfáltica</b>	<b>Brita 3/8" (%)</b>	<b>Brita 1/2" (%)</b>	<b>Pó de pedra (%)</b>	<b>Fresado (%)</b>
CPA_CAMPO	55	35	10	-
CPA_15%RA	70	15	-	15
CPA_REF	60	30	10	-

Fonte: Elaborado pela autora.

As proporções dos materiais virgens utilizados na CPA\_REF serviram de base para a proposição da mistura asfáltica com a incorporação de fresado no teor de 15% (CPA\_15%RA), aqui estudada. Essas proporções foram definidas de tal forma que as proporções dos agregados virgens ficassem o mais próximo possível das respectivas proporções utilizadas na mistura asfáltica virgem CPA\_REF. O teor de ligante asfáltico que atingiu o Vv alvo (21,5%) para a CPA\_REF foi 4,2%. As curvas granulométricas das misturas asfálticas CPA\_REF e CPA\_15%RA são mostradas na Figura 2, por onde é possível perceber que estas estão praticamente sobrepostas. Por fim, uma mistura asfáltica de campo, oriunda da usina e sem fresado em sua composição, denominada CPA\_CAMPO, também será considerada nas análises aqui realizadas. Essa última foi coletada na usina e compactada em laboratório, e sua curva de projeto é denominada Faixa de projeto – Faixa II na Figura 2. As composições dessas misturas asfálticas são apresentadas na Tabela 4. Ressalta-se que a mistura asfáltica CPA\_CAMPO é provavelmente equivalente à mistura CPA\_M2, o que fica claro ao se observar as composições dos materiais nela utilizados (Tabela 4) e a observação no rodapé na Tabela 2.

Figura 2 — Granulometria das misturas asfálticas CPA\_REF e CPA\_15%RA



Fonte: Elaborado pela autora.

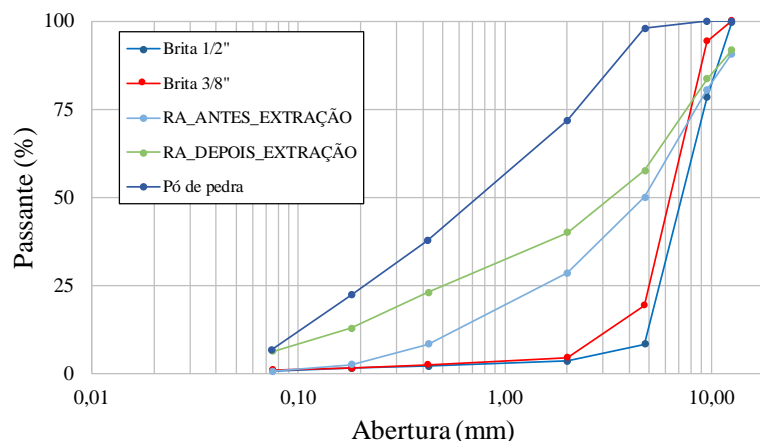
O fresado utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela empresa Insttale Engenharia Ltda. e é proveniente da fresagem de revestimentos utilizados em pavimentos de vias urbanas localizadas na cidade de Fortaleza. Não há registros do projeto original desses revestimentos. Esse material se encontra disponível em uma pilha no pátio da empresa, de onde é retirado para abastecer o anel de fresagem que compõe a usina do tipo *drum mixer* utilizada para a usinagem das misturas asfálticas recicladas. Vale ressaltar que o fresado passa por um processo de beneficiamento que consiste da separação e eliminação de frações indesejadas, bem como da rebitagem de algumas frações visando desfazer grumos maiores. As frações desejadas são, então, misturadas novamente. Após coletado, o fresado foi seco ao ar e armazenado em sacos plásticos para uso nesta pesquisa.

Como é procedimento padrão, quando se trata do uso de fresado, a curva granulométrica desse material foi obtida antes e após a extração do ligante asfáltico (realizada por meio do equipamento Rotarex). Essas curvas são mostradas na Figura 3. O tamanho máximo nominal (TMN) desse material é de 12,5mm (granulometria anterior à extração do ligante asfáltico). Além do fresado, dispõem-se de agregados virgens para compor as misturas asfálticas, que são brita 1/2", brita 3/8" e pó de pedra. As curvas granulométricas desses materiais também são mostradas na Figura 3. O teor de ligante asfáltico extraído do fresado foi de 3,5%.

Para que o fresado pudesse ser incorporado à mistura, a dosagem da mistura asfáltica virgem (nesse caso, a CPA\_REF) teve que ser adaptada. É possível perceber pela Figura 3 que a fração 1/2" (12,5mm) está presente no material (percentual passante em torno de 90%), o que impossibilita utilizá-lo da forma como este é coletado em uma mistura asfáltica que esteja enquadrada na Faixa II (Tabela 1), que exige que 100% do material passe na fração

½””. Dessa forma, foi necessário separar esta fração do restante do material, obtendo-se novas proporções para as demais frações para compor a curva granulométrica do fresado. Mesmo com essa alteração, o TMN do fresado se manteve igual a 12,5 mm.

Figura 3 — Curvas granulométricas dos materiais virgens e do fresado antes e após a extração



Fonte: Elaborado pela autora.

O ligante asfáltico utilizado nessa pesquisa foi um AMP (Stylink 55/75-E) e suas características estão resumidas na Tabela 5. As Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC) utilizadas foram 177 °C para usinagem e 170 °C para compactação. No entanto, durante o processo de produção dos CP, foi constatado que alguns desses estavam desagregando logo após a compactação, o que provavelmente estava ocorrendo devido à alta temperatura utilizada nesse processo. Dessa forma, a temperatura de compactação foi reduzida em 10 °C para que se pudesse proceder com a produção das amostras. Os CP afetados por isso são referentes às misturas CPA\_M1 e CPA\_M2. O surgimento da desagregação em alguns CP pode ter sido causado pela mudança de lote do ligante asfáltico utilizado, bem como devido a possíveis alterações que o material sofreu após alguns ciclos de aquecimento e resfriamento, processos que são comuns na prática laboratorial.

Tabela 5 — Características dos ligante asfáltico utilizado

Características do ligante	Método	CAP 55/75-E
Penetração, 100g, 5s, 25°C, %	NBR-6576	48
Recuperação elástica, 20cm, 25°C, %	NBR-15086	81
Ponto de amolecimento, °C	NBR-6560	60
Viscosidade Brookfield a 135°C, cP	NBR-15184	1.275
Viscosidade Brookfield a 150°C, cP	NBR-15184	485
Viscosidade Brookfield a 177°C, cP	NBR-15184	202
Temperatura de usinagem (°C)	-	177 a 180



<b>Características do ligante</b>	<b>Método</b>	<b>CAP 55/75-E</b>
Temperatura de compactação (°C)	-	166 a 171

Fonte: Elaborado pela autora.

No processo de fabricação das misturas asfálticas recicladas, o fresado foi introduzido à temperatura ambiente na mistura asfáltica, pois decidiu-se que seu aquecimento se daria por troca de calor com os agregados virgens superaquecidos, no intuito de simular o processo de mistura que costuma ser utilizado em usinas do tipo *drum mixer* na cidade onde essa pesquisa foi realizada. O AMP foi aquecido à 177°C e os agregados virgens à 197°C, ou seja, 20 °C acima da temperatura de usinagem do ligante asfáltico para compensar o fato de que nesse estudo o fresado não foi pré-aquecido. O tempo de contato entre os materiais virgens e o fresado, no ato da mistura em laboratório, foi aquele suficiente para que se percebesse que os agregados virgens e o foram envolvidos pelo AMP e para que a mistura asfáltica atingisse a temperatura de compactação (170°C), o que acontecia, aproximadamente após 2 a 3 minutos de mistura.

Adotou-se que o teor de projeto de ligante asfáltico utilizado na CPA\_15%RA seria aquele cujo Vv ficasse próximo de 22%, que é um valor intermediário dentro dos limites estabelecidos pela norma. Para defini-lo, foram produzidos CPs em triplicata nos teores de 4,5% ± 0,5% e 4,5 ± 1,0%. A Tabela 6 mostra os Vv obtidos para cada teor testado, onde é possível perceber que o teor de projeto é de 4,5%.

Tabela 6 — Vv dos CPs produzidos para dosagem da CPA com 15% de fresado

CP	Vv (%)				
	Teor de ligante (%)				
	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
CP1	24,5	22,5	<b>22,4</b>	19,0	20,9
CP2	22,6	21,8	<b>21,0</b>	18,4	17,9
CP3	25,6	23,0	<b>21,9</b>	17,3	18,7
Média	24,2	22,5	<b>21,8</b>	18,2	19,1

Fonte: Elaborado pela autora.

Para que se possa comparar a CPA\_15%RA com a CPA\_REF e com a CPA\_CAMPO, é necessário manter alguns parâmetros similares, como as curvas granulométricas e o Vv. O teor de projeto de ligante asfáltico da CPA\_CAMPO foi de 4,2% e seu Vv foi de, aproximadamente, 22%, parâmetros muito similares aos obtidos para a CPA\_15%RA. Escolheu-se, então, testar um teor de 4,5% de AMP para a CPA\_REF, já que esta possui praticamente a mesma curva granulométrica da mistura asfáltica utilizada em

campo. Além disso, como a dosagem Marshall permite uma variação de  $\pm 0,3\%$  no teor de projeto de ligante asfáltico, considerou-se que as três misturas asfálticas estão, praticamente, com o mesmo teor de ligante asfáltico. A Tabela 7 resume os teores de ligante asfáltico de projeto encontrados, a massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ), necessária para a obtenção do  $V_v$ , e o  $V_v$  dessas três misturas asfálticas. Essas misturas asfálticas também foram comparadas a CPA\_M1 e CPA\_M2, pois conforme já comentado, as curvas granulométricas dessas misturas asfálticas são semelhantes, e o mesmo pode-se dizer dos teores de projeto.

Tabela 7 — Teor de projeto,  $G_{mm}$  e  $V_v$  das misturas asfálticas CPA\_15%RA, CPA\_REF e CPA\_CAMPO

Parâmetro	CPA_15%RA	CPA_REF	CPA_CAMPO
Teor de projeto (%)	4,5	4,5	4,2
$G_{mm}$	2,483	2,464	2,459
$V_v$ (%)	21,8	21,3	22,2

Fonte: Elaborado pela autora.

Com o intuito de facilitar o entendimento do leitor, na Tabela 8 estão resumidas as misturas asfálticas que foram investigadas nesse capítulo. De forma geral, as misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2 são réplicas de curvas de projeto de trechos de campo. A CPA\_CAMPO foi coletada na usina e compactada em laboratório. A CPA\_REF foi produzida seguindo dosagem utilizada pela empresa e foi modificada para permitir a incorporação de fresado, que originou a CPA\_15%RA.

Tabela 8 — Resumo das misturas asfálticas investigadas em laboratório

Mistura Asfáltica	Descrição
CPA_M1 CPA_M2	Reprodução de curvas de projeto aplicadas em campo. Produzida e compactada em laboratório. Separação do material em cada peneira.
CPA_REF	Base para a proposição da mistura asfáltica reciclada. Produzida e compactada em laboratório. Separação do material em peneiras específicas.
CPA_15%RA	Mistura asfáltica reciclada. Produzida e compactada em laboratório. Separação do material em peneiras específicas.
CPA_CAMPO	Coletada na usina no momento da aplicação em campo. Compactada em laboratório.

Fonte: Elaborado pela autora.

### 2.5.2 Ensaios mecânicos e funcionais

O comportamento das misturas asfálticas CPA\_REF, CPA\_15%RA e CPA\_CAMPO foi avaliado por meio dos ensaios exigidos em norma, que são desgaste

Cântabro e RT, bem como foi feita a verificação do Vv (cujos resultados já foram apresentados na Seção 2.5.1). Nas misturas asfálticas CPA\_REF e CPA\_15%RA também foi realizado o ensaio de MR. Para a CPA\_CAMPO, dispunham-se de 3 CP, dos quais 2 foram destinados ao ensaio de RT e 1 foi ensaiado quanto ao desgaste Cântabro. Para a CPA\_REF, foram produzidos 6 CP, 4 para o ensaio de RT e 2 para o ensaio de desgaste Cântabro. Para a CPA\_15%RA, foram produzidos CP em triplicata para a realização da dosagem (segundo o critério do Vv), os quais foram ensaiados quanto à RT. Além disso, posteriormente, foram produzidas 6 réplicas dessa mistura no teor de projeto, das quais 2 foram utilizadas para o ensaio de desgaste Cântabro e 4 foram adicionadas à amostragem da RT no teor de projeto. Com a produção dessas réplicas pretendia-se, de certa forma, aumentar o número de amostras da mistura asfáltica reciclada para minimizar os efeitos da variabilidade nos resultados dos ensaios de laboratório nas conclusões a serem retiradas na presente pesquisa. Tanto para a CPA\_REF quanto para a CPA\_15%RA, para a obtenção do MR, foram ensaiados 2 CP dentre os 4 destinados ao ensaio de RT. As quantidades de amostras para CPA\_REF e CPA\_15%RA são resumidas na Tabela 9.

A avaliação da mistura asfáltica reciclada proposta também foi realizada quanto ao método de compactação. Para isso, com a massa solta utilizada para medir a  $G_{mm}$  da mistura asfáltica reciclada, foram moldados CP, em duplicata, no compactador giratório Superpave com 50 giros, quantidade recomendada pela especificação americana para que se obtenha uma mistura asfáltica com elevado Vv.

Tabela 9 — Amostragem utilizada para avaliação das misturas asfálticas CPA\_REF e CPA\_15%RA

Ensaio de laboratório	Norma	Quantidade de amostras	Tipo de amostra
Resistência à Tração (RT)	DNIT 136/2018 – ME	4	CP Marshall
Módulo de Resiliência (MR)	DNIT 135/2018 - ME	2*	CP Marshall
Desgaste Cântabro	DNER-ME 383/99	2	CP Marshall
Volume de vazios (Vv)	DNER-ME 117/94	4	CP Marshall

\* Foram utilizados os mesmos CPs para o ensaio de RT

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a avaliação das misturas CPA\_M1 e CPA\_M2, foi definido um novo plano de amostragem, pois outros ensaios foram incluídos na análise. Os ensaios mecânicos considerados foram aqueles definidos pela ES 386 (DNER, 1999), RT e Cântabro. Em relação à volumetria do material, foi realizada a verificação do Vv para todos os CPs produzidos. Para a obtenção desse parâmetro, foi necessária a obtenção da  $G_{mm}$ . Por fim, para realizar a avaliação

funcional da mistura, foi utilizado o ensaio de Vc. A Tabela 10 apresenta esse plano experimental em detalhes.

Tabela 10 — Plano experimental de laboratório para as misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2

Ensaio de laboratório	Norma	Quantidade de amostras	Tipo de amostra
Resistência à Tração (RT)	DNIT 136/2018 – ME	8	CP Marshall
Desgaste Cântabro	DNER-ME 383/99	3	CP Marshall
Volume de vazios (Vv)	DNER-ME 117/94	11	CP Marshall
Vazios comunicantes (Vc)	NF P98-254-2 (1993)	8	CP Marshall
Massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ )	AASHTO T 209 (2015)	2	Amostra solta

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme exposto na Tabela 10, para os ensaios de RT das misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2 foram utilizados 8 CP. Para o ensaio de desgaste Cântabro foram produzidos CP em triplicata. O ensaio de Vc foi realizado em 8 desses 11 CP. Inicialmente, havia sido previsto a moldagem de 5 CP para a realização do ensaio de MR, que, posteriormente, seriam rompidos no ensaio de RT. Como o ensaio de MR requer o valor de RT como *input*, 3 CPs a mais foram preparados com a finalidade de se obter a RT, totalizando 8 CP para este ensaio. No entanto, o ensaio de MR não foi realizado devido a problemas técnicos no equipamento. Em suma, foram produzidos 11 CP para cada uma das misturas asfálticas avaliadas. Já para a determinação da  $G_{mm}$ , foram utilizadas 2 amostras soltas.

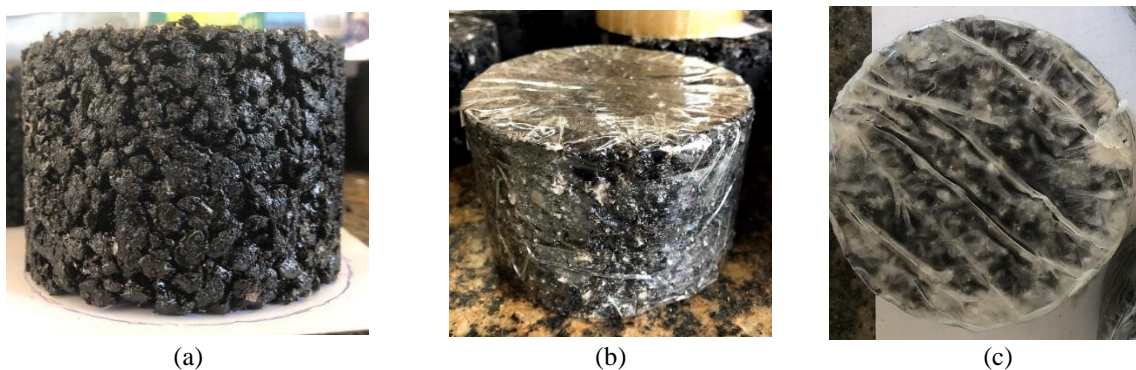
### 2.5.3 Volume de vazios (Vv)

Destaca-se que, quando da determinação da densidade aparente, a norma DNER-ME 117/94 estabelece que, para CP com Vv acima de 10%, que é o caso da CPA, são necessárias algumas operações além das pesagens do CP ao ar e imerso em água (pesagem hidrostática), que são suficientes para a determinação do Vv de CP com Vv de até 7%. No caso de misturas asfálticas do tipo CPA, o CP também deve ser pesado envolvido em fita adesiva e, posteriormente, envolvido com fita adesiva e parafina, como mostra a Figura 4. Por fim, ainda com o CP envolvido nesses materiais, deve ser feita a pesagem hidrostática. Com essas pesagens e com as densidades da fita adesiva e da parafina, é possível obter-se a densidade aparente do CP ( $G_{mb}$ ). A partir da Equação 1, calcula-se, então o Vv.

$$Vv = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (1)$$

A parafina utilizada foi aquecida a temperatura suficiente para que se tornasse visivelmente fluida. Logo após, esta foi colocada para resfriar até cerca de 80 °C, quando os CPs envolvidos com fita adesiva já podiam ser mergulhados nesse material sem danificar a fita adesiva. A massa específica da fita adesiva, informada pelo fabricante, foi de 0,92 g/cm<sup>3</sup>, e a da parafina foi de 0,9 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 4 — CPs preparados para pesagem a) ao ar, b) envolvido com fita adesiva e c) envolvido com fita adesiva e parafina para determinação do Vv



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 2.5.4 Desgaste Cântabro

De acordo com a norma DNER-ME 383/99, o ensaio de desgaste Cântabro deve ser realizado no equipamento utilizado para a realização do ensaio de abrasão Los Angeles sem o uso da carga abrasiva (esferas de aço). O CP deve ser inserido no tambor e a máquina deve realizar 300 revoluções deste, a uma velocidade de 30rpm. a 33rpm, à temperatura de 25°C. O CP deve ser pesado antes e após a realização do ensaio. O desgaste da mistura asfáltica com polímero (ensaio Cântabro), é calculado com o uso da Equação 2. O resultado final deste ensaio é a média aritmética dos resultados de três CPs, e os valores individuais não devem diferir  $\pm$  20% do valor médio.

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad (2)$$

Onde,

A: desgaste da mistura asfáltica contendo asfalto-polímero;

P: peso do CP antes do ensaio;

P': peso do CP após o ensaio.

### 2.5.5 Resistência à Tração (RT)

O ensaio de RT, também conhecido por ensaio brasileiro, normatizado pela DNIT 136/2018 – ME, consiste na aplicação de carregamento de compressão, em planos paralelos e diametralmente opostos de um CP cilíndrico, como é mostrado na Figura 5. As forças aplicadas geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. A RT indireta do CP é equivalente a essa tensão de tração, dada pela Equação 3.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3)$$

Onde,

$\sigma_R$ : resistência à tração (em MPa);

F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro do CP, em mm;

H: altura do CP, em mm.

Figura 5 — CP cilíndrico posicionado na prensa utilizada para a realização do ensaio de RT



Fonte: Elaborado pela autora.

A norma DNIT 136/2018 – ME determina que o CP deve ser mantido em ambiente com temperatura controlada de  $25 \pm 0,5$  °C por um período de 4 horas antes da realização do ensaio. A altura e o diâmetro do CP devem ser medidos em 4 posições equidistantes e distintas, respectivamente. Após esses procedimentos, o CP deve ser colocado entre os frisos metálicos de um dispositivo centralizador, com sua superfície cilíndrica entre estes. Os pratos da prensa mecânica devem ser ajustados de modo a haver uma leve compressão do CP, capaz de mantê-lo na posição ajustada de ensaio. É, então, aplicada progressivamente carga vertical de compressão, com velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que haja ruptura completa do CP em duas partes, segundo o plano diametral vertical. A RT da amostra da mistura asfáltica é a média aritmética dos valores obtidos de 3 CP. A variação dos valores individuais e a média desses deve estar em um intervalo de  $\pm 10\%$ .

### 2.5.6 Módulo de Resiliência (MR)

O ensaio consiste na aplicação repetida de uma carga diametral vertical em um CP cilíndrico, que gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga. O deslocamento diametral recuperável gerado na direção horizontal é, então, medido por sensores denominados *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs) e registrado em um sistema de aquisição de dados. A disposição do CP no aparato para realização do ensaio é mostrada na Figura 6.

Figura 6 — CP posicionado na prensa para a realização do ensaio de MR, com LVDT



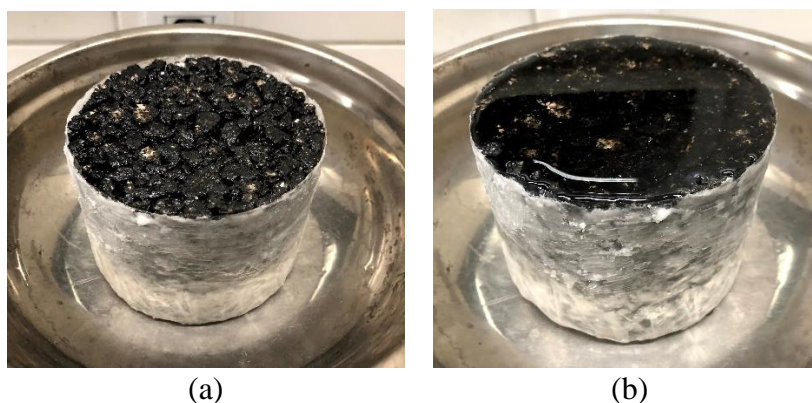
Fonte: Elaborado pela autora.

A norma brasileira que rege a realização desse ensaio em misturas asfálticas é a DNIT 135/2018 – ME. Por esse método, o MR de misturas asfálticas é determinado geralmente à 25 °C. Cada ciclo do carregamento tem duração de 1,0 s (frequência de 1 Hz), durante o qual é aplicado um pulso de carga de forma aproximadamente semi-senoidal de duração de 0,1 s, seguido de 0,9 s de repouso. A norma exige o condicionamento do CP, por um período mínimo de 4 h, à temperatura de  $25 \pm 0,5$  °C. A carga do ensaio deve estar entre 5% e 25% da RT, obtida a partir da realização de ensaios em CPs com as mesmas características.

### 2.5.7 Vazios comunicantes

Esse ensaio é normatizado pela norma francesa NF P98-254-2 (1993). O ensaio consiste em verter água pela face superior do CP para que esta penetre seu interior, enquanto as demais faces estão vedadas com fita adesiva e parafina. A água deve ser despejada aos poucos, até que uma película de água na face superior do CP mantenha-se constante durante 10 minutos. Na Figura 7a, é mostrado um CP com as faces lateral e inferior impermeabilizadas, pronto para o início do ensaio. Na Figura 7b é mostrado o CP durante a realização do ensaio, com a película d'água em sua face superior. A porcentagem de Vc é obtida pela Equação 4. O limite mínimo de Vc estabelecido pela norma francesa para esse ensaio é 10%.

Figura 7 — CP a) antes do início do ensaio e b) durante o ensaio de Vc



Fonte: Elaborado pela autora.

$$Vc = \left( \frac{P_{ab}}{A_f \times h_{redu}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde,

Vc: volume de vazios comunicantes (%);

P<sub>ab</sub>: peso de água absorvida (g);



$A_f$ : área da face superior (cm<sup>2</sup>);

$H_{redu}$ : altura reduzida (cm).

A altura reduzida é calculada pela Equação 5.

$$h_{redu} = h_m - \left( \frac{D_{m\acute{a}x}}{20} \right) \quad (5)$$

Onde,

$h_m$ : altura média do CP (cm);

$D_{m\acute{a}x}$ : diâmetro máximo do agregado (cm).

## 2.6 Resultados e discussão

### 2.6.1 Volume de vazios

Os Vvs das misturas CPA\_M1 e CPA\_M2 foram obtidos para todos os 22 CPs produzidos (11 para cada mistura asfáltica). A Tabela 11 contém o resumo dos resultados encontrados para o Vv dessas misturas asfálticas, em termos de média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV), bem como a  $G_{mm}$  dessas misturas asfálticas, necessária para o cálculo desse parâmetro.

Tabela 11 — Resultados Vv e  $G_{mm}$  para as misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2

Mistura asfáltica	Vv			$G_{mm}$
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	
CPA_M1	17,1	2,9	16,8	2,445
CPA_M2	21,6	1,4	6,5	2,464

Fonte: Elaborado pela autora.

É importante destacar que para a mistura asfáltica CPA\_M1, dos 11 CPs, 7 estavam com o Vv abaixo do valor mínimo de 18% exigido pela ES 386 (DNER, 1999). Já para a mistura asfáltica CPA\_M2, todas as amostras estavam com o Vv dentro do intervalo exigido por norma. Outro ponto observado foi a maior dispersão dos resultados encontrada para a mistura asfáltica CPA\_M1 em relação à CPA\_M2, em termos de DP e CV. Com relação a esse último parâmetro, que expressa em porcentagem o DP em relação à média, o valor obtido para CPA\_M1 foi cerca

de 2,5 vezes maior do que aquele obtido para CPA\_M2, o que mostra que houve maior dispersão para os valores encontrados para a primeira mistura asfáltica em relação à segunda.

A maior dispersão do Vv obtida para CPA\_M1 (CV de 16,8%) em relação à CPA\_M2 (CV de 6,5%) pode ser resultado de adaptações realizadas no processo de produção dos CPs, como a diminuição da temperatura de compactação devido à desagregação do material. Um maior número de amostras seria necessário para avaliar se, de fato, essas diferenças são estatisticamente significantes. Por outro lado, os valores de  $G_{mm}$  para as duas misturas asfálticas foram próximos, com uma diferença de 0,02. Esses valores foram considerados próximos porque, para a norma que estabelece o método de ensaio para obtenção desse parâmetro, AASHTO T 209 (2015), as amostras utilizadas em um ensaio não devem divergir  $\pm 0,02$  da média entre elas, o que mostra que os valores de  $G_{mm}$  encontrados para CPA\_M1 e CPA\_M2 são próximos.

Quanto às misturas asfálticas CPA\_REF e CPA\_CAMPO, cujos teores de ligante asfáltico são 4,5% e 4,2%, respectivamente, os Vv foram apresentados na seção 2.5.1 (Tabela 7), e são, respectivamente, 21,3 e 22,2%. Esses valores são próximos entre si como também são próximos àquele encontrado para CPA\_M2 (21,6%), cujo teor de ligante asfáltico é de 4,3%. No entanto, embora a mistura asfáltica CPA\_M1 apresente curva granulométrica e teor de projeto (4,3%) semelhante a todas essas misturas asfálticas, o resultado encontrado para seu Vv foi 17,1%, o que a torna diferente das demais. Novamente, chama-se atenção para as adaptações no processo produtivo que já foram comentadas anteriormente, que podem ter sido a causa dessa diferença, já que os demais parâmetros das misturas asfálticas são semelhantes. Por fim, para a mistura asfáltica reciclada, CPA\_15%RA (4,5% de ligante asfáltico), o resultado do Vv foi de 21,8%, conforme apresentado na Tabela 7. Além desses resultados, o Vv médio obtido para 4 CPs das réplicas produzidas para essa mistura asfáltica foi de 22,3%, o que resulta em uma média de 22,1% considerando-se os 7 CPs. Percebe-se que o valor desse parâmetro atendeu às exigências da norma, dado que este ficou próximo ao Vv alvo (22%) e ao Vv das demais misturas asfálticas virgens analisadas, à exceção de CPA\_M1.

### **2.6.2 Desgaste Cântabro**

Para as misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2, o ensaio de desgaste Cântabro foi realizado em 3 amostras. Na Tabela 12 são mostrados os resultados obtidos. Os resultados estão dentro do limite estabelecido pela norma da CPA (< 25%).

Tabela 12 — Resultados do ensaio de desgaste Cântabro para CPA\_M1 e CPA\_M2

Mistura asfáltica	Desgaste Cântabro (%)			
	CP1	CP2	CP3	Média
CPA_M1	15	9	6	10
CPA_M2	15	12	15	14

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados do ensaio de desgaste Cântabro para as misturas asfálticas CPA\_REF, CPA\_CAMPO e CPA\_15%RA estão resumidos na Tabela 13. Observa-se que a CPA\_RA foi a que apresentou o maior valor de perda (22,5%), ainda que inferior ao limite de 25%. Quando se compara essa mistura asfálticas com a de referência (CPA\_REF), observa-se que a presença de ligantes asfálticos com diferentes níveis de envelhecimento na CPA\_15%RA pode ser a causa desse maior desgaste na mesma, apesar de não ser possível afirmar de maneira conclusiva com a quantidade de observações que se dispõe que essa diferença é, estatisticamente, significativa. A CPA\_CAMPO, retirada diretamente da usina, apresentou o menor valor de desgaste. Supõe-se que isso pode ter ocorrido devido ao processo de usinagem em grande escala, que pode ser mais eficiente quanto à interação do AMP com os agregados, o que pode também contribuir para o melhor comportamento com relação a esse aspecto. Além disso, o fato de essa mistura asfáltica não conter fresado em sua composição pode ter contribuído para que a mesma apresentasse uma maior resistência ao desgaste.

Tabela 13 — Resultados do ensaio de desgaste Cântabro para CPA\_CAMPO, CPA\_REF e CPA\_15%RA

CP	CPA_CAMPO	CPA_15%RA	CPA_REF
	Desgaste Cântabro (%)	Desgaste Cântabro (%)	Desgaste Cântabro (%)
CP1	10,0	23,0	17,0
CP2	-	22,0	19,0
Média	-	22,5	18,0

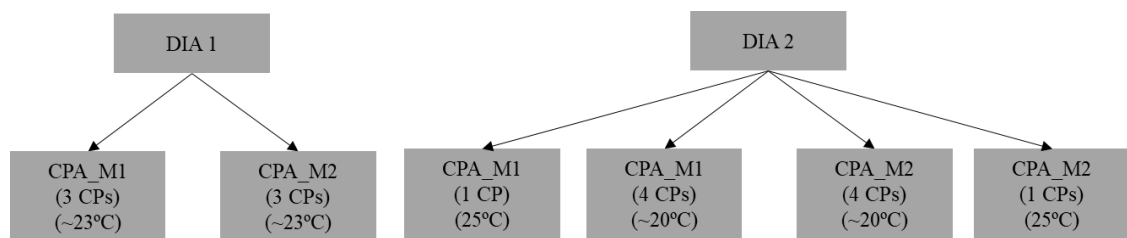
Fonte: Elaborado pela autora.

Todas as misturas asfálticas avaliadas nesse estudo atenderam ao critério da perda de massa no ensaio de desgaste Cântabro (inferior a 25%). No entanto, embora todas essas misturas asfálticas sejam semelhantes entre si quanto à granulometria e ao teor de ligante asfáltico, percebe-se que os resultados desse ensaio foram muito variáveis (um chegou a ser quase o dobro do outro). A exemplo disto, citam-se a média de 10% para CPA\_M1 e a média de 18% para CPA\_REF.

### 2.6.3 Resistência à Tração (RT)

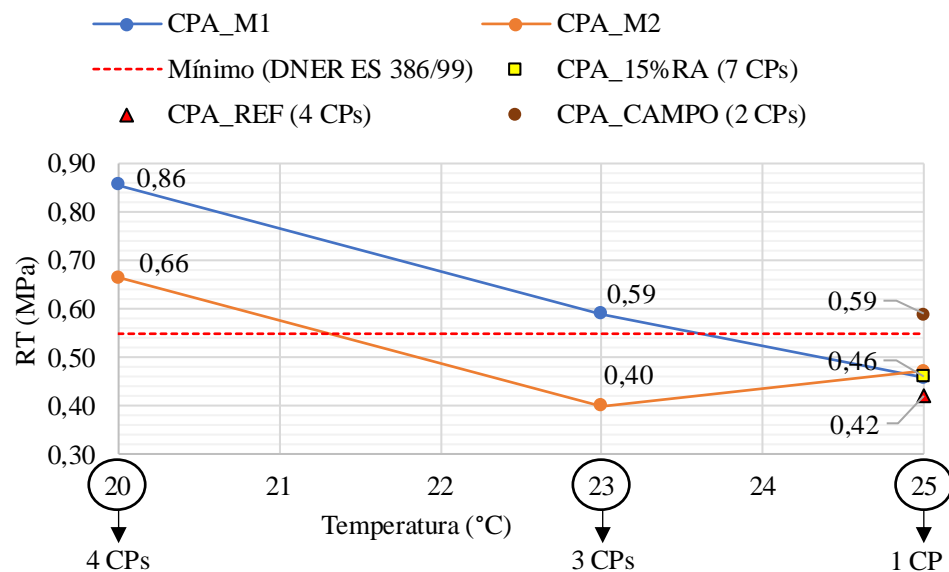
Para o ensaio de RT foram previstos 8 CPs no plano experimental para cada uma das misturas CPA\_M1 e CPA\_M2. No entanto, após o rompimento de alguns CPs (referentes a uma das misturas asfálticas), foi detectado um problema na estabilização de temperatura na câmara onde esses foram condicionados. Por esse motivo, para que os resultados dos CPs já rompidos não fossem perdidos, decidiu-se por condicionar, para a outra mistura, a mesma quantidade de CPs já rompidos, sob as mesmas condições. Assim, ao invés do ensaio ter sido realizado a 25°C em todos os CPs, as temperaturas de condicionamento (aproximadas) variaram e são mostradas na Figura 8. Os ensaios foram realizados em dois dias diferentes. Os resultados para cada CP estão apresentados na Tabela 14, e as médias dos resultados, na Figura 9.

Figura 8 — Temperaturas de condicionamento dos CPs para o ensaio de RT



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 — Resultados dos ensaios de RT



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 14 — Resultados de RT para as misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2

Mistura asfáltica	Temperatura							
	~23 °C		~20 °C				25 °C	
	RT (MPa)							
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
CPA_M1	0,50	0,63	0,64	0,85	0,85	0,87	0,86	0,46
CPA_M2	0,39	0,41	0,39	0,69	0,62	0,68	0,67	0,47

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se, pela Figura 9, a sensibilidade da RT à variação da temperatura. Nas temperaturas de 20 e 23 °C, para as quais foram ensaiadas um maior número de amostras (4 e 3, respectivamente), a mistura asfáltica CPA\_M1 apresentou RT médio 30 e 47,5%, respectivamente, superior ao de CPA\_M2. No entanto, na temperatura de 25 °C, para a qual só foi possível ensaiar 1 CP de cada uma das referidas misturas asfálticas, o resultado foi muito próximo (0,46 MPa para CPA\_M1 e 0,47 MPa para CPA\_M2).

Os resultados do ensaio de RT para as demais misturas asfálticas avaliadas no presente estudo também estão apresentados na Figura 9. Para CPA\_15%RA, o valor médio de RT foi 0,46 MPa, obtido a partir do ensaio em 7 CPs (3 oriundos da dosagem e 4 réplicas). Já para CPA\_REF, o valor médio de RT (calculado a partir do ensaio em 4 CPs) foi de 0,42 MPa. Por fim, a mistura asfáltica CPA\_CAMPO apresentou RT médio (dos ensaios em 2 CPs) de 0,59 MPa. Os resultados individuais de cada CP dessas três misturas asfálticas são mostrados na Tabela 15. Apesar da limitação quanto à quantidade de amostras para a realização do ensaio na temperatura normatizada (25 °C) em CPA\_M1 e em CPA\_M2, os ensaios realizados na mistura asfáltica virgem semelhante (CPA\_REF, enquadrada na mesma faixa granulométrica e com praticamente o mesmo teor de ligante asfáltico), que variaram de 0,38 MPa a 0,50 MPa e apresentaram valor médio de 0,42 MPa, adicionam certa confiança de que o valor de RT encontrado para CPA\_M1 e CPA\_M2 à 25 °C está próximo ao seu valor médio real. Os resultados de RT para CPA\_15%RA produzidas com outros teores de ligante asfáltico são apresentados na seção 2.6.6.1.

Tabela 15 — Resultados de RT para as misturas asfálticas CPA\_15%RA, CPA\_REF e CPA\_CAMPO

Mistura asfáltica	RT (MPa)							
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	Média
CPA_15%RA	0,43	0,52	0,47	0,45	0,49	0,48	0,38	0,46
CPA_REF	0,42	0,50	0,38	0,38	-	-	-	0,42
CPA_CAMPO	0,52	0,66	-	-	-	-	-	0,59

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados do ensaio de RT obtidos para as misturas asfálticas virgens e para a mistura asfáltica contendo fresado em sua composição mostram que a maioria dos valores encontrados estão abaixo do mínimo exigido pela norma brasileira para CPA (0,55 MPa). Dessa forma, a presença do fresado não parece ser o fator a comprometer o comportamento dessas misturas asfálticas. Na verdade, o valor médio de RT encontrado para a mistura reciclada, com base em uma quantidade maior de amostras, foi superior (0,46 MPa) àqueles encontrados para as misturas asfálticas virgens usinadas e compactadas em laboratório. Quanto à mistura asfáltica oriunda da usina asfáltica e compactada em laboratório, que foi a única que atendeu ao requisito da norma para esse parâmetro, acredita-se que o processo de usinagem em grande escala foi o fator responsável pelo melhor desempenho, como já comentado na seção 2.6.2, referente ao desgaste cântabro.

#### 2.6.4 Módulo de Resiliência (MR)

Os resultados do ensaio de MR foram obtidos para 2 CPs para cada uma das misturas asfálticas CPA\_REF e CPA\_15%RA. Os resultados estão apresentados na Tabela 16. Conforme já comentado anteriormente, não foi possível realizar esse ensaio para as demais misturas asfálticas devido a problemas no equipamento. Os resultados obtidos apresentaram uma diferença da ordem de 200 MPa entre os valores médio de RT das misturas asfálticas virgem e reciclada avaliadas, que pode ser considerada pequena, levando-se em consideração que dentre os CPs da CPA\_REF ensaiados houve uma diferença superior a 1000 MPa. Um maior número de amostras seria necessário para que se pudesse concluir se a presença do fresado é responsável por algum aumento no valor desse parâmetro, como é esperado, devido ao aumento da rigidez do ligante asfáltico envelhecido na mistura asfáltica reciclada.

Tabela 16 — Resultados de RT para as misturas asfálticas CPA\_15%RA e CPA\_REF

Mistura asfáltica	CP1	CP2	Média (MPa)
CPA_15%RA	2675,0	2768,0	2721,5
CPA_REF	2212,0	3617,0	2914,5

Fonte: Elaborado pela autora.

Recorreu-se à literatura para se verificar a ordem de grandeza do MR de outras misturas asfálticas do tipo CPA. Em Motta *et al.* (2010), misturas asfálticas produzidas utilizando-se um AMP (FlexPave 65/90), no teor de 4,5%, de curva granulométrica próxima à faixa II (ver curva granulométrica de 9,5 mm do Arizona para CPA, na seção 2.6.6.1) utilizada

no presente estudo, e compactadas pelo método Marshall com 50 golpes, o valor médio de MR encontrado foi de 1805 MPa. Já no trabalho de Alves (2019), misturas asfálticas enquadradas nas faixas IV e V do DNER, produzidas com teor de ligante asfáltico de 4,5% forneceram valores médios de MR de, respectivamente 6098 e 5219 MPa. Percebe-se, então, a variabilidade desse parâmetro, a depender da faixa granulométrica utilizada. Segundo Motta *et al.* (2010), em função do seu elevado Vv, a CPA apresenta maior flexibilidade (MR < 2000 MPa) quando comparada com misturas asfálticas densas.

### 2.6.5 Vazios comunicantes

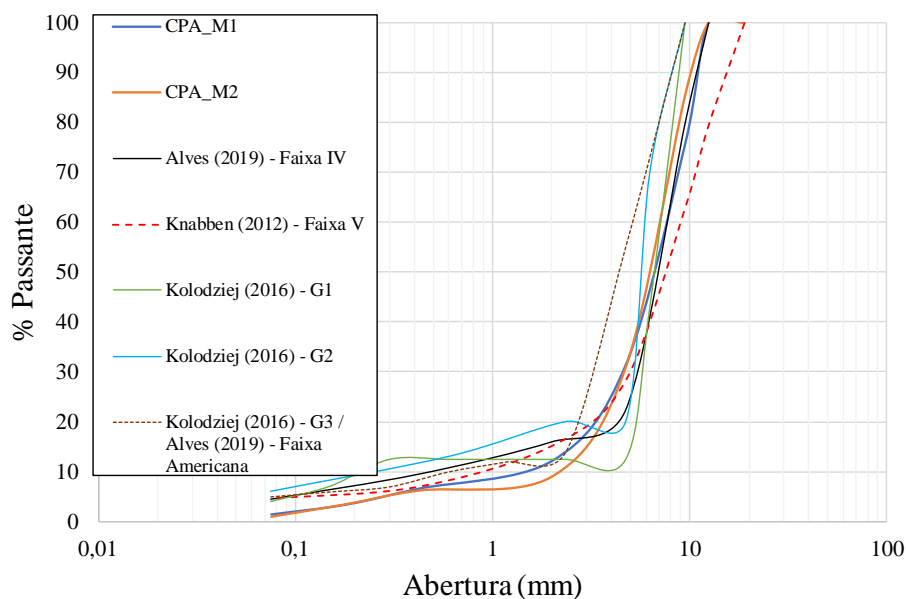
O ensaio de vazios comunicantes foi realizado em 8 amostras de cada uma das misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2. Na Tabela 17 são mostrados os resultados obtidos na presente pesquisa, como também resultados encontrados na literatura, referentes a misturas projetadas com outras faixas granulométrica de CPA. As curvas granulométricas dessas misturas asfálticas são apresentadas na Figura 10.

Tabela 17 — Resultados do ensaio de Vc para as misturas asfálticas do tipo CPA

Referência	Mistura asfáltica	Teor de ligante (%)	Vc (%)								Média
			CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	
Autora	CPA_M1	4,3	3,53	3,33	3,20	3,18	3,63	3,00	1,56	2,85	3,03
	CPA_M2	4,3	4,45	4,29	4,32	5,29	4,14	3,59	4,19	3,90	4,27
Knabben (2012)	CPA Faixa V	4,3	-	-	-	-	-	-	-	-	14,27
	CPA Faixa IV	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	16,52
Alves (2019)	CPA Faixa V	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	16,3
		4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	14,19
	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	11,31	
	Faixa americana	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	14,04
		4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	16,45
Kolodziej (2016)	CPA G1	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-	17,43
	CPA G2	5,5	-	-	-	-	-	-	-	-	13,85
	CPA G3	5,5	-	-	-	-	-	-	-	-	12,78

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 10 — Curvas granulométricas de algumas CPAs encontradas na literatura



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que os resultados encontrados para as misturas asfálticas aqui estudadas são inferiores (até 5,4 vezes) aos valores encontrados na literatura para outras faixas granulométricas de CPA, com teores de ligante asfáltico semelhantes ao teor de projeto (4,3%) encontrado para essas misturas. No caso da mistura asfáltica enquadrada na faixa V de Knabben (2012), o valor médio de  $V_c$  foi 4,7 e 3,3 vezes maior que o valor de  $V_c$  encontrado para CPA\_M1 e CPA\_M2, respectivamente. Comparando-se as misturas asfálticas enquadradas na faixa V no estudo conduzido por Alves (2019), cuja curva granulométrica é semelhante àquela utilizada por Knabben (2012) e, portanto, não foi mostrada na Figura 10, resultados semelhantes para o teor de ligante asfáltico de 4,0% foram encontrados. No entanto, para o teor de ligante asfáltico de 4,5%, o  $V_c$  é 11,31%.

Para a mistura asfáltica enquadrada na faixa IV utilizada no trabalho de Alves (2019), que é, visualmente, a que tem granulometria mais próxima daquelas utilizadas nas misturas CPA\_M1 e CPA\_M2, apresentadas na Figura 10, os resultados de  $V_c$  ficaram em torno de 16,3%. As misturas asfálticas G1, G2 e G3 estudadas por Kolodziej (2016), produzidas com teores de ligante asfáltico de, respectivamente, 6,0%, 5,5% e 5,5%, apresentaram  $V_c$  de 17,43%, 13,85% e 12,78%. Essas últimas misturas asfálticas, mesmo com teor de ligante asfáltico de até 1,50% a mais do que aqueles utilizados para as misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2, apresentaram valores de  $V_c$  de até 5,7 e 4,1 vezes superior àqueles obtidos para CPA\_M1 e CPA\_M2, respectivamente.



Diante da comparação dos resultados encontrados no presente estudo com aqueles encontrados na literatura para o parâmetro  $V_c$ , percebe-se que este é sensível à variação da faixa granulométrica e ao teor de ligante asfáltico. As misturas asfálticas CPA\_M1 e CPA\_M2, avaliadas no presente estudo, apresentam  $V_c$  de 3,03% e 4,27%, respectivamente, ambos inferiores ao limite mínimo estabelecido pela norma francesa que rege esse ensaio (10%). Percebe-se, pela Figura 10, que a principal diferença entre as curvas granulométricas dessas misturas asfálticas e as das demais está nos percentuais das frações retidas nas peneiras inferiores a 2,0 mm. A modificação das porcentagens de material passante nessas peneiras pode ser um ponto chave para se propor o aumento dos  $V_c$  das misturas asfálticas enquadradas na faixa II.

### ***2.6.6 Avaliação do comportamento da mistura asfáltica reciclada segundo a variação do método de compactação e do teor de ligante asfáltico***

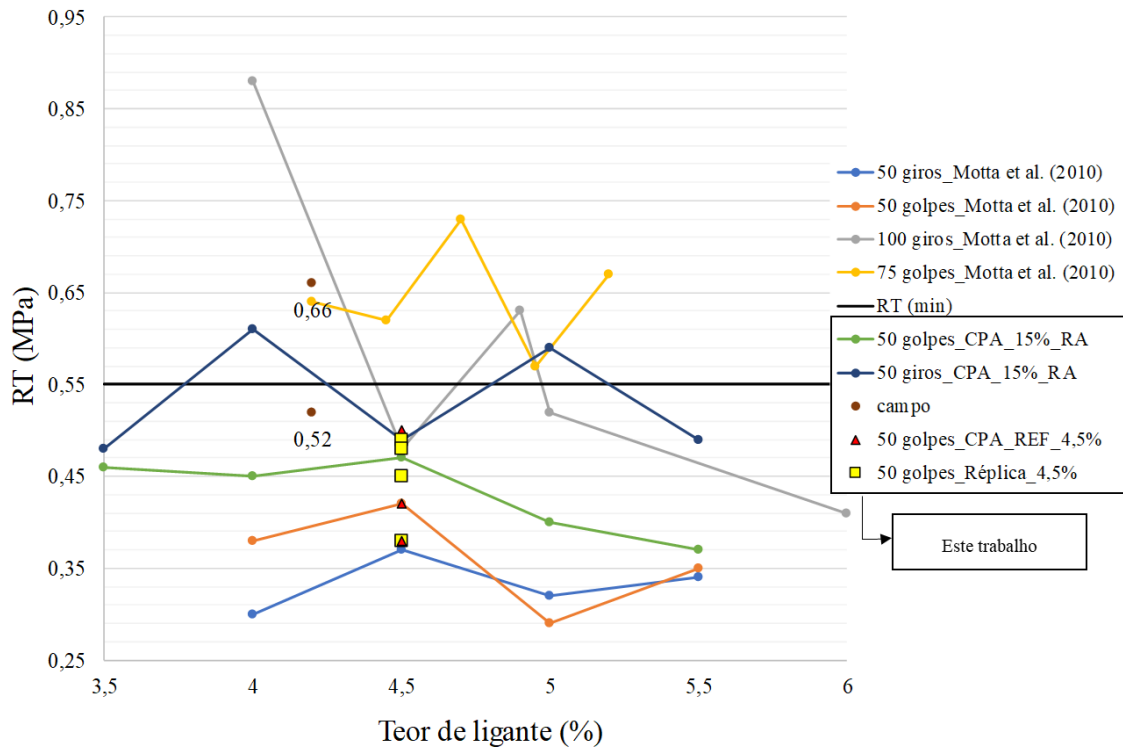
#### ***2.6.6.1 Resistência à Tração (RT)***

Nessa seção são comparados os resultados do ensaio de RT realizado nos CPs (i) compactados seguindo a metodologia Marshall utilizada na dosagem (CPA\_15%RA) e na produção das réplicas no teor de projeto, (ii) compactados com o uso do compactador giratório Superpave (CPA\_15%RA) e (iii) naqueles referentes às amostras oriundas de campo (CPA\_CAMPO), também compactados pelo método Marshall. As médias dos resultados são apresentadas na Figura 11. Como pode-se perceber, os valores de RT obtidos para as amostras da CPA\_15%RA que foram compactadas utilizando a metodologia Marshall apresentaram-se abaixo do valor mínimo (0,55 MPa) exigido por norma, variando de 0,47 MPa a 0,37 MPa para os teores de ligante asfáltico de 4,5% e 5,5%, respectivamente.

Para a compactação giratória, apenas as médias da RT para os teores de ligante asfáltico de 4,0% e 5,0% apresentaram valores acima do mínimo (0,55MPa), sendo de 0,61 e 0,59 MPa, respectivamente. No entanto, para esse método de compactação, os resultados de RT para todos os teores de ligante foram superiores (até 47,5%, para o teor de 5% de ligante) àqueles encontrados para as amostras compactadas pelo método Marshall. As duas amostras oriundas de campo, por sua vez, apresentaram valores de RT de 0,52MPa e 0,66MPa, média de 0,59MPa, maior, pois, que o mínimo exigido em norma. Percebe-se uma certa tendência de a mistura asfáltica oriunda de campo apresentar propriedades superiores às das demais misturas

asfálticas avaliadas neste trabalho, pois, conforme já comentado, acredita-se que a usinagem em grande escala proporciona uma interação mais eficiente do AMP com os agregados.

Figura 11 — Resultados de RT em função do teor de ligante asfáltico para CPAs investigadas nesse trabalho e na literatura



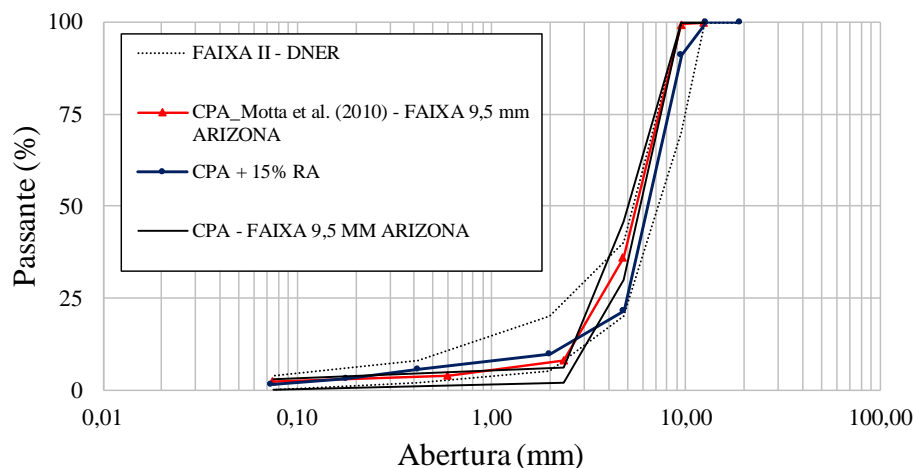
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 11, além dos resultados obtidos no presente trabalho, também foram plotados valores referentes a outras CPA encontradas no trabalho conduzido por Motta *et al.* (2010). No referido trabalho, foram investigadas misturas asfálticas compactadas pelos métodos Marshall e Superpave, com variação do número de giros (50 e 100) e de golpes (50 e 75). A granulometria das misturas asfálticas investigadas na pesquisa mencionada anteriormente encaixa-se na faixa 9,5mm do Arizona para CPA e está representada na Figura 12, onde é possível perceber que a curva granulométrica referida também se encaixa na faixa II do DNER. Dessa forma, considerou-se que a comparação entre misturas asfálticas produzidas por Motta *et al.* (2010) e as da presente pesquisa é razoável.

Pela Figura 11 é possível perceber que a CPA\_15%RA apresentou valores de RT superiores àqueles encontrados para as misturas asfálticas produzidas com 50 giros e com 50 golpes por Motta *et al.* (2010), para os teores de ligante asfáltico de 4,0, 4,5, 5,0 e 5,5%, para os dois métodos de compactação utilizados na pesquisa. Enquanto que dentre essas misturas

produzidas por Motta *et al.* (2010) o valor máximo de RT foi de 0,42 MPa (para o teor de 4,5% de ligante e para a compactação Marshall com 50 golpes), na presente pesquisa o RT máximo dentre as misturas asfálticas com 50 golpes e com 50 giros foi de 0,61 MPa (para o teor de 4,0% de ligante e para a compactação com 50 giros). É importante ressaltar que os resultados obtidos nesta etapa da pesquisa no que diz respeito à eficiência da compactação giratória ser superior à Marshall não foi confirmada pelos resultados reportados por Motta *et al.* (2010), que apresentou tendência contrária. De fato, Nascimento (2008) concluiu que a energia de compactação Marshall não tem relação fixa com a energia utilizada durante a compactação Superpave, relação esta que depende do esqueleto pétreo da mistura asfáltica avaliada.

Figura 12 — Curvas granulométricas avaliadas em Motta *et al.* (2010) e utilizada para a mistura asfáltica reciclada avaliada no presente estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de RT para os CPs produzidos como réplicas são apresentados na Figura 11, juntamente com os resultados de RT já apresentados anteriormente. O valor médio de RT para esses CPs foi de 0,45 e foi, de fato, próximo àquele já obtido pela dosagem, cuja média foi de 0,47MPa. Quanto ao resultado encontrado para a CPA\_REF, em média, o RT foi 0,42MPa. Esse cenário pode ser devido à presença de ligante envelhecido na mistura reciclada, que tende a aumentar sua rigidez. Centofante *et al.* (2018) concluíram que os valores de RT aumentam conforme aumentou-se o teor de fresado em um CA denso. Os citados autores acreditam que esses resultados se deveram à presença do fresado, que, por sua vez, eleva a rigidez da mistura asfáltica.

A mistura asfáltica compactada com 75 golpes (Marshall) (Motta *et al.*, 2010) apresentou valores de RT que variaram de 0,57 MPa a 0,73 MPa, que são superiores ao mínimo

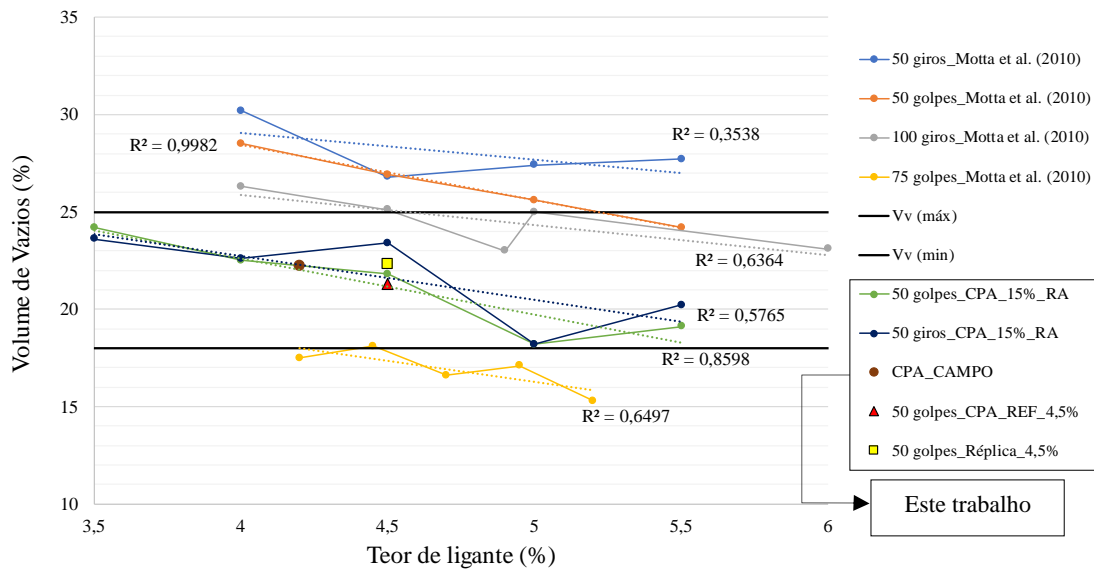
exigido em norma (0,55MPa), bem como são superiores aos valores encontrados para as demais misturas asfálticas apresentadas na Figura 11 e para a maioria das misturas com os teores de ligante asfáltico e os métodos de compactação testados. O maior esforço de compactação em laboratório – em relação à mesma mistura quando compactada com 50 golpes - pode ter contribuído para uma melhoria do intertravamento do esqueleto mineral, elevando a resistência da mistura asfáltica. Ainda assim, é importante verificar se está ocorrendo quebra de agregados e se a capacidade drenante da camada está sendo prejudicada. O aumento do número de giros durante a compactação Superpave (de 50 para 100), nas misturas asfálticas avaliadas por Motta *et al.* (2010), por sua vez, não conduziu a resultados conclusivos, as amostras apresentaram um comportamento variável para diferentes teores de ligante asfáltico e Vv.

#### 2.6.6.2 Volume de vazios (Vv)

A relação entre o Vv e o teor de ligante asfáltico foi avaliada para os dois métodos de compactação (Marshall e Superpave) estudados. Os resultados são mostrados na Figura 13, bem como os resultados referentes à análise conduzida por Motta *et al.* (2010). É possível perceber que os resultados de Vv para a CPA\_15%RA, em estudo, foram próximos quando os diversos teores de ligante asfáltico e os diferentes métodos de compactação foram utilizados. Já para as misturas asfálticas avaliadas por Motta *et al.* (2010) com 50 giros (Superpave) e 50 golpes (Marshall), esses valores foram mais distintos.

Embora no estudo conduzido por Motta *et al.* (2010) os resultados de RT tenham sido superiores quando a compactação Marshall (75 golpes) foi utilizada, percebe-se que o Vv ficou comprometido, variando entre 15,3 e 18,1%, o que não atinge os limites estabelecidos pela norma brasileira (mínimo de 18%). Também é possível perceber que o Vv é menos sensível à variação da compactação Superpave (de 50 para 100 giros) quando comparada à variação da compactação Marshall (de 50 para 75 golpes), o que é possível perceber na Figura 13 ao se observar a distância entre as linhas referentes a 50 e 100 giros comparada àquela entre as linhas referentes à 50 e 75 golpes. Por fim, verifica-se que os resultados oriundos da compactação Marshall têm maior correlação com o Vv se comparados àqueles oriundos da compactação giratória, conforme indicado pelos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mostrados ao lado das linhas de tendência da Figura 13.

Figura 13 — Resultados de Vv em função do teor de ligante asfáltico para várias CPAs avaliadas nesse estudo e presentes na literatura



Fonte: Elaborado pela autora.

Leandro *et al.* (2014) constataram que, mantidas as mesmas condições de temperatura de compactação e a distribuição granulométrica, os Vv de misturas asfálticas densas compactadas pelos métodos Marshall e Superpave (100 mm de diâmetro), a 75 golpes e 100 giros, respectivamente, são semelhantes e têm tendências parecidas (no que se refere à relação entre Vv e teor de ligante asfáltico). No caso de misturas asfálticas abertas, como é o caso da CPA, esse comportamento não foi observado ao serem comparadas as misturas asfálticas avaliadas no estudo conduzido por Motta *et al.* (2010) com utilização de 100 giros (compactação Superpave) e com utilização de 75 golpes (compactação Marshall).

Mallick *et al.* (2000) afirmam que 50 golpes na compactação Marshall em misturas asfálticas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) são equivalentes a 100 giros na compactação Superpave. Watson *et al.* (2003) recomendam compactação Superpave com 50 giros para misturas asfálticas porosas, baseado numa avaliação macroscópica de densidade, quebra de agregados e no contato grão-a-grão. No entanto, na Figura 13, o comportamento da CPA\_15%RA com as compactações de 50 golpes (Marshall) e 50 giros (Superpave) tanto apresenta a mesma tendência quanto é semelhante, em termos de Vv, visto que as curvas apresentadas na citada figura estão próximas. De fato, apesar da especificação ASTM D 7064-04 recomendar 50 giros para a compactação de misturas porosas, essa especificação também afirma que a compactação nessas misturas asfálticas pode ser realizada com outras formas de compactação, desde que esta forneça densidade compactada semelhante. Alvarez, Martin e

Estakhri (2011), no entanto, chamam atenção para o fato de que amostras compactadas de diferentes formas levam a diferenças na estrutura interna das misturas.

Um fato curioso observado em laboratório foi que a  $G_{mm}$  da CPA\_REF, que contém 4,5% de ligante asfáltico, foi mais próxima àquela da CPA\_15%RA com teor de 5,0% de ligante asfáltico do que daquela com 4,5%. Esses valores são 2,464 e 2,458, respectivamente, enquanto que para a mistura asfáltica reciclada com 4,5% de ligante asfáltico a  $G_{mm}$  foi 2,483. A hipótese levantada é que tal semelhança entre as densidades da CPA\_REF e da CPA\_15%RA com maior teor de ligante asfáltico - dado que as curvas granulométricas são próximas - pode ser devida à não mobilização completa do ligante asfáltico presente no fresado (ABED, THOM e LO PRESTI, 2018; KASEER, ARÁMBULA-MERCADO e MARTIN, 2019; LO PRESTI *et al.*, 2019). Isso vai contra a premissa aqui adotada de que o ligante asfáltico envelhecido teria sido 100% mobilizado.

De acordo com os resultados obtidos no estudo conduzido por Stephens, Mahoney e Dippold (2001), o tempo de aquecimento do fresado antes deste ser misturado aos materiais virgens tem efeito na RT e na resistência à compressão não confinada da mistura asfáltica. Os referidos autores variaram o tempo de pré-aquecimento do fresado de 0 a 540 minutos, o que indica que ocorre mistura entre ligantes asfálticos envelhecido e virgem. Assim, acredita-se que os tempos de mistura utilizados nesta etapa, entre os materiais virgens e o fresado, cerca de 2 a 3 minutos, não foram suficientes para que 100% de mobilização do ligante asfáltico envelhecido do fresado ocorresse.

## 2.7 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Foi avaliado o comportamento de uma CPA com 15% de fresado adicionado, conforme os requisitos da norma brasileira para este tipo de mistura. Verificou-se o Vv dos CPs e executaram-se os ensaios de RT e Cântabro, além de ensaios de MR. A mistura asfáltica reciclada foi comparada a misturas asfálticas virgens de referência, preparadas em laboratório, e a uma mistura asfáltica advinda diretamente da usina e compactada em laboratório utilizando o método Marshall. Além disso, amostras com diferentes teores de ligante asfáltico, compactadas com o uso de dois métodos de compactação (Marshall e Superpave), foram comparadas quanto à RT e ao Vv. Para algumas misturas asfálticas virgens também foi realizado o ensaio de Vc. Por fim, os resultados obtidos no presente estudo foram comparados àqueles encontrados em trabalhos já publicados na literatura (MOTTA *et al.*, 2010; KNABBEN, 2012; KOLODZIEJ, 2016; ALVES, 2019).

Observa-se que muitas misturas asfálticas do tipo CPA, inclusive misturas asfálticas convencionais (sem o uso de fresado), tanto as encontradas na literatura quanto as propostas neste trabalho, não atingiram o limite mínimo de 0,55 MPa para a RT. Observaram-se resultados superiores, em termos de RT, para as misturas asfálticas oriundas da usinagem e compactadas em laboratório, em relação àquelas misturadas e compactadas em laboratório, o que pode ser um indicativo de que o processo de mistura em usina seja mais eficiente. Os resultados do ensaio de desgaste Cântabro demonstram que, para as misturas recicladas, há uma perda nessa propriedade provavelmente devido à mistura entre o AMP e o ligante asfáltico envelhecido oriundo do fresado. As misturas asfálticas virgens avaliadas quanto à porcentagem de  $V_c$ , enquadradas na faixa II de CPA do DNER, forneceram valores em torno de 3 e 4% para esse parâmetro, que está abaixo do valor mínimo (10%) estabelecido pela norma francesa que rege o ensaio e que também está abaixo de valores encontrados na literatura para CPA de outras faixas granulométricas.

A utilização de 15% de fresado na composição da CPA no presente estudo originou resultados semelhantes àqueles encontrados em misturas asfálticas que utilizaram apenas materiais virgens, o que sugere que a proposta aqui apresentada pode ser promissora. Quanto aos métodos de compactação utilizados em laboratório, aqui estudados, observou-se tendência da obtenção de maiores valores de RT com a aplicação de 50 giros (Superpave) do que com a aplicação de 50 golpes (Marshall). O mesmo não foi verificado ao se comparar com os resultados obtidos por Motta *et al.* (2010). Assim, nota-se certa dificuldade de concluir sobre o tipo e o esforço de compactação que promovem melhores misturas asfálticas do ponto de vista da resistência mecânica sem prejuízos às propriedades volumétricas (e, conseqüentemente, à permeabilidade) da CPA. Embora as compactações Marshall e Superpave envolvam diferentes mecanismos de compactação e já tenha sido constatado em outros trabalhos (NASCIMENTO, 2008; ALVAREZ; MARTIN e ESTAKHRI, 2011) sobre esse tema que 50 giros e 50 golpes não sejam esforços equivalentes, nesse estudo obteve-se que, para esses níveis de compactação, a volumetria das amostras manteve-se similar para diferentes teores de ligante asfáltico testados. De fato, Nascimento (2008) e Alvarez, Martin e Estakhri (2011) afirmam que as compactações Marshall e Superpave não possuem relação fixa de energia e que esta depende do esqueleto pétreo/estrutura interna da mistura.

Por se tratar de um tipo de revestimento cuja principal função é drenar, a avaliação do impacto da utilização de teores de fresado na permeabilidade desta camada é importante. Levando-se em consideração os resultados obtidos neste estudo, é sugerida a aplicação de maior energia de compactação Marshall (75 golpes) em laboratório, a fim de verificar se há melhorias

na resistência mecânica da mistura asfáltica sem prejudicar sua volumetria. Para estudos futuros é recomendada a utilização de uma amostragem maior do que a utilizada no presente estudo, pois alguns ensaios aqui realizados apresentaram resultados muito variáveis ( $V_v$ , RT, MR, Cântabro). Como quantidade de partida fica sugerida a fabricação de 5 CPs para cada um desses ensaios, além da fabricação de 3 CPs para a verificação do RT que será utilizada como entrada no ensaio de MR. Além disso, problemas na execução dos experimentos ainda contribuíram para a redução do número de amostras em alguns desses ensaios ou acrescentaram variáveis ao estudo que deveriam ter sido mantidas constantes (como a temperatura de compactação de alguns CPs).

Outra sugestão para trabalhos futuros é a avaliação da incorporação de fresado em outras faixas granulométricas de CPA, sobretudo aquelas nas quais já tenham sido observadas altas porcentagem de Vc. Essa combinação seria interessante pensando-se em soluções sustentáveis para ambientes urbanos, já que estaria associando a utilização de material reciclado à utilização de misturas asfálticas que, em teoria, promovem reduções de ruído, melhoram a permeabilidade e favorecem o aumento do atrito pneu-pavimento (contribuindo para a melhoria da segurança viária). A caracterização dos Vc para a faixa II de CPA do DNIT, por si só, ainda é uma incógnita, pois não foram encontrados resultados referentes a esse parâmetro para essa faixa granulométrica na literatura. Quanto à análise realizada no presente trabalho, as dificuldades encontradas na produção dos espécimes de laboratório podem ter comprometido os resultados obtidos para esse parâmetro.

Por fim, para viabilizar a utilização de fresado em CPA é sugerida a investigação do uso de outros AMP, de maiores recuperações elásticas, como o 60/85 e o 65/90. Outra opção no que diz respeito ao ligante é o uso de asfalto-borracha. Quanto a modificações no material reciclado em si, a utilização de agentes rejuvenescedores pode ser uma boa opção. Encoraja-se a investigação dessas alternativas a fim de se obter dosagens que atendam a especificações de desagregação até mais restritas (que já são a realidade de algumas concessionárias brasileiras), do que aquela exigida em norma, respeitando-se o atendimento aos outros parâmetros, sobretudo o  $V_v$ .



### **3 ANÁLISE ESTRUTURAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO UTILIZADAS COMO REVESTIMENTOS DE VIAS URBANAS (CAPÍTULO 3)**

#### **3.1 Considerações iniciais**

Os benefícios funcionais da CPA são amplamente reconhecidos. Essas misturas asfálticas promovem aumento do atrito superficial especialmente em condições molhadas, redução do potencial de hidroplanagem, redução da formação de respingos e borrifos d'água, e melhores condições de visibilidade (HUBER, 2000; COOLEY *et al.*, 2009). Outro benefício da CPA é a redução do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento (HANSON, DONAVON e JAMES, 2005). A CPA possui vazios interconectados que promovem drenagem durante fortes eventos de chuva. As águas pluviais são drenadas verticalmente através da CPA para uma subcamada impermeável e depois lateralmente até a borda exposta da mesma (KANDHAL, 2002).

Em geral, não é atribuído valor estrutural às CPAs utilizadas nas estruturas dos pavimentos. Assim, normalmente, o revestimento de pavimentos que utilizam CPA, é composto por duas camadas, da seguinte forma: uma com função estrutural e a CPA, no topo, com função de promover benefícios funcionais. Segundo Cooley *et al.* (2009), a literatura fornece evidências de que camadas de CPA levam a menores temperaturas nas camadas subjacentes, o que leva a maiores rigidezes nessas camadas, fato que, por si só indica que a CPA acrescenta valor estrutural ao pavimento. Em um estudo conduzido pelo Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans), nos Estados Unidos, para avaliar as propriedades estruturais da CPA e de uma camada de base permeável tratada com material asfáltico, o mesmo coeficiente estrutural foi atribuído a ambas, sendo a CPA considerada estruturalmente equivalente a uma camada asfáltica densa (MOORE, 1989 *apud* KANDHAL, 2002).

Moore, Hicks e Rogge (2001) fornecem uma visão geral sobre o uso de CPA no estado do Oregon, sob uma perspectiva histórica, de projeto (da mistura asfáltica e estrutural do pavimento), de construção (com considerações sobre o controle de qualidade) e das práticas de manutenção e reabilitação. Nesse estado americano, as classes de misturas asfálticas do tipo CPA são denominadas E e F. A primeira tem TMN de 19 mm e é utilizada, geralmente, para camadas de recapeamento delgadas sem função estrutural, com o objetivo de melhorar a resistência à derrapagem e reduzir a ocorrência de hidroplanagem. Já o TMN da segunda é de 25 mm, sendo esta, geralmente, utilizada para camadas asfálticas delgadas de recapeamento de

50 mm de espessura e em camadas de rolamento de pavimentos novos ou recapeamentos (de até 100mm de espessura) com função estrutural em rodovias.

De acordo com Moore, Hicks e Rogge (2001), o manual de dimensionamento da AASHTO de 1993 e outros métodos baseados em deflexões são utilizados para o projeto estrutural de CPA no estado do Oregon, nos Estados Unidos. O mesmo coeficiente estrutural é atribuído a essas misturas asfálticas com base na experiência e no desempenho obtido em campo. Deflexões em misturas asfálticas do tipo CPA classe F, após aplicação das mesmas, indicaram que a redução da deflexão estimada foi comparável àquela esperada para camadas densas típicas com espessura semelhante.

West e Copeland (2015) reportam que no Japão, para o dimensionamento de pavimentos, considera-se que a CPA tem o mesmo valor estrutural que as misturas asfálticas densas. Também se considera que a vida de serviço de ambos os materiais é similar. Outro ponto importante apontado pelos autores sobre as práticas relacionadas a CPA nesse país é o uso de camadas mais espessas, de 4 a 5 cm, para melhor suprimir o ruído pneu-pavimento e melhorar a drenagem, o que pode encontrar justificativa econômica no fato de que a essas camadas é atribuído o mesmo coeficiente estrutural de misturas asfálticas densas. Pesquisas realizadas em pistas de teste do *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), nos Estados Unidos, recomendaram a adoção de um coeficiente estrutural para a camada de CPA de 0,18, que é aproximadamente um terço do valor utilizado para misturas asfálticas densas (West *et al.*, 2012).

Em um estudo que visava recomendar diretrizes de projeto, construção, manutenção e reabilitação que pudessem maximizar as vantagens e diminuir as desvantagens associadas ao uso de CPA foi realizado um questionário com as agências rodoviárias dos Estados Unidos e em outros locais do mundo sobre o uso de CPA. Quanto ao valor estrutural dado à CPA, em suma, a maioria das agências que responderam ao questionário afirmou não atribuir valor estrutural à CPA. A maior parte das agências declarou a utilização de uma espessura única para CPA, que comumente é inferior a 25 mm. No entanto, foi constatado no citado estudo que são utilizadas espessuras maiores que essa tanto nos Estados Unidos quanto internacionalmente (COOLEY *et al.*, 2009).

Em Fortaleza, cidade onde está sendo desenvolvido o presente trabalho, iniciou-se o uso de CPA em meio urbano em 2017. No entanto, considerando-se que esse tipo de mistura asfáltica é utilizado tradicionalmente em rodovias de alto volume de tráfego, despertou-se para a necessidade de avaliar o comportamento desse tipo de mistura asfáltica no meio urbano, tanto no que tange às suas características funcionais - pelas quais as CPAs são amplamente

reconhecidas - quanto no que diz respeito à contribuição estrutural que esse tipo de mistura asfáltica pode oferecer, sobretudo no meio urbano.

Perante o panorama apresentado quanto às possibilidades de uso de CPA e as diferentes formas de como essa mistura asfáltica é considerada no dimensionamento de pavimentos, este capítulo tem por objetivo investigar, mediante simulações em *software* de análise estrutural de pavimentos flexíveis, o comportamento estrutural de pavimentos com uma camada de CPA funcionando como revestimento único ou combinado com outra camada de revestimento. Ressalta-se, ainda, a intenção de contribuir para a tomada de decisão quanto à possibilidade de utilização de CPA em meio urbano, com base no tráfego típico de vias desse meio e nas soluções de pavimentação comumente empregadas. Para isso, alguns projetos típicos utilizados nesse meio foram considerados, variando-se também a espessura da camada de CPA quando da análise estrutural.

### 3.2 Revisão bibliográfica

Timm e Vargas-Nordbeck (2012) conduziram um trabalho que visava atribuir um coeficiente estrutural a uma mistura asfáltica do tipo OGFC. O trabalho contou com a construção de duas seções em escala real, cujas camadas eram idênticas, com exceção do revestimento, que na seção de controle era composto por uma mistura asfáltica densa e na outra seção foi usada uma OGFC. Os perfis podem ser vistos na Figura 14. Testes de deflexão permitiram que o número estrutural efetivo do pavimento (do inglês, *effective structural number*,  $SN_{eff}$ ) fosse calculado por meio de equações empíricas da AASHTO. O número estrutural representa o requisito estrutural geral necessário para sustentar as cargas de tráfego do projeto. Após a determinação do módulo de resiliência do subleito e do módulo efetivo do pavimento (parâmetro relacionado à resistência de todas as camadas do pavimento que estão acima do subleito), o cálculo de  $SN_{eff}$  é feito por meio da Equação 6.

$$SN_{eff} = 0,0045 \times D \times \sqrt[3]{E_p} \quad (6)$$

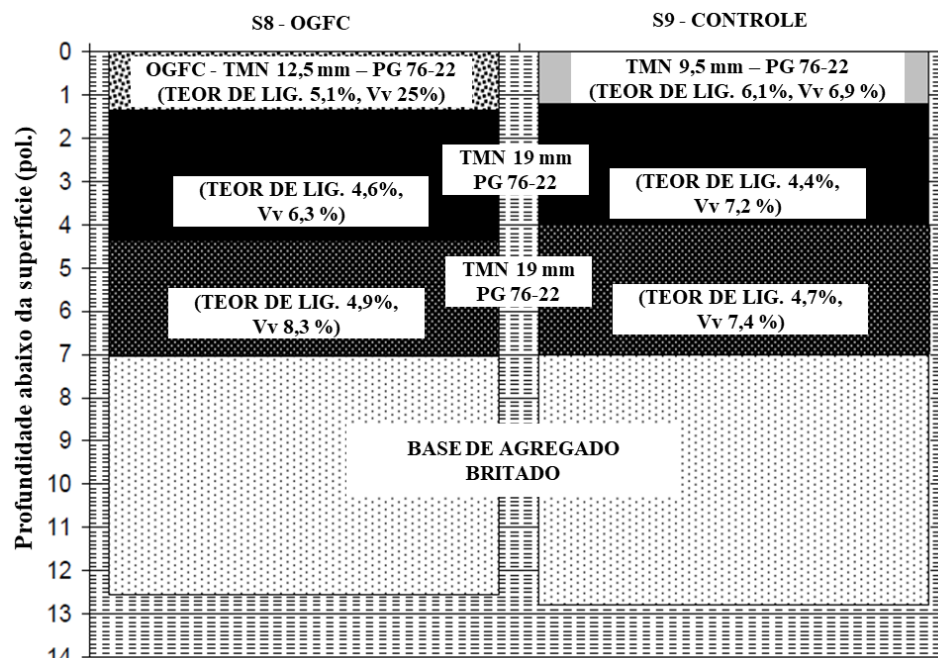
Onde,

D: espessura total das camadas do pavimento, em polegadas;

$E_p$ : módulo efetivo do pavimento (de todas as camadas acima do subleito), em psi.

A partir do coeficiente estrutural (0,54) para misturas asfálticas densas no estado onde a pesquisa de Timm e Vargas-Nordbeck (2012) foi realizada, e das espessuras das camadas, os referidos autores chegaram a um coeficiente estrutural para a camada de OGFC (0,15). Por meio deste, foi calculada a espessura adicional que seria necessária a esta camada para atingir o mesmo número estrutural encontrado para a solução convencional. Para validar esse estudo, medidas diretas de deformação sob ação do tráfego foram obtidas no revestimento ao longo do tempo. A partir destas, foi determinada a espessura adicional na camada de OGFC para atingir o mesmo nível de deformação encontrado para a seção de controle. Os resultados obtidos por Timm e Vargas-Nordbeck (2012) foram considerados semelhantes entre si e compatíveis com os valores reportados na literatura. Esse estudo destacou a necessidade de se investigar a melhor forma de se incorporar a contribuição estrutural de camadas do tipo OGFC a métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos. Os autores concluíram que a seção com CPA requer um aumento de 12% na espessura das camadas asfálticas densas para alcançar a mesma capacidade estrutural da seção que contém só misturas asfálticas densas.

Figura 14 — Perfis do pavimento avaliados no estudo conduzido por Timm e Vargas-Nordbeck (2012)



Fonte: Traduzido de Timm e Vargas-Nordbeck (2012).

Wang, Leng e Wang (2014) realizaram um estudo cujo objetivo era caracterizar misturas asfálticas do tipo OGFC quanto ao módulo dinâmico e investigar se essas misturas asfálticas contribuem estruturalmente quando utilizadas em pavimentos flexíveis. Nesse estudo,

foram selecionadas misturas asfálticas que atenderam ao critério típico do ensaio de deformação permanente utilizando o equipamento *asphalt pavement analyzer* (afundamento de trilha de roda máximo de 7 a 8 mm ao fim de 8000 ciclos). Essas misturas asfálticas foram, então, caracterizadas por meio do ensaio de módulo dinâmico. Para o cálculo das respostas estruturais, os referidos autores utilizaram o programa Kenlayer (HUANG, 2003), que é baseado na teoria elástica de multicamadas. O desempenho do pavimento quanto à fadiga nas camadas asfálticas (na fibra inferior da última camada asfáltica) e a deformação permanente (no topo do subleito) também foram calculados. Para isso, foram utilizadas as equações de dano do manual de projetos de pavimentos mecanístico-empíricos (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*, MEPDG). Além disso, foi realizada uma avaliação com projetos experimentais utilizando o *software* MEPDG.

No estudo conduzido por Wang, Leng e Wang (2014), foi realizada uma análise de sensibilidade (das respostas estruturais e do desempenho) à presença e ao tipo de OGFC. Para isso, foram considerados cenários que consistiam em um sistema multicamadas com a presença de uma camada do tipo OGFC (foram testadas três OGFC diferentes quanto à composição dos agregados), e um cenário sem OGFC. Para a análise das respostas estruturais, foi considerada uma estrutura teórica do pavimento típica, sob a carga de um eixo simples de roda dupla (de 80,07 kN, com pressão dos pneus de 689 kPa, e distanciamento entre rodas duplas de 30,5 cm), diferentes temperaturas do pavimento, e com uma velocidade do veículo de 72 km/h. O referido estudo revelou que a presença da camada de OGFC reduziu em aproximadamente 24% a deformação horizontal de tração ( $\epsilon_t$ ) na fibra inferior da última camada asfáltica e em 20% a deformação vertical de compressão ( $\epsilon_z$ ) no topo do subleito, quando foi considerada a temperatura de 50 °C. A vida de fadiga da camada asfáltica mais inferior, foi cerca de 150% maior na presença da camada de OGFC. O desempenho quanto à deformação permanente no topo do subleito também foi melhor quando a camada de OGFC estava disponível na estrutura do pavimento. Os projetos experimentais sugeriram que, em um clima quente, o efeito de uma unidade de espessura de OGFC é aproximadamente equivalente a dois terços (66%) de unidade de espessura de CA.

Dresch (2016) realizou análise estrutural em misturas asfálticas do tipo CPA que teve como objetivo simular o comportamento e a contribuição estrutural da CPA para o pavimento. Para tanto, a ferramenta utilizada foi o módulo AEMC (Aplicativo de Análise para Estruturas de Múltiplas Camadas) do *software* SisPay, desenvolvido por Franco (2007). A autora optou por utilizar na simulação camadas que seriam aplicadas em campo em rodovias da região Sul do Brasil. Foram definidas espessuras padrões para as camadas de sub-base

(macadame seco) e base (brita graduada simples, BGS), bem como combinações entre espessuras de CA e CPA para o revestimento. A camada de CPA teve sua espessura fixada em 4 cm e foram consideradas estruturas com e sem sua presença, enquanto que para o CA foram testadas espessuras de 5 e 10 cm. O perfil de referência e os parâmetros utilizados são mostrados na Figura 15. Ainda, a simulação utilizou valores de MR obtidos em diferentes temperaturas, a saber, 10°C, 25°C e 35°C.

Figura 15 — Resumo das características dos perfis e parâmetros de análise adotados

Camadas do Pavimento	Espessuras (cm)	MR (MPa)			Coef. Poisson	Aderência
		Temp. 10°C	Temp. 25°C	Temp. 35°C		
Camada Porosa de Atrito	4,0	5298 - 7211	3317 - 5531	1204-2112	0,35	aderido
Concreto Asfáltico	5,0 - 10	9737	4480	2268	0,35	não aderido
Brita Graduada Simples	15	250	250	250	0,40	não aderido
Macadame Seco	20	200	200	200	0,42	não aderido
Subleito	Infinito	80	80	80	0,45	

Fonte: Dresch (2016).

Ainda sobre o trabalho desenvolvido por Dresch (2016), os parâmetros de entrada na ferramenta AEMC são: tipos de material, espessuras das camadas, MR de cada camada, coeficiente de Poisson e condição de aderência da camada em questão. A citada autora utilizou valores fixos de MR para as camadas de base, sub-base e subleito, respectivamente 250MPa, 200MPa e 80MPa e optou pela consideração do MR como linear em cada camada. Os valores dos coeficientes de Poisson adotados foram os sugeridos por Balbo (2007), mostrados na Figura 15. O carregamento adotado foi o eixo padrão rodoviário (8,2 t). As coordenadas dos pontos de análise de esforços foram: eixo de simetria, borda da roda e eixo da roda. A partir das definições dos pontos mencionados, foram calculadas a deflexão vertical ( $U_z$ ) no topo do revestimento,  $\varepsilon_t$  na fibra inferior do revestimento e  $\varepsilon_z$  no topo do subleito. Por fim, foi calculada a quantidade de ciclos até a ruptura por fadiga no revestimento asfáltico ( $N_f$ ), por meio do modelo de desempenho de fadiga proposto pela FHWA (esse modelo é apresentado na seção 3.3.3).

O trabalho conduzido por Dresch (2016) concluiu que a presença da CPA no topo do revestimento, em relação às estruturas avaliadas sem a presença dessa camada, contribuiu para a redução de  $U_z$ ,  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_z$ . Alguns dos cenários analisados no referido trabalho são apresentados na Tabela 18. Se os revestimentos compostos por 5 cm ou 10 cm em CA e 4 cm

em CPA (de MR = 3317 MPa) forem tomados como exemplo em comparação àqueles com 5 cm ou 10 cm em CA apenas, percebe-se que houve uma redução em  $U_z$ ,  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_z$  de 18, 26 e 26 %, respectivamente. Já o valor de  $N_f$  foi cerca de 185% superior para as estruturas com CPA em relação àquelas com CA apenas.

Tabela 18 — Resultados das respostas estruturais encontrados no trabalho conduzido por Dresch (2016)

Composição do revestimento	$U_z$ (mm)	$\varepsilon_t$ (m/m)	$\varepsilon_z$ (m/m)	$N_f$
5 cm de CA	85,11	471	186	$5,28 \times 10^5$
10 cm de CA	64,17	314	121	$2,19 \times 10^6$
4 cm de CPA (MR = 3317 MPa) + 5 cm de CA	69,86	349	138	$1,51 \times 10^6$
4 cm de CPA (MR = 5531 MPa) + 5 cm de CA	66,93	338	129	$1,69 \times 10^6$
4 cm de CPA (MR = 3317 MPa) + 10 cm de CA	52,76	232	89	$6,35 \times 10^6$
4 cm de CPA (MR = 5531 MPa) + 10 cm de CA	50,08	219	81	$7,77 \times 10^6$

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3 Materiais e métodos

Devido a não disponibilização dos projetos *as built* das obras de pavimentação realizadas nas vias urbanas na cidade de Fortaleza, especialmente aquelas que utilizaram CPA em seus revestimentos, alguns projetos para esse tipo de via foram selecionados na literatura (a partir de trabalhos, também, realizados em Fortaleza) a fim de serem avaliados no presente trabalho. A análise do comportamento estrutural do pavimento com a presença da CPA se deu a partir de vários perfis de pavimentos, analisados por meio da ferramenta de análise estrutural AEMC do *software* de verificação e dimensionamento de pavimentos, o MeDiNa. Esse *software* recebe o mesmo nome do método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos que está em processo de implementação no Brasil, o Método de Dimensionamento Nacional (MEDINA). O referido método foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), com a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) e de diversas universidades do Brasil (IPR, 2020).

Para que a CPA pudesse ser considerada nessas estruturas, acima da camada densa de revestimento, e também diretamente acima da camada de base, é inserida uma camada asfáltica extra, de espessura de 3 ou 4 cm, que são as espessuras que a CPA pode assumir de acordo com a ES 386 (DNER, 1999). Essa consideração foi realizada com base em informações obtidas com a empresa que executa revestimentos em CPA na cidade de Fortaleza, onde foi

informado que a aplicação da CPA acontecia sobre uma camada asfáltica densa subjacente. A consideração da CPA sobre a base foi realizada apenas a título de comparação.

Após a obtenção das respostas estruturais do pavimento para os perfis considerados, são utilizadas equações de desempenho, quanto aos danos de fadiga nas camadas asfálticas e de deformação permanente no subleito, para a cálculo da estimativa do número de ciclos que pontos críticos da estrutura suportariam. Esse número de ciclos é, então, comparado ao número  $N$  (número de passagens do eixo padrão rodoviário, de 8,2 t, durante a vida de projeto do pavimento) da via, como forma de indicativo da adequação ou não da utilização das soluções com CPA no meio urbano. Os pontos de interesse, os perfis considerados na análise e as equações de desempenho são apresentados nas seções 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3, respectivamente.

### **3.3.1 Software de análise estrutural**

O *software* escolhido para o cálculo de tensões e deformações foi o AEMC. Como parâmetros de entrada do pavimento, o programa demanda as espessuras de cada camada, a massa específica do material que a compõe, o comportamento (linear ou não-linear) do MR dos materiais, o MR, os parâmetros do modelo constitutivo ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ ) do MR (para caso de consideração do comportamento como não-linear), os coeficientes de Poisson e a consideração da aderência entre as interfaces das camadas (valor que varia de 0 a 1). Já para o carregamento, o programa fornece várias opções de eixos rodoviários, que já possuem configurações padrão quanto à carga e pressão dos pneus, mas permite alterações. Ainda, é necessário informar os pontos onde se deseja que o programa realize os cálculos, que são as coordenadas  $x$  (eixo perpendicular ao sentido do tráfego),  $y$  (eixo no sentido do tráfego) e  $z$  (profundidade abaixo do topo do revestimento).

Os pontos no plano longitudinal ( $xy$ ) do pavimento escolhidos para análise foram: Eixo de Simetria (ES), Borda da Roda (BR) e Eixo da Roda (ER). As profundidades (coordenadas  $z$ ) de interesse para a análise estrutural aqui realizada são aquelas onde ocorrem as deformações  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_z$ , e os deslocamentos  $U_z$ , de maior magnitude no pavimento. Assim, para  $U_z$ , a coordenada  $z$  de interesse é o topo do revestimento; para  $\varepsilon_t$ , a coordenada  $z$  de interesse é aquele relativa à fibra inferior da última camada asfáltica (de cima para baixo); e, para  $\varepsilon_z$ , essa coordenada é aquela relativa ao topo do subleito. Na Tabela 19 são resumidos os pontos analisados e as respectivas coordenadas, onde foi considerada a espessura de 0,001 cm do início ou do fim de determinada camada para a alocação do ponto nas extremidades dessas camadas. O carregamento adotado para o cálculo das respostas estruturais do pavimento foi o eixo padrão



rodoviário (eixo simples de roda dupla), cuja carga é de 8,2 t, a pressão dos pneus é de 0,56 MPa, o distanciamento entre os ERs na direção x é de 32,4 cm, e o raio da área de contato pneu-pavimento é de 10,8 cm. Dessa forma, como pode ser visto na Tabela 19, as coordenadas x de ES, BR e ER são, respectivamente, 0, 5,4 e 16,2 cm.

Tabela 19 — Pontos considerados na análise estrutural

Esforço	Posição no plano xy	Coordenada		
		x (cm)	y (cm)	z (cm)
$U_z$	ES	0	0	0,001
$U_z$	BR	5,4	0	0,001
$U_z$	ER	16,2	0	0,001
$\varepsilon_t$	ES	0	0	Rev* - 0,001
$\varepsilon_t$	BR	5,4	0	Rev - 0,001
$\varepsilon_t$	ER	16,2	0	Rev - 0,001
$\varepsilon_z$	ES	0	0	Rev + CS* + 0,001
$\varepsilon_z$	BR	5,4	0	Rev + CS + 0,001
$\varepsilon_z$	ER	16,2	0	Rev + CS + 0,001

\*Rev: soma das espessuras das camadas asfálticas (em cm).

\*CS: soma das espessuras das camadas subjacentes ao revestimento (em cm).

Fonte: Elaborado pela autora.

Os coeficientes de Poisson adotados para as camadas foram: 0,35 para as camadas asfálticas, 0,40 para as camadas de base e sub-base, 0,42 para o reforço do subleito e 0,45 para o subleito. Uma vez que as respostas estruturais foram calculadas, foram identificados os pontos críticos (de maior magnitude dentre as posições dos pontos no plano xy, ou seja, ES, BR e ER). Esses foram, posteriormente, utilizados para aplicação nas equações de desempenho.

### 3.3.2 Determinação dos parâmetros de entrada: propriedades das camadas

Além da busca na literatura por projetos de pavimentos utilizados em meio urbano, também é necessária a investigação de valores de MR típicos para cada tipo de material, visto que essa propriedade não é ainda considerada no método de dimensionamento empírico empregado nacionalmente e, portanto, não é um parâmetro tão comum no meio técnico. Por se encontrar em um momento de transição entre os métodos empírico e empírico-mecanístico de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil, espera-se que dados dessa propriedade estejam cada vez mais disponíveis em breve.

Os projetos das misturas asfálticas do tipo CPA, empregadas nos revestimentos de algumas vias da cidade de Fortaleza, foram fornecidos pela empresa que executa esses revestimentos na cidade, e são aqueles apresentados no Capítulo 2 do presente trabalho. No entanto, os perfis dos pavimentos dessas vias, que interessam à essa análise, não estavam

disponíveis. Algumas informações a esse respeito foram obtidas por meio de contato com a Secretaria Municipal da Conservação e Serviços Públicos (SCSP), no setor de conservação de vias públicas, que informou que é comum a existência de pavimentos compostos por uma base em calçamento, em pedra tosca ou paralelepípedo assentados sobre o terreno natural, e uma camada de 5 cm de CA ou Areia Asfáltica Usinada a Quente (AAUQ). De fato, Pinheiro e Soares (2005) reportam um trecho experimental na Avenida da Abolição (em Fortaleza) cuja base é de paralelepípedo, além da existência de até três revestimentos antigos, totalizando 12 cm de CA. Provavelmente, essa característica encontrada no revestimento se deve a sucessivas aplicações de revestimentos em operações de reabilitação, sem a devida fresagem da camada de rolamento antiga, o que é um problema comum na cidade em estudo.

Para fins deste trabalho, serão considerados alguns perfis de pavimento que foram estudados em Bastos (2016). Um desses perfis é referente a um trecho experimental denominado Insttale I no referido trabalho, composto por camadas granulares tipicamente empregadas no estado do Ceará. O outro perfil corresponde a um trecho executado pela Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF), cujas rigidezes das subcamadas foram estimadas a partir da retroanálise de bacias deflectométricas no *software* CAP3D (HOLANDA *et al.*, 2006; TORQUATO e SILVA *et al.*, 2014). As Tabelas 20 e 21 mostram, respectivamente, as características dos trechos Insttale I e aquele executado pela PMF encontrados no trabalho de Bastos (2016).

Tabela 20 — Estrutura do pavimento do trecho Insttale 1 avaliado por Bastos (2016)

Camada	Material utilizado	Espessura (cm)	MR <sub>médio</sub> (MPa)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Revestimento	Faixa B (DNIT)	5	6334	2,434
Base	Brita Graduada Simples (BGS)	15	478	2,156
Sub-base	Solo-brita	15	493	2,197
Regularização do subleito	Solo natural existente	20	376	2,030
Subleito	Solo natural	-	407	1,956

Fonte: Adaptado de Bastos (2016).

A mistura asfáltica utilizada no revestimento do trecho Insttale I teve teor de ligante asfáltico de 4,5%, foi enquadrada na Faixa B do DNIT, com a seguinte composição de agregados: 37% de brita ¾”, 23% de brita ½”, 38% de pó de pedra e 2% de cal hidratada. O valor de MR para essa mistura asfáltica foi reportado em Menezes, Soares e Bastos (2019), como sendo de 6334 MPa. A densidade aparente da mistura foi de 2,434. Vale ressaltar que as

densidades dos materiais não são utilizadas no cálculo de tensões e deformações, mas serão informadas nesse trabalho, já que no AEMC há um campo destinado a esse parâmetro.

No trecho da PMF foi utilizada uma mistura asfáltica que se enquadra Faixa C do DNIT. Na pista experimental foram executados dois trechos, um com um CAP 30/45 e outro com CAP 50/60, cujas densidades aparentes das respectivas misturas foram de 2,340 e 2,330. Essas informações sobre os materiais utilizados nas misturas asfálticas aplicadas no trecho são encontradas em Soares *et al.* (1999). No presente trabalho, para o projeto em questão será adotado o valor de 3500 MPa como MR da camada de revestimento, que corresponde a um valor central da faixa de valores das estruturas analisadas por Bastos (2016).

As massas específicas para os materiais utilizados nas camadas granulares do trecho executado pela PMF foram consultadas no catálogo de materiais do MeDiNa, devido à falta de informações sobre o projeto. Para a base, considerou-se que foi utilizada um brita graduada, pois esse material é comumente empregado em camadas de base na pavimentação asfáltica em Fortaleza. O material escolhido do catálogo é aquele denominado Brita Graduada – Gnaisse C5, cuja massa específica é de 2,223 g/cm<sup>3</sup>. Para a sub-base, selecionou-se a opção Solo Brita – M3 (LG' s:1521), de massa específica 2,38, que tem MR de 398 MPa, semelhante ao valor de 400 MPa do tipo de sub-base aqui utilizada. Por fim, para o subleito optou-se pelo material denominado Solo Siltoso NS', cujo MR é de 189 MPa, semelhante ao de 170 MPa aqui utilizado, e a massa específica é de 1,800 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 21 — Estrutura do pavimento do trecho executado pela PMF e avaliado em Bastos (2016)

<b>Camada</b>	<b>Material utilizado</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Estrutura da PMF – MR médio (MPa)</b>
Revestimento	Concreto Asfáltico	5 - 10	2500 – 5000
Base	Base estabilizada	15	590
Sub-base	Sub-base granular	15	400
Subleito	Solo natural	-	170

Fonte: Adaptado de Bastos (2016).

Alves (2019) realizou um estudo das propriedades mecânicas de CPAs com diferentes granulometrias (faixas IV e V do DNIT e uma faixa norte americana de TMN de 9,5 mm), cujos materiais utilizados foram os mesmos que haviam sido utilizados em um trecho da rodovia BR 158 e também nas misturas asfálticas avaliadas no trabalho de Dresch (2016). Os ensaios de MR para a CPA da faixa V, com teor de ligante asfáltico de 4,0%, no referido trabalho, forneceram valor médio de MR de 6302 MPa. Para essa mistura asfáltica a massa específica foi de 2,168 g/cm<sup>3</sup>. Observa-se, que houve uma diferença entre esse resultado e

aquele obtido por Dresch (2016) para uma CPA enquadrada na mesma faixa granulométrica e com o mesmo teor de ligante asfáltico, sendo o primeiro 71% maior em relação ao segundo.

O grupo de pesquisa do qual o presente trabalho faz parte dispõe de dados de ensaios de MR para CPA enquadrada na Faixa II do DNIT, referentes à mistura asfáltica avaliada em Maia *et al.* (2019) e a uma das misturas asfálticas avaliadas na presente pesquisa (CPA\_REF). A mistura asfáltica avaliada em Maia *et al.* (2019) foi utilizada em campo em Fortaleza em uma fase de teste da aplicação de CPA na cidade, na Rua Conde D'Eu. Essa ação fez parte da revitalização da Rua José Avelino e seus entornos, região do centro da cidade onde se encontram algumas atrações turísticas, como o Mercado Central e a Catedral da Sé.

A composição granulométrica da mistura asfáltica reportada por Maia *et al.* (2019) era a seguinte: 90% de brita ½'', 8% de pó de pedra e 2% de cal. O Vv foi de 18% e o teor de ligante asfáltico foi de 3,9%. Esse teor de ligante asfáltico foi aquele que atingiu o Vv mínimo (18%) preconizado pela ES 386 (DNER, 1999), sendo praticamente equivalente ao teor mínimo de ligante asfáltico de 4%, também preconizado por essa norma. Para essa mistura asfáltica, o valor médio obtido no ensaio de MR foi 3281 MPa. A outra mistura asfáltica (CPA\_REF) é derivada do estudo de laboratório realizado no Capítulo 2 da presente dissertação, cuja composição granulométrica é de 60% de brita 3/8'', 30% de brita ½'' e 10% de pó de pedra, o Vv é de 21,8% e o teor de ligante asfáltico é de 4,5%. Foram moldados 2 CPs para o ensaio de MR nessa mistura asfáltica, cujos valores obtidos para este ensaio foram de 2212 e 3617 MPa (média de 2914,5 MPa). A respectiva massa específica para essa mistura é de 1,943g/cm<sup>3</sup>.

Dada a limitação na quantidade de amostras ensaiadas para o ensaio de MR na presente pesquisa, para fins da análise estrutural foi escolhido utilizar o valor médio de MR referente às misturas aqui ensaiadas e aquelas encontradas no trabalho conduzido por Maia *et al.* (2019). Essa consideração foi considerada razoável, já que ambas as misturas asfálticas são enquadradas na faixa II do DNIT, além de possuírem valores médios de MR próximos (diferença de 366 MPa), se comparados àqueles obtidos por Alves (2019) para uma CPA faixa V (6302 MPa para o teor de ligante de 4%), por exemplo. Assim, o valor médio de MR considerado para CPAs enquadradas na faixa II, na análise estrutural, foi de 3098 MPa.

Conforme a ES 386 (DNER, 1999), as faixas I e II são recomendadas para camadas com espessuras de 3,0 cm, e as faixas III, IV e V, para camadas com espessuras de até 4,0 cm. Sendo assim, uma das variáveis de análise desse estudo será a espessura da camada de CPA. Para os cenários onde for utilizada espessura de 4,0 cm, consideram-se os dados de entrada referentes à CPA enquadrada na faixa V, com 4,0% de ligante asfáltico, reportada por Alves (2019), enquanto que nos cenários onde camadas de 3 cm foram avaliadas, correspondente à

realidade do uso de CPA em Fortaleza, utilizam-se as propriedades mecânicas obtidas em laboratório, pelo grupo de pesquisa do qual a autora do presente trabalho faz parte, para CPAs enquadradas na faixa II do DNIT. Os cenários considerados na análise estrutural são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 — Cenários considerados na análise estrutural

Perfil das subcamadas	Composição do revestimento				
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Trecho Insttale I (Bastos, 2016)	4cm de CPA (faixa V) + 5cm de CA (faixa B)	3cm de CPA (faixa II) + 5cm de CA (faixa B)	4cm de CPA (faixa V)	3cm de CPA (faixa II)	5cm de CA (faixa B)
Trecho executado pela PMF	4cm de CPA (faixa V) + 5cm de CA (faixa C)	3cm de CPA (faixa II) + 5cm de CA (faixa C)	4cm de CPA (faixa V)	3cm de CPA (faixa II)	5cm de CA (faixa C)

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3.3 Determinação do número de repetições de carga até a ruptura do pavimento a partir de modelos de desempenho

Após o cálculo das respostas estruturais do pavimento com o uso do AEMC, o modelo de desempenho de fadiga da mistura asfáltica, proposto pela FHWA, e os modelos de desempenho de deformação permanente propostos pelo *Asphalt Institute* (AI) e pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) da França, foram utilizados para estimar o número de repetições de carga que o pavimento suportaria até a ruptura. O modelo proposto pela FHWA para a previsão do número de repetições de carga até a ruptura por fadiga ( $N_f$ ), na camada asfáltica, é apresentado na Equação 7. Os modelos propostos pelo AI e pelo LCPC da França para a previsão do número de ciclos de carga até a ruptura do pavimento por deformação permanente são mostrados nas Equações 8 e 9, respectivamente. É importante ressaltar que esses modelos fornecem números de repetições de carga que podem ser comparados ao número  $N$  calculado pelo método da AASHTO, que é diferente daquele proposto pelo Corpo de Engenheiros Norte-Americano (USACE), utilizado no Brasil. Para converter o  $N$  correspondente ao método da AASHTO no  $N$  calculado pelo método USACE, utiliza-se um fator de escala de 3.

$$N_f = 1,092 \times 10^{-6} \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3,512} \quad (7)$$

Onde,

$N_f$ : Número de repetições de carga até a ruptura por fadiga;

$\varepsilon_t$ : Deformação horizontal de tração da camada asfáltica.

$$N_{ATR} = 1,365 \times 10^{-9} \times \varepsilon_v^{-4,477} \quad (8)$$

$$N_{ATR} = 2,227 \times 10^{-9} \times \varepsilon_v^{-4,505} \quad (9)$$

Onde,

$N_{ATR}$ : número de repetições de carga até atingir a tensão vertical limite no topo do subleito;

$\varepsilon_v$ : deformação de compressão vertical crítica no topo do subleito.

### 3.3.4 *Volume de tráfego em via urbana de Fortaleza*

Nesta seção é calculado o número N, equivalente à quantidade de passagens de eixos padrão, de uma das avenidas de Fortaleza onde a CPA está sendo utilizada como solução de pavimentação. Devido à ocorrência da pandemia da COVID-19 no ano de realização deste trabalho, 2020, o tráfego das vias foi alterado, o que culminou na decisão de não coletar dados de campo no momento de realização do trabalho. Assim, recorreu-se a outros meios de contagem de tráfego, relativos a anos anteriores. O intuito dessa etapa é ter uma dimensão do tráfego dessas vias para que se possa comparar com os resultados de previsão de desempenho dos pavimentos.

Foi solicitado à Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC) dados de fiscalização eletrônica com classificação veicular. Os dados obtidos são referentes aos meses de agosto e setembro de 2018 e neles os veículos são classificados como motocicleta, carro, caminhão, ônibus e veículo indefinido. Por meio do algoritmo de automatização da classificação veicular, incorporado aos equipamentos de fiscalização eletrônica, não é possível identificar a subclasse dos veículos de carga, necessária à determinação do número N, de acordo com o método disposto no manual de estudos de tráfego (DNIT, 2006a). Além disso, existem erros associados à essa classificação automatizada que desencorajaram sua utilização para os fins dessa pesquisa.

Braga (2016) analisou a qualidade da tecnologia utilizada para classificação veicular (laços indutivos), concluindo que existem maiores erros relativos, em média e dispersão, associados às categorias caminhão e ônibus, o que indica inconsistência da tecnologia para uso relativo a essas categorias. O autor constatou que o sistema é mais sensível para caminhões, detectando mais caminhões do que se observa na realidade, enquanto que para

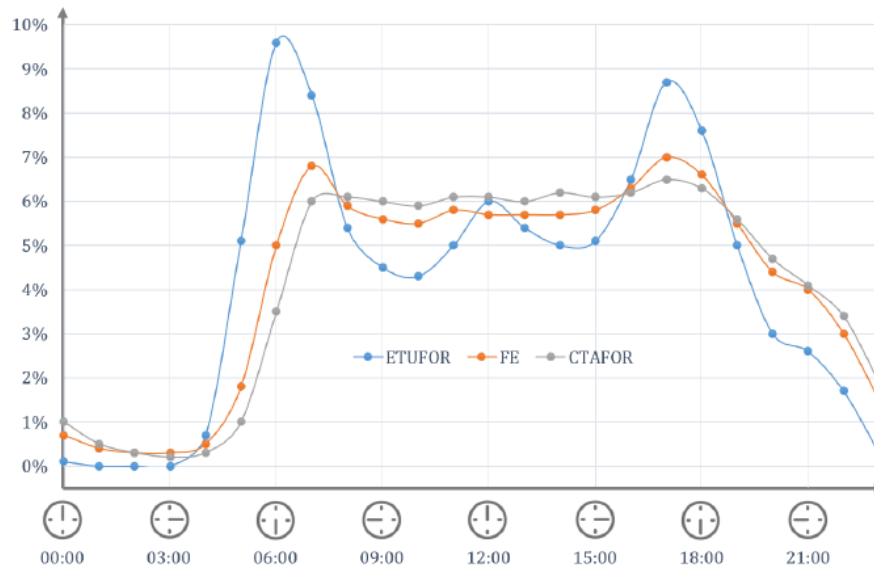
ônibus observa-se o contrário. Dessa forma, os dados do sistema de classificação de fiscalização eletrônica de Fortaleza não são adequados para a utilização do dimensionamento de pavimentos, que utiliza especificamente dados de veículos pesados, cujos erros associados na classificação desse sistema são maiores.

Outra base de dados de contagem veicular à qual se teve acesso foi a que pertence ao Plano de Acessibilidade Sustentável de Fortaleza (Pasfor). Os dados são referentes a uma pesquisa volumétrica realizada em vários postos de contagem de tráfego localizados em Fortaleza, ao longo dos meses de agosto e setembro de 2018. As contagens são discriminadas pelo tipo de movimento realizado pelos veículos, no que diz respeito ao sentido e às conversões realizadas, bem como pelo tipo de veículo. As categorias da classificação são: automóvel, motocicleta, micro ônibus, ônibus comum, ônibus articulado, van, caminhão de 2 ou 3 eixos, caminhão de 4 ou mais eixos, Veículo Utilitário de Carga (VUC) e bicicleta. Os dados coletados são referentes apenas aos horários de pico da manhã (06:00 às 08:59), do almoço (10:30 às 12:59) e da tarde (16:30 às 19:59).

Para o dimensionamento de pavimentos, consideram-se que as categorias de veículo que interessam ao cálculo do número  $N$ , dentre aquelas coletadas pela contagem volumétrica do PasFor, são ônibus comum, ônibus articulado, caminhão de 2 ou 3 eixos e caminhão de 4 ou mais eixos. Novamente, não se sabe ao certo a classe do veículo, pois ao classificar um veículo como caminhão de 2 ou 3 eixos, a pesquisa pode estar se referindo a um caminhão, a um caminhão trucidado ou a um caminhão trator + semi reboque, de acordo com a classificação adotada pelo DNIT (2006a). Essa imprecisão também ocorre com a categoria caminhão de 4 ou mais eixos. Dessa forma, será necessário para o prosseguimento dessa pesquisa, assumir algumas classes de veículos nesses casos onde estes não foram especificados.

Outra limitação na utilização dos dados do PasFor na presente pesquisa é o fato das contagens terem sido realizadas apenas nos horários de pico. Como alternativa para viabilizar a utilização desses dados, propõe-se a realização de uma extrapolação dos dados para os horários fora do pico, utilizando para isso distribuições horárias de viagens em Fortaleza. A Figura 16 mostra as distribuições horárias de viagens em Fortaleza, onde as curvas FE (Fiscalização Eletrônica) e CTAFOR (Controle de Tráfego em Área de Fortaleza) são referentes à distribuição média da quantidade de veículos que trafegaram por vias com fiscalização eletrônica da cidade nos dias úteis de outubro de 2013 e que trafegaram pelos laços magnéticos nos dias úteis de outubro de 2013 instalados pelo CTAFOR.

Figura 16 — Distribuições horárias de viagens na cidade de Fortaleza, relativos a outubro de 2013



Fonte: SOUSA (2016).

Para essa etapa, a Avenida Dom Luís, destacada na Figura 17, foi escolhida. A configuração das faixas de tráfego dessa avenida é mostrada na Figura 18. As contagens de tráfego no posto de coleta dessa avenida foram realizadas nos dias 07/08/2018 e 08/08/2018, sendo feita em horários complementares, da seguinte forma: no dia 07 foi feita a coleta no horário de pico da tarde, enquanto que no dia 08 foram coletados os horários de pico da manhã e do almoço. Após a distribuição das viagens de ônibus e caminhões de 2 ou 3 eixos com base nas proporções apresentadas na Figura 16, chegaram-se aos volumes diários que estão apresentados na Tabela 23.



Figura 17 — Localização da Avenida Dom Luís na cidade de Fortaleza



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 — Avenida Dom Luís com indicação das faixas de tráfego



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 23 — Volume de veículos diário na Avenida Dom Luís

<b>Ônibus comum</b>	<b>Caminhão de 2 ou 3 eixos</b>	<b>Caminhão de 4 ou mais eixos</b>
917	118	11

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme explicado anteriormente, será assumido uma classe específica de acordo com a classificação do DNIT (2006a) para as categorias de veículos que trafegam na via. Para ônibus comum a classe assumida é a 2CB, que consiste de um eixo simples com roda simples e de um eixo duplo com roda dupla, que é a configuração da maioria dos ônibus em Fortaleza. Para caminhão de 2 ou 3 eixos, na classificação do DNIT (2006a) existem as possibilidades de caminhão (2 eixos, classe 2C), caminhão trucado (3 eixos, classe 3C) e caminhão trator + semi reboque (3 eixos, classe 2S1). Para essa categoria, a classe assumida será a 3C, que consiste de um eixo simples com roda simples e de um conjunto de eixos em tandem duplo. Essa classe foi escolhida por ser um caso intermediário, em termos de carga, dentre as possibilidades. Para a classificação caminhão de 4 ou mais eixos, da contagem veicular, existem 24 possibilidades na classificação do DNIT. Nesse último caso, será assumida a classe caminhão trator + semi reboque (2S2).

Há ainda que se levar em consideração que na via em questão existem 4 faixas de tráfego (ver Figura 18), sendo que a da direita é uma faixa exclusiva para ônibus, que funciona das 5:00 da manhã às 21:00 hrs. Dessa forma, considera-se que a totalidade dos ônibus trafega nessa faixa. Quanto aos veículos de carga, será considerado um cenário no qual esses veículos trafegam por essa faixa nos horários em que o funcionamento não é exclusivo para ônibus e, para o horário de funcionamento da faixa exclusiva, trafegam pela terceira faixa (da esquerda para a direita na Figura 18). Os volumes diários de veículos na faixa exclusiva, para esse cenário, são mostrados na Tabela 24. É considerado também outro cenário, no qual todos os caminhões trafegam apenas pela terceira faixa (da esquerda para a direita na Figura 18). A partir desses cenários, definiu-se a faixa exclusiva para ônibus como faixa de projeto, pois esta apresentou maior número N.

Tabela 24 — Volume de veículos diário na faixa exclusiva para ônibus da Avenida Dom Luís

<b>Ônibus comum</b>	<b>Caminhão de 2 ou 3 eixos</b>	<b>Caminhão de 4 ou mais eixos</b>
917	14	1

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 25 resume o número N presente (correspondente à data da contagem de tráfego) e o N para o período de projeto de 10 anos (a partir da contagem), separadamente para

ônibus (faixa exclusiva) e para caminhões (que trafegam na faixa exclusiva nos horários permitidos). Na Tabela 25 também são apresentados alguns dos fatores utilizados no cálculo do número N, a saber: Fator de Carga (FC), Fator de Eixo (FE), Fator de Veículo (FV) e taxa anual de crescimento da frota (i). Destaca-se que a taxa de crescimento da frota foi arbitrária, com base em valores comumente utilizados.

Tabela 25 — Número N por tipo de veículo na faixa de projeto

Tipo de veículo	Faixa exclusiva para ônibus					
	Número N (2018)	Número N (2028)	FE	FC	FV	i (%)
Ônibus	$1,19 \times 10^6$	$1,31 \times 10^7$	-	-	-	-
Caminhões	$4,95 \times 10^4$	$5,42 \times 10^5$	-	-	-	-
TOTAL	$1,24 \times 10^6$	$1,36 \times 10^7$	2,00	1,83	3,66	2,00

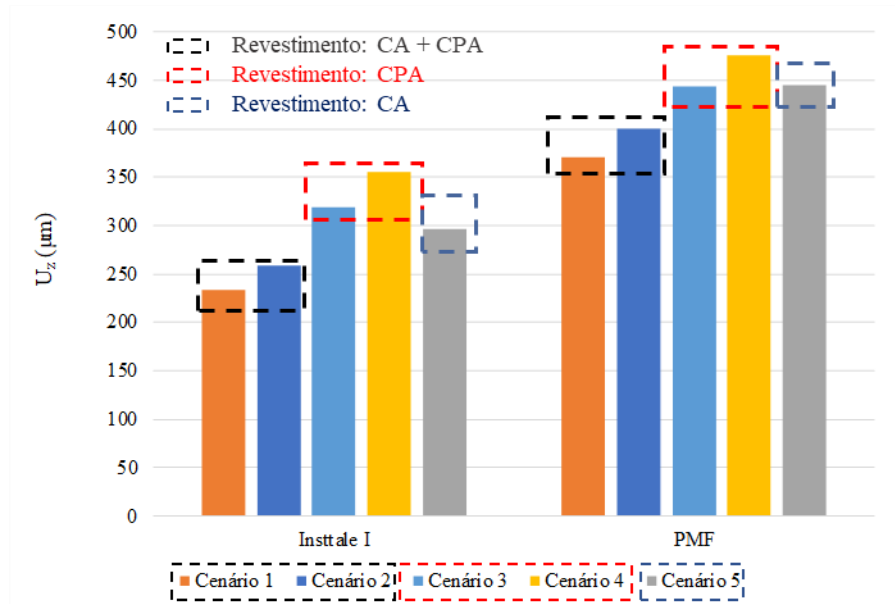
Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme já comentado, com base nos valores encontrados para o número N, tem-se que a faixa de projeto é a faixa exclusiva para ônibus, que apresentou maior número N. Assim, a classificação do tráfego na avenida considerada – para o final da vida de projeto - quanto ao número de solicitações do eixo padrão, é de pesado.

### 3.4 Resultados e discussão

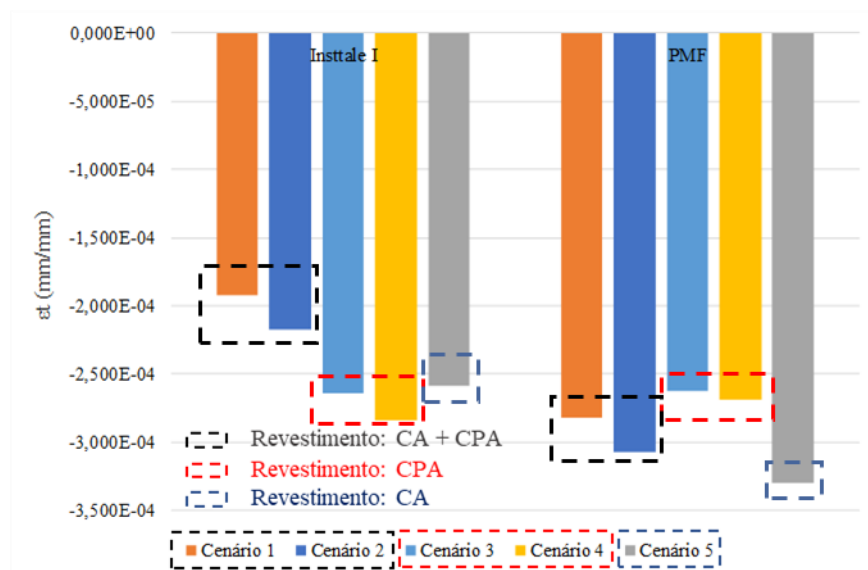
A seguir são apresentados os resultados encontrados para os perfis de pavimentos analisados em diferentes cenários (apresentados na Tabela 22). Nas Figuras 19 a 21 estão apresentados os valores de  $U_z$ ,  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_z$  encontrados para os perfis analisados. Na Tabela 26 são apresentadas as previsões de desempenho para fadiga e deformação permanente segundo os modelos apresentados na seção 3.3.3. Por fim, essas previsões de ciclos foram multiplicadas pelo fator de escala 3 para que pudessem ser comparadas, mais adiante, ao número N obtido pelo método USACE. Os resultados estão apresentados na Tabela 27.

Figura 19 — Deflexão no topo do revestimento ( $U_z$ )

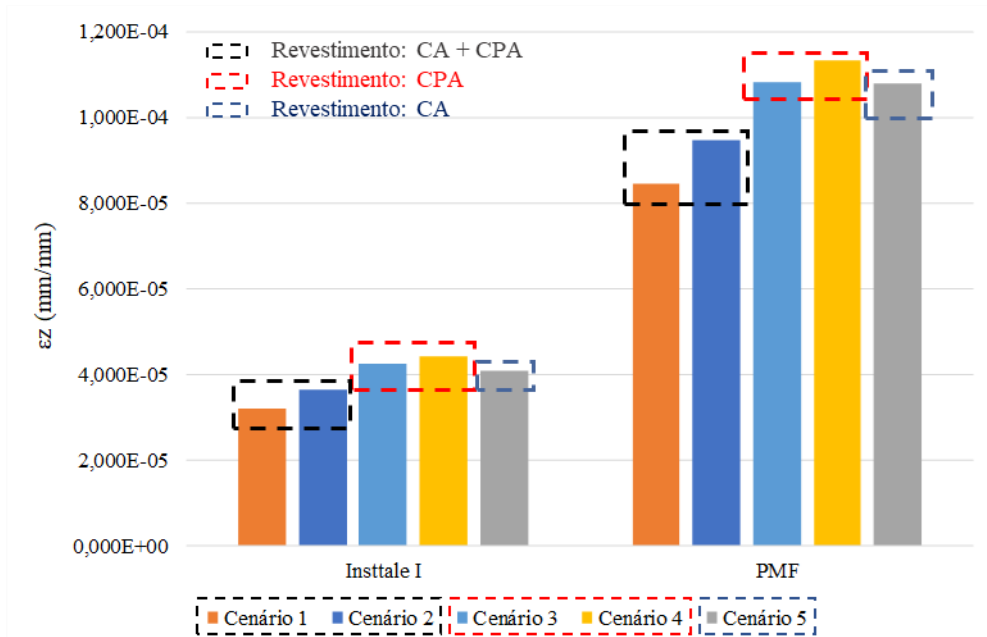


Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 — Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento ( $\epsilon_t$ )



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 — Deformação de compressão vertical no topo do subleito ( $\epsilon_z$ )

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 26 — Previsão do número de ciclos até a falha com base em modelos de desempenho (FHWA, AI e LCPC)

Trecho	$N_f$ (FHWA)	$N_{ATR}$ AI	$N_{ATR}$ LCPC
Insttate I – Cenário 1 (5 cm CA + 4 cm CPA)	$1,239 \times 10^7$	$1,780 \times 10^{11}$	$3,879 \times 10^{11}$
Insttate I – Cenário 2* (5 cm CA + 3 cm CPA)	$8,003 \times 10^6$	$1,034 \times 10^{11}$	$2,246 \times 10^{11}$
Insttate I – Cenário 3 (4 cm CPA)	$4,030 \times 10^6$	$5,106 \times 10^{10}$	$1,104 \times 10^{11}$
Insttate I – Cenário 4 (3 cm CPA)	$3,139 \times 10^6$	$4,321 \times 10^{10}$	$9,336 \times 10^{11}$
Insttate I – Cenário 5 (5 cm CA)	$4,358 \times 10^6$	$6,082 \times 10^{10}$	$1,317 \times 10^{11}$
PMF – Cenário 1 (5 cm CA + 4 cm CPA)	$3,185 \times 10^6$	$2,358 \times 10^9$	$5,004 \times 10^9$
PMF – Cenário 2* (5 cm CA + 3 cm CPA)	$2,378 \times 10^6$	$1,415 \times 10^9$	$2,993 \times 10^9$
PMF – Cenário 3 (4 cm CPA)	$4,100 \times 10^6$	$7,755 \times 10^8$	$1,634 \times 10^9$
PMF – Cenário 4 (3 cm CPA)	$3,792 \times 10^6$	$6,305 \times 10^8$	$1,327 \times 10^9$
PMF – Cenário 5 (5 cm CA)	$1,848 \times 10^6$	$7,905 \times 10^8$	$1,666 \times 10^9$

\*Cenário mais próximos das soluções empregadas na cidade de Fortaleza.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 27 — Conversão do número de ciclos até a falha com base em modelos de desempenho (FHWA, AI e LCPC) para o método USACE

Trecho	$N_f$ (FHWA)	$N_{ATR}$ AI	$N_{ATR}$ LCPC
Insttate I – Cenário 1 (5 cm CA + 4 cm CPA)	$3,717 \times 10^7$	$5,339 \times 10^{11}$	$1,164 \times 10^{12}$
Insttate I – Cenário 2* (5 cm CA + 3 cm CPA)	$2,401 \times 10^7$	$3,101 \times 10^{11}$	$6,737 \times 10^{11}$
Insttate I – Cenário 3 (4 cm CPA)	$1,209 \times 10^7$	$1,532 \times 10^{11}$	$3,313 \times 10^{11}$
Insttate I – Cenário 4 (3 cm CPA)	$9,416 \times 10^6$	$1,296 \times 10^{11}$	$2,801 \times 10^{11}$
Insttate I – Cenário 5 (5 cm CA)	$1,307 \times 10^7$	$1,825 \times 10^{11}$	$3,951 \times 10^{11}$
PMF – Cenário 1 (5 cm CA + 4 cm CPA)	$9,554 \times 10^6$	$7,075 \times 10^9$	$1,501 \times 10^{10}$

Trecho	$N_f$ (FHWA)	$N_{ATR}$ AI	$N_{ATR}$ LCPC
PMF – Cenário 2* (5 cm CA + 3 cm CPA)	$7,133 \times 10^6$	$4,246 \times 10^9$	$8,979 \times 10^9$
PMF – Cenário 3 (4 cm CPA)	$1,230 \times 10^7$	$2,327 \times 10^9$	$4,902 \times 10^9$
PMF – Cenário 4 (3 cm CPA)	$1,138 \times 10^7$	$1,891 \times 10^9$	$3,980 \times 10^9$
PMF – Cenário 5 (5 cm CA)	$5,544 \times 10^6$	$2,372 \times 10^9$	$4,997 \times 10^9$

\*Cenário mais próximos das soluções empregadas na cidade de Fortaleza.

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a estrutura Insttale I, de forma geral, percebe-se que a presença da camada de CPA, independentemente da faixa/espessura elevou a ordem de grandeza do número de ciclos de carga (em 185% e 84% para os cenários 1 e 2, respectivamente) que levaria o pavimento à falha segundo o dano por fadiga na camada asfáltica, em comparação à estrutura cujo revestimento não inclui uma camada de CPA. Para essa estrutura, os valores de  $\epsilon_t$  para os cenários 1 e 2 são, respectivamente, 26 e 16% menores do que aqueles referentes ao cenário 5 (revestimento em CA apenas). No entanto, a consideração do revestimento com apenas uma camada de CPA (cenários 3 e 4), levou a maiores deslocamentos e deformações em comparação à solução com revestimento apenas em CA. Para os cenários 3 e 4, os valores de  $\epsilon_t$  foram, respectivamente, 2 e 10 % maiores em comparação ao valor para o cenário 5.

Para a estrutura executada pela PMF, os perfis cujos revestimentos são compostos por uma camada de CA e uma camada de CPA, também apresentaram menores valores de  $\epsilon_t$  (14 e 7%, respectivamente, para os cenários 1 e 2) em comparação àqueles assumidos no cenário 5 (revestimento apenas em CA). Os cenários com revestimento apenas em CPA, por sua vez, apresentaram valores de  $\epsilon_t$  menores (20 e 19%, respectivamente, para os cenários 3 e 4) do que o cenário 5 para essa estrutura. Tanto para a estrutura Insttale I quanto para a estrutura PMF, houveram reduções de  $\epsilon_v$  nos cenários 1 e 2 em comparação ao cenário 5. As reduções chegaram a 21% para a Insttale I e a 22% para a estrutura PMF. Percebe-se que, para todos os casos estudados, o critério de falha limitante é a fadiga, que foi calculada para a fibra inferior da última camada de revestimento (de cima para baixo). Especialmente em estruturas que estão em campo há muitos anos, espera-se que as camadas granulares já estejam consolidadas e que não haja problemas de deformação permanente. Pelas análises realizadas, de fato, é esperado que as estruturas suportem número de ciclos até da ordem de  $10^{12}$ .

É importante ressaltar que o próprio método de análise considerado nesse trabalho limita a validade da afirmação de que a presença da camada de CPA implica em contribuição estrutural para o pavimento. Isso porque para o *software* de análise utilizado, o que estaria diferenciando a CPA de uma mistura asfáltica densa convencional seria a densidade e o MR

dessas camadas, que a depender da granulometria utilizada, do tipo de ligante asfáltico, dentre outras propriedades, podem até assumir os mesmos valores.

Embora o método de análise aqui apresentado possua limitações, ao comparar os valores de MR considerados para as misturas asfálticas densas (6334 e 3500 MPa) e para a CPA (3098 e 6302 MPa), percebe-se que os MRs das CPAs são muito variáveis e mesmo para o menor MR (correspondente à mistura asfáltica empregada em menor espessura, de 3 cm) houve aumento da quantidade de ciclos até a ruptura segundo os danos analisados. É importante notar que, conforme apresentado na seção 3.1 deste capítulo, alguns estudos que atribuem à CPA algum valor estrutural utilizam espessuras de 4 cm, 5 cm ou superiores. Por outro lado, as espessuras aqui tratadas são de, no máximo 4 cm, devido à norma vigente no Brasil para esse tipo de revestimento.

A comparação do número de ciclos até a ruptura do revestimento, obtido por meio dos modelos de desempenho (FHWA, AI e LCPC) e convertido para o método USACE, com o número N de uma via urbana (onde foi aplicada a CPA) de Fortaleza sugere que há um subdimensionamento das camadas na maioria dos cenários testados, em ambas os trechos considerados. Isso é observado porque, pelo critério da fadiga, a maioria dessas estruturas resistiria até um número de ciclos inferior ao número N calculado, que foi da ordem de  $10^7$ . No entanto, a estrutura Installe I, para os cenários 1 e 2 (com 4 cm e 3 cm, respectivamente, de CPA acima dos 5 cm de CA) suportaria o tráfego estimado. Uma importante conclusão desse estudo é que a presença de uma camada de CPA no topo do revestimento, implica em ganho de vida útil para o pavimento. Dessa forma, a contribuição estrutural de revestimento do tipo CPA não deveria ser negligenciada no processo de dimensionamento de pavimentos.

Apesar das análises aqui realizadas e outros estudos já comentados também apontarem para um ganho estrutural com a adição de uma camada de CPA no revestimento, é importante frisar há outros critérios a serem considerados quando da tomada de decisão acerca do seu uso. Um importante fator a ser considerado é o custo de produção da CPA, geralmente mais alto do que um CA convencional. No entanto, a CPA fornece inúmeros benefícios funcionais, que outros revestimentos com capacidade estrutural mais elevada e de menor custo não oferecem. Assim, a decisão final quanto ao uso de CPA, sobretudo no ambiente urbano, deve passar por uma análise do caso específico.

Como exemplos de aplicação de CPA como estratégia de pavimentação citam-se dois casos a seguir. O primeiro é referente a locais sujeitos a altas temperaturas e/ou a tráfego pesado, onde há problema de ATR nos primeiros anos. Nesses locais, a aplicação de uma camada de CPA no topo do revestimento pode viabilizar a utilização de ligante asfáltico 50/70

em uma camada de CA subjacente, o que acontece devido a redução da temperatura dessa última após a aplicação da primeira. Outro caso seria em rodovia de tráfego muito pesado, onde fosse necessário aplicar camada mais espessa ou camada fabricada com AMP para evitar deformação permanente. Nesse caso, a utilização de uma camada de CPA sobre a camada de CA convencional (sem aumento de sua espessura) poderia ser uma solução que atendesse ao problema apresentado ao passo que fornece ganhos funcionais.

### **3.5 Conclusões e sugestões**

Nesse capítulo foi discutido o valor estrutural que é atribuído à CPA por diferentes órgãos e países no dimensionamento de pavimentos. Diante da falta de consenso no que concerne a essa questão, foi proposta a investigação das respostas estruturais do pavimento na presença de uma camada de CPA. Para isso, estruturas de pavimentos encontradas na literatura, que foram aplicadas em pavimentos de Fortaleza e de sua região metropolitana, foram consideradas, e foram propostos diferentes cenários de análise, com e sem a presença de CPA no pavimento. As respostas estruturais, obtidas com a utilização do AEMC, foram, então, aplicadas em modelos de previsão de desempenho para o cálculo do número de ciclos que a estrutura suporta até a falha segundo os danos por fadiga na camada asfáltica e deformação permanente no subleito. Esse número foi comparado a uma estimativa de tráfego (número N) de uma via de Fortaleza, para a qual a solução de pavimentação em CPA sobre um revestimento denso foi aplicada.

Como principal conclusão, tem-se que a aplicação de uma camada de CPA acima do revestimento asfáltico denso pode levar a um aumento da vida útil do pavimento, o que foi analisado em termos do número de ciclos até o rompimento da estrutura por meio de modelos de desempenho. No entanto, boa parte das estruturas aqui tratadas como típicas não atenderiam ao tráfego de uma via urbana analisada, para a vida de projeto, pois o N calculado para a via foi maior do que o número de ciclos até a falha para esses casos. Além disso, constatou-se certa limitação na análise pelo fato de que os parâmetros de entrada no programa de análise estrutural podem ser da mesma ordem de grandeza para CPA e para misturas asfálticas densas. Assim, é interessante propor a análise da contribuição estrutural da CPA em outro programa, que incorpore mais características desse tipo de mistura asfáltica, como forma de diferenciá-la de outros tipos. Sugere-se como próxima tentativa o uso do programa CAP3D, que atualmente utiliza dados do ensaio de módulo dinâmico para a realização das análises. Esse programa



utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para o cálculo de tensões, deformações e deslocamento.

Diante dos resultados obtidos nesse trabalho, encoraja-se a inclusão de revestimentos do tipo CPA no catálogo do MeDiNa, após a realização de procedimentos de testagem e calibração de funções de transferência com misturas asfálticas desse tipo. Ressalta-se a importância de se investigar, primeiramente, a adequabilidade de ensaios tradicionais de deformação permanente de misturas asfálticas para a CPA. Alves (2019) realizou estudo que evidenciou a necessidade de um estudo mais aprofundado acerca da utilização do parâmetro *flow number* como critério para deformação permanente em misturas do tipo CPA. A utilização de simuladores de tráfego em laboratório e a realização de medições em campo podem ser alternativas para a consideração da deformação permanente que a CPA sofre.

Por fim, para trabalhos futuros, recomenda-se a consideração de cenários com outros níveis de tráfego, como por exemplo a utilização uma margem para mais e para menos do tráfego aqui considerado. Essa consideração é importante porque a adoção de um valor pontual de tráfego pode incorrer em erros maiores - sobretudo quando há limitação na disponibilidade de dados de tráfego, que foi o caso do presente trabalho - do que a consideração de um espectro nas análises.

## 4 ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO E DAS CARACTERÍSTICAS DE SUPERFÍCIE DE CAMADA POROSA DE ATRITO EM MEIO URBANO (CAPÍTULO 4)

### 4.1 Considerações iniciais

No Japão, devido à crescente proporção da população idosa, o ruído oriundo do contato pneu/pavimento nas rodovias e vias municipais é adotado como sendo um indicativo do padrão de qualidade ambiental. Os padrões de qualidade ambiental para poluição sonora são de 70 dB durante o dia e 65 dB à noite (NIELSEN *et al.*, 2005). Em 2003, o Ministro da Terra, Infraestrutura e Transporte reportou que o nível de poluição sonora de vias arteriais não atendeu a esses padrões em todo o país, e que a principal fonte geradora dos problemas de ruído eram vias urbanas com velocidade máxima de 40-60 km/h.

Nielsen *et al.* (2005) reportam que, no Japão, a redução de ruído por meio da utilização de CPA dura entre 2 e 3 anos em vias urbanas (40-60 km/h), enquanto que a durabilidade acústica em vias expressas (100 km/h) é de 10 anos – e a vida útil da estrutura é de mais de 10 anos para essas últimas. À época desse estudo, soluções de pavimentos com redução de ruído eram utilizadas em 20% nas vias nacionais. Além da utilização de CPA devido ao seu desempenho acústico, esse tipo de revestimento também é utilizado com o intuito de reduzir o acúmulo de água superficial durante períodos de chuvas e, conseqüentemente, melhorar a segurança viária e o conforto. No país, a CPA é utilizada principalmente em áreas densamente habitadas e urbanas.

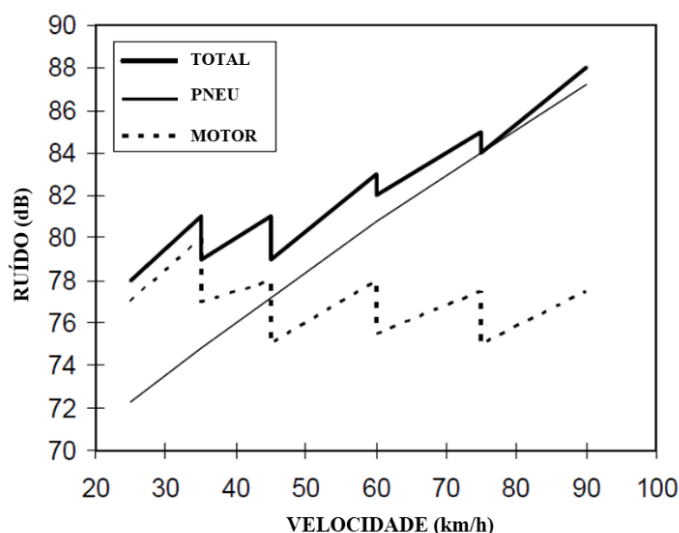
Albuquerque *et al.* (2013) colocam que no Brasil a concepção de ambientes urbanos preparados para a redução de ruído proveniente do tráfego ainda não é a maior preocupação de projetistas brasileiros. Internacionalmente, uma das formas de mitigar essa fonte de poluição sonora são as barreiras acústicas, os chamados pavimentos silenciosos e até mesmo uma combinação de ambas as soluções. Para Sandberg e Ejsmont (2002), pavimento silencioso é aquele que, na interação pneu-pavimento, é capaz de reduzir o ruído de passagem do veículo em pelo menos 3 dB (A) em relação àquele gerado em um pavimento convencional. De acordo com a *Permanent Association of Road Congresses* (PIARC) uma superfície, para ser considerada silenciosa, deve reduzir no mínimo 3 dB (A) em relação a uma camada padrão de referência (PIARC, 2013).

No Brasil, Strufaldi *et al.* (2010) relatam a combinação do uso de barreiras acústicas com um revestimento do tipo CPA para mitigação de ruídos do tráfego em um anel viário

urbano de grande porte que cruza uma área altamente habitada na cidade de São Paulo. Gibbs *et al.* (2005) relatam que um estudo dinamarquês comparou o custo da utilização de CPA, de barreiras acústicas e de isolamento acústico de fachadas para três categorias de vias, a saber: ruas da cidade, anel viário e rodovia. O estudo concluiu que a CPA promove redução de ruído muito maior por euro investido. No entanto, a seção de teste tinha apenas 3 anos de idade e, portanto, não é possível concluir que o pavimento é capaz de manter a redução de ruído ao longo de toda a sua vida de serviço.

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. Para a norma francesa referente ao método da passagem controlada ou *controlled pass-by* (CPB), NF S31-119-2 (2000), em velocidades superiores a 60 km/h, o ruído pneu-pavimento é predominante. Bendtsen e Andersen (2005) mostram que, para velocidades acima de 40 km/h, o ruído pneu-pavimento é a fonte dominante de ruído, ao passo que o ruído do motor tem pouca ou nenhuma influência sobre o ruído total emitido pelo veículo, conforme ilustrado na Figura 22. Para caminhões e ônibus, a transição entre o ruído do motor e o ruído pneu-pavimento ocorre em velocidades mais altas (60-70 km/h).

Figura 22 — Ruído total, do contato pneu-pavimento e do motor, emitido por um carro de passageiros com velocidade constante



Fonte: Traduzido de Bendtsen e Andersen (2005).

Diante do exposto, fica evidenciado o potencial da CPA enquanto solução da engenharia de pavimentação para a mitigação do ruído de tráfego desenvolvido na interface

pneu-pavimento. Na cidade de Fortaleza, esse tipo de revestimento está sendo empregado em ambientes urbanos e adensados, cujas velocidades de tráfego são baixas (no máximo é permitido 60 km/h) comparadas às permitidas em rodovias, locais onde normalmente se utiliza revestimentos do tipo CPA. Considerando-se que o ruído gerado na interface pneu-pavimento é a principal fonte de ruído do tráfego acima de determinadas velocidades (no mínimo, 40 km/h) e que se torna maior com o aumento desta, cabe avaliar o impacto da utilização desse tipo de solução de pavimentação em áreas urbanas, para as velocidades nelas permitidas.

É objetivo do presente trabalho avaliar o impacto acústico da utilização de revestimentos do tipo CPA em vias do ambiente urbano na cidade de Fortaleza-CE. Como é sabido que o ruído pneu-pavimento é influenciado pela micro e macro texturas da superfície e que a CPA proporciona melhor aderência pneu-pavimento, propõe-se também verificar se no ambiente urbano - onde a composição do tráfego em si e o padrão das manobras realizadas pelos veículos é diferente daquele das rodovias - esses parâmetros fornecem melhores condições de segurança em comparação a revestimentos tradicionais. Ainda, devido a existência de relatos na literatura de que o ensaio convencional de macrotextura, a mancha de areia, não é adequado para avaliar revestimentos do tipo CPA, as superfícies destes materiais também foram avaliadas por meio do uso de fotogrametria para a modelagem 3D da superfície.

## **4.2 Objetivos do capítulo**

A recente utilização de revestimentos do tipo CPA em vias do meio urbano na cidade de Fortaleza, associada aos reconhecidos benefícios funcionais desse tipo de revestimento, sobretudo na redução do ruído pneu-pavimento, ensejam o principal objetivo desse capítulo, que é: avaliação do desempenho acústico e das características de superfície da CPA em vias do meio urbano. Para alcançar esse objetivo, os seguintes objetivos específicos são propostos: (i) avaliação acústica de revestimento em CPA e em CA utilizados em vias urbanas com diferentes condições de entorno; (ii) avaliação da micro e da macrotextura de revestimentos do tipo CPA e CA com a utilização de métodos tradicionais e de modelagem 3D.

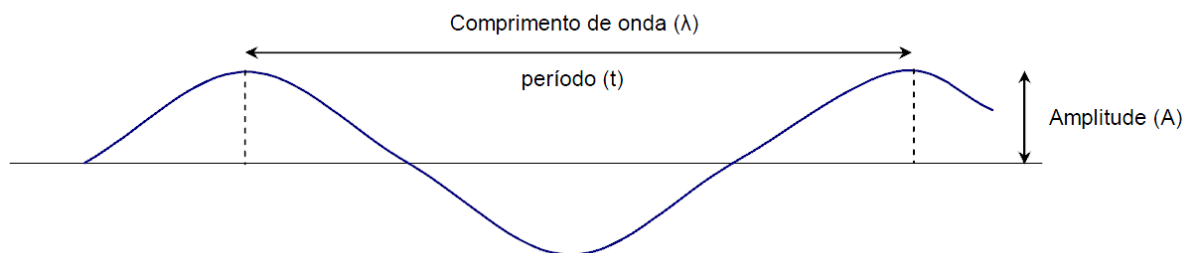
### 4.3 Revisão bibliográfica

#### 4.3.1 Conceitos de acústica

O som é a flutuação do ar em um movimento ondulatório, ao qual está associada a pressão acústica ou sonora, que é medida em decibéis (dB). O decibel combina a magnitude do som com a forma como os humanos ouvem (HANSON, DONAVON e JAMES, 2005). Gerges (2000) estabelece a diferença entre som e ruído. O primeiro é definido como variação da pressão atmosférica dentro dos limites de amplitude e banda de frequências aos quais o ouvido humano responde; enquanto o ruído é um tipo de som, cujo conceito é associado ao som desagradável e indesejado. Para o ouvido humano, a banda de frequência auditiva está entre 20 Hz e 20 KHz (GERGES, 2000). No entanto, dentro desta faixa de frequência, a sensibilidade do ouvido muda, e este é mais sensível na faixa de frequência de cerca de 1 kHz a 5 kHz, que é, coincidentemente, a mesma na qual ocorre o ruído pneu-pavimento (FEHRL, 2006).

As ondas sonoras produzidas pelos corpos em vibração podem ser caracterizadas a partir de três parâmetros: amplitude ( $A$ ), comprimento de onda ( $\lambda$ ) e período ( $t$ ). A amplitude corresponde à pressão máxima ou mínima produzida pela vibração, o comprimento de onda corresponde à distância entre picos consecutivos, e o período é o tempo entre esses picos. Esses parâmetros são ilustrados na Figura 23. O comprimento de onda também é definido como o inverso da frequência, e é dado pela Equação 10.

Figura 23 — Parâmetros físicos da onda sonora



Fonte: Kiely (1999).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (10)$$

Onde,

$\lambda$ : comprimento de onda, em m/ciclos;

c: velocidade do som (344 m/s);

f: frequência (Hz ou ciclos/s).

Como o ouvido humano compreende uma vasta gama de sons, ao invés de escala linear, uma escala logarítmica é utilizada para representar níveis de som (em dB). Para ruídos ambientais, os níveis de pressão sonora são normalmente ponderados na curva A, que corresponde aproximadamente à resposta do ouvido humano ao som. O ouvido tem seus próprios mecanismos de filtragem e a inclusão de A após dB indica que a escala foi ajustada ou “afinada” para ouvir como um humano. Utiliza-se, portanto, o termo dB (A) para se referir aos níveis de som que foram avaliados como A (GERGES, 2000).

A percepção do som depende da complexa fisiologia do ouvido humano e de sua resposta a variações na pressão sonora e ao processamento desta informação pelo cérebro. Além da ponderação de frequência, outro fator importante quando da avaliação de ruídos é o tempo de resposta. Para responder a variações na pressão sonora, o sistema auditivo requer um certo período de tempo durante o qual a informação é assimilada. Para avaliar as variações nos níveis de ruído típicos de quando o ruído pneu-pavimento é a fonte dominante, é utilizado um período de tempo no processamento do sinal dos medidores do nível sonoro que simula o tempo de resposta do sistema auditivo humano, conhecido como resposta rápida ou *fast* (F) (FEHRL, 2006).

O Nível de Pressão Sonora (NPS) ou *sound pressure level*, é a razão da amplitude média da pressão do som medida ( $p$ ) em relação à amplitude média da pressão do som que pode ser detectada apenas pelo ouvido humano ( $p_0$ ), normalmente referido como o limiar da audição e igual a  $20 \mu\text{Pa}$  (FEHRL, 2006). A Equação 11 mostra essa relação, onde a unidade do NPS é dB. Essa grandeza pode ser medida com Medidores de Nível de Pressão Sonora (MNPS) ou sonômetro. Esses equipamentos possuem filtros de ponderação ou compensação de frequência e circuitos de resposta, que atribuem a esses aparelhos características definidas e essenciais para cada finalidade, como a sensibilidade, o tempo de resposta, a reprodutibilidade, a exatidão, dentre outras funções (LÁO, 2004).

$$NPS = 10 \times \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (11)$$

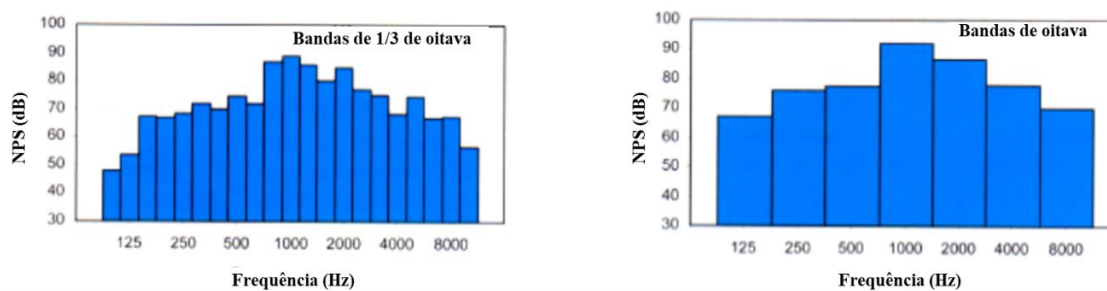
O NPS é um índice de medição de ruído. Esses níveis de ruído podem ser expressos em dB ou em dB(A), conforme a análise tenha sido feita com ou sem a ponderação A. O efeito

de uma combinação de eventos de ruído está relacionado com a energia do som combinada desses eventos (o princípio da igualdade de energia). A soma do total de energia durante certo período de tempo resulta em um nível equivalente à energia média do som durante esse período ( $L_{eq}$ ) (BERGLUND, LINDVALL e SCHEWLA, 1999). Se a análise do ruído tiver sido feita com a ponderação A, o nível sonoro é representado por  $L_{Aeq}$ . De acordo com FEHRL (2006), essa escala de ruído é a mais comumente utilizada na Europa para avaliação do impacto do ruído do tráfego rodoviário. O  $L_{Aeq}$  deve ser usado para medir o som contínuo, como o ruído gerado pelo tráfego rodoviário ou ruídos industriais. No entanto, quando o ruído consiste de um pequeno número de eventos discretos, indicadores de eventos individuais, como o nível de ruído máximo  $L_{Amáx}$ , devem ser utilizados (BERGLUND, LINDVALL e SCHEWLA, 1999). Este último representa o ruído máximo que ocorre em um curto período de tempo.

Vários indicadores de ruído e diferentes limites para esses são adotados por diferentes países. Na Europa, por exemplo, o *Environmental Noise Guidelines for the European Region* (WHO, 2018), utiliza os indicadores  $L_{DEN}$  (nível de pressão sonora ponderado dia-tarde-noite) e  $L_{night}$  (nível de pressão sonora contínua equivalente quando o intervalo de tempo de referência é a noite). Segundo as recomendações do citado documento, os níveis de ruído produzidos pelo tráfego devem estar abaixo de 53 dB e 45 dB, segundo os indicadores  $L_{DEN}$  e  $L_{night}$ , respectivamente. Ambos indicadores utilizam a escala de ruído  $L_{Aeq}$  como métrica básica, mas incluem fatores adicionais relativos à hora do dia e à duração da exposição (FEHRL, 2006).

Como dito anteriormente, o ouvido humano detecta uma larga escala de frequências e é mais sensível em determinadas faixas. Por essa razão, ao invés de especificar a intensidade de cada frequência para descrever o comportamento do ruído, geralmente são utilizadas escalas de frequência. Dentre estas, uma escala comumente utilizada são as bandas de oitava. Por vezes, é necessária a utilização de escalas de frequência ainda mais restritas, que são baseadas em bandas de oitava mais reduzidas, como as bandas de terço de oitava ou de doze avos de oitava (SANTOS, 2007). No estudo do ruído do tráfego exige-se o uso de bandas de 1/3 de oitava e até superiores para que se possa distinguir a influência dos diferentes mecanismos de geração de ruído. Na Figura 24 são ilustrados dois espectros de frequência para o mesmo som, dentre os quais o espectro em bandas de 1/3 de oitava é mais detalhado e, portanto, mais adequado ao estudo do ruído da interação pneu-pavimento (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

Figura 24 — Espectros de frequência em bandas de oitava e 1/3 de oitava



Fonte: Traduzido de Sandberg e Ejsmont (2002).

### 4.3.2 Ruído pneu-pavimento

As principais fontes de ruído em um veículo são a unidade de potência (motor, ventilador, entrada de ar, exaustão, transmissão, etc.), a sua aerodinâmica, e a interação pneu-pavimento (HANSON, DONAVON e JAMES, 2005). Embora o projeto do pneu e a operação do veículo afetem os níveis de ruído gerados, o projeto e a construção da superfície da via podem afetar tanto a geração do ruído quanto a sua propagação, que envolve vários mecanismos complexos. Os principais fatores da superfície que influenciam nessa geração e propagação são a rugosidade ou textura da superfície, o padrão de textura (positivo ou negativo) e o grau de porosidade da estrutura da superfície, com este último governando o grau de absorção do som. Além desses parâmetros, a impedância mecânica (parâmetro relacionado à rigidez do revestimento) também é relevante para o fenômeno (FEHRL, 2006; RASMUSSEN *et al.*, 2007).

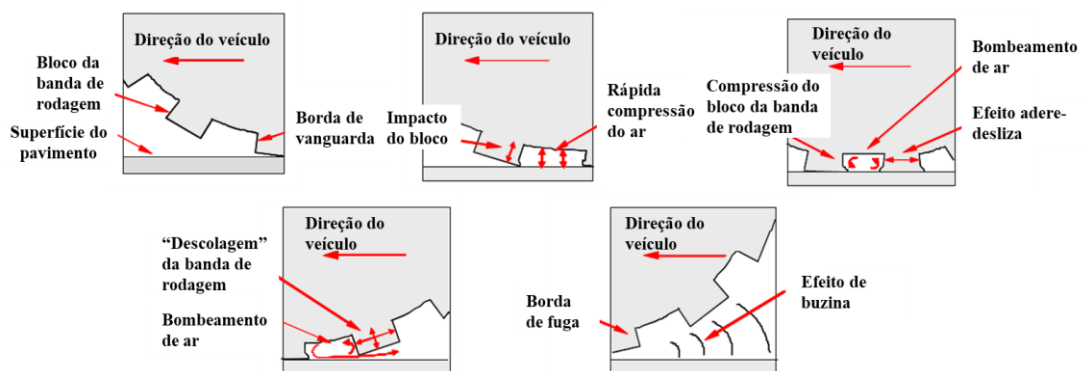
Para Newcomb e Scofield (2004), os dois fatores chave para a produção de pavimentos silenciosos são a textura e porosidade da superfície. Nesse sentido, de acordo com esses autores, menores TMN do agregado e texturas negativas são mais desejáveis. Superfícies relativamente planas e com vazios são caracterizadas como sendo de textura negativa, enquanto que a presença de saliências acima da superfície caracteriza uma textura positiva. Quanto a esses dois fatores citados, para Hall *et al.* (2009), misturas asfálticas contendo TMN do agregado de 5 ou 6 mm produzem pavimentos mais silenciosos em comparação a misturas asfálticas densas com TMN do agregado de 14 ou 16 mm. Em relação à porosidade, Hall *et al.* (2009) apontam a combinação de misturas asfálticas abertas com agregados de menores tamanho como eficazes na redução do ruído do tráfego, e afirmam que camadas porosas duplas (camada subjacente mais graúda e camada de superfície mais fina) ajudam a manter a segurança e a reduzir o ruído. Embora a macrotextura deva ser mantida tão baixa quanto possível para



proporcionar redução de ruído (entre 10 e 50 mm), essa prática não deve comprometer o atrito da superfície (WAYSON, 1998).

O ruído pneu-pavimento é considerado como um resultado de uma combinação de processos físicos. Segundo a FEHRL (2006), estes são categorizados, por convenção, em três classes distintas de mecanismos, que são: impactos e choques causados pela variação das forças de interação entre a banda de rodagem do pneu e o pavimento, incluindo a resposta vibracional da carcaça do pneu; processos aerodinâmicos entre - e dentro - da banda de rodagem do pneu e a superfície da estrada; e efeitos de adesão e micromovimentos da borracha do pneu na superfície da estrada. Os mecanismos descritos são apresentados na Figura 25, que mostra os vários estágios de rotação do padrão de banda de rodagem e os efeitos de geração de ruído em cada estágio do processo.

Figura 25 — Mecanismos de geração do ruído pneu-pavimento



Fonte: Traduzido de FEHRL (2006).

Os mecanismos que criam energia na interface pneu-pavimento, que é eventualmente radiada como som, são conhecidos como mecanismos de geração de ruído. Além desses, existem também características da interface pneu-pavimento que fazem com que essa energia seja convertida em som e irradiada de forma eficiente. Essas características são conhecidas como mecanismos de amplificação do som. Os mecanismos de geração de ruído são: impacto da banda de rodagem, bombeamento de ar, efeito desliza-adere e efeito adere/descola. Já os mecanismos de amplificação do ruído são: efeito buzina, ressonâncias de tubos de órgãos e ressonadores Helmholtz, vibração da carcaça e ressonância acústica interna (SANDBERG e EJSMONT, 2002). Maiores explicações sobre estes mecanismos podem ser encontradas em Sandberg e Ejsmont (2002).

De acordo com Sandberg (1996), mudanças de até 15 dB (A) nos níveis de ruído podem ocorrer devido à influência da superfície, mas em geral as mudanças são de 3 a 5 dB

(A). Sobre pavimentos capazes de reduzir o ruído pneu-pavimento, Bernhard *et al.* (2004) apontam que, em geral, estes são baseados nas seguintes descobertas experimentais: texturas superficiais com comprimentos característicos maiores que 20 mm tendem a aumentar o ruído, enquanto que aquelas com comprimento característico inferior a 10 mm tendem a reduzi-lo; a porosidade do pavimento tende a reduzir o ruído aerodinâmico nas frequências acima de 1500 Hz; uma superfície de pavimento elástica reduz o impacto e outras fontes mecânicas de geração de ruído; e, por fim, texturas negativas tendem a oferecer melhores resultados quanto à redução do ruído se comparadas a texturas positivas. Contudo, é importante ressaltar que, quando do projeto de pavimentos silenciosos, é necessário a consideração de outros aspectos – não acústicos - da superfície, como o atrito superficial, spray/borrifo de água, mudanças nos níveis de emissão do ruído ao longo do tempo, durabilidade e custo gerais (BERNHARD *et al.*, 2004; FEHRL, 2006).

Para CPAs, Bernhard *et al.* (2004) reportam que, em geral, há redução do ruído pneu-pavimento para frequências acima de 1000 Hz. Os referidos autores afirmam que a porosidade (ou seja, o elevado  $V_v$ ) desse tipo de revestimento reduz a força do mecanismo de bombeamento uma vez que evita a compressão do ar, e reduz o potencial amplificador do efeito buzina e dos mecanismos de ressonância de tubos de órgão e Helmholtz. Outra propriedade das CPAs, apontada pelos autores como capaz de reduzir o ruído do tráfego, é a qualidade da absorção sonora desses revestimentos. Para a FEHRL (2006), o desempenho acústico é influenciado por uma série de propriedades de superfície, dentre as quais as mais importantes são textura, porosidade e rigidez.

Apesar de ser uma solução desejável também devido à capacidade de redução da formação de spray d'água e melhoria do atrito, os autores apontam que duas preocupações associadas ao uso da CPA são: perda do benefício da redução de ruído a longo prazo devido à colmatação dos poros com areia e grãos durante a operação do pavimento; e manutenção da resistência ao deslizamento durante condições de gelo. Para contornar o problema da colmatação, na Europa são utilizadas as camadas porosas duplas que são mais autolimpantes do que os revestimentos porosos de camada única.

Nas camadas porosas duplas, a camada superior funciona como uma peneira que previne o entupimento da camada inferior por grãos maiores. A camada inferior é altamente porosa e é facilmente limpada pela ação de bombeamento do fluxo de tráfego. Além disso, na Europa, também se tem restringido o uso de CPA a áreas de alta velocidade. Algumas soluções apresentadas por Bernhard *et al.* (2004) para a produção de superfícies redutoras de ruído são: *overlays* finas do tipo *gap-graded* com agregados menores; controle de textura por meio da

escolha do TMN, da forma e da granulometria dos agregados; produção de revestimentos que sejam mecanicamente mais elásticos e acusticamente mais porosos.

Em um estudo promovido por órgãos norte-americanos, Gibbs *et al.* (2005) fizeram um levantamento e avaliaram estruturas de pavimentos utilizados na Europa para a redução de ruídos do tráfego. Os países investigados foram Dinamarca, França, Itália, Países Baixos e Reino Unido. Foi constatado que esses países têm políticas que exigem consideração de pavimentos silenciosos onde o ruído é uma preocupação. Para isso, utilizavam-se três tecnologias principais, que são: superfícies delgadas de misturas asfálticas do tipo *gap-graded* e textura negativa; misturas asfálticas altamente porosas (Vv superior a 18%) de camada única e dupla; e pavimentos de concreto com agregado exposto. Dentre as recomendações feitas pela equipe que realizou o estudo, para aplicação nos Estados Unidos, estavam: avaliar o uso de misturas asfálticas porosas de camada dupla para a redução de ruído em rodovias de alta velocidade, reduzir o tamanho dos agregados utilizados na camada de rolamento e testar textura superficial fina utilizando agregados miúdos em áreas urbanas, dentre outras com menores velocidades de tráfego.

### **4.3.3 Métodos de avaliação do ruído pneu-pavimento**

O ruído pneu-pavimento pode ser medido tanto no interior quanto no exterior do veículo. O primeiro caso é mais útil quando o objetivo da medição é avaliar o conforto dos ocupantes do veículo, o que geralmente é uma questão da engenharia mecânica. Já as medições do ruído externo são mais voltadas para o ruído ambiental gerado pela interação pneu/pavimento. A seguir são apresentados os métodos de medição do ruído externo mais utilizados, que são: método da proximidade fechada, método estatístico de passagem e método da passagem controlada. Esses métodos estabelecem condições que ressaltam, predominantemente, o ruído gerado pelo contato pneu-pavimento. Além desses, também é abordado nessa seção um método de medição do ruído de fundo ou nível global de ruído.

#### **4.3.3.1 Método de proximidade fechada ou Close Proximity Method (CPX)**

Métodos de proximidade fechada foram desenvolvidos para permitir que as medições focassem no ruído da interação pneu-pavimento (BERNHARD, 2004). O método da proximidade fechada ou, do inglês, *Close Proximity Method* (CPX), é normatizado pela ISO 11819-2 (2017). O método avalia o campo sonoro próximo da zona de contato pneu-pavimento,

utilizando para isso um trailer projetado para essa finalidade, que é equipado com microfones situados próximos aos pneus de referência. Esse aparato foi concebido de forma que a incidência de vento, e de outras fontes sonoras, nos microfones é reduzida por uma cobertura. Assim, esse tipo de medição pode ser realizado na corrente de tráfego e é um método relativamente rápido. No entanto, o método possui algumas desvantagens, como a limitação dos tipos de pneu e o fato de utilizar um único peso, o que não leva em consideração a variação de veículos típica do tráfego. A Figura 26 mostra um equipamento desenvolvido para ser utilizado nesse método.

Anteriormente, para a medição do ruído segundo as recomendações da ISO 11819-2:2000, era utilizado um conjunto de quatro pneus de referência, onde três destes representavam pneus de carros de passageiros e um era representativo de pneus de veículos pesados. No entanto, após a realização de estudos sobre recomendações para atualização desse conjunto de pneus de referência, foi proposta uma alteração onde os pneus a serem utilizados no trailer devem seguir as especificações da ISO 11819-3 (2017). De acordo com as recomendações, os pneus de referência passaram a ser apenas dois, com um deles representando o ruído gerado por veículos leves e o outro sendo mais adequado para representar o ruído de veículos pesados (MORGAN, SANDBERG e VAN BLOKLAND, 2009).

Os testes são realizados em uma ou mais das velocidades de referência (50, 80 e 110 km/h). O ruído gerado pela interação da superfície com os dois tipos de pneus é avaliado e pode ser expresso por meio de um índice com uma média ponderada das duas avaliações (CPXI), que serve, inclusive, para a comparação entre diferentes superfícies de revestimentos (ISO 11819-2:2017).

Figura 26 — Trailer CPX e detalhe da posição dos microfones próximo ao pneu de referência



Fonte: Adaptado de Bueno *et al.* (2011).

#### 4.3.3.2 Método estatístico de passagem ou *Statistical Pass-by Method* (SPB)

No Brasil, o método estatístico de passagem ou *Statistical Pass-by Method* (SBP) é normatizado pela ISO 11819-1 (1997). Este método define diretrizes para a medição da influência da superfície do pavimento no ruído do tráfego. Os dois propósitos principais para os quais esse método pode ser utilizado são: classificação, em um tipo, de superfícies em boas condições, de acordo com sua influência no ruído do tráfego; e avaliação da influência no ruído do tráfego, de diferentes superfícies em locais específicos, independentemente de sua condição e idade. Um exemplo dessa segunda aplicação é a avaliação do ruído pneu-pavimento, em um mesmo local, antes e após a aplicação de um recapeamento.

De acordo com esse método, devem ser medidas a maior pressão sonora (com ponderação de frequência A e tempo de resposta F) e a velocidade de veículos individuais que estejam passando por um determinado ponto da via. A norma estabelece que as medições devem ocorrer para três categorias de veículos do tráfego que passa no local do teste, bem como estabelece a quantidade mínima de veículos para cada uma delas. Para os veículos da categoria 1 (veículo de passeio), o número mínimo de medições é 100, já para as categorias 2a (veículo pesado com dois eixos) e 2b (veículo pesado com mais de dois eixos) esse número é 30. No entanto, a soma dos veículos de categoria 2a e 2b deve ser de, no mínimo, 80. Ainda, a norma determina que devem ser levados em consideração apenas veículos que estão livres da interferência acústica de outros veículos. O medidor do nível sonoro deve atender aos requisitos de um instrumento tipo 1 da norma IEC 60651.

A citada norma estabelece três categorias de vias, de acordo com a gama de velocidades nas quais os veículos trafegam e estas geralmente correspondem a áreas urbanas (45 km/h a 64 km/h), suburbanas (65 km/h a 99 km/h) ou rurais (100 km/h ou mais). Para cada uma das faixas de velocidade definidas, bem como para cada uma das três categorias de veículos, é definida uma velocidade de referência, como mostrado na Tabela 28. Com esses dados, deve ser feita uma reta de regressão do nível de pressão sonora máximo de ponderação A *versus* o logaritmo da velocidade para cada categoria de veículo. A partir dessa linha, é determinado o nível sonoro do veículo ( $L_{veh}$ ), que corresponde ao nível de pressão sonora máximo de ponderação A na velocidade de referência.

O desempenho acústico das superfícies é reportado por meio do índice chamado *Statistical Pass-by Index* (SPBI). Esse índice é calculado por meio da Equação 12, onde  $L_1$ ,  $L_{2a}$  e  $L_{2b}$  são valores de nível de pressão sonora para cada categoria em dB (A),  $W_1$ ,  $W_{2a}$  e  $W_{2b}$  são

fatores que presumem as proporções dos veículos para cada categoria e  $V_1$ ,  $V_{2a}$  e  $V_{2b}$  são as velocidades de referência.

Tabela 28 — Velocidades de referência e fatores de ponderação ( $W_x$ )

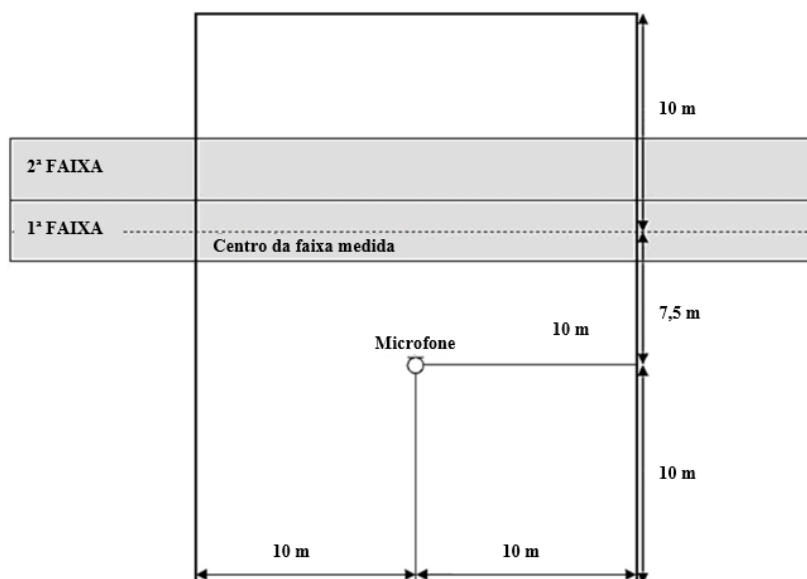
Categoria do veículo	Velocidade da via						
	Baixa		Média		Alta		
Nome	Nº	Vel. Referência (Km/h)	$W_x$	Vel. Referência (Km/h)	$W_x$	Vel. Referência (Km/h)	$W_x$
Carros	1	50	0,900	80	0,800	110	0,700
Pesados de dois eixos	2a	50	0,075	70	0,100	85	0,075
Pesados de mais de dois eixos	2b	50	0,025	70	0,100	85	0,225

Fonte: ISO 11819-1 (1997).

$$SPBI = 10 \log \left[ W_1 \times 10^{\frac{L_1}{10}} + W_{2a} \left( \frac{V_1}{V_{2a}} \right) \times 10^{\frac{L_{2a}}{10}} + W_{2b} \left( \frac{V_1}{V_{2b}} \right) \times 10^{\frac{L_{2b}}{10}} \right] \quad (12)$$

Devido as exigências quanto à quantidade, tipo e condições acústicas da passagem dos veículos, o método SPB é considerado demorado. Além disso, este tem severas restrições quanto ao ambiente acústico. A Figura 27 mostra a área que deve estar livre de superfícies refletoras. O nível sonoro deve ser medido a 7,5 m do centro da faixa de teste e a 1,2 m do nível da via. Durante as medições, é preciso certificar-se que a temperatura do ar esteja entre 5 °C e 30 °C, que a temperatura da superfície do pavimento esteja entre 5 °C e 50 °C e que a velocidade do vento na posição do microfone não ultrapasse 5 m/s.

Figura 27 — Área que deve estar livre de superfícies refletoras de acordo com o método SPB



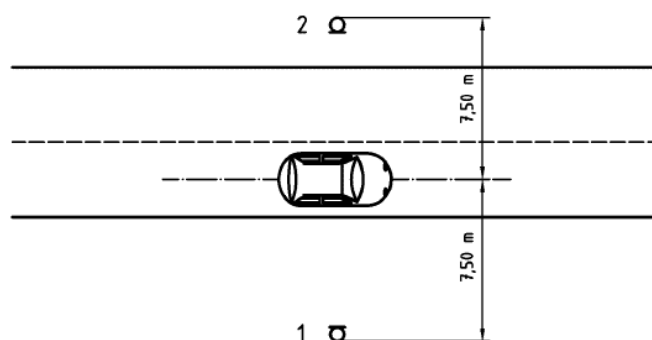
Fonte: Traduzido de ISO 11819-1 (1997).

#### 4.3.3.3 Método da passagem controlada (CPB)

O método da passagem controlada ou *Controlled Pass-by* (CPB) é indicado, dentre outras situações, para casos onde não seja possível aplicar o método SPB, como por exemplo: vias sem circulação ou de trânsito leve e rodovias muito movimentadas, que não permitem isolamento dos veículos, para os quais seria necessário interromper o tráfego. Esse método é normatizado pela NF S31-119-2 (2000).

No método CPB, o ruído pneu/pavimento é medido próximo à pista durante a passagem de um veículo, na ausência de outras fontes de ruído. O aparelho de medição deve ser um sonômetro de classe 1, que deve distar horizontalmente 7,5 m do eixo do veículo e estar a 1,2 m da superfície do revestimento. A norma define as condições meteorológicas a serem atendidas quando da medição, bem como estabelece algumas restrições quanto ao entorno, de forma a evitar que haja interferências de objetos e superfícies refletoras ou absorventes do ruído emitido. A Figura 28 mostra as posições possíveis do microfone em relação ao veículo.

Figura 28 — Posição do microfone em relação ao veículo



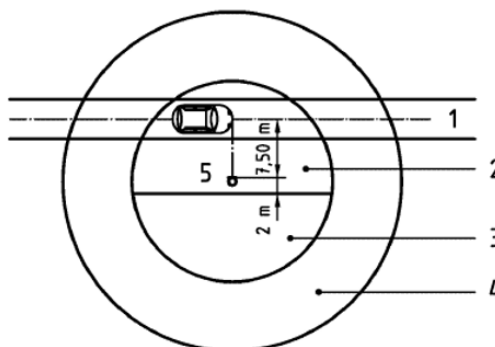
Fonte: ISO NF S31-119-2 (2000).

A norma NF S31-119-2 (2000) define uma zona chamada de zona de medição, de extensão de 120 m, na qual o revestimento deve ser homogêneo e isento de elementos particulares (reparos localizados, juntas de dilatação, etc.), a declividade longitudinal deve ser inferior a 2% e o traçado deve ser plano e retilíneo. O local de medição deve estar situado a igual distância de ambas as extremidades dessa zona, deve ser livre de obstáculos reflexivos de pequena dimensão (como barreiras metálicas ou sebe de árvores com troncos de diâmetro  $\leq 0,10$  m) em um raio de 10 m ao redor do microfone ou obstáculo de grande dimensão situado em um raio pelo menos igual a 10 vezes a menor dimensão do obstáculo, com um máximo de 50 m.

A Figura 29 mostra um desenho esquemático das restrições do local de medição. Tendo em vista que as condições de local são muito restritivas, a norma tolera configurações para as quais um obstáculo de pequena dimensão esteja situado a pelo menos 2 metros atrás do microfone. Quanto às condições meteorológicas, a temperatura do ar à altura da medição (1,20 m) deve estar entre +5 e +30 °C, a temperatura da superfície do pavimento deve estar entre +5 °C e +50 °C e a velocidade média do vento deve ser inferior a 5 m/s. Além disso, é necessário que o revestimento esteja seco.



Figura 29 — Zonas de restrição do local de medição



Legenda:

1 – Eixo da via de circulação

2 – Zona A

3 – Zona B

4 – Zona C

5 – Microfone

Fonte: Traduzido de ISO NF S31-119-2 (2000).

As zonas A, B e C da Figura 29 são definidas da seguinte forma (ISO NF S31-119-2, 2000):

- Zona A: área de um raio de 10 m ao redor do microfone à qual é subtraída a zona situada a mais de 2 m atrás do microfone. Essa zona não deve conter obstáculos de pequena dimensão;

- Zona B: área situada a mais de 2 m atrás do microfone contida na área de raio de 10 m ao redor do microfone. Essa zona pode incluir obstáculos de pequenas dimensões (barreira de segurança, árvores cujo diâmetro do tronco é inferior a 0,10 m). Esta zona não pode conter obstáculos refletores compactos, mesmo de altura baixa.

- Zona C: área compreendida entre dois círculos de raios de 10 m e 50 m, no máximo, ao redor do microfone. Nessa zona é proibido todo obstáculo situado a uma distância  $r$  do microfone, cuja menor dimensão seja superior a  $r/10$ . Ou seja, a menor dimensão do objeto tem que ser  $\leq r/10$ .

São definidas duas categorias de veículos (veículo comercial pequeno ou médio inferior e veículo comercial médio ou grande) e duas configurações (conjunto veículo-pneu) para cada categoria que devem ser utilizados nas medições. O veículo pequeno deve ter massa inferior a 900 kg e largura total de 1,45 a 1,55 m, enquanto a massa do veículo médio deve estar entre 900 kg e 1300 kg, e sua largura total deve estar entre 1,75 m e 1,95 m. Quanto às configurações, para a mesma categoria de veículos, o que as difere é o tipo de pneu. O veículo deve passar em frente ao sonômetro com a velocidade estabilizada, com o motor em marcha que produza o menor ruído mecânico possível. As velocidades de passagem devem estar

distribuídas o mais uniformemente possível entre 70 km/h e 110 km/h. Para cada configuração são requeridas oito observações, ou seja, 32 observações por revestimento.

Para cada configuração de ensaio e para todas as configurações de ensaio combinadas, é calculada uma reta de regressão linear (dos mínimos quadrados) do nível de pressão acústica ( $L_{Amáx}$ ) em função do logaritmo decimal da velocidade. A partir dessas regressões, são calculados os níveis de referência ( $L_{ref}$ ), à velocidade de referência ( $V_{ref} = 90$  km/h), aos quais são associados um intervalo de confiança (IC) com grau de confiança de 95%. A reta de regressão é apresentada na Equação 13. As equações para cálculo dos coeficientes de regressão e do IC também são fornecidas pela norma. Para que esse último parâmetro tome os valores mais baixos possíveis, é indispensável que a média das velocidades dos veículos da classe, ou das configurações definidas, difira pouco da velocidade de referência.

$$L = L_{ref} + a \times \log\left(\frac{V}{V_{ref}}\right) \quad (13)$$

Onde,

$V_{ref}$ : velocidade de referência, km/h;

$L$ : nível de ruído medido, seja de pressão máxima, seja de exposição, em nível global ou em nível por banda de terço de oitava à velocidade, em dB;

$V$ : velocidade de passagem contida no intervalo de velocidades observadas, em km/h;

$L_{ref}$ : nível de ruído resultante da regressão linear dos mínimos quadrados, para a velocidade  $V_{ref}$ , em dB;

$a$ : inclinação da regressão linear, em decibéis por década de velocidade.

#### 4.3.3.4 Ruído de fundo

O ruído gerado pelo contato pneu-pavimento é uma das fontes de ruído decorrentes do tráfego, que ainda conta com o ruído dos motores dos veículos, com as buzinas, etc. como fontes de ruído. Além dessas fontes, as atividades e edificações do entorno, as condições meteorológicas locais, dentre outros fatores, também influenciam para o ruído global (ou de fundo) das vias. No Brasil, existe legislação que determina as condições de avaliação e aceitabilidade do ruído em áreas habitadas, a NBR 10151 (2000). O método de avaliação se dá por medições do nível de pressão sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ), que é o nível obtido a partir do

valor médio quadrático da pressão sonora (ponderação A) referente a todo o intervalo de medição.

A referida norma estabelece o Nível de Critério de Aceitação (NCA) para ambientes externos e internos, de acordo com os tipos de áreas e o turno (diurno ou noturno). A Tabela 29 mostra esses valores. Os limites de horário para cada turno são definidos pelas autoridades, de acordo com os hábitos da população. No entanto, o período noturno deve começar até as 22 h e deve terminar antes das 7 h do dia seguinte (se domingo ou feriado, deve terminar antes das 9 h). Ainda, a norma indica que se o nível de ruído ambiente - no local e horário considerados - definido como o NPS (em ponderação A) equivalente na ausência do ruído gerado pela fonte sonora em questão, for superior ao valor reportado na Tabela 29, o NCA assume o valor do ruído ambiente. Para a avaliação de ruídos em ambientes internos, a norma indica as devidas correções em dB (A) que devem ser feitas.

Tabela 29 — Nível de critério de avaliação para ambientes externos, em dB (A)

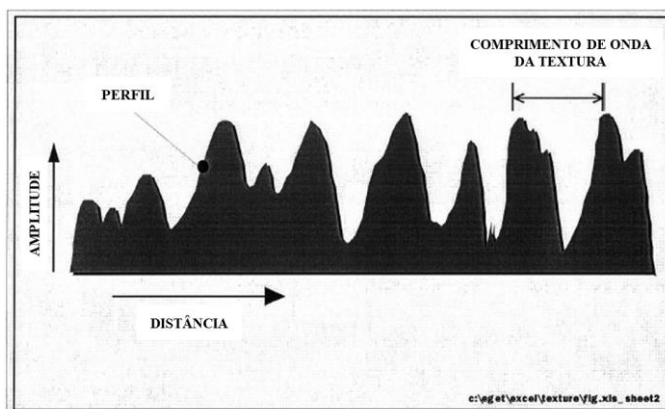
<b>Tipos de áreas</b>	<b>Diurno</b>	<b>Noturno</b>
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: NBR 10151 (2000).

#### **4.3.4 Textura superficial do revestimento**

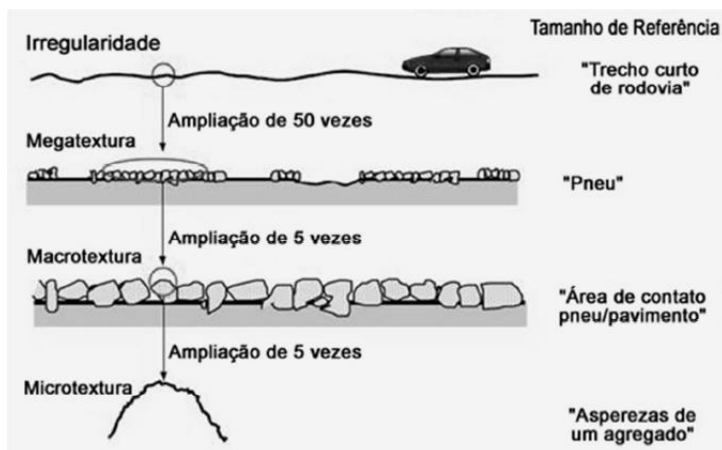
De acordo com a ISO 13473-2 (2002), que define a terminologia e os requisitos básicos para a análise do perfil da textura do pavimento, a textura é definida como o desvio de uma superfície do pavimento de uma superfície verdadeiramente plana, dentro das seguintes faixas de comprimentos de onda: microtextura (comprimentos de onda de 0 a 0,5 mm), macrotextura (comprimentos de onda de 0,5 a 50 mm), megatextura (comprimentos de onda de 50 a 500 mm) e irregularidades (comprimentos de onda superiores a 500 mm). Para cada uma dessas faixas, há amplitudes pico-a-pico típicas, sendo de 0,001 a 0,5 mm para microtextura, 0,1 a 20 mm para macrotextura e 0,1 a 50 mm para megatextura. Essas escalas de textura foram definidas pelo PIARC (1987). A Figura 30 retrata, esquematicamente, alguns termos básicos que descrevem a textura da superfície. A Figura 31 ilustra a classificação da textura segundo essas categorias.

Figura 30 — Ilustração de termos básicos que descrevem uma superfície



Fonte: Traduzido de Sandberg (1997).

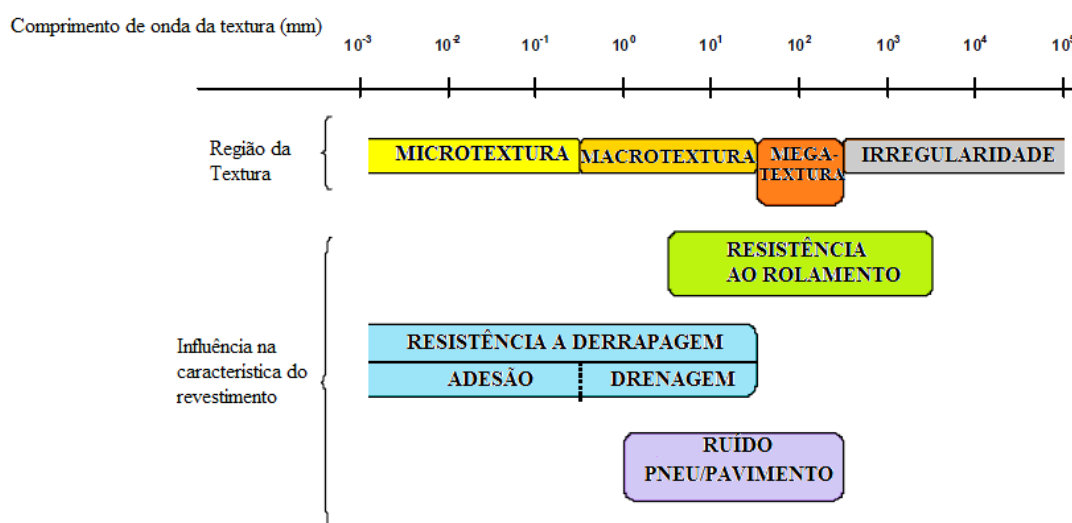
Figura 31 — Ilustração das faixas de textura



Fonte: Traduzido de Sandberg (1997).

De acordo com os trabalhos desenvolvidos pelo PIARC (1987), certas faixas de comprimento de onda da textura do revestimento influenciam as características da superfície relativas ao ruído pneu-pavimento, à resistência ao rolamento e à derrapagem. Essas faixas são mostradas na Figura 32. De acordo com esse estudo, os comprimentos de onda da ordem da macro e da megatextura ( $0,5 \text{ mm} < \lambda < 500 \text{ mm}$ ) influenciam no ruído pneu-pavimento, enquanto a adesão e a drenagem são influenciadas, respectivamente pela micro e pela macrotextura, e a resistência ao rolamento é mais influenciada pela macro e megatextura e pelas irregularidades. Para FEHRL (2006), uma compreensão da relação entre o comprimento de onda da textura e os demais parâmetros descritos na Figura 32 fornece a base para a caracterização de superfícies de pavimentos que proporcionam menores níveis de ruído sem comprometer a durabilidade, o desempenho quanto à derrapagem e a segurança.

Figura 32 — Faixas de comprimento de onda da textura e sua influência nas características do pavimento

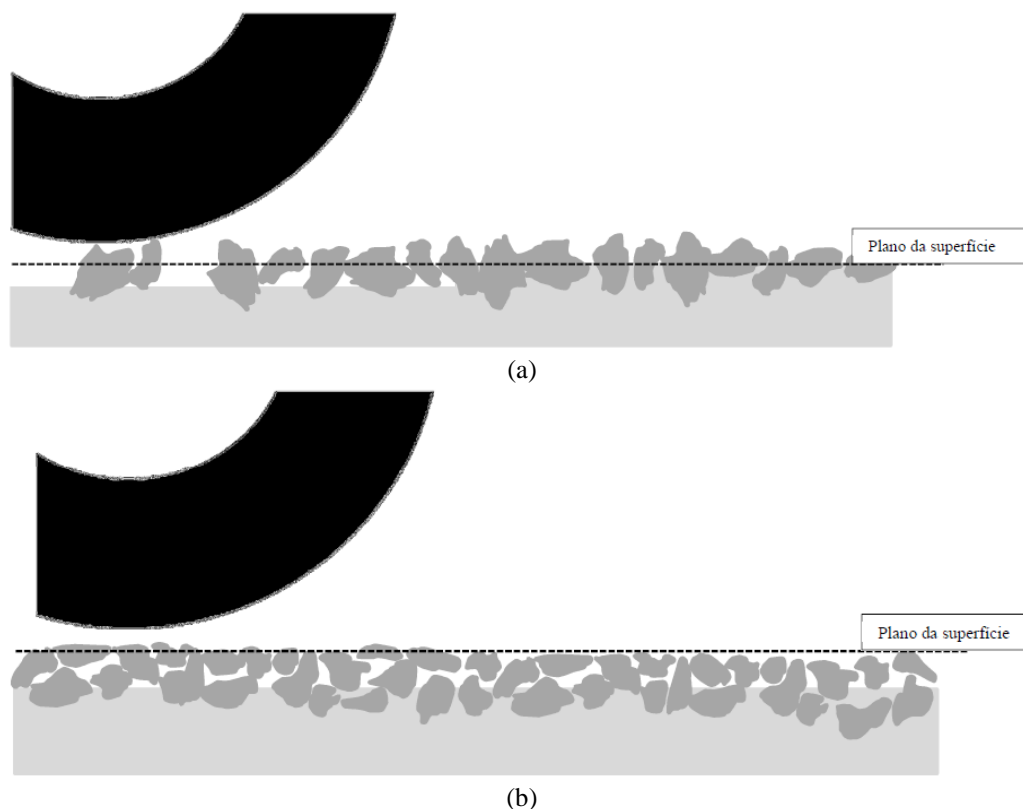


Fonte: Traduzido de Sandberg (1987) *apud* FEHRL (2006).

A relação entre textura superficial e ruído pneu-pavimento é complexa. Para exemplificar como parâmetros de textura podem influenciar no ruído pneu-pavimento, toma-se como exemplo o mecanismo de geração do ruído citado na Seção 4.3.2 referente à adesão entre o pneu e a área de contato com o pavimento. Forças compostas por histerese (perda de energia resultante de deformações na borracha do pneu devido ao efeito da textura) e componentes de adesão controlam o atrito entre a banda de rodagem do pneu e a superfície. O componente de adesão tem origem a nível molecular e é governado, em grande parte, pelas características de rugosidade em pequena escala, ou seja, pela microtextura. Já o componente de histerese é controlado pela macrotextura, cujos comprimentos de onda correspondem ao tamanho do agregado utilizado na superfície (FEHRL, 2006).

Outra consideração importante a respeito da textura é a forma como essa se dispõe no plano vertical, podendo ser positiva ou negativa. A textura positiva é formada por partículas ou picos que se projetam acima do plano da superfície, enquanto que a negativa é normalmente associada a materiais nos quais a textura compreende amplamente vazios entre partículas cujas superfícies superiores formam um plano geralmente plano, típico de sistemas de superfície fina (FEHRL, 2006). Na Figura 33 é mostrada a disposição dos agregados em uma superfície de textura (a) positiva e (b) negativa.

Figura 33 — Texturas (a) positiva e (b) negativa



Fonte: Callai (2011).

#### 4.3.4.1 Macrotextura

A macrotextura é normalmente formada pela forma e pelo tamanho dos agregados na superfície do pavimento. O arranjo e o espaçamento das partículas de agregados graúdos também afeta essa propriedade (KOGBARA *et al.*, 2016). Hall *et al.* (2009) resumem os principais fatores que afetam a macrotextura, que são: o tamanho máximo do agregado, tipos de agregados graúdos e miúdos, teor de ligante asfáltico da mistura e sua viscosidade, granulometria e Vv da mistura asfáltica.

Kogbara *et al.* (2018a) citam, como métodos mais comuns para determinação da macrotextura de pavimentos asfálticos, o método volumétrico da mancha de areia, o *circular texture meter* e o medidor de vazão. O método da mancha de areia, normatizado pelas normas NBR 16504 (2016) e ASTM E965-15 (2019), é amplamente pesquisado, bem apoiado pela literatura e consagrado nos códigos de prática europeus e americanos (MILLAR, 2013), bem como no Brasil. Embora bastante difundido, Millar (2013) chama atenção para o fato de que esse ensaio oferece uma classificação qualitativa acerca da superfície do pavimento, utilizando para isso um único parâmetro geométrico, o que oferece uma caracterização limitada da real

natureza da interface pneu-pavimento. Trata-se de um método volumétrico de determinação da profundidade média de macrotextura superficial, no qual um volume conhecido de material granular padrão é espalhado na superfície do revestimento e a profundidade média da macrotextura ou *Mean Texture Depth* (MTD) é calculada subsequentemente. A Figura 34 mostra o procedimento de espalhamento de uma areia padronizada utilizada para execução desse ensaio.

Figura 34 — Espalhamento da areia padronizada na superfície do pavimento



Fonte: Elaborado pela autora.

O ensaio de mancha de areia consiste em despejar e espalhar em movimentos circulares uniformes, com disco espalhador próprio, um volume conhecido ( $25 \text{ mm}^3$ ), de material granular padrão na superfície do pavimento. O material pode ser esferas de vidro com, no mínimo, 90% da massa passante na peneira nº 60 (0,250 mm) e retida na peneira nº 80 (0,180mm) ou areia natural com, no mínimo, 90% da massa passante na peneira nº 50 (0,300 mm) e retida na nº 100 (0,150 mm). Após o espalhamento do material na superfície, devem ser obtidas quatro medidas do diâmetro da área circular com uma régua graduada, igualmente espaçadas ao redor da circunferência, para o cálculo da profundidade média de macrotextura através da Equação 14.

$$H_s = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (14)$$

Onde:

$H_s$  = profundidade média da macrotextura da superfície do pavimento, em mm;

$V$  = volume de material granular padrão espalhado, em  $\text{mm}^3$ ;

$D$  = diâmetro médio da área circular coberta pelo material granular, em mm.

A macrotextura pode ser classificada em função da altura média da mancha de areia de acordo com os limites apresentados na Tabela 30, sugeridos no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006b). O manual também sugere uma faixa de profundidade média da mancha de areia,  $H_s$ , para garantir a segurança do usuário,  $0,6 \text{ mm} < H_s < 1,2 \text{ mm}$ , correspondente a uma textura de média a grosseira. Aps (2006), no entanto, propôs a incorporação de mais duas faixas na classificação da mancha de areia, para tornar o número de faixas compatível com aquele da classificação de microtextura com o uso do pêndulo britânico. As faixas propostas por Aps (2006) para a classificação de macrotextura são mostrados na Tabela 31.

Tabela 30 — Classes de macrotextura propostas por DNIT (2006b)

<b>Profundidade média (mm)</b>	<b>Textura superficial</b>
$H_s < 0,20 \text{ mm}$	Muito Fina ou Muito Fechada
$0,20 \text{ mm} < H_s < 0,40 \text{ mm}$	Fina ou Fechada
$0,40 \text{ mm} < H_s < 0,80 \text{ mm}$	Média
$0,80 \text{ mm} < H_s < 1,20 \text{ mm}$	Grosseira ou Aberta
$H_s > 1,20 \text{ mm}$	Muito Grosseira ou Aberta

Fonte: DNIT (2006b).

Tabela 31 — Classes de macrotextura propostas por Aps (2006)

<b>Profundidade média (mm)</b>	<b>Textura superficial</b>
$H_s \leq 0,20 \text{ mm}$	Muito Fina
$0,20 \text{ mm} < H_s \leq 0,40 \text{ mm}$	Fina
$0,40 \text{ mm} < H_s \leq 0,60 \text{ mm}$	Medianamente Fina
$0,60 \text{ mm} < H_s \leq 0,80 \text{ mm}$	Média
$0,80 \text{ mm} < H_s \leq 1,00 \text{ mm}$	Medianamente Grossa
$1,00 \text{ mm} < H_s \leq 1,20 \text{ mm}$	Grossa
$H_s > 1,20 \text{ mm}$	Muito Grossa

Fonte: Aps (2006).

Além da classificação apresentada na Tabela 30, Pasquet (1968) propõe o tipo de via e as velocidades de tráfego para as quais cada classe de textura é indicada. A Tabela 32 mostra essa relação.

Tabela 32 — Aplicações de revestimento a depender da altura média da mancha de areia

<b>Altura média da mancha de areia (mm)</b>	<b>Textura superficial</b>	<b>Aplicação do revestimento</b>
$H_s < 0,20 \text{ mm}$	Muito Fina ou Muito Fechada	Não deve ser utilizado
$0,20 \text{ mm} < H_s < 0,40 \text{ mm}$	Fina ou Fechada	Reservado para zonas urbanas ( $V < 80 \text{ Km/h}$ )
$0,40 \text{ mm} < H_s < 0,80 \text{ mm}$	Média	Indicado para vias com $80 \text{ Km/h} < V < 120 \text{ Km/h}$



Altura média da mancha de areia(mm)	Textura superficial	Aplicação do revestimento
$0,80 \text{ mm} < H_s < 1,20 \text{ mm}$	Grosseira ou Aberta	Indicado para vias rápidas com $V > 120 \text{ Km/h}$
$H_s > 1,20 \text{ mm}$	Muito Aberta	Indicado em casos especiais (zonas de perigo constante com longos trechos retos, zonas onde há uma presença constante de contaminantes, etc.)

Fonte: Adaptado de Pasquet (1968).

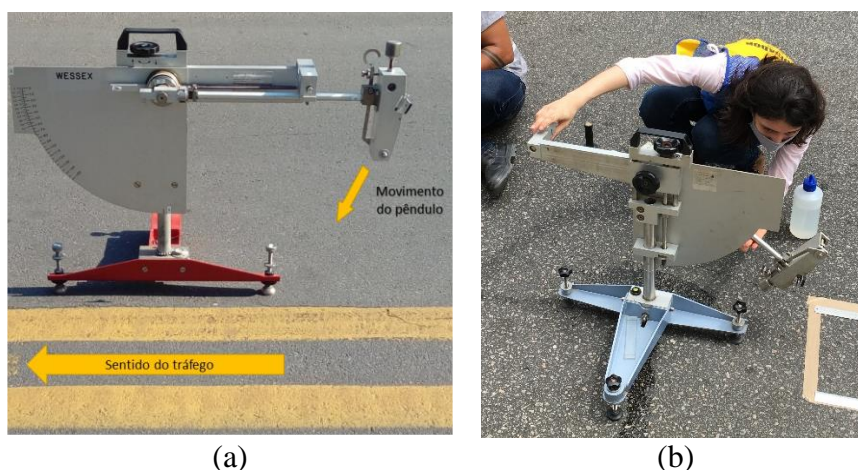
Callai (2011) e Knabben (2012) chamam a atenção para o fato de que, em superfícies mais porosas, o material padronizado utilizado no ensaio de mancha de areia preenche os poros da camada asfáltica, o que torna esse ensaio não adequado para superfícies desse tipo. Por outro lado, a técnica de *Close-Range Photogrammetry* (CRP) permite a caracterização da textura para uma vasta gama de texturas superficiais positivas e negativas Millar (2013).

#### 4.3.4.2 Microtextura

A microtextura é a rugosidade da superfície de um pavimento em nível microscópico (KASSEM *et al.*, 2013). Esta 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. Esse componente da textura é especialmente importante em baixas velocidades, mas precisa existir em qualquer velocidade (FLINTSCH *et al.*, 2012). A microtextura, normalmente, é avaliada por meio de medições de atrito, ao invés de ser medida diretamente em campo. Para isso, os equipamentos mais utilizados são o pêndulo britânico, o *dynamic friction tester* e o *locked wheel skid trailer* (HAN, LIU E FWA, 2018).

O ensaio do pêndulo britânico é bastante utilizado tanto por pesquisadores quanto por empresas que executam serviços de pavimentação. O referido ensaio é normatizado pela ASTM D 303-93 (2018) e pela NBR 16780 (2019). Esse equipamento mede o valor da resistência à derrapagem (VRD) e é constituído por um pêndulo oscilante cuja extremidade livre contém um deslizador de borracha. O resultado do ensaio é expresso em *British Pendulum Number* (BPN), que é uma medida baseada na energia perdida devido ao atrito entre a borracha na extremidade do pêndulo oscilante e a superfície que está sendo testada. A superfície a ser ensaiada deve ser previamente molhada. A Figura 35a mostra o equipamento com a haste na posição antes de ser liberada e a Figura 35b mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 35 — Pêndulo britânico nas posições a) antes do início e b) durante o ensaio



Fonte: a) NBR 16780 (2019) e b) Autora.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006b) estabelece faixas de classificação da microtextura em função dos valores obtidos de VRD. Essas classes são mostradas na Tabela 33. O citado manual recomenda valores de VRD  $\geq 55$ , o que implica que as superfícies tenham microtextura rugosa ou muito rugosa.

Tabela 33 — Classes de microtextura

Limites da microtextura (BPN)	Classificação
$VRD < 25$	Perigosa
$25 \leq VRD \leq 31$	Muito Lisa
$32 \leq VRD \leq 39$	Lisa
$40 \leq VRD \leq 46$	Insuficientemente rugosa
$47 \leq VRD \leq 54$	Medianamente rugosa
$55 \leq VRD \leq 75$	Rugosa
$VRD > 75$	Muito rugosa

Fonte: DNIT (2006b).

#### 4.3.4.3 International Frictional Index (IFI)

Dada a variedade de métodos e sistemas utilizados para medição de textura e atrito, o comitê técnico da PIARC propôs um experimento internacional para comparar e harmonizar medições de textura e resistência à derrapagem, reportado em Wambold *et al.* (1995). Um dos objetivos desse experimento foi a proposição de uma escala internacional de valores de atrito, denominada *International Friction Index* (IFI). Esse índice consiste de dois parâmetros, F60 e Sp. F60 é a estimativa harmonizada do atrito a 60 km/h e Sp é a constante de velocidade. Medidas de macrotextura foram consideradas excelentes preditores de Sp e são, portanto, utilizadas nesse cálculo. A partir desses parâmetros, o IFI é, então, calculado. Esse índice

também permite o cálculo do atrito em qualquer velocidade de interesse. O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006b) considera como ótimo o revestimento que apresentar IFI superior a 0,30 para a velocidade de 60 km/h.

Para o cálculo do IFI, primeiramente, obtem-se o parâmetro  $Sp$  (Equação 15). Este é, então, utilizado para converter a medida de atrito para uma velocidade de 60 km/h, por meio do parâmetro  $F60$  (Equação 16). Por fim, esses dois parâmetros são empregados na Equação 17 para o cálculo do IFI. Utilizando-se a Equação 17, o atrito pode ser obtido para outras velocidades.

$$Sp = a + b \times Tx \quad (15)$$

$$F60 = A + B \times FRS \times e^{\frac{(S-60)}{Sp}} + C \times Tx \quad (16)$$

$$F(S) = F60 \times e^{\frac{(60-S)}{Sp}} \quad (17)$$

Onde,

$Sp$ : constante de velocidade;

$a$  e  $b$ : constantes que dependem do método de medição (para mancha de areia,  $a = -11,5981$ ;  $b = 113,63246$ );

$Tx$ : medida da textura, em mm;

$A$ ,  $B$  e  $C$ : constantes que dependem do método utilizado (para pêndulo britânico,  $A = 0,05626$ ;  $B = 0,00756$ ;  $C = 0$ );

$FRS$ : a leitura da fricção no dispositivo, à velocidade de deslizamento;

$S$ : velocidade em que é medido o atrito (para pêndulo britânico,  $S = 10$  km/h).

#### 4.3.4.4 Close range photogrammetry (CRP)

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 mais ganhando atenção (KOGBARA *et al.*, 2018b). 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). No entanto, equipamentos a laser são caros, enquanto que a técnica CRP pode ser

aplicada com o uso de uma câmera comum e se correlaciona bem com o MTD da mancha de areia ( $R^2 = 0,90$ ), além de cobrir escalas de micro, macro e megatextura (KOGBARA *et al.*, 2016).

*Terrestrial, ground-based e close range photogrammetry* são todos termos descritivos que se referem a fotos tiradas com uma distância entre o objeto e a câmera de menos de 300 m (MILLAR, 2013). Essa técnica 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 uma câmera comum. Outra alternativa é a utilização de *smartphones* modernos, que são equipados com câmeras digitais de alta definição (MEDEIROS *et al.*, 2016). 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, que inclui parâmetros de altura, de volume, dentre outros. Alguns trabalhos utilizaram essa técnica para caracterização de micro, macro e megatextura (MCQUAID *et al.*, 2013; MCQUAID, MILLAR e WOODWARD, 2015; MEDEIROS *et al.*, 2016).

A norma ISO 25178-2 (2012) especifica termos, definições e parâmetros para a determinação de textura superficial de área. Alguns desses parâmetros estão explicados na Tabela 34. Esses parâmetros são normalmente agrupados em *field parameters* e *feature parameters*. O primeiro leva em consideração cada ponto dos dados medidos em uma superfície, enquanto o segundo grupo considera apenas pontos, linhas ou áreas específicas que são identificadas como *features*, como picos e vales. Ainda, o primeiro grupo é subcategorizado em parâmetros de altura, relacionados à função, híbridos e espaciais (LEACH, 2012). Os parâmetros que iniciam pela letra “v” denotam parâmetros de volume, que são parâmetros funcionais. Já os parâmetros iniciados pela letra “s” são parâmetros de altura. Vários trabalhos estudaram a correlação entre esses parâmetros e os resultados de ensaios tradicionais de macrotextura e atrito (HU *et al.*, 2016; MEDEIROS *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2017; MAIA, 2020).

Tabela 34 — Parâmetros de textura definidos pela ISO 25178-2 (2012)

Parâmetro	Significado
$S_a$	Altura média aritmética
$S_q$	Raiz quadrada média da altura
$S_p$	Altura máxima do pico
$S_v$	Profundidade máxima do vale
$S_z$	Altura máxima
$S_{sk}$	Assimetria da distribuição das alturas
$S_{ku}$	Curtose (grau de achamento do pico da curva de distribuições das alturas)

Parâmetro	Significado
$V_{mp}$	Volume de pico (limite de 10%)
$V_{mc}$	Volume do material do núcleo

Fonte: Adaptado de ISO 25178-2 (2012).

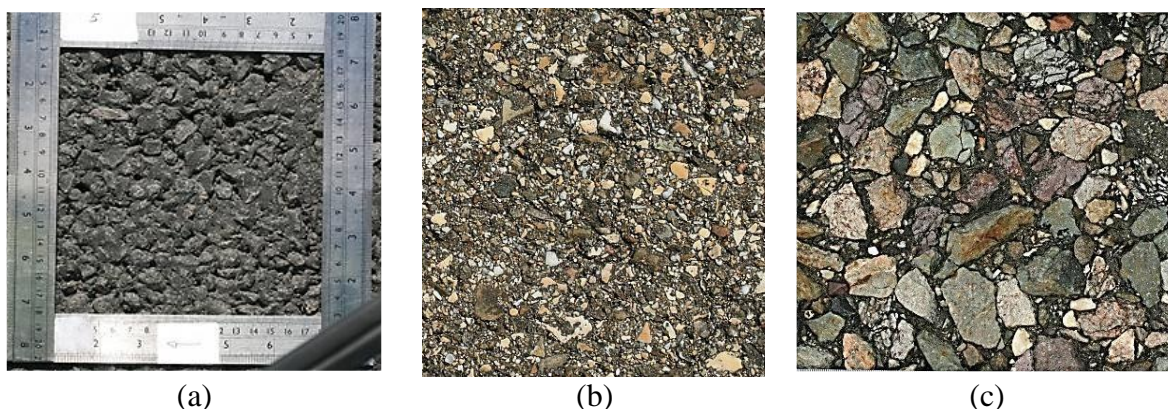
Millar (2013) investigou a correlação entre dados de macrotextura obtidos pelo método da mancha de areia com aqueles obtidos dos modelos de superfície criados por meio da técnica de CRP (MTD calculado a partir dos modelos 3D). As superfícies analisadas foram: uma seção de uma rodovia na Escócia, cujos revestimentos eram em SMA, com TMN de 6, 8, 10 e 14 mm, antes e após a aplicação de uma areia na superfície (técnica conhecida como *gritting*), de TMN de 3 mm; diferentes tipos de revestimento de vários locais na Europa, dentre eles, tratamentos superficiais, vários CAs (incluindo de TMN de 20 mm e 12 mm, por exemplo) e *high stone asphalt*; revestimentos no litoral leste dos Estados Unidos, em tratamento superficial, SMA, CA de TMN de 6, 10, 14 mm. As superfícies analisadas nos Estados Unidos e na Europa diferiam também em fatores como a condição de desgaste, idade, nível de tráfego, polimento da superfície, exsudação, etc. Alguns exemplos dessas superfícies são mostrados na Figura 36 e o resumo dos conjuntos de dados analisados são apresentação na Tabela 35. Dentre os resultados encontrados, a correlação entre os dois métodos de caracterização da macrotextura mostrou-se forte para os revestimentos escoceses em SMA ( $R^2 = 0,76$ ), para o conjunto de dados europeus ( $R^2 = 0,94$ ), e também para os dados estadunidenses ( $R^2 = 0,91$ ).

Tabela 35 — Correlações entre MTD e MMTD obtidas por Millar (2013) para diferentes conjuntos de dados

Local	Tipos de revestimentos	Correlação entre MTD e MMTD	Número de amostras
Seção da rodovia M8 na Escócia	SMA de TMN de 6, 8, 10 e 14 mm, com e sem aplicação da técnica de <i>gritting</i>	0,76	8
Vários países europeus (França, Itália, Irlanda)	SMA, Tratamento superficial, CA (de TMN de 12 e 20 mm, dentre outros), <i>high stone asphalt</i>	0,94	23
Litoral leste dos Estados Unidos (Virgínia, Maryland, Washington)	Tratamento superficial, SMA, CA, de TMN de 6, 10, 14 mm	0,91	37

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 36 — Exemplo de superfícies em (a) SMA (TMN 14 mm), (b) CA desgastado (TMN 6 mm) e (c) tratamento superficial (14/6 mm) avaliadas por Millar (2013)



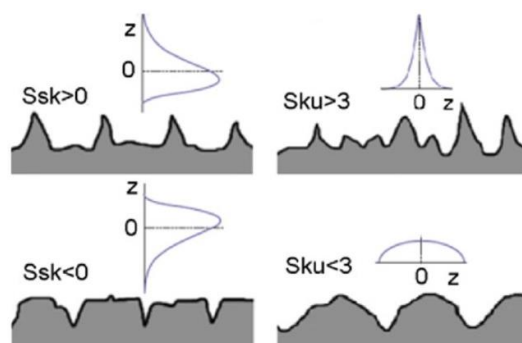
Fonte: Millar (2013).

Kogbara *et al.* (2018b) investigaram a influência das condições de ensaio (velocidades de 35 km/h e 50 km/h, pavimento seco e molhado, e temperatura do pneu) na relação entre medições de atrito obtidas pelo equipamento *GripTester* e parâmetros de textura superficial obtidas por CRP. Foram considerados três parâmetros 3D de textura, um relacionado à altura ( $S_q$ , representando uma medida geral da textura), um ao volume ( $V_{mp}$ , que caracteriza a zona de contato entre o pneu e a superfície) e outro à distribuição de picos ( $S_{pd}$  – densidade de picos, afeta a maneira pela qual os picos sofrem deformação sob carga). Os três parâmetros apresentaram melhores correlações para a condição molhada do revestimento, quando o ensaio foi realizado a uma maior velocidade. Para o parâmetro  $S_q$ , a correlação foi baixa para ambas as condições ( $R = 0,27$  e  $0,33$  para as condições seca e molhada, respectivamente); com o  $V_{mp}$ , a correlação foi razoável para ambas as condições ( $R = 0,61$  e  $0,78$ ); enquanto que para o  $S_{pd}$  a correlação foi forte para a condição molhada ( $R = 0,74$ ) e fraca para a condição seca ( $R = 0,17$ ). Para a superfície avaliada, desgastada e com agregados polidos, os autores concluíram que o parâmetro mais adequado é o  $V_{mp}$ .

A distribuição de alturas em um perfil pode ser descrita por uma função de densidade de amplitude, que relaciona a probabilidade,  $p(y)$ , de se encontrar um ponto de altura  $y$  em um perfil (HUTCHINGS, 1992). Alguns parâmetros que estão relacionados à forma dessa função são a assimetria ou, do inglês, *skweness* ( $S_{sk}$ ), e a curtose ou, do inglês, *kurtosis* ( $S_{ku}$ ). A primeira, como o próprio nome sugere, está relacionada ao grau de simetria da curva de distribuição das alturas da superfície em relação ao plano médio. Valores positivos de  $S_{sk}$  indicam a predominância de picos, enquanto que valores negativos indicam predominância de vales. Já a curtose, está associada ao grau de achatamento do pico da curva de distribuições, e

indica a presença de picos extremamente altos ou vales profundos ( $S_{ku} > 3$ ) ou a ausência desses ( $S_{ku} < 3$ ). Quando  $S_{ku} < 3$ , o pico da função é achatado; para  $S_{ku} = 3$ , o pico é semelhante ao de uma curva normalmente distribuída; para  $S_{ku} > 3$ , o pico é mais afinado. Esses parâmetros são ilustrados na Figura 37.

Figura 37 — Representação dos parâmetros de superfície  $S_{sk}$  (à esquerda) e  $S_{ku}$  (à direita)



Fonte: Macek, Rozumek E Królczyk (2020).

Medeiros *et al.* (2016) avaliaram a precisão (3,4%) e acurácia (4,2%) da técnica de modelagem 3D da superfície do pavimento utilizando imagens de uma câmera e *softwares* abertos, comparando o modelo gerado por essa técnica com uma superfície gerada por um programa de desenho assistido por computador. O modelo obtido pela técnica proposta também foi comparado a um modelo 3D gerado por um scanner a laser, e os resultados mostraram que o primeiro caso gerou uma malha mais refinada e um maior nível de detalhes. A técnica foi, então, aplicada em campo em 28 pontos referentes a quatro tipos de superfícies (revestimento em mistura à quente altamente desgastado, CA denso de TMN 12,5 mm, OGFC de TMN 12,5 mm e tratamento superficial). Os modelos 3D foram fatiados em perfis distanciados de 1 mm um do outro, e foram calculados o *Mean Profile Depth* (MPD) e parâmetros da ISO 13473-2 (2002) (caracterização da textura do pavimento pelo uso de perfis da superfície) com o auxílio de um código no programa Matlab, após a realização de etapas de nivelamento das superfícies e do seu valor médio ter sido zerado. Utilizou-se a média dos resultados dos perfis, como forma de representar toda a área analisada. O parâmetro que apresentou melhor correlação com a mancha de areia foi o MPD ( $R^2 = 0,97$ ). A assimetria (parâmetro  $S_k$ , para perfis) foi indicada como uma possibilidade de caracterização do nível de aleatoriedade da orientação dos agregados, como também de detecção de segregação de agregados ao se comparar distribuições de diferentes seções de um mesmo pavimento.

Medeiros *et al.* (2020) realizaram estudo no qual compararam resultados de macrotextura calculados (MPD) com base na técnica CRP com aqueles obtidos por ensaios de

pêndulo britânico e mancha de areia. Foram obtidas fortes correlações com a mancha de areia, no entanto o mesmo não aconteceu com os resultados do ensaio de pêndulo britânico. Os parâmetros da modelagem 3D que foram comparados aos métodos tradicionais foram  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_z$ ,  $V_{mp}$  e  $V_{mc}$ . Os valores assumidos por  $R^2$  nessas correlações são mostrados na Tabela 36.

Tabela 36 — Resumo dos valores de  $R^2$  para as correlações entre parâmetros da modelagem 3D e ensaios tradicionais de textura obtidos por Medeiros *et al.* (2020)

Parâmetros	Coeficiente de determinação ( $R^2$ )						
	MPD	$S_p$	$S_q$	$S_z$	$S_a$	$V_{mp}$	$V_{mc}$
MTD	0,922	0,736	0,694	0,470	0,723	0,892	0,709
BPN	0,090	1E-4	0,009	0,004	0,006	0,020	0,003

Fonte: Adaptado de Medeiros *et al.* (2020).

#### 4.3.5 Drenabilidade

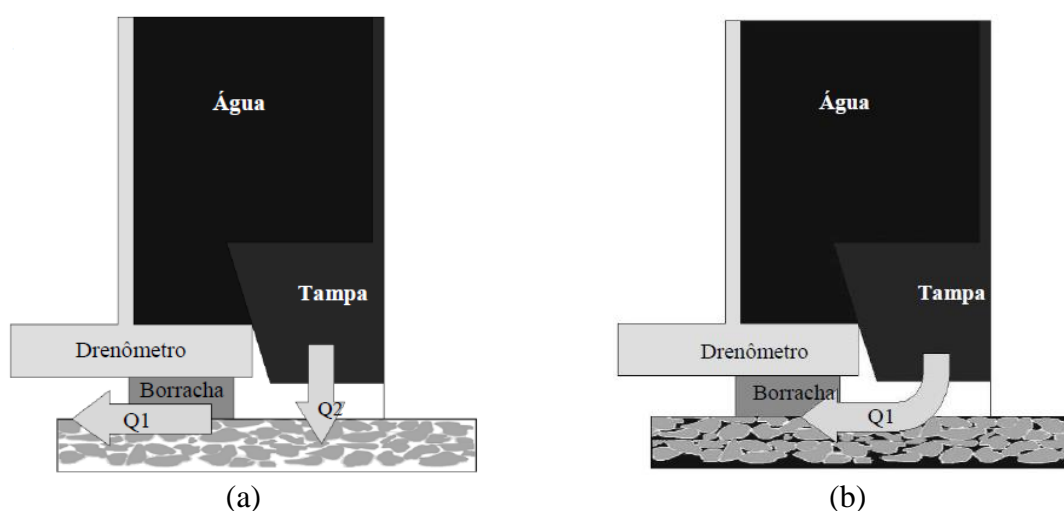
Nos Estados Unidos, as misturas asfálticas do tipo CPA (OGFC/PFC) foram concebidas com o intuito de serem utilizadas como revestimentos capazes de promover a drenagem das águas durante fortes chuvas (FEHRL, 2006; ALVAREZ, MARTIN e ESTAKHRI, 2010). A estrutura de vazios conectados das CPAs fornece drenabilidade e redução do ruído pneu-pavimento, que são características que estão diretamente relacionadas às principais vantagens promovidas por misturas asfálticas desse tipo (ALVAREZ; MARTIN e ESTAKHRI, 2011). A drenabilidade das misturas asfálticas pode ser avaliada por meio de diversos modelos de drenômetro, que podem ser de carga hidráulica constante ou variável. De acordo com Knabben (2012), o ensaio de drenabilidade pode ser conduzido na vertical ou na horizontal.

O drenômetro é um equipamento utilizado para analisar a macrotextura do revestimento a partir do tempo de escoamento de um volume pré-definido de água. Foi desenvolvido por Desmon F. Moore. A norma americana para o ensaio de drenabilidade é a ASTM E2380/E2380M (2019). De acordo com esta norma, esse ensaio é adequado para avaliar a drenagem superficial do revestimento e, em alguns casos, a drenagem interna da camada de revestimento. De acordo com Alvarez, Martin e Estakhri (2010), o tempo de escoamento de um determinado volume de água na superfície do pavimento, com a utilização de medidores de vazão (drenômetros), é um parâmetro útil para comparar o desempenho em termos de drenabilidade para diferentes misturas asfálticas ou de uma mistura específica sob diferentes condições de compactação ou em diferentes locais do projeto.



De acordo com Doty (1975), a superfície do revestimento a ser ensaiado deve ser molhada durante 1 minuto. Vieira *et al.* (2013) observaram que a saturação de CPs, previamente à realização do ensaio de drenabilidade, para misturas asfálticas do tipo microrrevestimento e *gap-graded*, é um fator pouco determinante para este ensaio. No entanto, os referidos autores chamam a atenção para a possibilidade de que a saturação seja importante para revestimentos com maior porosidade. Na Figura 38 é representado um drenômetro na condição (a) não-saturada e (b) saturada. A partir desta figura é possível notar que a condição saturada permite que ocorra somente o fluxo de água Q1, relacionado com a macrotextura. Já a condição não-saturada permite a ocorrência, além do fluxo Q1, do fluxo Q2, relacionado à permeabilidade do pavimento.

Figura 38 — Representação do fluxo no drenômetro para as condições (a) não-saturada e (b) saturada (corte no plano de simetria)



Fonte: Vieira *et al.* (2013).

#### 4.3.6 Caracterização acústica de revestimentos

Sobre a caracterização acústica de revestimentos, Callai (2011) avaliou o ruído interno e externo gerado pelo tráfego em trecho de rodovia antes e após execução de revestimento do tipo *gap-graded* com asfalto borracha em substituição ao revestimento antigo em microrrevestimento a frio. O ruído interno também foi comparado com um CA. O ruído externo foi caracterizado por meio do nível de ruído equivalente, preconizado pela NBR 10151 (2000), e o interno pela norma NBR 9079 (1985), os quais mostraram reduções de, respectivamente, 2 dB (A) e 3 dB (A) – principalmente nas bandas de frequência de 200 Hz a 1000 Hz - com a referida mudança de revestimento. Além disso, a influência da distância da

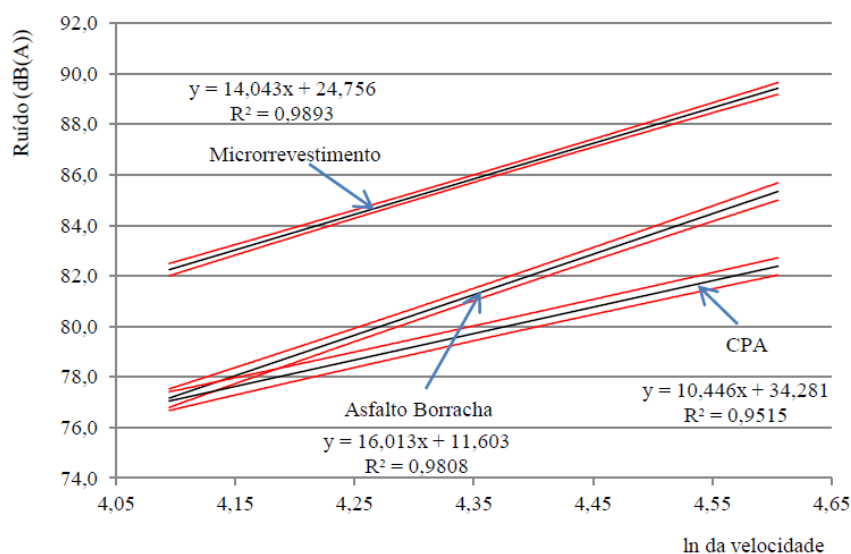
fonte ao ponto de medição também foi analisada, e mostrou que para uma distância de 45 m os níveis de ruído no microrrevestimento e no *gap-graded* foram de 68 e 62 dB (A), respectivamente, não atingindo o limite de 55 dB (A) da norma brasileira para área mista, predominantemente residencial em horários diurnos.

No estudo de Callai (2011) também foram medidas as macrotexturas dos revestimentos pelo método da mancha de areia e do perfilômetro a laser. A pista em CA (utilizada para comparação do ruído interno) apresentou MTD de 0,71 mm; o microrrevestimento, de 0,9 mm; e o *gap-graded*, de 0,74 mm. A classificação de macrotextura foi, respectivamente, média, grosseira ou aberta e média. No entanto, foi constatado que os métodos empregados para a avaliação da macrotextura não são suficientes para determinar o comportamento acústico de revestimentos densos. O autor destaca a necessidade de busca de meios que consigam caracterizar a macrotextura de forma que estes compreendam a distribuição espacial (textura negativa ou positiva) dos agregados na superfície.

Specht *et al.* (2009a) apresentam resultados obtidos a partir de 1487 medições de ruído em quatro diferentes tipos de revestimentos de rodovias brasileiras. Os revestimentos avaliados foram CA, tratamento superficial duplo, CPA e concreto de cimento Portland. O método de medição empregado foi o SPB. O maior valor de 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 e 79,29 dB (A) para a CPA. Além dos resultados apresentados por Specht *et al.* (2009a), em trabalho conduzido por Specht *et al.* (2009b) também é apresentado resultado referente a um microrrevestimento (SPBI de 78,51 dB (A)). Além disso, no referido trabalho os autores relacionaram dados de macrotextura desses revestimentos à variável NPS, porém o coeficiente de correlação obtido foi muito baixo. No entanto, verificou-se que menores ruídos correspondem a menores valores de macrotextura.

Knabben (2012) avaliou em campo o ruído de tráfego em 4 tipos de revestimento, que foram: CA denso comum com 30 anos de idade (que foi avaliado para 3 diferentes macrotexturas), resvestimento em 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, utilizando algumas diretrizes do método CPB, em 3 velocidades (60, 80 e 100 km/h). A distância horizontal do sonômetro ao eixo do veículo foi de 2,8 m. Os resultados da comparação entre o asfalto-borracha, a CPA e o microrrevestimento mostraram menores ruídos para a CPA em todas as velocidades ensaiadas, com diferenças mais expressivas (de até 2,7 e 6,9 dB(A) em relação ao revestimento em asfalto-borracha e ao microrrevestimento, respectivamente) acima de 65 km/h, como mostra a Figura 39.

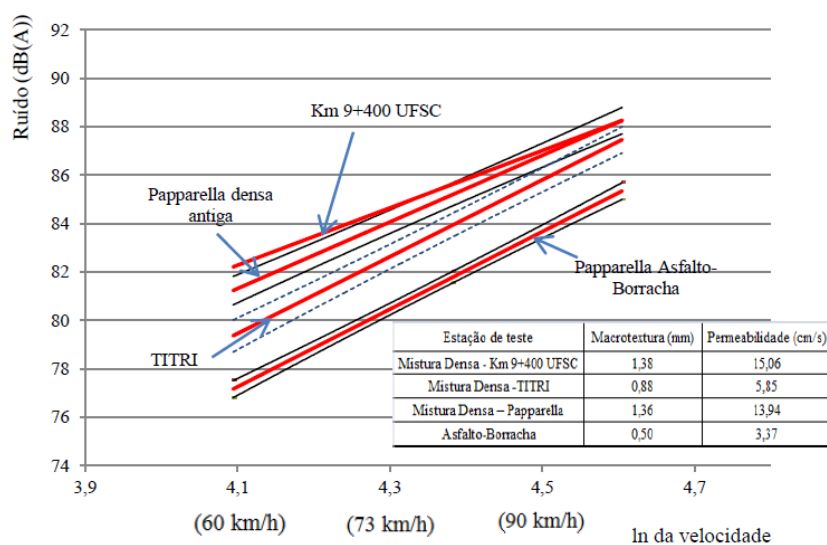
Figura 39 —  $L_{Am\acute{a}x}$  individual para três tipos de revestimentos em função da velocidade e respectivos ICs



Fonte: Knabben (2012).

No estudo de Knabben (2012), o  $L_{Am\acute{a}x}$  em 3 diferentes macrotexturas do revestimento denso envelhecido foi comparado aos resultados obtidos para o revestimento em asfalto-borracha, que foi aplicado no mesmo local do primeiro em uma operação de restauração. A análise estatística, em termos de IC, do ruído em função da velocidade, mostrou que, até certa velocidade, houve diferença entre retas correspondentes a diferentes texturas, que após isso se cruzaram, indicando que, para aquelas velocidades, a textura não influenciou significativamente o ruído gerado. Foi observada diferença de até 5,3 dB (A) (na velocidade de 60 km/h) entre uma das retas correspondentes ao revestimento antigo e aquela referente ao revestimento novo, em asfalto-borracha. Esses resultados são mostrados na Figura 40. No citado estudo, o impacto da mudança do tipo de revestimento, no ruído global, também foi avaliado. Para isso, obtiveram-se medidas de  $L_{Aeq}$ , com duração de 15 minutos cada, para pontos de diferentes macrotexturas no revestimento denso envelhecido e para o revestimento em asfalto-borracha, aplicado nos mesmos locais. As medições foram feitas em dias úteis diferentes, porém nos mesmos horários para ambos os revestimentos, assumindo-se que o fluxo veicular fosse semelhante. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas em  $L_{Aeq}$  antes e após a intervenção, o que pode ser devido às incertezas atreladas à igualdade do fluxo veicular nas duas situações. Além disso, há interferência do ruído provocado por veículos pesados que mascaram a medida do ruído da interação pneu-pavimento que está sendo medida.

Figura 40 — Curvas de ruído em função da velocidade para diferentes macrotexturas de uma mistura asfáltica densa envelhecida e asfalto-borracha recém-aplicado



Fonte: Knabben (2012).

Knabben (2012) também verificou a influência da macrotextura no ruído pneu-pavimento para os revestimentos fechados, ou seja, excluindo-se a CPA, pois considerou-se que, por ser uma mistura asfáltica aberta, o ensaio de mancha de areia não era apropriado, já que a areia penetra nos poros dessa mistura e não caracteriza adequadamente a sua macrotextura. Os resultados mostraram que, de fato, quanto maior a altura da macrotextura, maior é o ruído provocado. Os resultados de drenabilidade, também para os revestimentos asfálticos densos, foram relacionados com o nível de pressão sonora. Observaram-se maiores níveis para maiores drenabilidades, sendo esta relação explicada pelo autor como devido a maiores drenabilidades ocorrerem em maiores alturas de macrotextura.

Alves (2019) realizou avaliações do desempenho acústico de CPA em campo e em laboratório. As avaliações de campo foram feitas, utilizando o método SPB, em dois trechos com revestimento do tipo CPA recém-construídos e em um outro com mais de 10 anos de execução. Além desses, trechos contíguos de referência, em CA, também foram avaliados. Os resultados das medições são mostrados na Tabela 37. O desempenho acústico da CPA em campo em pista molhada e em pista seca também foi avaliado, bem como a influência, no ruído gerado, da velocidade de passagem do veículo, por meio da passagem de um veículo de controle, conforme a norma do método *coast-by* (ISO 13325 – 2003). Na ocasião da avaliação acústica da CPA com veículo de controle também foi medido o  $L_{Aeq}$ , que foi de 49,9 dB (A). O estudo de campo também contou com análise de microtextura, macrotextura, drenabilidade e ATR. A comparação do ruído gerado nas pistas seca e molhada indicaram aumento do NPS na

presença de água. Observou-se que, na condição seca, a altas velocidades, a diferença entre os níveis de ruído em CPA e CA são maiores. Além dessas medições, também foi investigada a influência da distância da fonte no ruído gerado, pelo método SPB. Além da distância normatizada para esse ensaio (7,5 m) entre o MNPS e a fonte geradora do ruído, também foram feitos levantamentos a 15 e 30 m. Essa avaliação mostrou que para a CPA seriam necessárias menores distâncias das áreas onde se concentram determinados usos do solo (industrial e residencial, no caso) para atender à NBR 10151 (2000) do que para revestimento em CA.

Tabela 37 — Resultados de SPBI encontrados no estudo conduzido por Alves (2019)

Trecho	Tipo de revestimento	Data da execução do trecho	SPBI (dB (A))
<b>BR 158</b>	CPA	Dezembro/2014	78,3*
	CA	-	83,8*
<b>BR-285</b>	CPA	Dezembro/2016	77,3
	CA	-	83,0
	CPA	2005	78,3
	CA	-	85,4

\*Valor médio de medições semestrais de 2016.1 a 2019.1.

Fonte: Elaborado pela autora.

No trecho da rodovia BR-158, com revestimentos em CPA e em CA, monitorado por Alves (2019), não se observou aumento estatisticamente significativo do NPS ao longo de 3,5 anos. Levantou-se, então, a hipótese de que as precipitações no local são o principal fator responsável pela limpeza dos poros da CPA. Nesse trecho, ao longo de 5 anos de serviço da CPA, não se observou surgimento de ATR, fato que contradiz os resultados de ensaios de deformação permanente realizados em laboratório (*flow number* e triaxial) pelo citado autor. Esses, mostraram que as CPAs estudadas resistiriam apenas a tráfego médio ou leve, que é inferior ao tráfego já recebido nos trechos estudados, de acordo com dados de contagem de tráfego.

Alves (2019) relaciona os maiores níveis de ruído encontrados para revestimentos em CA, em relação àqueles em CPA, ao menor MTD encontrado nesse último. O citado autor também avaliou o comportamento da CPA em relação às bandas de oitava, dos ruídos produzidos por veículos leves (maiores NPS nos espectros de frequências de 500 Hz e 1kHz) e por veículos pesados (maiores NPS nos espectros de frequências de 250 Hz e 500 Hz). Confirmou-se que a CPA se enquadra na designação de revestimentos abertos, cuja atenuação maior concentra-se no intervalo de frequências próximo aos 1000 Hz, sendo mais favorável aos veículos de passeio do que aos veículos pesados. Os ensaios de absorção sonora no tubo de impedância mostraram que os picos de absorção sonora acontecem nesta mesma faixa.

Steven (1990) *apud* Wayson (1998) relata, com base em ensaios realizados pelo método *coast by* – que consiste na passagem do veículo em frente ao MNPS com o motor desligado - em CPAs alemãs e em misturas asfálticas densas, redução de 2 a 3 dB (A) nos revestimentos em CPA recém construídos em áreas adensadas com velocidades médias entre 40 a 60 km/h. Em localidades fora de áreas construídas, com velocidades médias entre 60 e 120 km/h, reduções de 4 a 5 dB (A) foram encontradas. No mesmo trabalho, foi concluído que o efeito da absorção sonora de CPAs é, essencialmente, confinado ao intervalo de frequência acima de 1 kHz, o que é favorável à redução de ruído, uma vez que os maiores componentes de energia dos ruídos dos veículos estão na faixa de 500 Hz e 4 kHz.

#### **4.4 Materiais e métodos**

##### **4.4.1 Trechos avaliados no estudo**

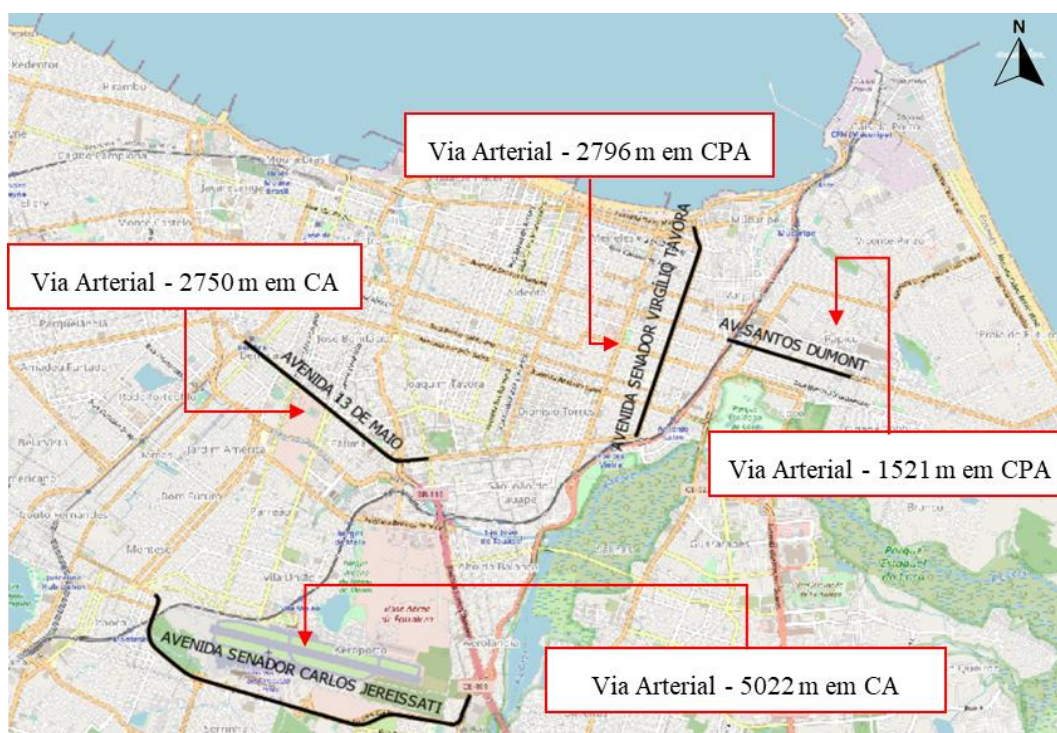
Para a compreensão acerca do desempenho funcional da CPA no meio urbano foi proposta a investigação em campo das propriedades deste tipo de revestimento que o tornam singular em comparação aos revestimentos CA denso, amplamente e tradicionalmente utilizados em meios urbanos brasileiros. Assim, foram investigadas propriedades referentes ao desempenho acústico, aos parâmetros de superfície e à drenabilidade para trechos com revestimento em CPA e para trechos de referência, em CA.

A avaliação acústica dos revestimentos foi realizada de acordo com o método CPB com algumas adaptações, que serão explicadas na seção 4.4.2.1. Na ausência de equipamentos de medição de proximidade, como trailer CPX, optou-se por métodos de passagem. Idealmente, o método SPB é mais desejável devido à maior representatividade da composição do tráfego. No entanto, tendo em vista que este estudo é realizado em vias do meio urbano, as medições de passagens de veículos individuais, que podem ser claramente distinguidos acusticamente do tráfego na via, como recomenda a norma, são difíceis de serem realizadas. Além disso, nessas vias, a passagem de veículos de dois ou mais eixos é escassa se comparada a vias rurais. Dessa forma, decidiu-se utilizar o método CPB. No entanto, devido às severas restrições exigidas por esse método para o entorno do local de avaliação, adaptações foram realizadas, de forma a viabilizar sua utilização nas condições encontradas nos locais de estudo.

Uma vez definidos os locais de realização dos ensaios acústicos, visando obedecer às restrições mencionadas anteriormente, os demais ensaios foram realizados nos mesmos locais, de forma que uma análise da relação entre as propriedades estudadas pudesse ser

realizada. Ainda tendo em vista que o método CPB exige severas restrições de entorno, o que restringe as possibilidades de escolha de locais onde este possa ser aplicado, o presente trabalho consistiu em uma segunda etapa da avaliação acústica, que buscou contemplar entornos de vias mais típicos do meio urbano. Assim, 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. Esses locais são mostrados na Figura 41.

Figura 41 — Localização das avenidas avaliadas no mapa da Fortaleza



Fonte: Elaborado pela autora.

Na primeira etapa foram escolhidos trechos que obedecem ao máximo de quesitos possíveis constantes na norma do método CPB, como o afastamento transversal de 7,5 m do eixo de passagem do veículo ao sonômetro, a ausência de obstáculos em raio de 2 m, a ausência de fachadas, dentre outros. Já para a segunda etapa, foram escolhidas vias com configuração espacial de 2 faixas de tráfego por sentido, presença de canteiro central, e cujo entorno era bem adensado, caracterizado pela presença de prédios/fachadas mais próximos da via. Avenidas com essa configuração de entorno são comuns na cidade de Fortaleza e em outras grandes cidades. Na cidade de Fortaleza, revestimentos em CPA foram executados, majoritariamente, em vias com essa conformação espacial.

Para a primeira etapa, o trecho escolhido para estudo encontra-se na Avenida Santos Dumont na cidade de Fortaleza/CE, cujo revestimento é do tipo CPA. Além deste, escolheu-se

também um trecho de referência na Avenida Senador Carlos Jereissati (CE-401), cujo revestimento é um CA convencional. Dentre os locais onde foi aplicado a CPA na cidade, a avenida escolhida foi considerada a mais adequada para atender às restrições de entorno da NF S31-119-2 (2000). Particularmente, atender a essas restrições no meio urbano se mostrou um desafio para a realização das coletas em campo, devido à presença de elementos que podem causar interferências na propagação do som ao refleti-lo, como edificações, calçadas, postes de iluminação, meios-fios, etc. Dessa forma, para a escolha do local de medição levou-se em consideração o fato da avenida em questão ter 4 faixas de tráfego (de 3,5 m), não ter canteiro central e o entorno no local da medição ser de calçadas largas, relativamente aberto (com terrenos sem construções próximos) e cujas edificações altas encontram-se apenas nos quarteirões adjacentes. A Figura 42 mostra o entorno do local de medição.

Figura 42 — Entorno do local de medição em revestimento do tipo CPA localizado na Avenida Santos Dumont



a) Vista frontal da pista, à direita do sonômetro



b) Vista frontal da pista, à esquerda do sonômetro



c) Lateral da pista, próximo ao sonômetro



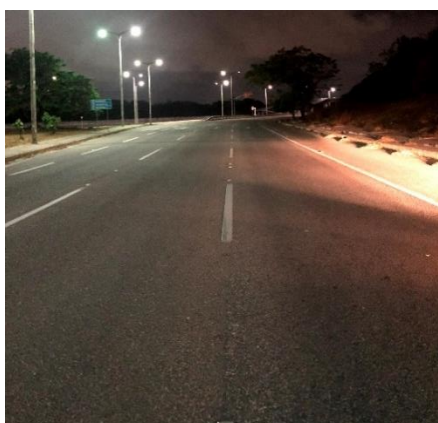
d) Lateral da pista, do outro lado do sonômetro

Fonte: Elaborado pela autora.

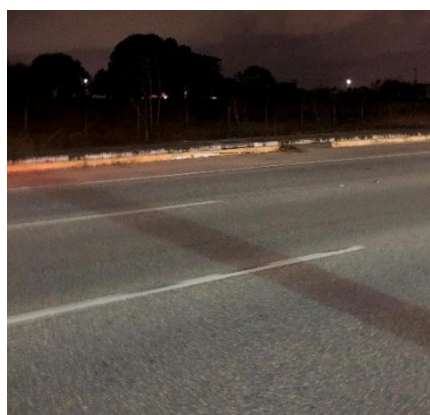


A outra via selecionada para a realização dessa etapa foi escolhida em razão da ausência de edificações no entorno, dos obstáculos no local serem pequenos, como por exemplo árvores pequenas (diâmetro do tronco inferior a 10 cm) e barreiras de concreto separando o acostamento da ciclovia, além da existência de 3 faixas de tráfego, o que possibilitou respeitar o distanciamento transversal de 7,5 m entre o eixo de passagem do veículo e o sonômetro. Além disso, a via possui limite de velocidade mais elevado (80 km/h), em relação a outras vias da cidade que obedeceriam razoavelmente aos critérios da norma. Tal fato possibilitou a realização de ensaios em velocidade mais elevadas, como a de 80 km/h, e, conseqüentemente, permitiu o atendimento parcial às velocidades de passagem recomendadas na norma. A realização dos ensaios em velocidades mais elevadas também é importante para melhor compreensão do fenômeno, visto que o ruído do atrito pneu-pavimento se torna mais expressivo com o aumento da velocidade. A Figura 43 mostra o entorno do local de medição nessa via.

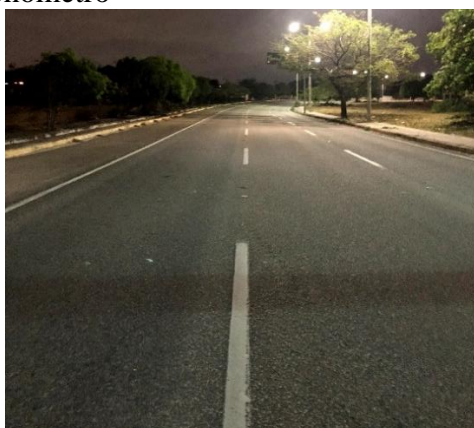
Figura 43 — Entorno do local de medição em revestimento em CA localizado na Avenida Senador Carlos Jereissati



a) Vista frontal da pista, à direita do sonômetro



b) Lateral da pista, próximo ao sonômetro



c) Vista frontal da pista, à esquerda do sonômetro



d) Lateral da pista, do outro lado do sonômetro, e posição do sonômetro

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a segunda etapa da análise, referente às vias com entorno mais adensado, foram selecionadas a Avenida Senador Virgílio Távora, com revestimento em CPA, e a Avenida 13 de Maio, com revestimento em CA. Nessas vias, as medições foram realizadas em pontos cujos entornos eram semelhantes entre si, como a presença de fachadas de estabelecimentos comerciais, calçadas de largura semelhante (de 4 a 5 m), presença de obstáculos, como postes de iluminação e orelhões, e distância semelhante entre as fachadas das edificações (cerca de 30 m entre fachadas em lados opostos da via). Escolheu-se um ponto na calçada para o posicionamento do sonômetro de forma a respeitar um raio de aproximadamente 2 m de distância de obstáculos como os mencionados. Assim, na primeira via onde as medições foram coletadas, a distância transversal do sonômetro ao eixo de passagem do veículo foi de 5,2 m, e essa distância foi mantida para as coletas realizadas na segunda via. Essa distância foi estabelecida porque para que esta fosse mantida a cada passagem, era necessário que o motorista do veículo de passagem tivesse algum indicativo visual do local onde deveria passar, então utilizou-se a faixa divisória entre as duas faixas de tráfego para esse propósito. Os entornos das vias são mostrados nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 — Entorno do local de medição com revestimento em CPA localizado na Avenida Senador Virgílio Távora



a) Visão da pista à esquerda do sonômetro



b) Fachadas mais à esquerda e do lado oposto ao sonômetro



c) Visão da pista e fachadas mais à direita e do lado oposto ao sonômetro

Fonte: Elaborado pela autora.



d) Fachada próxima ao sonômetro

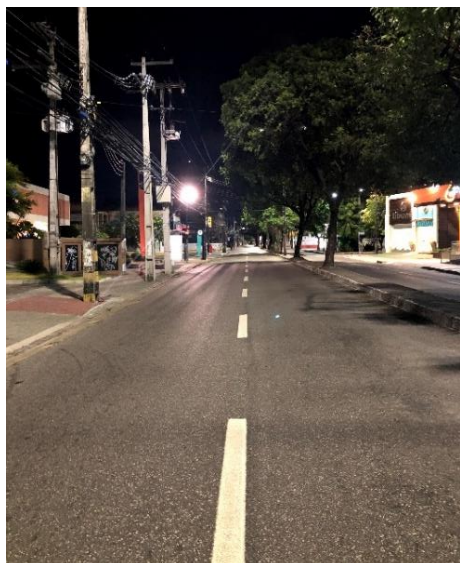
Figura 45 — Entorno do local de medição com revestimento em CA localizado na Avenida 13 de Maio



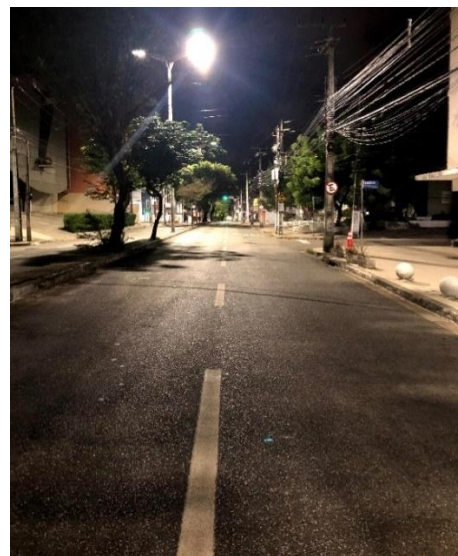
a) Fachadas mais à esquerda e do lado oposto ao sonômetro



b) Fachadas mais à direita e do lado oposto ao sonômetro



c) Vista frontal da pista, à esquerda do sonômetro

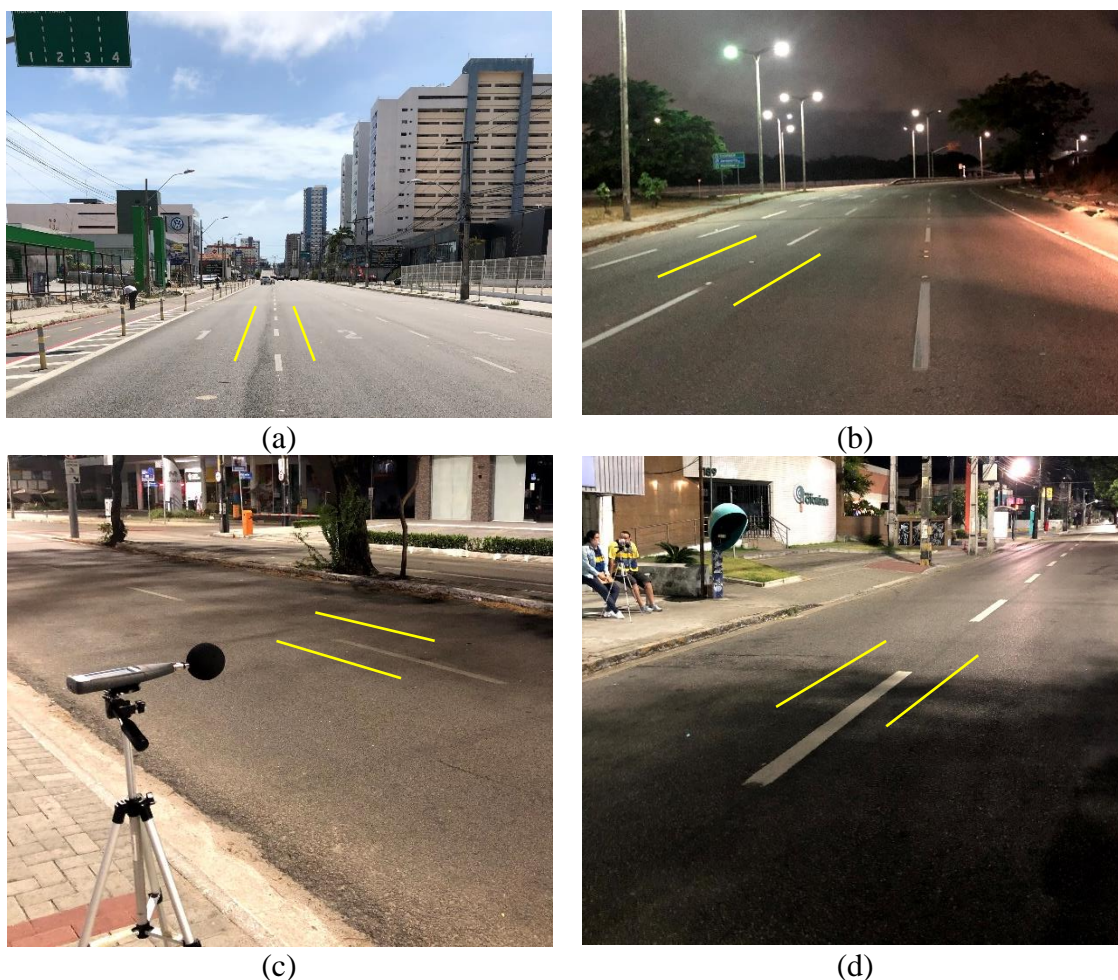


d) Vista frontal da pista, à direita do sonômetro

Fonte: Elaborado pela autora.

Uma vez que os revestimentos em CPA analisados nesse capítulo correspondem a misturas asfálticas avaliadas no Capítulo 2 do presente trabalho, a designação utilizada para essas últimas será seguida aqui para se referir aos respectivos revestimentos. Assim, os revestimentos das avenidas Santos Dumont e Senador Virgílio Távora serão tratados como CPA\_M1 e CPA\_M2, respectivamente. Aos demais revestimentos avaliados serão atribuídas as seguintes denominações: CA\_M1 e CA\_M2 para as avenidas Senador Carlos Jereissati e 13 de Maio, respectivamente. A Figura 46 mostra os locais de passagem do veículo em cada caso. Reforça-se que para a primeira etapa foi seguida a distância de 7,5 m entre o sonômetro e o eixo de passagem do veículo, enquanto que para a segunda etapa essa distância foi de 5,2 m. Como explicado anteriormente, a passagem do veículo para todos os casos ocorreu entre duas faixas, para que o motorista pudesse ter um auxílio visual do local de passagem. Em todos os trechos o sonômetro foi posicionado a uma altura de 1,2 m da superfície da via, como determina a norma NF S31-119-2 (2000).

Figura 46 — Locais de passagem do veículo na pista nas medições realizadas nas avenidas a) CPA\_M1, b) CA\_M1, c) CPA\_M2 e d) CA\_M2



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

É importante ressaltar que os revestimentos avaliados possuem diferentes idades e diferentes estados de conservação. Enquanto os revestimentos em CPA foram executados recentemente, há, no máximo 2,5 anos, os revestimentos em CA são mais antigos, chegando a mais de 25 anos em um dos casos, e desgastados. Pelo fato dos projetos das CPAs serem recentes e de se ter contato com a empresa que as executou, os projetos dessas misturas asfálticas foram acessados. Não se teve acesso, no entanto, aos projetos das vias em CA, e apenas a idade do pavimento (em torno de 25 anos) da Avenida Senador Carlos Jereissati foi informada. A idade do revestimento da Avenida Senador Virgílio Távora é de 2,5 anos, enquanto que a da Avenida Santos Dumont é de 2 anos. Como já dito no capítulo 2, ambos os revestimentos em CPA foram executados utilizando a mesma faixa granulométrica, Faixa II do DNER. No entanto, a composição das britas utilizadas foi diferente para as duas misturas

asfálticas. Essas informações podem ser encontradas na Tabela 2 (resumo dos materiais utilizados) e na Figura 1 (curva de projeto das misturas asfálticas).

#### **4.4.2 Ensaio acústicos**

##### *4.4.2.1 Locais e condições de medição*

A avaliação do desempenho acústico da CPA em meio urbano foi realizada utilizando premissas do método CPB, porém com adaptações. Não foi possível obedecer aos raios mínimos livre de obstáculos, detalhados na seção 4.3.3.3 deste capítulo, então aqui foram utilizados raios livres de cerca de 2 m. Além disso, a norma do método CPB determina que as velocidades de passagem dos veículos devem estar distribuídas da forma mais uniforme possível entre 70 e 110 km/h, o que não foi possível obedecer devido ao limite de velocidade da via (60 km/h para três das quatro vias analisadas, e 80 km/h para a outra via). Além disso, também não se dispunha de veículo comercial médio e nem das duas configurações de pneus recomendadas pela norma. Assim, a análise foi feita a partir da passagem de um único veículo de passeio, em, no mínimo, três velocidades diferentes, conforme feito por Knabben (2012). O referido autor realizou o ensaio nas velocidades de 60, 80 e 100 km/h. No entanto, devido ao limite de velocidade das vias e à presença de fiscalização eletrônica de velocidade próxima ao local de medição, velocidades mais baixas tiveram que ser escolhidas.

Sabe-se que o ruído do contato pneu-pavimento passa a ser preponderante em relação aos ruídos mecânicos do veículo acima de certas velocidades. Para alguns autores essa velocidade é de 40 km/h, já outros citam 50 km/h, enquanto que a norma francesa menciona 60 km/h como tal velocidade. Outra constatação encontrada em alguns estudos, quanto ao comportamento acústico dos revestimentos em diferentes velocidades de passagem dos veículos, é que a diferença entre os NPS da CPA e dos revestimentos asfálticos densos aumentam conforme o aumento da velocidade.

Diante das considerações feitas sobre o comportamento acústico dos revestimentos asfálticos, e diante da necessidade de se escolher velocidades que possibilitem a compreensão do fenômeno e o atendimento às limitações impostas no ambiente urbano quando das coletas de dados, decidiu-se por realizar as passagens nas velocidades de 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h e 80 km/h para as vias que obedecem razoavelmente às restrições de entorno, e de 40, 50 e 60 km/h para as vias com entorno adensado. Entende-se que, no meio urbano, teoricamente, os veículos devem trafegar dentro dos limites de velocidade regulamentados, o que torna essa

escolha de velocidades mais condizente com a realidade e mais adequada à análise proposta nesse estudo. Foram realizadas 8 e 6 passagens para cada velocidade de ensaio no entorno mais restrito e mais adensado, respectivamente. 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.

Para a execução do ensaio, demarcou-se uma zona de medição de 50 m de distância, na qual o sonômetro foi posicionado equidistante das extremidades, sinalizadas com o auxílio de cones. A zona de medição é visivelmente plana longitudinalmente e é um trecho em tangente. Além do nível de pressão sonora máximo, o tempo de passagem do veículo pelo interior da zona de medição também era medido para posterior cálculo da velocidade de passagem. Para isso, um cronômetro era acionado por um operador quando o veículo entrava na zona e era parado quando uma pessoa no final da zona sinalizava que o veículo passou pelo cone.

O veículo de teste deve passar com velocidade constante, sem aceleração ou desaceleração no interior da zona de medição. Por esse motivo, a motorista foi instruída a atingir as velocidades alvo e mantê-las o mais constante possível dentro da zona. O tempo de passagem e o  $L_{Amáx}$  associado foi anotado em cada observação, tendo-se o cuidado de observar se o último ocorria quando o veículo estava em frente ao sonômetro. Nos casos em que o  $L_{Amáx}$  ocorreu dentro da zona de medição, mas não necessariamente em frente ao sonômetro, considerou-se válida a medição.

#### 4.4.2.2 *Veículo de teste*

O veículo de teste foi um veículo de passeio da marca Chevrolet, modelo Onix LTZ, com motor 1.4, câmbio manual, ano 2015, e peso de 1067 kg. Antes do início de todas as coletas os pneus foram calibrados com 32 libras, conforme recomendação da fabricante. As dimensões do veículo são: largura total de 1,705 m, altura de 4,484 m, comprimento de 3,930 m e distância de 2,528 m entre eixos. Esse veículo se enquadra como veículo de categoria comercial médio, de acordo com a norma francesa (massa superior à 900 kg e inferior a 1300 kg).

Os pneus utilizados são da marca Fuzion, tamanho 185/65 R15 (M+S). Conforme determinação da norma, as ranhuras principais do pneu devem ter profundidade superior à 2/3 da profundidade original. Esse requerimento não foi medido, mas os pneus estavam em bom estado de conservação, e um deles é mostrado na Figura 47.

Figura 47 — Pneu utilizado no veículo utilizado durante o ensaio da passagem controlada



Fonte: Elaborado pela autora.

#### **4.4.3 Parâmetros de superfície**

Os parâmetros de superfície estudados foram microtextura e macrotextura. Para isso, foram realizados os ensaios clássicos, de pêndulo britânico e mancha de areia, além da modelagem tridimensional de superfícies por meio da técnica da fotogrametria de curta distância.

##### **4.4.3.1 Pêndulo britânico e mancha de areia**

A microtextura dos revestimentos foi avaliada por meio do ensaio de pêndulo britânico, seguindo os procedimentos da norma NBR 16780 (2019). Assim, em cada local definido para o ensaio, foram realizados 5 lançamentos da sapata do equipamento e as respectivas leituras foram registradas. Posteriormente, a maior e a menor leitura foram descartadas e o resultado do ensaio foi obtido a partir da média das três leituras remanescentes. Além disso, considerando-se que a temperatura ambiente quando da execução dos ensaios foi próxima a 30 °C, foi feita a correção sugerida pela norma, equivalente à adição de 2 unidades de BPN para cada local testado.

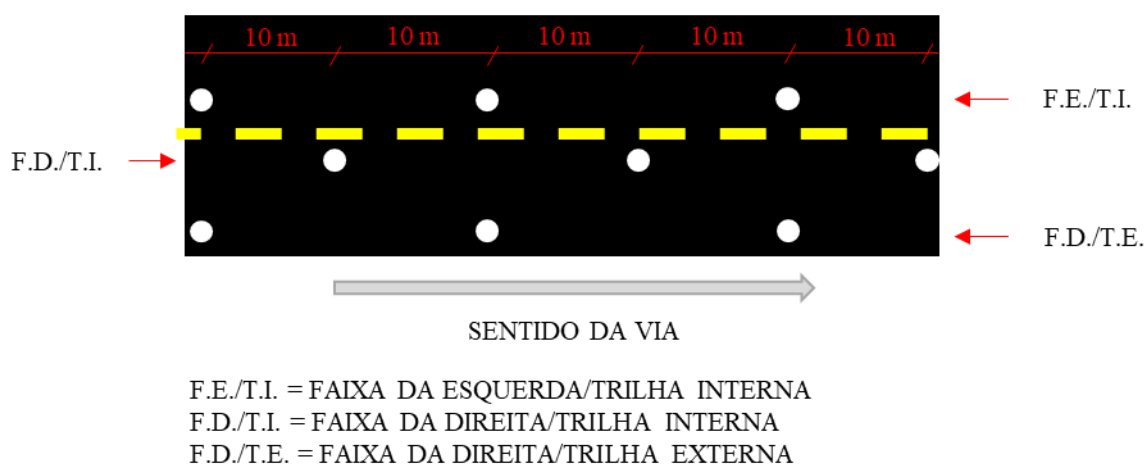
Para a determinação da macrotextura do pavimento foi utilizado o método da mancha de areia, pelo qual é obtida a profundidade média da macrotextura superficial. O ensaio foi conduzido de acordo com a NBR 16504 (2016). Assim, após o espalhamento da areia padronizada, com uma régua graduada foram feitas 4 medições do diâmetro da mancha, defasadas de 45°. Com a média desses valores, foi calculada a altura média da macrotextura.

Os locais de teste foram definidos de acordo com os ensaios acústicos, previamente executados. Assim, como a trajetória do veículo nos ensaios acústicos contemplou duas faixas de tráfego, os ensaios de superfície foram realizados nas trilhas de roda, por onde o veículo passou, que foram: a trilha de roda externa da faixa mais à esquerda e a trilha de roda interna



da faixa à direita da primeira. Além disso, para que uma das faixas de tráfego ficasse completamente caracterizada, no que se refere à caracterização de ambas as trilhas de roda, alguns pontos também foram ensaiados na outra trilha de roda de uma dada faixa. A Figura 48 mostra um esquema do plano de amostragem executado.

Figura 48 — Plano de amostragem executado para os ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia



Fonte: Elaborado pela autora.

Em três dos quatro trechos avaliados, o plano de amostragem foi exatamente igual ao apresentado na Figura 48, com exceção do trecho da Avenida Santos Dumont (CPA\_M1). Nesse trecho, a faixa mais à esquerda, correspondente à faixa 1 dessa avenida, foi a que teve ambas as trilhas de roda caracterizadas. Essa escolha, para todos os trechos, foi pautada na opção que oferecesse menor impacto à operação da via no momento da realização dos ensaios. Os trechos, de 50 m, foram ensaiados a cada 10 m, em zigue-zague, de forma que tanto para a caracterização de uma das faixas por inteiro quanto para a caracterização da superfície de passagem do veículo, foram ensaiados 6 pontos. Ao todo, em cada trecho, foram ensaios 9 pontos.

Os pontos ensaiados no pavimento foram próximos, mas não exatamente os mesmos para a realização dos ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia. Além da questão de minimizar o tempo de execução dos ensaios e, conseqüentemente, o tempo de interdição dos trechos, a execução de ambos os ensaios em determinado ponto prejudica a execução do outro no mesmo ponto logo em seguida. O pêndulo britânico demanda que a superfície seja molhada, o que prejudicaria a execução da mancha de areia se esse ensaio fosse executado primeiro. Essa, por sua vez, deixa esse material espalhado no pavimento, o que prejudicaria a realização do

ensaio de pêndulo britânico nessa sequência. Na Figura 49 é apresentado um dos pontos de ensaio, onde pode ser visualizada a proximidade entre o ponto de execução do ensaio do pêndulo britânico e o ponto de execução da mancha de areia, coincidente com o quadrado delimitado no pavimento, onde também foi executado o ensaio da modelagem 3D.

Figura 49 — Local da realização dos ensaios em campo: pontos para realização dos ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia / modelagem 3D



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4.3.2 Modelagem 3D das superfícies por meio da técnica de CRP

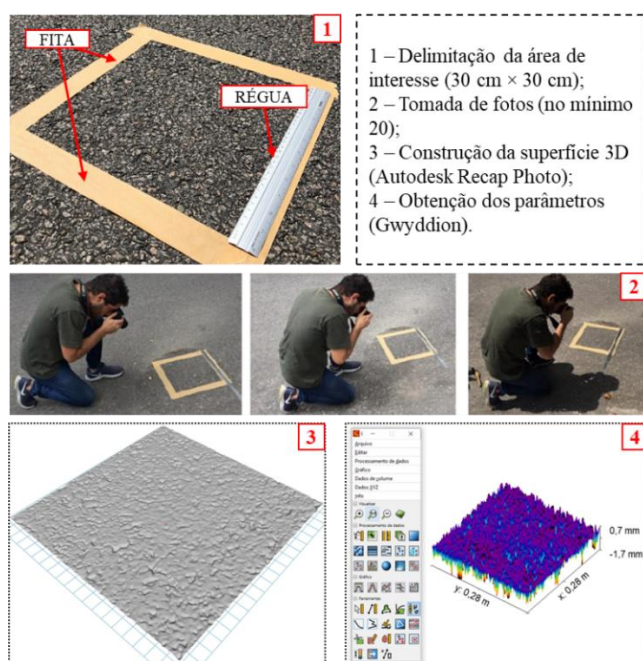
A caracterização da superfície por meio da técnica de CRP foi realizada nos quatro trechos em estudo. Em cada um desses, foram escolhidos pontos – coincidentes com aqueles utilizados para a realização dos ensaios de mancha de areia – para a coleta das fotos da superfície. Seguindo a mesma lógica utilizada nos demais ensaios de caracterização de superfície, os pontos ensaiados são relativos às trilhas de roda interna e externa de uma das faixas de tráfego e à uma das trilhas de roda da faixa adjacente, correspondente ao local de passagem do veículo durante o ensaio acústico. Diferentemente dos ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia, devido ao tempo para a tomada de fotos ser maior em relação ao tempo necessário para a realização desses outros ensaios, foram ensaiados apenas dois pontos por trilha de roda, o que totalizou 6 pontos por trecho, com exceção da Avenida 13 de Maio (CA\_M2), onde foram ensaiados 8 pontos.

Em cada ponto ensaiado foi feito um quadrado de 30 cm × 30 cm com fita gomada para a delimitação da área de interesse. Em pelo menos um dos lados foi colocada uma régua graduada em mm/polegadas, cuja função era guiar a definição da escala em uma das etapas

posteriores, durante o processamento das imagens. Para a tomada de fotos, o operador do *smartphone* manteve o padrão de posicionamento do aparelho, correspondente à altura de 20 cm do chão e afastamento lateral de 20 cm da área delimitada. A presença de sombras na área de interesse foi evitada e, a cada ponto, tentou-se ao máximo manter a homogeneidade da luminosidade, evitando sequências de foto onde houvesse transição da condição ensolarada para nublada e vice-versa. As fotos foram tiradas ao redor da área delimitada, de diferentes ângulos (geralmente de 25 a 30 imagens por local ensaiado).

Para o processamento das imagens foi utilizado o *software* Recap Photo (versão 19.3.0.11) da Autodesk, que possibilitou a reconstrução 3D da superfície, a definição da escala (baseada nas medidas conhecidas da régua colocada na superfície), a orientação do modelo criado segundo os eixos xyz e a delimitação da área de interesse. Após essa etapa, o modelo 3D foi convertido do formato em que havia sido salvo (.STL) para o formato XYZ *point cloud* (.xyz), com o auxílio de um *software* livre, o MeshLab (v. 2020.07). O arquivo .xyz foi então importado para o *software* Gwyddion (versão 2.50), que possui ferramentas que calculam parâmetros de área da ISO 25178-2 (2012). Nesse programa, 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. Na Figura 50 as etapas envolvidas na modelagem 3D da superfície por meio da técnica de CRP são apresentadas.

Figura 50 — Etapas da modelagem 3D utilizando a técnica de CRP



Fonte: Elaborado pela autora (1,3 e 4) e Maia (2020) (2).

#### 4.4.4 Drenabilidade

Para cada via, esse ensaio foi realizado em 4 pontos referentes a uma mesma faixa de tráfego. Foram seguidos os procedimentos da norma ASTM E2380/E2380M (2019), que é um teste relativo à conectividade da textura no que se refere à capacidade de drenagem do pavimento por meio de seus vazios superficiais e subsuperficiais. Pode também ser utilizado, se combinado a outros testes, para avaliar a textura de um CA. De acordo com a ASTM E2380/E2380M (2019), os resultados desse ensaio correlacionam-se com outros métodos de obtenção de textura, como *circular test meter*, *Mean Profile Depth (MPD)* e mancha de areia. O drenômetro utilizado neste ensaio foi desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC, nos moldes do drenômetro do *Institute of Highways, Railroads and Rock Engineering (ISETH)*, da Suíça, e é mostrado na Figura 51.

Figura 51 — Drenômetro utilizado na presente pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

O ensaio consiste em medir o tempo que leva para que um volume conhecido de água (0,73 L), sob ação gravitacional, escape por vazios na textura do revestimento ensaiado. Utiliza-se, para isso, um dispositivo medidor de vazão, constituído de um cilindro vertical com um orifício em sua base, onde é plugada uma borracha contra a superfície do revestimento para vedar o escoamento do líquido antes do início do ensaio. Esse cilindro contém duas marcações, que delimitam o volume conhecido. Uma vez que o plugue de borracha está encaixado no orifício, o cilindro deve ser completamente preenchido com água. Para início do ensaio, o plugue deve ser retirado do orifício, possibilitando o escoamento da água. Quando a superfície livre da água atinge a primeira marcação, o cronômetro deve ser acionado, e o tempo que esta leva para atingir a segunda marcação deve ser registrado.

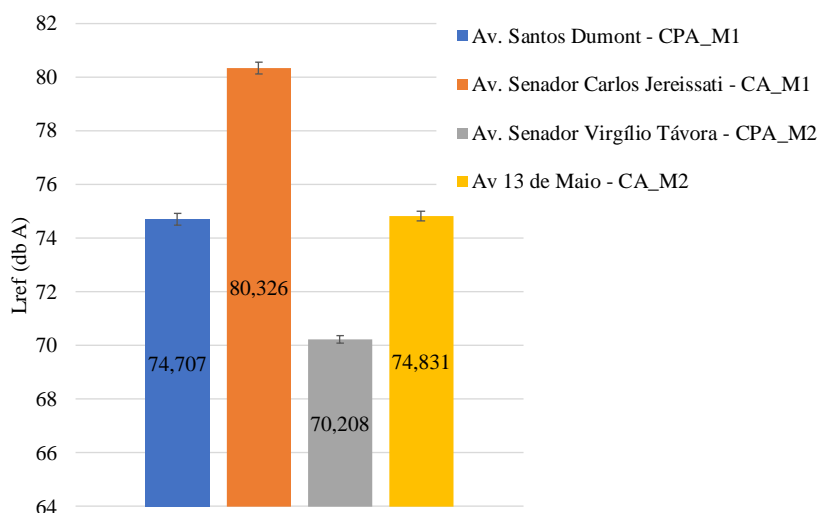
Nesse trabalho, a vazão de escoamento, obtida da relação entre o volume conhecido e o tempo de escoamento deste, foi utilizada como indicador de drenabilidade. Dentre os revestimentos investigados, encontram-se CPAs, que são revestimentos porosos e que, segundo a norma, estes não são superfícies cujos resultados de textura obtidos com o uso do drenômetro correlacionam-se bem com o parâmetro MPD. Este último é uma medida da textura superficial e não leva em conta a água que flui através dos poros da superfície. Por outro lado, alguns autores apontam o ensaio da mancha de areia como não adequado para avaliação de CPAs, visto que a areia utilizada no ensaio pode preencher os vazios desse tipo de revestimento e fornecer medidas equivocadas da macrotextura (CALLAI, 2011; KNABBEN, 2012; ALVES, 2019). Diante desses fatos, ressalta-se que o ensaio de drenabilidade não está sendo utilizado para medir a macrotextura, e sim para fornecer uma dimensão do tempo de escoamento da água na superfície. As superfícies não foram saturadas antes da realização do ensaio.

## **4.5 Resultados e discussão**

### ***4.5.1 Caracterização acústica***

A caracterização acústica, realizada por meio do método CPB (NF S31-119-2, 2000) com algumas adaptações, é expressa em termos de  $L_{ref}$  (Figura 52), associado a um nível de confiança de 95%, bem como em termos da reta de regressão linear do NPS ( $L_{Amáx}$ ) em função do logaritmo decimal da velocidade. As velocidades de referência,  $V_{ref}$ , são, respectivamente, 65 km/h e 50 km/h para a primeira e para a segunda etapa de caracterização. Esses valores foram escolhidos por serem os valores centrais do intervalo de velocidades de teste, além de serem próximos das médias das velocidades (em torno de 63 km/h e 50 km/h, respectivamente) dos trechos avaliados na primeira e na segunda etapa. A NF S31-119-2 (2000) estabelece que é indispensável que a média das velocidades difira pouco da velocidade de referência, mas não quantifica de quanto deve ser essa diferença.

Figura 52 — Níveis de referência do  $L_{Amáx}$  e respectivos ICs para as vias estudadas

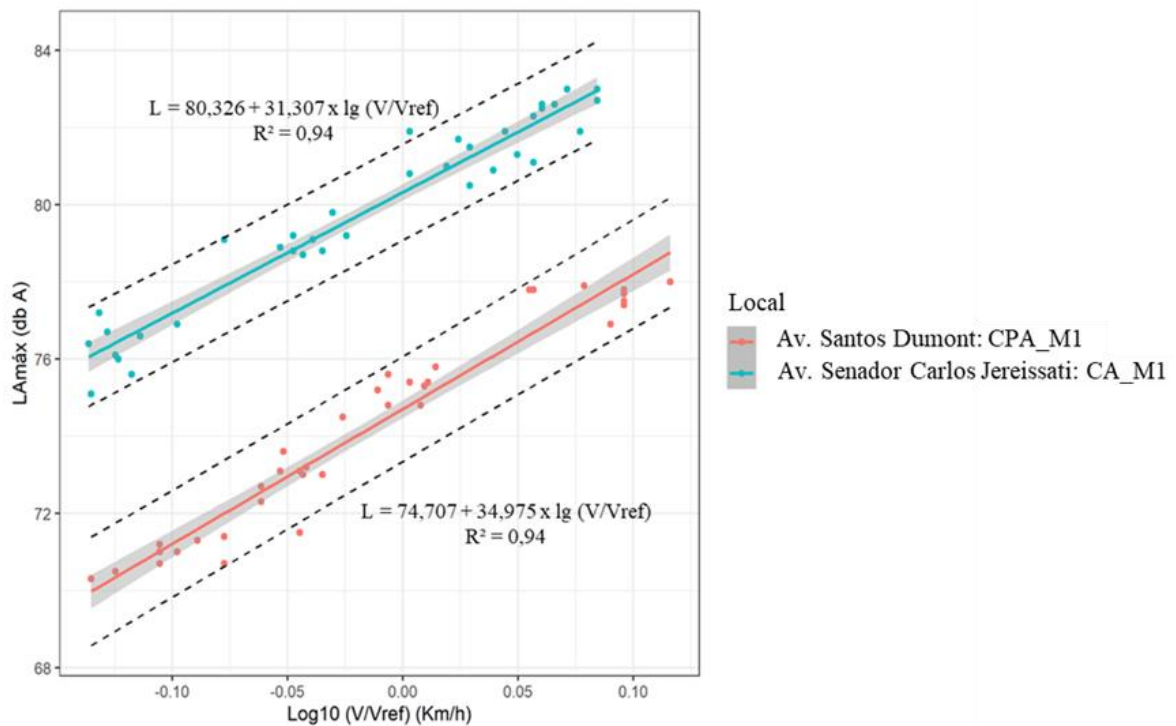


Fonte: Elaborado pela autora.

Nas Figuras 53 e 54 são mostrados os conjuntos de dados das vias estudadas na primeira e na segunda etapas desta pesquisa, respectivamente, juntamente com as retas de regressão, os valores de  $R^2$ , bem como os respectivos ICs e intervalos de previsão (IPs). Em ambas as figuras é possível perceber a correlação da velocidade de passagem com o NPS, como esperado. Tanto na primeira quanto na segunda etapas, os resultados mostraram que o revestimento em CPA forneceu menores níveis sonoros para todas as velocidades testadas. Os níveis de referência – que correspondem aos coeficientes lineares das retas de regressão – para 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). Os IP e IC apresentados na Figura 53 permitem afirmar que a diferença entre os NPS da passagem do veículo no revestimento em CPA e em CA são estatisticamente significantes, para um intervalo de 95% de confiança.

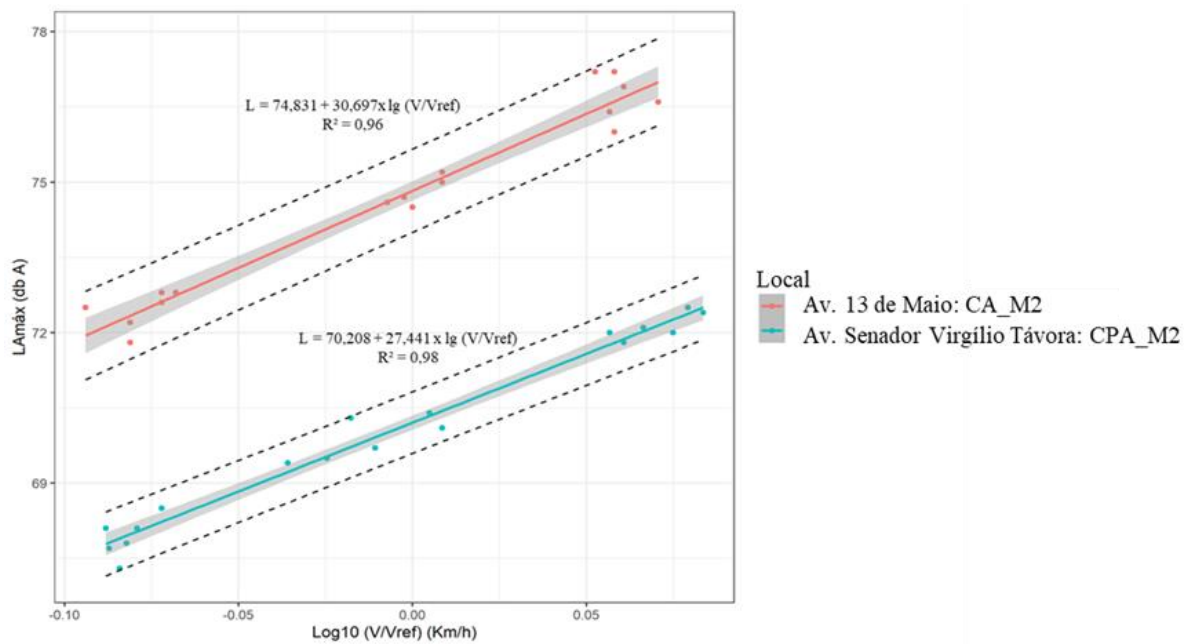
Na segunda etapa, os níveis de referência ( $V_{ref} = 50$  km/h) para CPA\_M2 e CA\_M2 foram, respectivamente, 70,2 e 74,8 dB (A). Dessa forma, a diferença entre os NPS das duas vias é 4,6 dB (A). Pela Figura 54, é possível perceber que nem as curvas de  $L_{Amáx}$  em função do logaritmo decimal da velocidade nem os respectivos IC e IP se interceptam. Com isso, pode-se concluir que, para essa etapa, as diferenças entre as vias analisadas também são estatisticamente diferentes, para um nível de confiança de 95%.

Figura 53 —  $L_{Am\acute{a}x}$  em função do logaritmo decimal da velocidade para as vias estudadas na primeira etapa da caracterização acústica



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 54 —  $L_{Am\acute{a}x}$  em função do logaritmo decimal da velocidade para as vias estudadas na segunda etapa da caracterização acústica



Fonte: Elaborado pela autora.

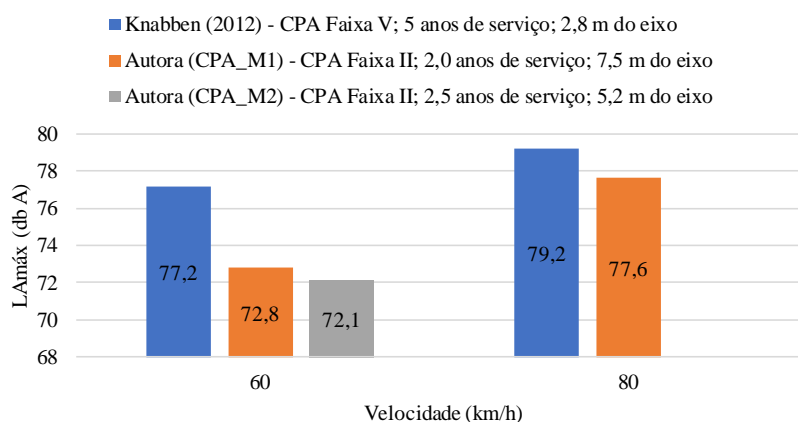
Nos resultados obtidos por Knabben (2012) para uma CPA com 5 anos de serviço (localizada em um trecho da BR-282), em uma via urbana, utilizando o método CPB e com o sonômetro a 2,8 m de distância do eixo de passagem do veículo, o  $L_{Amáx}$  foi, em média, 77,2 dB (A) e 79,2 dB (A) para as velocidades de 60 km/h e 80 km/h, respectivamente. No presente trabalho, para a CPA com 2 anos de serviço (CPA\_M1), para essas velocidades e a uma distância de 7,5 m do eixo de passagem do veículo, os  $L_{Amáx}$  foram de 72,8 dB (A) e 77,6 dB (A), respectivamente. Essa comparação é retratada na Figura 55, juntamente com o  $L_{Amáx}$  da CPA\_M2 (2,5 anos de serviço, MNPS a 5,2 m do eixo do veículo) para 60 km/h.

Devido às diferenças nos métodos de ensaio, nas idades dos revestimentos, nas distâncias do MNPS em relação ao veículo, nas faixas granulométricas empregadas nos revestimentos estudados, e nas condições de entorno encontradas em cada estudo da literatura, é difícil encontrar trabalhos com todas as condições semelhantes às aquelas investigadas no presente estudo. No entanto, a título de comparação, a partir dos resultados obtidos por Knabben (2012) para a CPA, o nível sonoro para uma distância entre MNPS e veículo mais próxima às ensaiadas no presente trabalho foi estimado. De acordo com Ramussen *et al.* (2007), para fontes sonoras pontuais, o nível sonoro diminui aproximadamente 6 dB quando se dobra a distância à fonte emissora. Dessa forma, para uma distância de 5,6 m (o dobro da distância ensaiada pelo referido autor), o  $L_{Amáx}$  seria 71,2 dB (A) para a velocidade de 60 km/h. Esse valor é próximo ao encontrado para CPA\_M2 para essa velocidade e uma distância de 5,2 m, que foi 72,1 dB (A) e também próximo ao valor obtido para CPA\_M1 a uma distância de 7,5 m (que foi 72,8 dB (A)).

Embora haja várias ressalvas no que tange à comparação dos resultados obtidos no presente de trabalho com aqueles obtidos por Knabben (2012), percebe-se que, apesar de estarem em operação há até 2,5 anos em vias urbanas – sujeitas a menores velocidades de tráfego e a ações de aceleração e desaceleração, conversões, dentre outros fatores que contribuem para a colmatção do revestimento – os revestimentos em CPA aqui estudados apresentaram níveis de ruído semelhantes àqueles utilizados em uma rodovia que utiliza essa solução de pavimentação. Uma importante conclusão do presente estudo é que, assim como outros trabalhos que compararam o ruído pneu-pavimento em diferentes tipos de revestimentos (KNABBEN, 2012; ALVES, 2019), inclusive em CPAs, os revestimentos desse tipo que aqui foram avaliados apresentaram menores níveis de pressão sonora, com diferenças que facilmente atingem ou superam 3 dB (A). Portanto, essa solução de pavimentação, que está sendo utilizada na cidade de Fortaleza, pode ser considerada eficaz na redução do ruído pneu-pavimento.



Figura 55 — Medidas de  $L_{Am\acute{a}x}$  obtidas pelo método CPB no presente trabalho e encontradas por Knabben (2012)



Fonte: Elaborado pela autora.

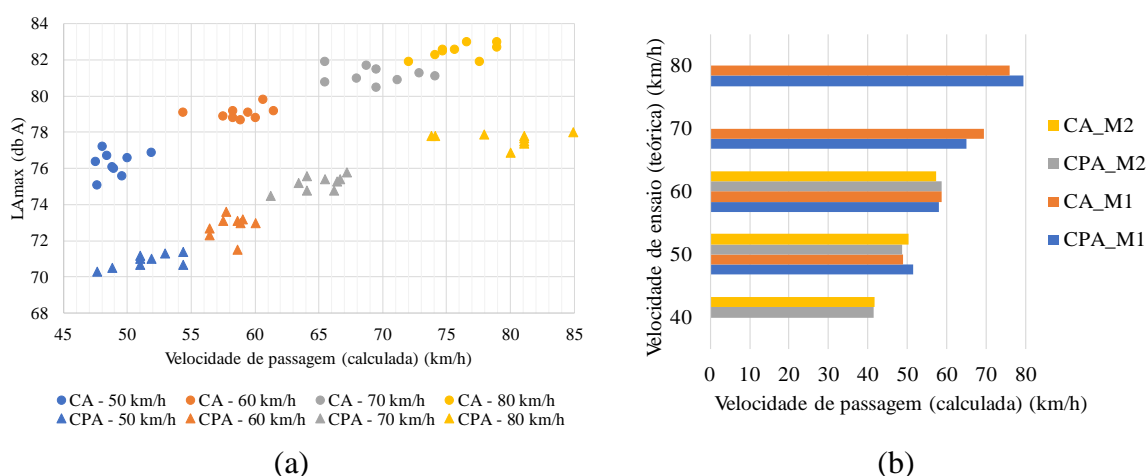
É importante ressaltar que, a despeito da tentativa de realizar os ensaios em pares de vias que apresentassem entornos semelhantes, alguns fatores que influenciam o NPS da passagem de veículos no revestimento foram diferentes nas duas vias avaliadas, a exemplo disto, citam-se: quantidade de faixas de tráfego e presença de barreiras de concreto e outros obstáculos. Além disso, chama-se atenção para a diferença entre as idades dos revestimentos. A utilização de CPA em vias da cidade de Fortaleza é uma prática recente, que tem menos de 4 anos, enquanto que as outras vias são mais antigas. Assim, é possível que essa diferença nos NPS, devido ao fato dos revestimentos serem de diferentes tipos, diminua após a realização de ações de manutenção e reabilitação nos revestimentos com CA.

Um fato observado durante a realização dos ensaios acústicos foi que, para velocidades mais baixas (40, 50 e 60 km/h), é mais fácil controlar a velocidade de passagem. A dificuldade de manter esse controle vai aumentando conforme se aumenta a velocidade de realização do ensaio. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 56. Conforme explicado na seção 4.4.2.1, as velocidades de passagem foram calculadas pelo tempo de passagem do veículo, gravados a partir de observação/sinalização e subsequente acionamento do cronômetro pelo operador desse dispositivo.

Devido ao fato de em velocidades mais altas (por exemplo, 70 e 80 km/h) o tempo de passagem ser menor, o cálculo destas tende a ser mais sensível aos erros humanos associados aos tempos de reação – tanto a ação do observador de levantar a mão para sinalizar a passagem do veículo pela marcação quanto o ato do operador de acionar o cronômetro. Para exemplificar isso, na Figura 56 (a), nota-se que, para a velocidade de 80 km/h para a CPA, as observações variaram de 75 km/h a 85 km/h. Além disso, para a CPA, para o ensaio realizado na velocidade

de 70 km/h, todos os pontos (velocidades calculadas) estão abaixo da velocidade de ensaio (teórica). Por outro lado, para velocidades mais baixas (50 e 60 km/h), tanto para a CPA quanto para o CA, os pontos estão mais concentrados próximos às respectivas velocidades alvo. Na Figura 56 (b) – que fornece outra possibilidade de visualização – novamente, para as velocidades de 70 e 80 km/h, as barras relativas às velocidades médias (calculadas) estão mais distantes das linhas verticais que marcam estas velocidades.

Figura 56 — Dispersão da velocidade calculada para cada velocidade de ensaio em gráficos de: velocidades de passagem *versus* (a)  $L_{Amax}$  e (b) velocidade de ensaio



Fonte: Elaborado pela autora.

## 4.5.2 Caracterização da superfície

### 4.5.2.1 Macrotextura e microtextura

As medições da macrotextura por meio do ensaio de mancha de areia, para os revestimentos testados (2 trechos em CPA e 2 trechos em CA), resultaram nos dados apresentados na Tabela 38. Esses dados são referentes à média dos 9 pontos testados em cada trecho. A seguir, nas Tabelas 39 a 42 são apresentados os resultados dos ensaios em cada ponto e em cada trecho estudado. Como foram realizados ensaios em trilhas de roda de diferentes faixas de tráfego, pelas razões já expostas, as médias relativas às trilhas de roda da trajetória do veículo no ensaio acústico e à uma única faixa de tráfego são calculadas separadamente. Valores de DP e CV são apresentados nas tabelas citadas anteriormente a fim de proporcionar melhor compreensão acerca da variabilidade dos resultados.

Tabela 38 — Resumo dos resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia nos trechos estudados

Trecho/Revestimento	Diâmetro médio (mm)	H <sub>s</sub> (mm)	DP (mm)	CV (%)	Classificação (DNIT, 2006b)
CPA_M1 – Av. Santos Dumont	246,1	0,53	0,05	10	Média
CA_M1 – Av. Senador Carlos Jereissati	164,2	1,19	0,10	8	Aberta
CPA_M2 – Av. Senador Virgílio Távora	218,9	0,67	0,08	12	Média
CA_M2 – Av. 13 de Maio	258,6	0,49	0,09	18	Média

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 39 — Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia no trecho da Av. Santos Dumont (CPA\_M1)

Ponto	Posição no trecho	Diâmetro médio (mm)	H <sub>s</sub> (mm)	Classificação (DNIT, 2006b)
1	F2/LE*	262,5	0,46	Média
2	F2/LE*	237,5	0,56	Média
3	F2/LE*	230,0	0,60	Média
4	F1/LE	247,5	0,52	Média
5	F1/LD*	262,5	0,46	Média
6	F1/LE	252,5	0,50	Média
7	F1/LD*	252,5	0,50	Média
8	F1/LE	230,0	0,60	Média
9	F1/LD*	240,0	0,55	Média
H <sub>s</sub> (trajetória)	0,52 mm	H <sub>s</sub> (F1)	0,52 mm	
DP (trajetória)	0,06 mm	DP (F1)	0,05 mm	
CV (trajetória)	11%	CV (F1)	9%	

Obs.: Os pontos marcados com \* são aqueles referentes à trajetória do veículo nos ensaios acústicos.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 40 — Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia no trecho da Av. Senador Carlos Jereissati (CA\_M1)

Ponto	Posição no trecho	Diâmetro médio (mm)	H <sub>s</sub> (mm)	Classificação (DNIT, 2006b)
1	FD/LD	170,0	1,10	Aberta
2	FD/LE*	165,0	1,17	Aberta
3	FD/LD	160,0	1,24	Muito aberta
4	FD/LE*	160,0	1,24	Muito aberta
5	FD/LD	162,5	1,21	Muito aberta
6	FD/LE*	180,0	0,98	Aberta
7	FE/LD*	165,0	1,17	Aberta
8	FE/LD*	155,0	1,32	Muito aberta
9	FE/LD*	160,0	1,24	Muito aberta
H <sub>s</sub> (trajetória)	1,19 mm	H <sub>s</sub> (FD)	1,16 mm	
DP (trajetória)	0,12 mm	DP (FD)	0,10 mm	
CV (trajetória)	10%	CV (FD)	9%	

Obs.: Os pontos marcados com \* são aqueles referentes à trajetória do veículo nos ensaios acústicos.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 41 — Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia no trecho da Av. Senador Virgílio Távora (CPA\_M2)

Ponto	Posição no trecho	Diâmetro médio (mm)	H <sub>s</sub> (mm)	Classificação (DNIT, 2006b)
1	FD/LD	230,0	0,60	Média
2	FD/LE*	207,5	0,74	Média
3	FD/LD	200,0	0,80	Média
4	FD/LE*	247,5	0,52	Média
5	FD/LD	220,0	0,66	Média
6	FD/LE*	212,5	0,70	Média
7	FE/LD*	215,0	0,69	Média
8	FE/LD*	220,0	0,66	Média
9	FE/LD*	220,0	0,67	Média
H <sub>s</sub> (trajetória)	0,66 mm	H <sub>s</sub> (FD)	0,67 mm	
DP (trajetória)	0,08 mm	DP (FD)	0,10 mm	
CV (trajetória)	11%	CV (FD)	15%	

Obs.: Os pontos marcados com \* são aqueles referentes à trajetória do veículo nos ensaios acústicos.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 42 — Resultados obtidos para o ensaio da mancha de areia no trecho da Av. 13 de Maio (CA\_M2)

Ponto	Posição no trecho	Diâmetro médio (mm)	H <sub>s</sub> (mm)	Classificação (DNIT, 2006b)
1	FD/LD	237,5	0,56	Média
2	FD/LE*	247,5	0,52	Média
3	FD/LD	225,0	0,63	Média
4	FD/LE*	262,5	0,46	Média
5	FD/LD	245,0	0,53	Média
6	FD/LE*	255,0	0,49	Média
7	FE/LD*	270,0	0,44	Média
8	FE/LD*	282,5	0,40	Fechada
9	FE/LD*	302,5	0,35	Fechada
H <sub>s</sub> (trajetória)	0,44 mm	H <sub>s</sub> (FD)	0,53 mm	
DP (trajetória)	0,06 mm	DP (FD)	0,06 mm	
CV (trajetória)	14 %	CV (FD)	11 %	

Obs.: Os pontos marcados com \* são aqueles referentes à trajetória do veículo nos ensaios acústicos.

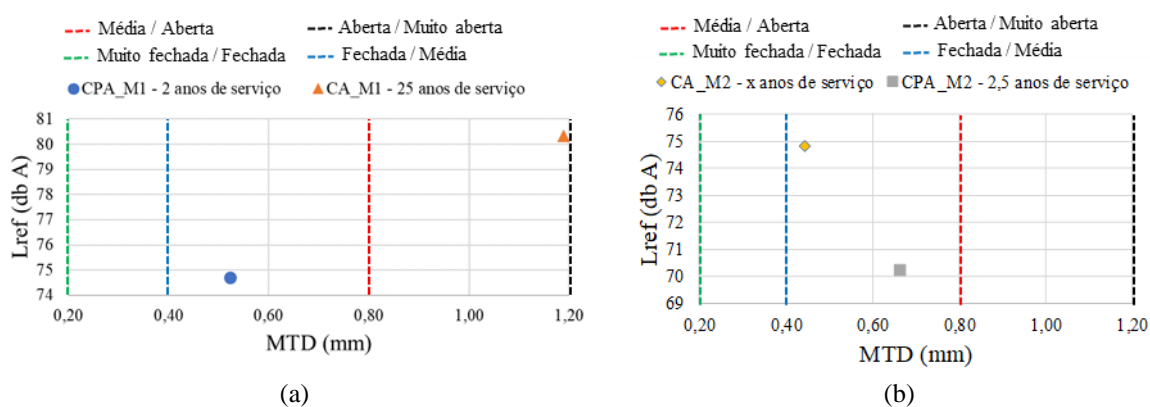
Fonte: Elaborado pela autora.

De forma geral, os resultados do ensaio de macrotextura para uma dada via são semelhantes, seja considerando-se as trilhas de roda da trajetória do veículo no ensaio acústico ou as trilhas de roda de uma única faixa de tráfego. A classificação da macrotextura, dentro de uma mesma via, variou entre duas categorias nas vias com revestimento em CA, enquanto que nas vias em CPA a classificação se manteve a mesma em todos os pontos. Para essas vias, a macrotextura foi classificada como média, a mesma classificação da via CA\_M2. Para essa última, no entanto, alguns pontos tiveram sua macrotextura classificada como fechada. Já para a via CA\_M1, a classificação geral da macrotextura foi aberta, embora a maioria dos seus pontos tenha sido classificada como muito aberta.

Na Figura 57 são apresentados os níveis de ruído  $L_{ref}$  em função da macrotextura. Como foram analisados pares de vias com condições de entorno semelhantes entre si, os resultados são apresentados separadamente (Figura 57a e b) para cada par de via. A relação ruído *versus* macrotextura obtida nas vias com condições mais restritas de entorno (Figura 57a) apresentou tendência contrária àquela obtida para o par de via no entorno mais adensado (Figura 57b), o que pode ser visto pela disposição dos pontos de forma crescente no primeiro caso e decrescente no segundo.

Como a quantidade de revestimentos aqui estudados é pequena (quatro), e ainda menor (dois) ao se considerar diferentes condições de entorno para o ensaio acústico, é difícil pautar a explicação do desempenho acústico na macrotextura da via. A testagem de mais vias, com entornos semelhantes aos aqui estudados, e com diferentes macrotexturas e/ou revestimentos, seria interessante para complementar esse estudo. Dessa forma, antes de concluir a influência da macrotextura no desempenho acústico do pavimento (em termos de  $L_{ref}$ ), é necessário que um número maior de trechos seja ensaiado, com diferentes idades, diferentes tipos de revestimentos, diferentes curvas granulométricas, etc. As análises da microtextura e do IFI em função do nível  $L_{ref}$  levaram às mesmas conclusões, pois os resultados apresentaram a mesma tendência que a macrotextura e os trechos foram os mesmos.

Figura 57 —  $L_{ref}$  em função do MTD para o par de vias com  $V_{ref}$  de: a) 65 km/h e b) 50 km/h



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de microtextura, obtidos a partir da realização do ensaio de pêndulo britânico, são apresentados na Tabela 43. Esses resultados correspondem à média do VRD para cada trecho, considerando todos os pontos testados, bem como o DP e o CV. Assim como para os ensaios de macrotextura, aqui também são apresentados a média, o DP e o CV do VRD médio de cada via, tanto relativos à trajetória do veículo no ensaio acústico quanto relativos à

uma única faixa de tráfego. Os resultados detalhados dos ensaios para cada via são mostrados nas Tabelas 44 a 47.

Tabela 43 — Resumo dos resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico nos trechos estudados

<b>Trecho/Revestimento</b>	<b>VRD médio (BPN)</b>	<b>DP (BPN)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Classificação (DNIT, 2006b)</b>
CPA_M1 – Av. Santos Dumont	40,4	2,6	6	Lisa
CA_M1 – Av. Senador Carlos Jereissati	53,8	6,8	13	Medianamente rugosa
CPA_M2 – Av. Senador Virgílio Távora	32,8	3,1	9	Lisa
CA_M2 – Av. 13 de Maio	32,2	3,1	10	Lisa

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 44 — Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico no trecho da Av. Santos Dumont (CPA\_M1)

<b>Ponto</b>	<b>Posição no trecho</b>	<b>VRD médio (BPN)</b>	<b>Classificação (DNIT, 2006b)</b>
1	F2/LE*	44,0	Insuficientemente rugosa
2	F2/LE*	41,5	Insuficientemente rugosa
3	F2/LE*	41,0	Insuficientemente rugosa
4	F1/LE	39,0	Lisa
5	F1/LD*	36,5	Lisa
6	F1/LE	43,8	Insuficientemente rugosa
7	F1/LD*	39,5	Lisa
8	F1/LE	41,3	Insuficientemente rugosa
9	F1/LD*	37,3	Lisa
VRD médio (trajetória)	40,0 BPN	VRD médio (F1)	39,5 BPN
DP (trajetória)	2,8 BPN	DP (F1)	2,7 BPN
CV (trajetória)	7 %	CV (F1)	7%

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 45 — Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico no trecho da Av. Senador Carlos Jereissati (CA\_M1)

<b>Ponto</b>	<b>Posição no trecho</b>	<b>VRD médio (BPN)</b>	<b>Classificação (DNIT, 2006b)</b>
1	FD/LD	44,6	Insuficientemente rugosa
2	FD/LE*	47,8	Medianamente rugosa
3	FD/LD	54,0	Medianamente rugosa
4	FD/LE*	57,3	Rugosa
5	FD/LD	57,0	Rugosa
6	FD/LE*	55,3	Rugosa
7	FE/LD*	67,8	Rugosa
8	FE/LD*	49,0	Medianamente rugosa
9	FE/LD*	52,5	Medianamente rugosa
VRD médio (trajetória)	54,9 BPN	VRD médio (FD)	52,6 BPN
DP (trajetória)	7,25 BPN	DP (FD)	5,27 BPN
CV (trajetória)	13 %	CV (FD)	10%

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 46 — Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico no trecho da Av. Senador Virgílio Távora (CPA\_M2)

<b>Ponto</b>	<b>Posição no trecho</b>	<b>VRD médio (BPN)</b>	<b>Classificação (DNIT, 2006b)</b>
1	FD/LD	32,0	Lisa
2	FD/LE*	38,3	Lisa
3	FD/LD	34,8	Lisa
4	FD/LE*	33,0	Lisa
5	FD/LD	27,5	Muito lisa
6	FD/LE*	29,8	Muito lisa
7	FE/LD*	34,8	Lisa
8	FE/LD*	32,0	Lisa
9	FE/LD*	32,8	Lisa
VRD médio (trajetória)	33,4 BPN	VRD médio (FD)	32,5 BPN
DP (trajetória)	2,9 BPN	DP (FD)	3,8 BPN
CV (trajetória)	9%	CV (FD)	12%

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 47 — Resultados obtidos para o ensaio de pêndulo britânico no trecho da Av. 13 de Maio (CA\_M2)

<b>Ponto</b>	<b>Posição no trecho</b>	<b>VRD médio (BPN)</b>	<b>Classificação (DNIT, 2006b)</b>
1	FD/LD	28,8	Muito lisa
2	FD/LE*	28,5	Muito lisa
3	FD/LD	33,8	Lisa
4	FD/LE*	32,0	Lisa
5	FD/LD	33,0	Lisa
6	FD/LE*	37,3	Lisa
7	FE/LD*	35,5	Lisa
8	FE/LD*	32,0	Lisa
9	FE/LD*	29,0	Muito lisa
VRD médio (trajetória)	32,4 BPN	VRD médio (FD)	32,2 BPN
DP (trajetória)	3,5 BPN	DP (FD)	3,3 BPN
CV (trajetória)	11%	CV (FD)	10%

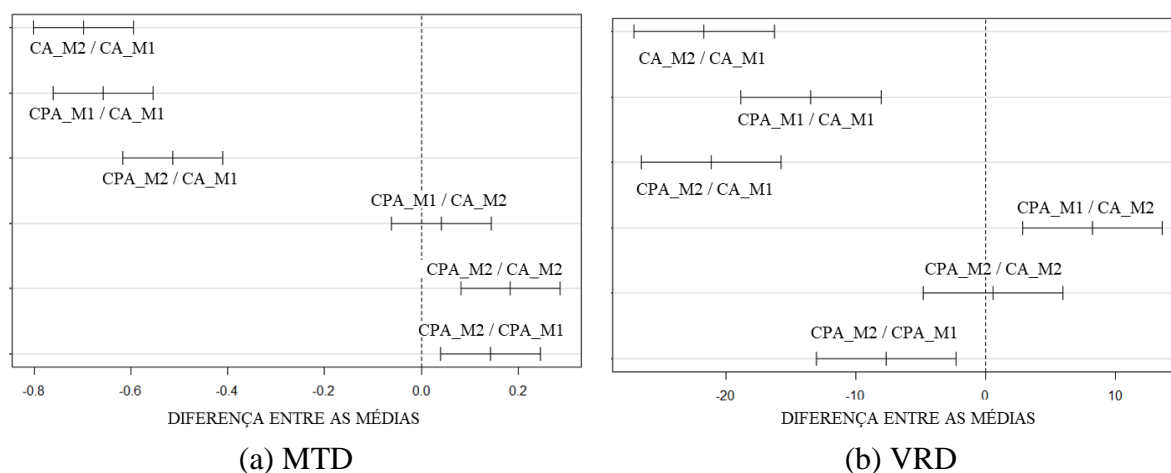
Fonte: Elaborado pela autora.

A classificação da microtextura dos pontos variou entre todas as vias estudadas. Para a Av. Santos Dumont (CPA\_M1), a classificação variou entre lisa e insuficientemente rugosa. Já para a CPA\_M2, a microtextura variou entre lisa e muito lisa, que também foi o caso da Av. 13 de Maio (CA\_M2). Por fim, a microtextura da CA\_M1 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 das vias em CPA coincidiu com a classificação da via CA\_M2. A microtextura dessas vias foi classificada como lisa, enquanto que a CA\_M1 teve sua macrotextura classificada como medianamente rugosa.

Com o objetivo de analisar se as diferenças para os parâmetros MTD e VRD entre as vias estudadas, par a par, são significativas, foi realizado um teste estatístico (teste Tukey).

Esse teste baseia-se na comparação da diferença das médias com o uso do conceito de diferença mínima significativa. O mesmo resultado também pode ser obtido com a utilização de IC das diferenças entre as médias ou, ainda, no com base no valor-p. As premissas para a realização do teste são as seguintes: as observações são independentes dentro e entre os grupos, os grupos devem ser normalmente distribuídos, e a variância dentro do grupo deve ser constante (homocedasticidade). Aqui, foram utilizados os IC (95%) das diferenças entre as médias. Quando o valor zero está contemplado nesses intervalos, significa que não há diferença significativa entre os grupos para a variável em questão; caso contrário, há diferença significativa. Na Figura 58, os resultados do teste Tukey para as variáveis MTD e VRD são apresentados. Em Costa (2017), dados de ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico, realizados em um trecho de estudo, apontaram que o primeiro parâmetro segue distribuição normal, enquanto que o segundo mostrou aderência à distribuição gama. Dessa forma, há limitação quanto a validade das premissas aqui assumidas para a realização do teste Tukey.

Figura 58 — Resultados do teste Tukey para os parâmetros (a) MTD e (b) VRD



Fonte: Elaborado pela autora.

Pela Figura 59, é possível perceber que só não houve diferença entre CPA\_M1 e CA\_M2 para MTD e entre CPA\_M2 e CA\_M2 para VRD. Outro fato que pode ser retirado dessas análises, é que as diferenças entre CA\_M1 e os demais revestimentos são sempre mais significativas do que as diferenças desses entre si. Para MTD, a menor diferença entre CA\_M1 e os demais revestimentos foi 2,8 vezes maior que a maior diferença desses revestimentos entre si. Já para VRD, esse valor foi 2,6.

Com os parâmetros de micro e macrotextura obtidos, foram calculados os parâmetros Sp e F60, e a classificação IFI para a velocidade de 60 km/h, proposta por APS



(2006) foi realizada, como mostrada na Tabela 48. Nessa tabela também são apresentados os resultados obtidos por Alves (2019). O IFI também foi calculado para diversas velocidades, a fim de se compreender o comportamento do atrito oferecido pelos revestimentos em função destas. Na Figura 59 é mostrada essa relação para as quatro vias analisadas no presente trabalho, juntamente com os limites propostos por APS (2006). É possível perceber que, para a velocidade de 60 km/h, os revestimentos CPA\_M1 e CPA\_M2 foram classificados como bons, CA\_M1 foi classificado como muito bom, e CA\_M2 como regular.

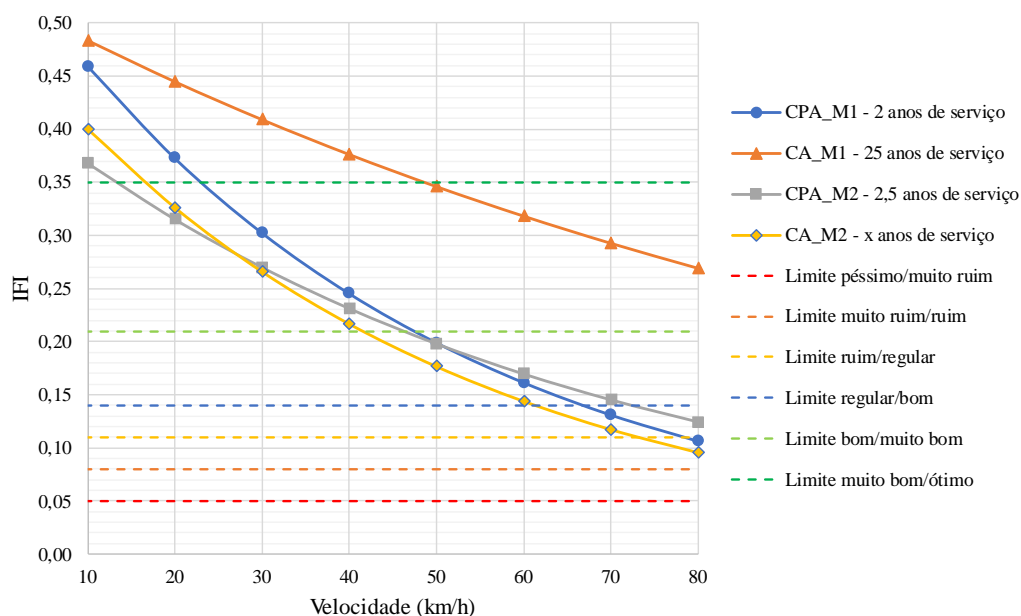
Os resultados de F60 obtidos por Alves (2019) para revestimentos em CPA de rodovias federais, com maior tempo de execução (4, 6 e 15 anos) em comparação aos revestimentos em CPA aqui estudados, resultam em classificações de IFI de ótimo e muito bom. O melhor desempenho apresentado para as CPAs avaliadas pelo referido autor, no que se refere ao atrito superficial, em relação às CPAs aqui estudadas, pode ser devido ao fato de que aquelas correspondem a revestimentos de rodovias, enquanto que essas correspondem a revestimentos de vias urbanas, onde as características do tráfego favorecem o polimento dos agregados e a colmatação do revestimento.

Tabela 48 — Parâmetros do IFI (Sp e F60) e sua classificação para os revestimentos avaliados nesse trabalho e presente na literatura

Referência	Tipo de revestimento	Idade do revestimento	Parâmetros do IFI		Classificação (APS, 2006)
			Sp	F60	
Autora	CPA_M1 – Faixa II – Santos Dumont	2 anos	47,76	0,16	Bom
	CPA_M2 – Faixa II – Virgílio Távora	2,5 anos	64,52	0,17	Bom
	CA_M1 – Av. Senador Carlos Jereissati	25 anos	119,94	0,32	Muito bom
	CA_M2 – Av. 13 de Maio	-	48,90	0,14	Regular
Alves (2019)	CPA – Faixa V – BR 285	4 anos	148,58	0,38	Ótimo
	CPA – Faixa V – BR 158	6 anos	183,79	0,46	Ótimo
	CPA – Faixa V – BR 285	15 anos	119,04	0,30	Muito bom

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 59 — IFI em função da velocidade e limites da classificação de APS (2006) para o IFI



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 59, pode ser constatado que o desempenho do revestimento CA\_M1, com relação ao atrito superficial, foi sempre superior aos demais. A mínima diferença foi de 5,2%, em relação a CPA\_M1, para a velocidade de 10 km/h, e a máxima foi de 182%, em relação à CA\_M2, para a velocidade de 80 km/h. Observando a citada figura é possível perceber que, até a velocidade de 25 km/h, CA\_M2 apresentou maior atrito que CPA\_M2, mas acima dessa velocidade, CA\_M2 teve sempre menor IFI, dentre os revestimentos estudados. Os resultados obtidos para o IFI refletem a tendência encontrada nos resultados dos ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia no que se refere à diferença entre CA\_M1 e os demais revestimentos ser sempre maior do que as diferenças entre esses outros quando comparados entre si.

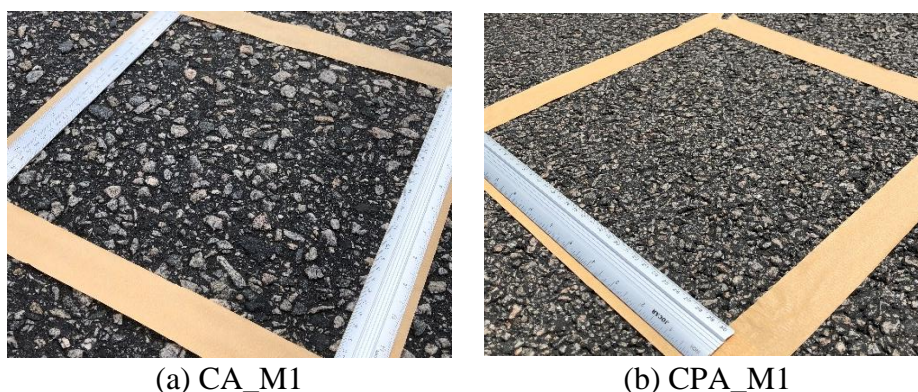
Em um estudo conduzido por Costa, Castelo Branco e Freitas (2017), foram calculadas curvas de atrito em função da velocidade (de 5 a 60 km/h) relativas a 11 diferentes tipos de revestimentos. Os resultados obtidos pelos referidos autores mostraram que os tipos de revestimento que tiveram menor desempenho (com relação ao atrito) em velocidades baixas (digamos, 10 km/h) foram: CPA, CA com microfresagem, SMA e tratamentos superficiais simples e duplos. No citado estudo, o valor de IFI para CPA, para a velocidade de 10 km/h, foi de aproximadamente 0,5, que é um valor 9% e 36% superior àqueles encontrados para CPA\_M1 e CPA\_M2, respectivamente. Já para a velocidade de 60 km/h, os referidos autores obtiveram IFI de 0,34, que é 110% e 100% maior àqueles obtidos para CPA\_M1 e CPA\_M2,

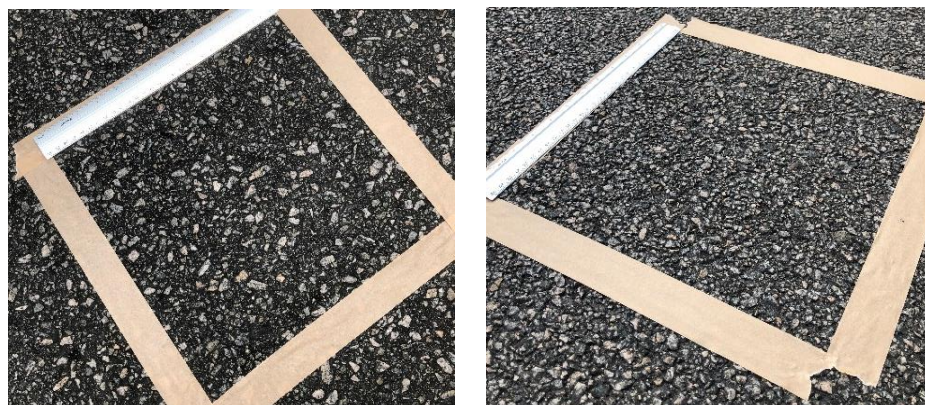
respectivamente. Assim, é possível perceber que o IFI das CPAs avaliadas na presente pesquisa é mais susceptível à variação de velocidade do que aquele das CPAs avaliadas por Costa, Castelo Branco e Freitas (2017). Para tentar compreender o motivo disso ocorrer, teria que se ter acesso às características das CPAs avaliadas no referido trabalho, que não estavam disponíveis.

O revestimento CA\_M1 é referente a um trecho de uma rodovia estadual (CE-401) que passa pelo interior da cidade de Fortaleza (na Figura 41 é possível ver que essa via é mais periférica em relação às demais), cuja velocidade permitida é de 80 km/h, diferentemente dos demais trechos avaliados (60 km/h). Por se tratar de um trecho de rodovia, as características do tráfego (composição dos veículos, velocidade permitida, manobras realizadas) são diferentes daquelas do tráfego das demais vias urbanas analisadas nesse estudo. É possível que essa seja a razão pela qual a micro e macrotexturas do revestimento dessa via são mais diferentes das demais vias analisadas.

Na Figura 60 são mostrados exemplos de pontos em cada uma das superfícies analisadas. Devido à idade do revestimento CA\_M1 (25 anos), pode ter havido aumento da macrotextura devido ao desgaste na película de ligante asfáltico (POMONI *et al.*, 2020). Por outro lado, com relação à microtextura, é possível que para as demais vias aqui estudadas, as ações mais frequentes de frenagem, aceleração e desaceleração e as conversões, por exemplo, tenham contribuído para o polimento dos agregados e a consequente diminuição da microtextura em menos tempo. Com relação aos 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, como resultado da remoção da película de ligante asfáltico que envolve os agregados e, portanto, os expõe ao polimento.

Figura 60 — Exemplos dos revestimentos analisados





(c) CA\_M2

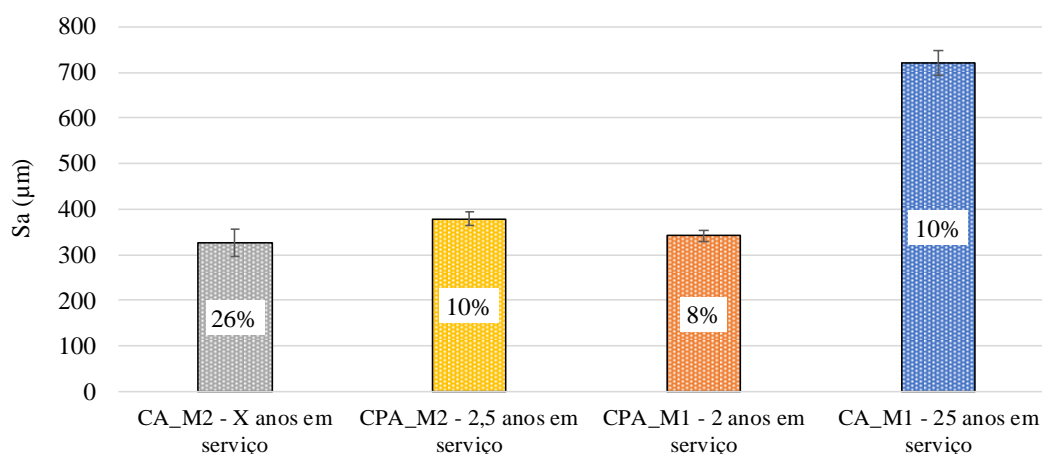
(d) CPA\_M2

Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.5.2.2 Close range photogrammetry (CRP)

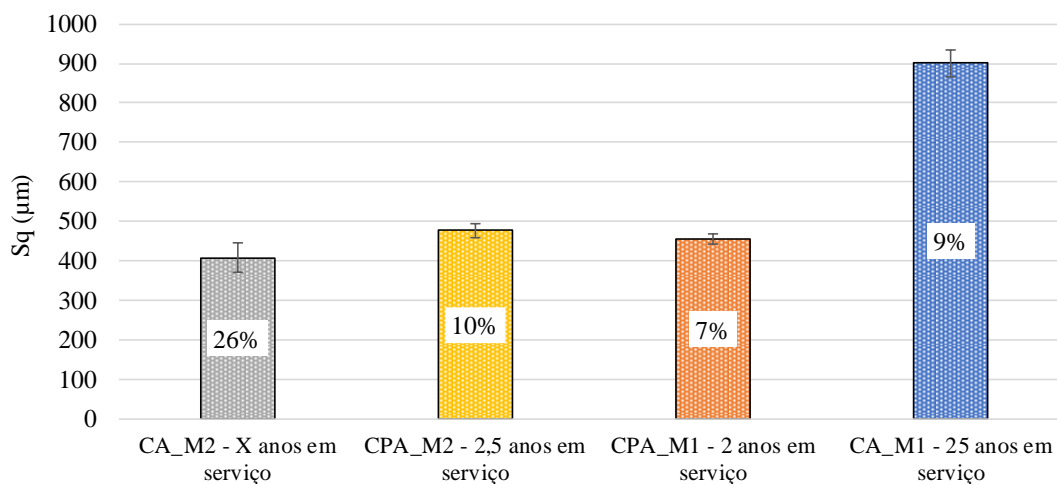
A partir dos modelos 3D obtidos pela técnica de CRP foram calculados alguns parâmetros de altura da ISO 25178-2 (2012), a saber:  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_{sk}$  e  $S_{ku}$ . Os resultados para os parâmetros  $S_a$  e  $S_q$  são mostrados nas Figuras 61 e 62, respectivamente. Observa-se que esses parâmetros apresentam a mesma tendência de diferença entre as vias, e que os CV 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 63 são mostrados exemplos de modelos 3D para cada um dos revestimentos analisados. Percebe-se uma maior densidade de pontos nos revestimentos em CPA, que têm menor tempo de execução, enquanto que para os demais, mais desgastados, a densidade de picos é menor.

Figura 61 — Parâmetro  $S_a$  obtido com o uso do *software* Gwyddion



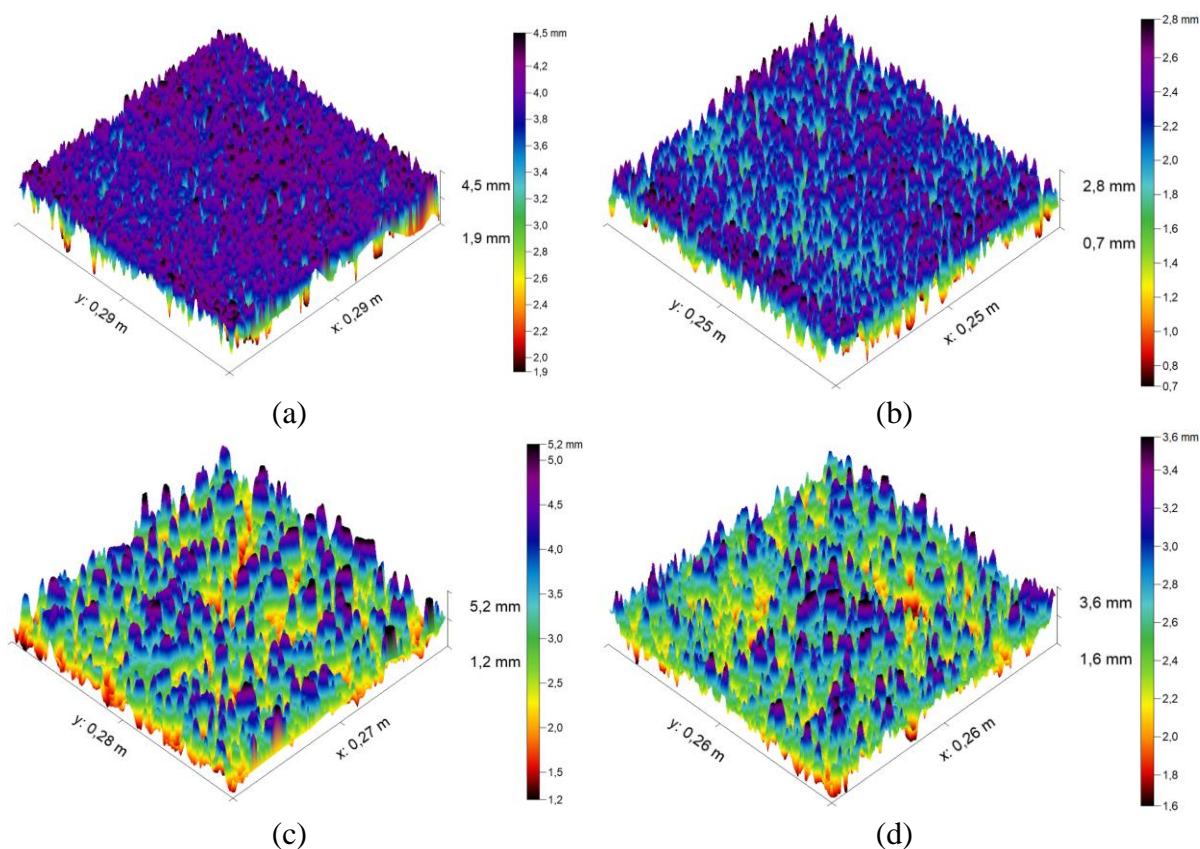
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 62 — Parâmetro  $S_q$  obtido com o uso do *software* Gwyddion



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 63 — Modelos 3D de pontos na (a) CPA\_M1, (b) CPA\_M2, (c) CA\_M1 e (d) CA\_M2

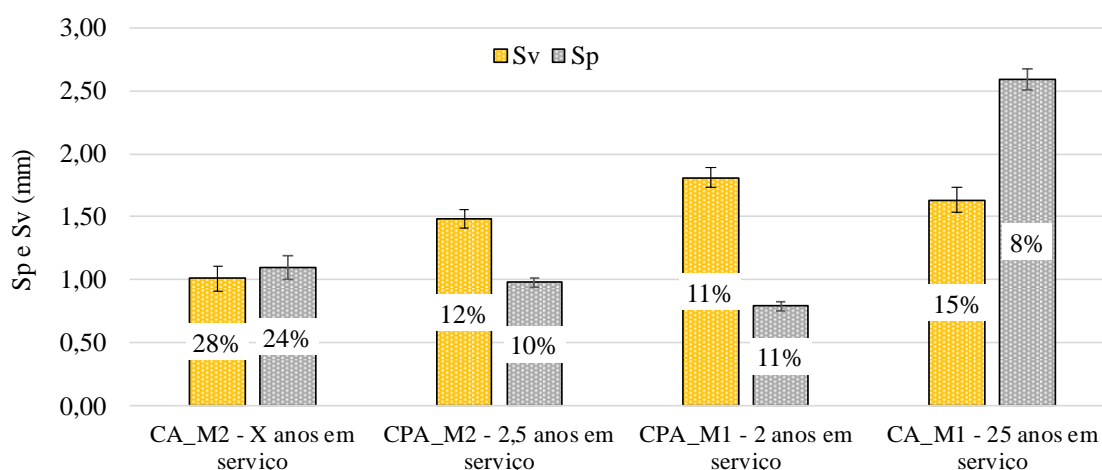


Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados dos parâmetros  $S_p$  e  $S_v$  são mostrados na Figura 64. Pela análise do parâmetro  $S_p$ , que representa o pico de maior altura na superfície, tem-se que a mistura CA\_M1 apresenta maior valor (2,6 mm), seguida do outro revestimento em CA, a CA\_M2 (1,10 mm),

ambos pavimentos de textura positiva. Para os demais revestimentos, em CPA, o valor de  $S_p$  foi maior para a CPA\_M2 (0,98 mm), de 2,5 anos em serviço. Esse parâmetro assumiu o valor de 0,79 mm para a CPA\_M1, com 2 anos de serviço. A análise desse parâmetro revela que, embora o tempo de execução dos revestimentos em CA seja da ordem de décadas, eles ainda mantêm picos mais altos em comparação à revestimentos de textura negativa, que é o caso dos demais revestimentos estudados. 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, sendo de 1,81 e 1,48 mm na CPA\_M1 e na CPA\_M2, respectivamente. Esse parâmetro assumiu os valores 1,63 e 1,01 mm para os revestimentos CA\_M1 e CA\_M2, respectivamente.

Figura 64 — Parâmetros  $S_p$  e  $S_v$  obtidos com o uso do *software* Gwyddion



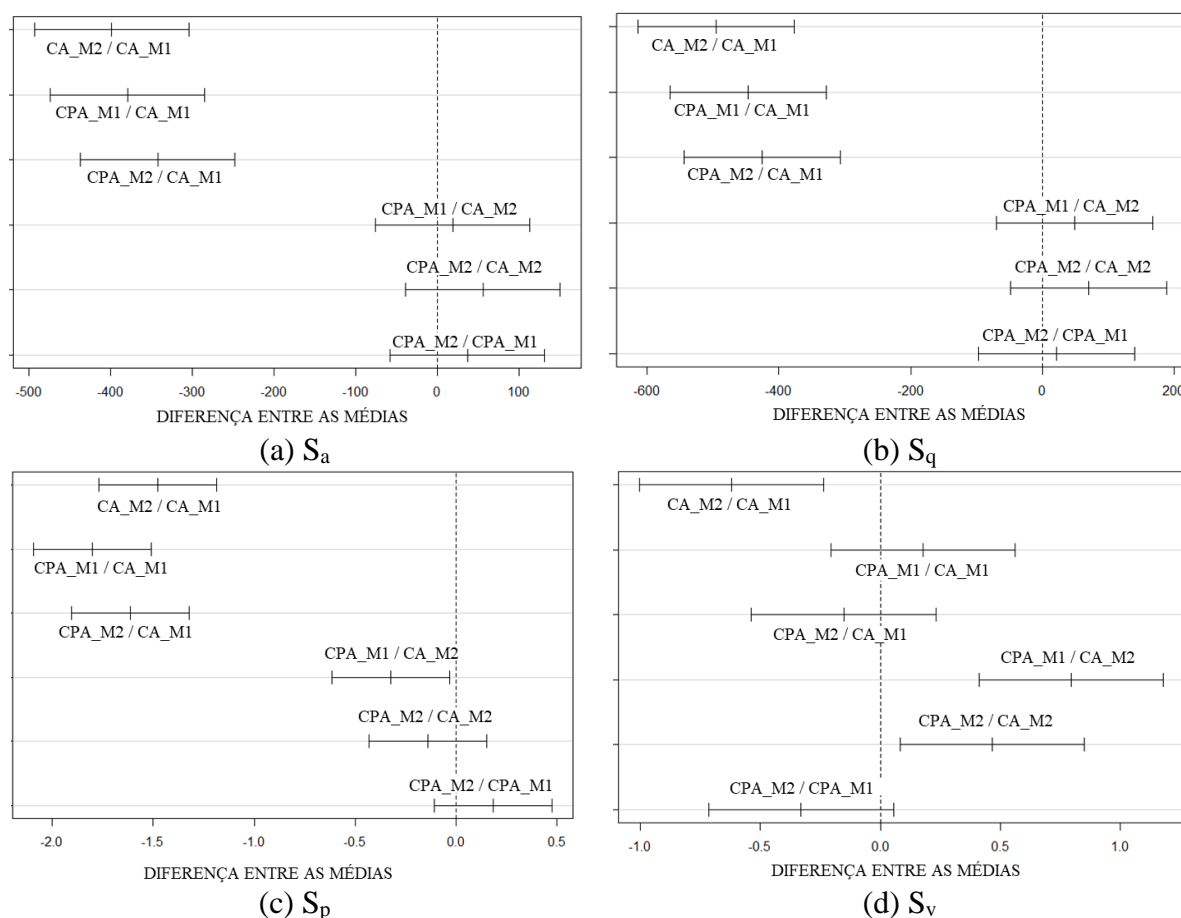
Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que o parâmetro  $S_v$  foi capaz de retratar a textura negativa característica de revestimentos em CPA, cujos agregados ficam dispostos de forma plana (com a maior dimensão alinhada com o plano do revestimento) na superfície. Devido a esse fato, percebe-se uma certa vantagem com relação à utilização de modelos 3D da superfície em comparação ao ensaio tradicional de classificação da macrotextura aqui realizado (mancha de areia), que, conforme comentado por Callai (2011), Knabben (2012) e Alves (2019), não são indicados para medir a textura superficial desse tipo de revestimento.

Para todos os parâmetros analisados, percebe-se que o revestimento CA\_M2 apresentou maior variabilidade de dados, pois este apresentou CV da ordem de 26%, ao passo que os demais revestimentos apresentaram CV semelhantes, em torno de 10%, na maioria dos casos. Como as diferenças nos valores assumidos pelos parâmetros, para alguns pares de via, foram pequenas (por exemplo, de 53  $\mu\text{m}$  para o parâmetro  $S_a$  entre CPA\_M2 e CA\_M2), foi

realizado o teste Tukey para verificar se essas diferenças são significativas, par a par. Na Figura 65 os resultados do teste Tukey para as variáveis  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$  e  $S_v$  são apresentados. É possível perceber que, para os parâmetros  $S_a$ ,  $S_q$  e  $S_p$ , houve diferenças significativas entre CA\_M1 e os demais revestimentos analisados. Para o parâmetro  $S_p$ , também houve diferenças significativas entre CPA\_M1 e CA\_M2. Para o parâmetro  $S_v$  houve diferenças significativas entre ambos os revestimentos em CPA e CA\_M2, bem como entre ambos os revestimentos em CA.

Figura 65 — Resultados do teste Tukey para os parâmetros (a)  $S_a$ , (b)  $S_q$ , (c)  $S_p$  e (d)  $S_v$



Fonte: Elaborado pela autora.

Os parâmetros relacionados à forma da curva de distribuição das alturas,  $S_{sk}$  e  $S_{ku}$ , também foram obtidos no Gwyddion e são mostrados nas Tabelas 49 e 50 (todos os pontos) e nas Figuras 66 e 67. 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. Esses parâmetros foram utilizados em Kuchiishi *et al.* (2014) para caracterizar a textura do revestimento e mostraram-se úteis na medida em que foram capazes

de enriquecer a análise com informações que não puderam ser obtidas em ensaios tradicionais, como mancha de areia e drenabilidade. Medeiros *et al.* (2016) também mostram exemplos da utilidade desse tipo de parâmetro, como a possibilidade de detecção de segregação de agregados na superfície do pavimento ou a caracterização do nível de aleatoriedade com que os agregados estão orientados nessa superfície.

O parâmetro  $S_{ku}$  revela que, em três (CPA\_M2, CA\_M1 e CA\_M2) dos quatro revestimentos estudados, as alturas estão mais 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 49 — 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
	D.P.	0,230	0,783		D.P.	0,157	0,386
	C.V. (%)	-18,3	15,3		C.V. (%)	-28,7	12,2

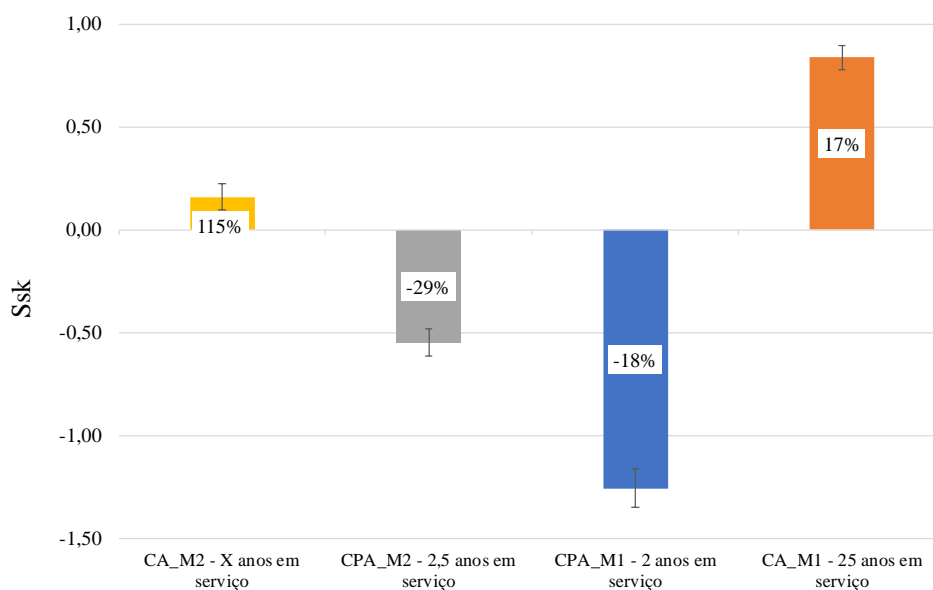
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 50 — Parâmetros  $S_{sk}$  e  $S_{ku}$  para os revestimentos em CA

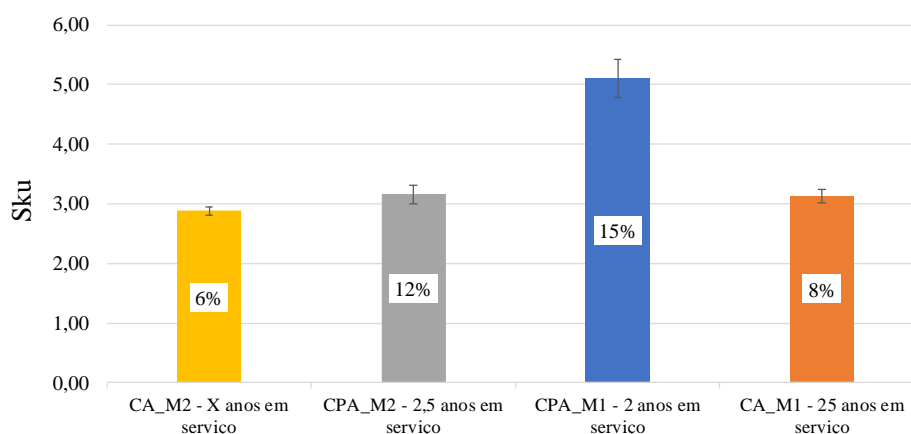
Revestimento							
CA_M1				CA_M2			
Ponto	Posição	$S_{sk}$	$S_{ku}$	Ponto	Posição	$S_{sk}$	$S_{ku}$
-	-	-	-	01	F.D. / L.D.	0,589	3,210
-	-	-	-	02	F.D. / L.E.	0,087	2,765
02	F.D. / L.E.	0,727	2,784	03	F.D. / L.D.	0,060	2,582
03	F.D. / L.D.	0,985	3,390	04	F.D. / L.E.	0,083	2,858
04	F.D. / L.E.	0,953	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
	D.P.	0,143	0,263		D.P.	0,184	0,184
	C.V. (%)	17,1	8,4		C.V. (%)	115	6,4

Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 66 — Valores médios do parâmetro  $S_{sk}$ 

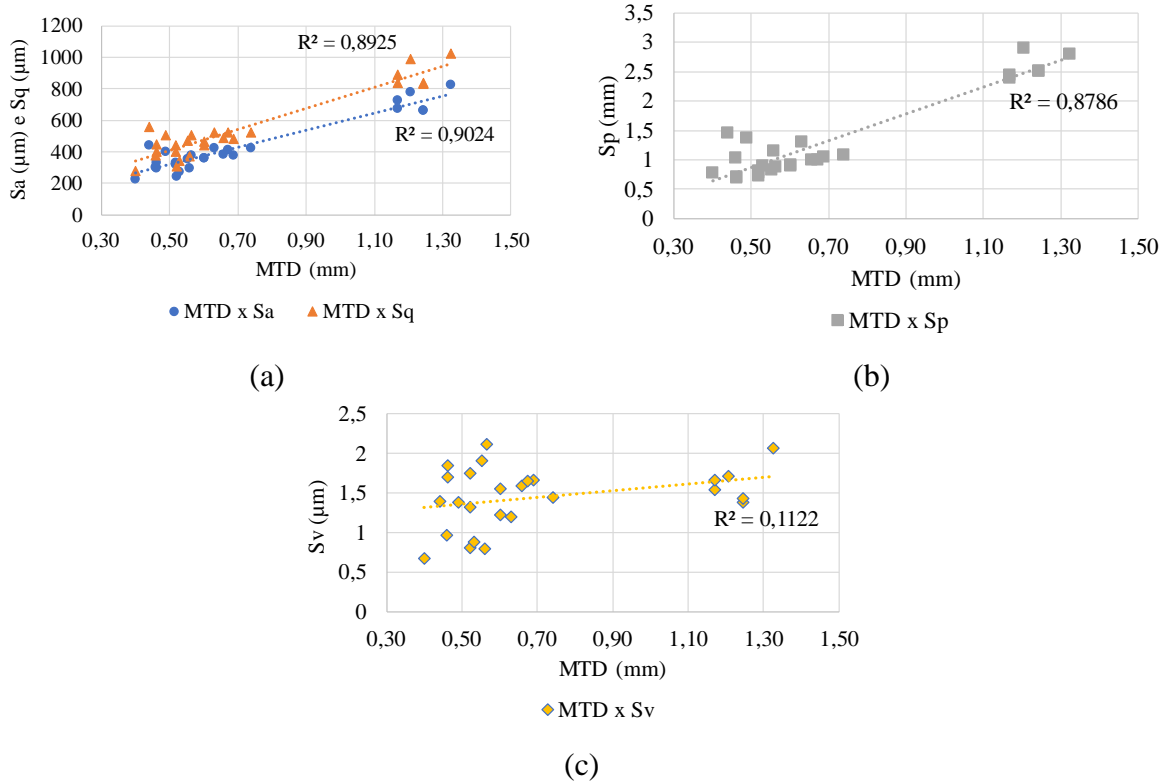
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 67 — Valores médios do parâmetro  $S_{ku}$ 

Fonte: Elaborado pela autora.

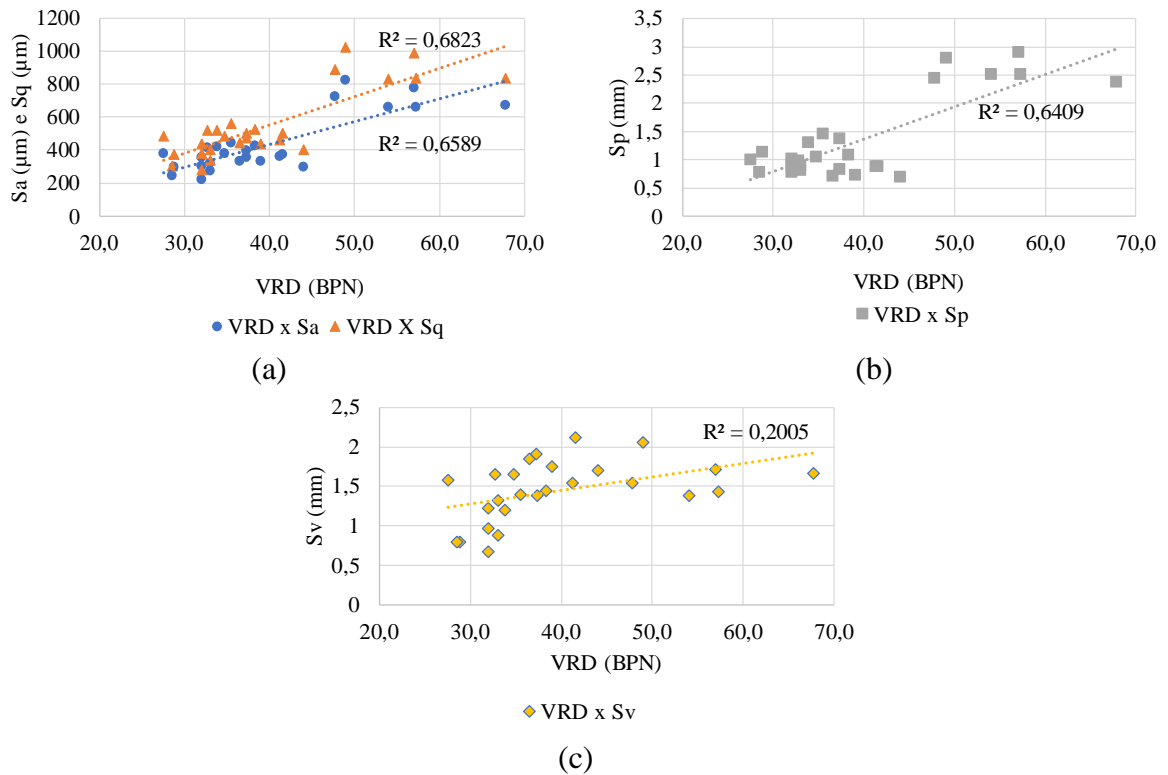
Foi verificada a possível correlação entre os resultados dos parâmetros obtidos pela modelagem 3D com aqueles obtidos com os ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico. Para essa análise, todos os pontos onde foi feita a modelagem 3D foram considerados. Os resultados são mostrados nas Figuras 68 e 69, respectivamente. De forma geral, percebe-se que houve maiores correlações entre os parâmetros  $S_a$ ,  $S_q$  e  $S_p$  da modelagem 3D e a altura da mancha de areia ( $R^2$  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 MTD e VRD, respectivamente.

Figura 68 — Correlação entre os parâmetros (a)  $S_a$  e  $S_q$ , (b)  $S_p$  e (c)  $S_v$  e MTD



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 69 — Correlação entre os parâmetros (a)  $S_a$  e  $S_q$ , (b)  $S_p$  e (c)  $S_v$  e VRD

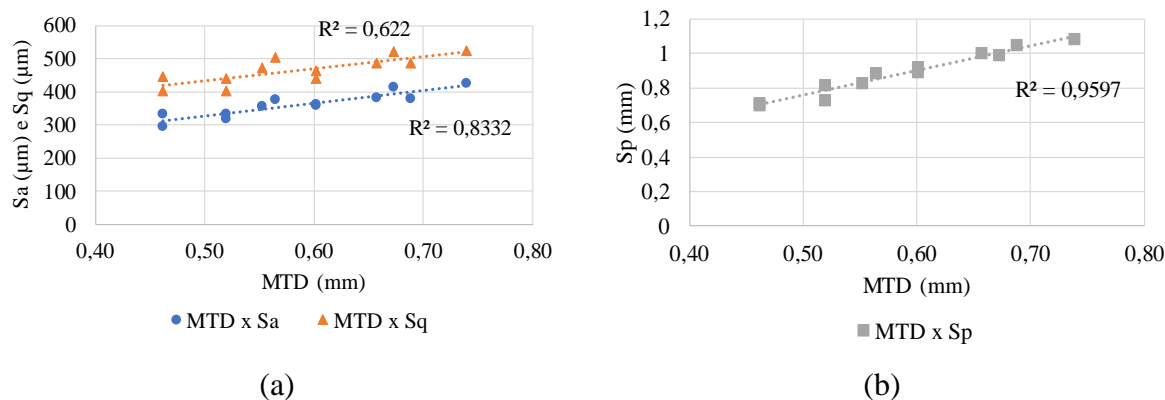


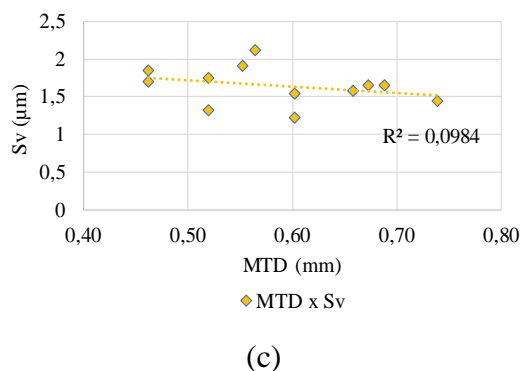
Fonte: Elaborado pela autora.

Além das correlações obtidas considerando-se conjuntamente todos os revestimentos aqui estudados, também foram feitas análises considerando-se os revestimentos em CPA e em CA separadamente. Esses resultados são mostrados nas Figuras 70 a 73. Para os revestimentos em CPA, o parâmetro que mostrou melhor correlação com o MTD foi o Sp ( $R^2 = 0,96$ ). Os parâmetros Sa e Sq, que na análise conjunta de todos os revestimentos tinham apresentado  $R^2$  da ordem de 0,90, nesse caso apresentou  $R^2$  de 0,83 e 0,62, respectivamente. Esses resultados são semelhantes àqueles obtidos por Millar (2013), que avaliou a correlação entre o MTD e uma espécie de MTD calculado a partir dos modelos 3D, e obteve  $R^2 = 0,76$  da análise de revestimentos apenas em SMA, e  $R^2 = 0,91 - 0,94$  para a análise de conjunto de dados mais abrangentes (diversos tipos de misturas asfálticas e diferentes condições do revestimento). De fato, a inclusão de uma maior gama de tipos de revestimentos, que contribui para a consideração de um maior espectro de texturas, melhora a adequabilidade da utilização de parâmetros dos modelos 3D para a previsão de resultados de MTD, caso se deseje. No entanto, sabe-se que aquele possui vantagens em comparação ao que se refere à quantidade de informação que é possível se extrair das análises.

A correlação entre o parâmetro  $S_v$  com MTD e VRD foi muito fraca ao se considerar apenas os revestimentos em CPA ( $R^2 = 0,10$  e  $0,21$ , respectivamente). Esse resultado era esperado, visto que esse parâmetro retrata os vales da superfície, que por serem predominantes em revestimentos de textura negativa - que é o caso da CPA, e pode ser comprovado pelos resultados dos parâmetros  $S_{sk}$  e  $S_{ku}$  já discutidos - favorecem a penetração da areia padronizada utilizada para obter o MTD. Conseqüentemente, esse último é inadequado para a caracterização de revestimentos abertos (KNABBEN, 2012; ALVES, 2019). Pelo fato de o VRD estar relacionado à textura ao nível dos agregados expostos na superfície, enquanto o  $S_v$  está associado à profundidade dos vales, é esperado que a correlação entre eles também seja fraca.

Figura 70 — Correlação entre os parâmetros (a) Sa e Sq, (b) Sp e (c) Sv e MTD para os revestimentos em CPA

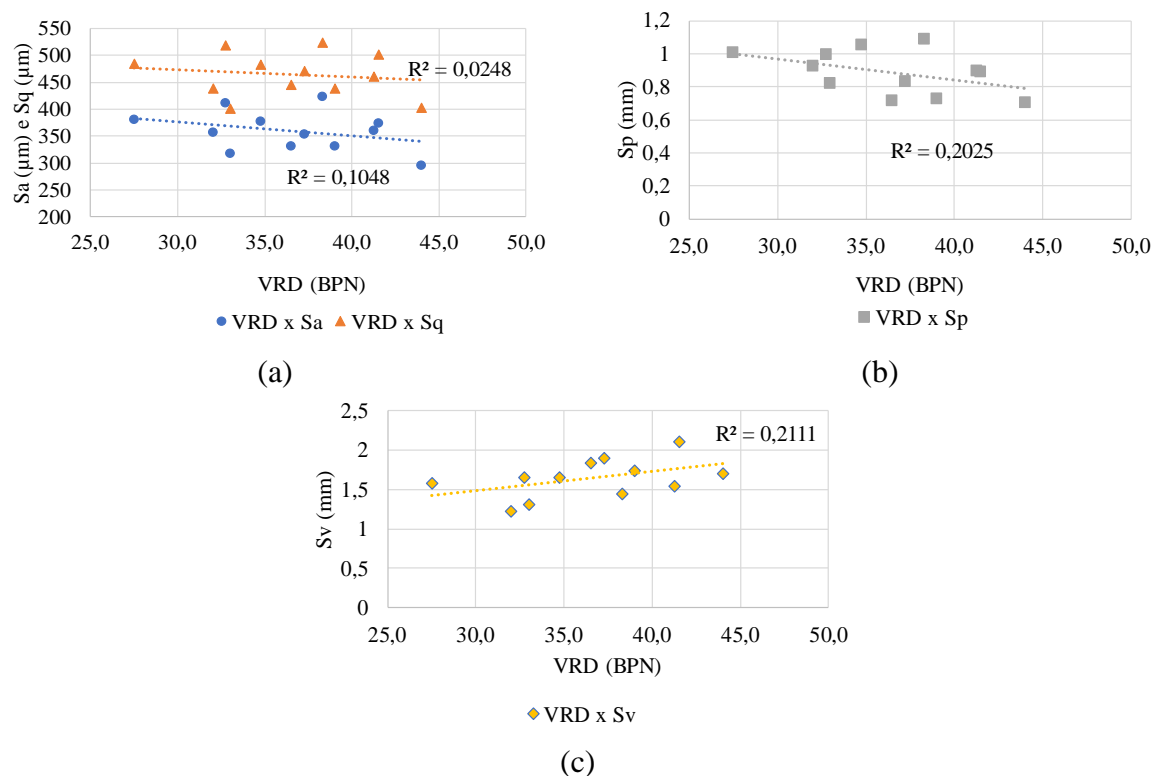




Fonte: Elaborado pela autora.

Além de  $S_v$ , os parâmetros  $S_a$ ,  $S_q$  e  $S_p$  possuem fraca correlação com o VRD quando se considera os revestimentos apenas em CPA. Novamente, acredita-se que um dos fatores que contribuem para isso é o fato da faixa de microtextura ter sido estreita (variação de 16,5 BPN entre os pontos que apresentaram maior e menor microtextura).

Figura 71 — Correlação entre os parâmetros (a)  $S_a$  e  $S_q$ , (b)  $S_p$  e (c)  $S_v$  e VRD para os revestimentos em CPA

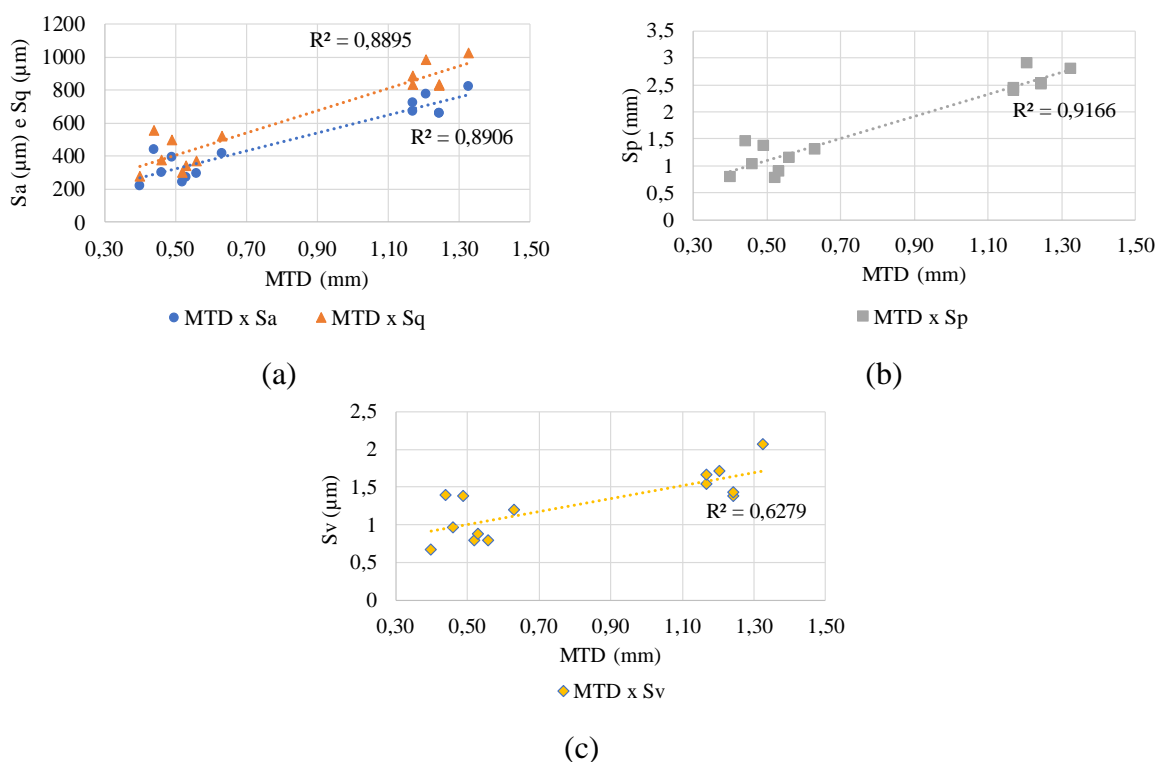


Fonte: Elaborado pela autora.

A análise da correlação entre os parâmetros 3D e MTD considerando-se apenas os pontos dos revestimentos em CA revelou resultados semelhantes àqueles da consideração dos

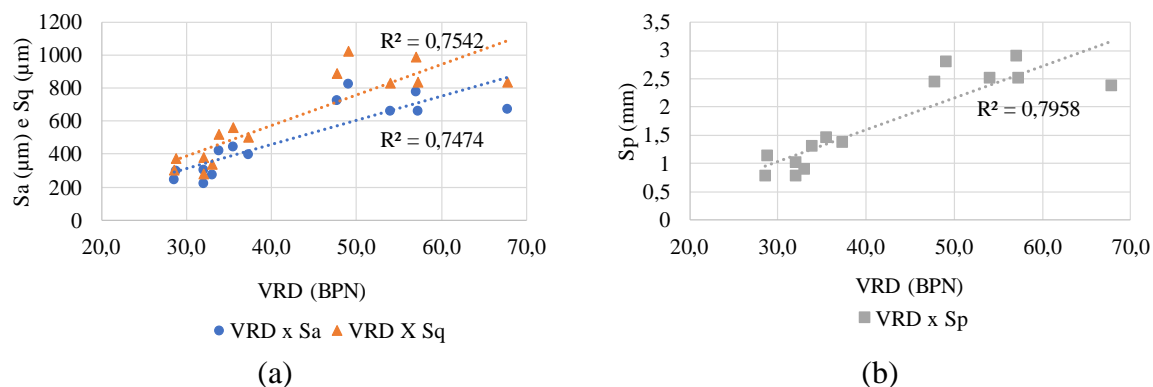
revestimentos conjuntamente ( $R^2$  em torno de 0,90), exceto para o parâmetro Sv, que nesse caso foi bem melhor ( $R^2 = 0,63$ ) do que na análise conjunta. As correlações com o VRD também aumentaram após a exclusão dos pontos em CPA da análise, e  $R^2$  ficou em torno de 0,75 para Sa e Sq, 0,80 para Sp. Para Sv, o aumento na correlação foi substancial em relação à análise conjunta, com  $R^2 = 0,59$  enquanto assumiu o valor de 0,11 no outro caso.

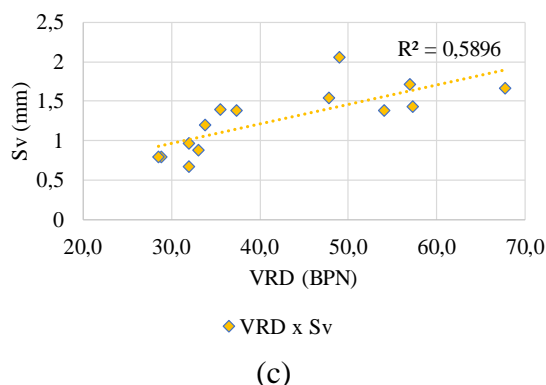
Figura 72 — Correlação entre os parâmetros (a) Sa e Sq, (b) Sp e (c) Sv e MTD para os revestimentos em CA



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 73 — Correlação entre os parâmetros (a) Sa e Sq, (b) Sp e (c) Sv e VRD para os revestimentos em CA





Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.5.3 Drenabilidade

Esse ensaio foi realizado em apenas três dos quatro trechos considerados no presente estudo, pois no trecho da Av. Senador Carlos Jereissati (CA\_M1) ao se liberar o plugue do drenômetro, a água escoou muito rápido, o que dificultou a cronometragem do tempo de escoamento. Outra dificuldade constatada nesse trecho foi a de vedação da base do drenômetro com o plugue devido à irregularidade da superfície, cuja macrotextura foi classificada na seção 4.5.2.1 como aberta. Conforme já discutido em outras seções deste capítulo, esse revestimento é o que está mais desgastado dentre aqueles analisados, o que causa a exposição dos agregados de forma protuberante na superfície. Com isso, a água é drenada instantaneamente no ensaio. Exemplos de pontos em cada uma dessas superfícies foram mostrados na Figura 60.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 51. Para os revestimentos CA\_M1 e CPA\_M2 as vazões obtidas foram próximas, de 0,102 l/s e 0,105 l/s, respectivamente. Já para CPA\_M1, a vazão foi de 0,076 l/s, portanto, mais baixa que as demais. Durante a realização desses ensaios foi percebido que a forma como a água flui nos revestimentos em CA é diferente do que acontece naqueles em CPA. Como já discutido, em revestimentos do tipo CPA, de textura negativa, os agregados da superfície ficam dispostos de forma plana, ou seja, com sua maior dimensão paralela à superfície do revestimento. Por outro lado, nos revestimentos em CA, de textura positiva, as protuberâncias ficam acima da superfície. Assim, nesses últimos, uma vez que é liberado o plugue do drenômetro, a água escoou pela macrotextura da superfície, ao passo que em revestimento do tipo CPA, a água entra pelos vazios da superfície e escoou pelos poros internos da camada. Pelas razões discutidas, foi constatado que o ensaio com o drenômetro, pelo menos na condição não saturada da superfície, não é adequado para a avaliação da drenabilidade dos revestimentos em CPA em relação aos CAs convencionais.

Tabela 51 — Resultados do ensaio de drenabilidade

<b>Revestimento</b>	<b>Vazão (l/s)</b>
CPA_M1	0,076
CPA_M2	0,105
CA_M1	0,102
CA_M2	-

Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.6 Conclusões e sugestões

A avaliação acústica dos revestimentos em campo foi realizada com a utilização do método CPB para duas condições de entorno das vias, que foram: entornos que obedecem razoavelmente às exigências da NF S31-119-2 (2000) (distância entre veículo e MNPS, ausência de construções, etc.); e entornos de avenidas com configuração espacial típica do meio urbano de grandes cidades brasileiras (ambientes adensados, com presença de fachadas de edificações, dentre outros obstáculos que impactam na propagação do som). Foram escolhidos dois pares de vias, um para cada uma dessas condições, compostos por vias com revestimentos em CPA e em CA, que foi considerado o revestimento de referência. As características da superfície dessas vias também foram avaliadas quanto à micro e macrotextura e à drenabilidade. Os ensaios tradicionais de pêndulo britânico, mancha de areia e de medição de vazão foram realizados. Além disso, a modelagem 3D da superfície por meio da técnica de CRP também foi utilizada para a caracterização da micro e da macrotextura.

Na análise do ruído pneu-pavimento, para o par de via com condições de entorno mais restritas,  $V_{ref}$  foi de 65 km/h, pois esta corresponde ao valor central dentre as velocidades ensaiadas (50, 60, 70 e 80 km/h). Os valores de  $L_{ref}$  para esse cenário foi de 74,71 dB (A) e 80,33 dB (A) para os revestimentos em CPA e CA, respectivamente. O primeiro é referente a uma CPA de 2 anos de idade enquanto o segundo é um CA de mais de 25 anos de execução. Para o par de vias com entorno adensado,  $V_{ref}$  foi de 50 km/h (valor central das velocidades ensaiadas, que foram de 40, 50 e 60 km/h), e 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 pneu-pavimento de até 5,6 dB (A).

Os ensaios de superfície mostraram que apenas um dos revestimentos (CA\_M1) considerados nesse estudo apresentou macro e microtexturas que atendem às recomendações ( $0,6 \text{ mm} < H_s < 1,2 \text{ mm}$  e  $VRD \geq 55$ ) encontradas em DNIT (2006b). É importante ressaltar que existem diferentes recomendações do DNIT quanto aos valores que os parâmetros de micro

e macrotextura devem assumir. Por exemplo, a instrução de serviço que trata de procedimentos para recebimento de obras de pavimentos novos e restaurados, IS N° 22/2019 (DNIT, 2019), estabelece como padrão um  $VRD \geq 45$ . A micro e a macrotextura desse revestimento foi classificada como medianamente rugosa e aberta, respectivamente. Os demais revestimentos estudados (CPA\_M1, CPA\_M2 e CA\_M2) receberam iguais classificações para micro e a macrotextura, que foi de lisa e média, respectivamente. A análise do IFI para diferentes velocidades mostrou que, para as CPAs avaliadas no presente estudo, o IFI é mais suscetível à variação de velocidade, se comparado a resultados para CPA encontrados na literatura para análise semelhante (Costa, Castelo Branco e Freitas, 2017). As CPA avaliadas no presente estudo forneceram valores de IFI semelhantes àqueles obtidos por Costa, Castelo Branco e Freitas (2017) para baixas velocidades (da ordem de 0,5 à 10 km/h), porém aproximadamente 50% inferiores à velocidade de 60 km/h.

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, utilizando-se 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 0,90 e 0,70, respectivamente). Ainda não se pode afirmar que a técnica de CRP é capaz de substituir os ensaios convencionais de textura. No entanto, a quantidade de informações que a técnica fornece, a praticidade e o baixo custo do ensaio são vantagens atrativas para a utilização desse método. Por fim, foi concluído que o ensaio com o drenômetro sem a saturação da superfície, para revestimentos do tipo CPA, não foi adequado para a avaliação da drenabilidade dos revestimentos em CPA em relação aos CAs convencionais. Recomenda-se a realização desse ensaio com a saturação da superfície, conforme recomendado por Doty (1975). Além disso, recomenda-se investigação de possíveis correlações entre ensaios tradicionais de drenabilidade e parâmetros obtidos por meio da modelagem 3D.

Para trabalhos futuros, quanto à avaliação do ruído pneu-pavimento em vias do meio urbano, recomenda-se a avaliação de mais revestimentos, tanto de outros tipos quanto dos mesmos tipos aqui estudados, porém, com diferentes macrotexturas. A consideração de um número maior de revestimentos, sobretudo em entornos semelhantes aos aqui estudados, é 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.



Apesar dos resultados animadores obtidos na presente pesquisa quanto à redução do ruído pneu-pavimento proporcionada pela utilização de CPA, é importante destacar a influência de outros fatores no ruído global das vias. Conforme já discutido no presente trabalho, são várias as fontes de ruído decorrentes da operação de veículos. Além dos ruídos do tráfego em si, a realização de atividades e os diferentes usos do solo, sobretudo em centros urbanos, contribuem para o aumento do ruído global. Dessa forma, tanto a investigação da contribuição do revestimento na atenuação do ruído global da via quanto a avaliação de outras formas de mitigação do ruído são importantes dentro dessa perspectiva.

No que se refere à avaliação das condições de superfície de revestimentos do tipo CPA em vias urbanas, é importante que seja realizado o monitoramento, desde a execução, de um trecho onde esse tipo de revestimento seja utilizado. A realização de ensaios de caracterização de textura, e até mesmo acústicos, digamos, semestralmente, pode fornecer subsídios para a compreensão acerca da duração dos benefícios funcionais que a CPA pode oferecer em vias do meio urbano. Destaca-se a importância de avaliar também a colmatção da CPA ao longo do tempo, sobretudo nos meios urbanos, onde diversas fontes de detritos (poluição atmosférica, borracha dos pneus, derramamento de óleos) estão fortemente presentes. O efeito da sazonalidade das chuvas sobre a colmatção também pode ser investigado. Outro aspecto importante a ser avaliado é o possível acúmulo de detritos no encaixe de revestimentos desse tipo no meio-fio.

Para uma análise mais criteriosa quanto aos parâmetros de superfície, sejam eles obtidos por meio de ensaios tradicionais ou pela modelagem 3D, 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) ( $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $S_{pd}$ , dentre outros), por meio de *softwares* que os calculem, também é encorajada.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DA DISSERTAÇÃO (CAPÍTULO 5)

### 5.1 Principais conclusões

A presente dissertação foi desenvolvida a partir da elaboração de três artigos científicos, correspondentes aos Capítulos 2, 3 e 4, cujos objetivos foram, respectivamente, os seguintes: avaliação de misturas asfálticas do tipo camada porosa de atrito recicladas; análise estrutural de misturas asfálticas do tipo CPA utilizadas como revestimentos de vias urbanas; e análise do desempenho acústico e das características de superfície de camada porosa de atrito em meio urbano. O trabalho foi organizado dessa forma no intuito de fornecer uma avaliação holística sobre a utilização de CPA em vias do meio urbano, que é uma solução de pavimentação que está sendo utilizada na cidade onde foi desenvolvido esse trabalho (Fortaleza-CE). Assim, estudos do material em laboratório, em campo e em programa de análise estrutural do pavimento foram realizados.

No Capítulo 2 foi observado que algumas misturas asfálticas do tipo CPA, tanto as avaliadas no presente estudo quanto aquelas encontradas na literatura, virgens ou recicladas, não atingiram o limite mínimo de 0,55 MPa para a RT. Observaram-se, também, maiores valores de RT ( $> 0,55$  MPa) para as misturas asfálticas oriundas da usinagem e compactadas em laboratório, em relação àquelas misturadas e compactadas em laboratório. Com isso, levantou-se a hipótese de que o processo de mistura em usina seja mais eficiente e garanta o atendimento ao valor mínimo de RT estabelecido pela norma brasileira para CPA (DNER, 1999). O resultado do ensaio de desgaste Cântabro, para a mistura reciclada, foi o maior (22,5%, em média) dentre as misturas asfálticas analisadas, o que mostra perda nessa propriedade provavelmente devido à mistura entre o AMP e o ligante asfáltico envelhecido oriundo do fresado. As misturas asfálticas virgens avaliadas quanto à porcentagem de  $V_c$ , enquadradas na faixa II de CPA (DNER, 1999), forneceram valores em torno de 3 e 4% para esse parâmetro, que está abaixo do valor mínimo (10%) estabelecido pela norma francesa que rege o ensaio. Também está abaixo de valores encontrados na literatura para CPAs de outras faixas granulométricas.

No Capítulo 3, foi concluído que a presença de uma camada de CPA no topo do revestimento implica em ganho de vida útil para o pavimento. Dessa forma, a contribuição estrutural de revestimento do tipo CPA não deveria ser negligenciada no processo de dimensionamento de pavimentos. A análise estrutural realizada nesse capítulo mostrou que a utilização de uma camada de CPA faixa II no topo do revestimento, como é feito em Fortaleza,

implicou em diminuições de  $\varepsilon_t$  tração na fibra inferior da camada asfáltica subjacente à CPA e de  $\varepsilon_z$  no topo do subleito em até 26 e 22%, respectivamente.

No Capítulo 4, a análise do ruído pneu-pavimento, para o par de vias com maiores restrições de entorno, resultou em valores de  $L_{ref}$  de 74,71 dB (A) e 80,33 dB (A) para os revestimentos em CPA e CA, respectivamente. O primeiro valor é referente a uma CPA de 2 anos de idade enquanto o segundo é um CA de mais de 25 anos de execução. 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 pneu-pavimento de até 5,6 dB (A).

Os ensaios de superfície, também realizados no Capítulo 4, mostraram que apenas um dos revestimentos (CA\_M1) considerado nesse estudo apresentou macro e microtexturas que atendem às recomendações ( $0,6 \text{ mm} < H_s < 1,2 \text{ mm}$  e  $VRD \geq 55$ ) encontradas em DNIT (2006b). A micro e a macrotextura desse revestimento foi classificada como medianamente rugosa e aberta, respectivamente. Os demais revestimentos estudados (CPA\_M1, CPA\_M2 e CA\_M2) receberam iguais classificações para micro e a macrotextura, que foi de lisa e média, respectivamente. A análise do IFI para diferentes velocidades mostrou que, para as CPAs avaliadas no presente estudo, o IFI é mais suscetível à variação de velocidade, se comparado a resultados para CPA encontrados na literatura para análise semelhante (Costa, Castelo Branco e Freitas, 2017). As CPAs avaliadas no presente estudo forneceram valores de IFI semelhantes àqueles obtidos por Costa, Castelo Branco e Freitas (2017) para baixas velocidades (da ordem de 0,5 à 10 km/h), porém aproximadamente 50% inferiores à velocidade de 60 km/h.

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). Por fim, foi concluído que ensaio com o drenômetro sem a saturação da superfície, para revestimentos do tipo CPA, não foi adequado para a avaliação da drenabilidade dos revestimentos em CPA em relação aos CAs convencionais.

## 5.2 Principais recomendações

No Capítulo 2, foi recomendada a aplicação de maior energia de compactação Marshall (75 golpes) em laboratório, a fim de verificar se há melhorias na resistência mecânica da mistura asfáltica reciclada sem prejudicar sua volumetria. Também foi recomendada a utilização maior amostragem, para o estudo de CPA em laboratório, do que a utilizada no presente estudo. Como quantidade de partida foi sugerida a fabricação de 5 CPs para cada um dos ensaios (Vv, RT, MR, Cântabro), além da fabricação de 3 CPs para a verificação do RT que será utilizada como entrada no ensaio de MR. A avaliação da incorporação de fresado em outras faixas granulométricas de CPA, sobretudo aquelas nas quais já tenha sido constatado altas porcentagem de  $V_c$ , também foi encorajada. Por fim, a fim de viabilizar a utilização de fresado em CPA é sugerida a investigação do uso de outros AMPs (de maiores recuperações elásticas, como o 60/85 e o 65/90), de asfalto-borracha, bem como de agentes rejuvenescedores.

No capítulo 3 foi sugerida a utilização de outros programas para a realização da análise estrutural, como o programa CAP3D, que atualmente utiliza dados do ensaio de módulo dinâmico para a realização das análises. Encorajou-se a realização de procedimentos de testagem e calibração de funções de transferência para misturas asfálticas do tipo CPA, com o intuito de viabilizar a inclusão de revestimentos desse tipo no catálogo do MeDiNa. Por fim, foi recomendada a consideração de cenários com diferentes níveis de tráfego na análise estrutural.

No Capítulo 4, quanto à avaliação do ruído pneu-pavimento em vias do meio urbano, foi recomendada a avaliação de mais revestimentos, de diferentes tipos e macrotexturas. Recomendou-se também a realização de avaliações do impacto do tipo de revestimento no ruído global da via. Recomendou-se o monitoramento, desde a execução, de trechos onde revestimento em CPA seja utilizado. Esse monitoramento pode contemplar aspectos como textura, desempenho acústico e também a colmatação da CPA ao longo do tempo. A obtenção de outros parâmetros da ISO 25178-2 (2012) ( $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $S_{pd}$ , dentre outros), por meio de *softwares* que os calculem, também foi encorajada. Quanto à drenabilidade, recomendou-se a realização do ensaio de drenabilidade com saturação da superfície, conforme recomendado por Doty (1975).

## REFERÊNCIAS

- ABED, A.; THOM, N.; LO PRESTI, D. (2018) **Design Considerations of High RAP-Content Asphalt Produced at Reduced Temperatures**. *Materials and Structures*, v. 51, n. 91. DOI: 10.1617/s11527-018-1220-1.
- ALBUQUERQUE, F. S.; M. F. F. CABRAL; O. FREITAS NETO; D. N. OLIVEIRA; L. M. S. RODRIGUES; A. K. C. VIEIRA; G. M. COSTA; T. M. A. ALBUQUERQUE (2013) **Efeito da Velocidade e do Tráfego no Ruído Gerado na Interface Pneu-Pavimento**. Anais do XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Belém-PA, Brasil.
- AL-QADI, I.L.; ELSEIFI, M.; CARPENTER, S.H. (2007) **Reclaimed Asphalt Pavement – A Literature Review**. Springfield: Illinois Center for Transportation, Report Number FHWA-ICT-07-001.
- ALVAREZ, A. E.; MARTIN, A. E.; ESTAKHRI, C. (2010) **Drainability of Permeable Friction Course Mixtures**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 22, n. 6, p. 556–564. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000053.
- ALVAREZ, A. E.; MARTIN, A. E.; ESTAKHRI, C. (2011) **A Review of Mix Design and Evaluation Research for Permeable Friction Course Mixtures**. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 3, p. 1159-1166. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.038.
- ALVES, A. (2019) **Comportamento Mecânico, Funcional e Ambiental de Misturas Asfálticas Porosas**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, Brasil.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO T 209: **Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (G<sub>mm</sub>) and Density of Asphalt Mixtures**, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D 7064-04: **Standard Practice for Open-graded Friction Course (OGFC) Mix Design**. West Conshohocken, PA, 2006.
- \_\_\_\_\_ E303-93: **Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**. West Conshohocken, PA, 2018.
- \_\_\_\_\_ E2380/E2380M-15: **Standard Test Method for Measuring Pavement Texture Drainage Using an Outflow Meter**. West Conshohocken, PA, 2019.
- \_\_\_\_\_ E965-15: **Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. West Conshohocken, PA, 2019.
- APS, MARCIA (2006) **Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – *International Friction Index* para Revestimentos Asfálticos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, Brasil.

ARÁMBULA-MERCADO, E.; CARO, S.; TORRES, C. A. R.; KARKI, P.; SÁNCHEZ-SILVA, M.; PARK, E. S. (2019) **Evaluation of FC-5 with PG 76-22 HP to Reduce Raveling** (BE287: Final Report). Texas A&M Transportation Institute. Texas, Estados Unidos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 9079: **Veículo Automotor – Determinação do Ruído Interno**. Rio de Janeiro, RJ, 1985.

\_\_\_\_\_. NBR 10151: **Acústica - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas, Visando o Conforto da Comunidade - Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

\_\_\_\_\_. NBR 16504: **Misturas Asfálticas - Determinação da Profundidade Média da Macrot textura Superficial de Pavimentos Asfálticos por Volumetria - Método da Mancha de Areia**. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 16780: **Sinalização Horizontal Viária - Medição da Resistência à Derrapagem de uma Superfície Utilizando o Pêndulo Britânico**. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) NF-P98-254-2: **Essais Relatifs aux Chaussés – Mesure de Propriétés Liées à la Permeabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2 : Détermination du Pourcentage de Vides Communicantes des Matériaux Liés**. 1993.

\_\_\_\_\_. NF S31-119-2: **Acoustique – Caractérisation in Situ des Qualités Acoustiques des Revêtements de Chaussés – Mesurages Acoustiques au Passage – Partie 2: Procédure Véhicule Maîtrisé**. Paris, 2000.

BABISCH, W. (2006) **Transportation Noise and Cardiovascular Risk, Review and Synthesis of Epidemiological Studies, Dose-Effect Curve and Risk Estimation**. WaBoLu-Hefte, 116 p. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2997.pdf>>. Acesso em: Março/2021.

BALBO, J. T. (2007) **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração**. Oficina de Textos, São Paulo.

BARCO CARRIÓN, A. J.; LO PRESTI, D.; AIREY, G. D. (2015) **Binder Design of High RAP Content Hot and Warm Asphalt Mixture Wearing Courses**. Road Materials and Pavement Design, v. 16, n. S1, p. 460-474. DOI: 10.1080/14680629.2015.1029707.

BASTOS, J. B. S. (2016) **Considerações sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

BENDTSEN, H.; ANDERSEN, B. (2005) **Noise-Reducing Pavements for Highways and Urban Roads - State of the Art in Denmark**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 74, pp. 1085-1106.

BERGLUND, B.; T. LINDVALL; D. H. SCHWELA (1999) **Guidelines for Community Noise**. WHO-expert task force meeting. Londres, Reino Unido.

- BERNHARD, R.; WAYSON, R. L.; HADDOCK, J.; NEITHALATH, N.; EL-AASSAR, A.; OLEK, J.; PELLINEN, T.; WEISS, W. J. (2004) **An Introduction to Tire/Pavement Noise of Asphalt Pavement**. Asphalt Pavement Alliance. Lanham, MD, Estados Unidos. 27 p. Disponível em: <<https://www.vaasphalt.org/wp-content/uploads/2012/07/anintroductiontotire-pavementnoiseofasphalt pavement.pdf>> Acesso em Fevereiro/2021.
- BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; SOARES, J.B.; CERATTI, J.P. (2010) **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras-ABEDA, Rio de Janeiro-RJ.
- BOLZAN, P. E.; NICHOLLS, J. C.; HUBER, G. A. (2001) **Searching for Superior Performing Porous Asphalt Wearing Courses**. Rep.No.Synthesis 852, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- BOVING, T.B.; STOLT, M.H.; AUGENSTERN, J.; BROSNAN, B. (2008) **Potential for Localized Groundwater Contamination in a Porous Pavement Parking Lot Setting in Rhode Island**. Journal of Environmental Geology, v. 55, n. 3, pp. 571-582. DOI: 10.1007/s00254-007-1008-z.
- BRAGA, C. K. V. (2016) **Qualidade da Classificação Veicular por Laços Indutivos do Sistema de Fiscalização Eletrônica de Fortaleza**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- BUENO, M.; LUONG, J.; VIÑUELA, U.; TERÁN, F.; PAJE, S.E. (2011) **Pavement Temperature Influence on Close Proximity Tire/Road Noise**. Applied Acoustics, v. 72, n. 11, p. 829–835, 2011. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.05.005.
- CAHILL, T. H.; ADAMS, M.; MARM, C. (2003) **Porous Asphalt: The Right Choice for Porous Pavements**. Hot Mix Asphalt Technology, v.8, n. 5, 26-40.
- CALLAI, S. C. (2011) **Estudo do Ruído Causado pelo Tráfego de Veículos em Rodovias com Diferentes Tipos de Revestimentos de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- CENTOFANTE, R.; SPECHT, L. P.; ALMEIDA JUNIOR, P. O. B.; PINHEIRO, R. J. B.; PEREIRA, D. S. (2018) **Avaliação do Comportamento de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com Inserção de Material Fresado**. Revista Matéria Versão On-line (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, e12178. DOI: 10.1590/s1517-707620180003.0512.
- COOLEY JR, L.A.; BRUMFIELD, J. W.; MALLICK, R. B.; MOGAWER, W. S.; PARTL, M.; PULIKAKOS, L.; HICKS, G. (2009) **Construction and Maintenance Practices for Permeable Friction Courses (National Cooperative Research Program Report 640)**. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- COPELAND, A. (2011) **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. Publication No. FHWA-HRT-11-021. US Department of Transportation.

COSEO, P.; LARSEN, L. (2015) **Cooling the Heat Island in Compact Urban Environments: The Effectiveness of Chicago's Green Alley Program**. *Procedia Engineering*, v. 118, p. 691–710. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.504.

COSTA, S. L. (2017) **Influência da Aderência Pneu-Pavimento nos Conflitos Veiculares Microssimulados**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

COSTA, S. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; FREITAS, E. F. (2017) **Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento para Diferentes Tipos de Pavimentos Utilizando o International Friction Index (IFI)**. Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Recife-PE, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER) ES 386: **Pavimentação – Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero – Camada Porosa de Atrito**. Rio de Janeiro, RJ, 1999.

\_\_\_\_\_ ME 117: **Mistura Betuminosa - Determinação da Densidade Aparente**. 1994.

\_\_\_\_\_ ME 383: **Desgaste por Abrasão de Misturas Betuminosas com Asfalto Polímero–Ensaio Cantabro**. Rio de Janeiro, RJ, 1999.

\_\_\_\_\_ ME 043: **Misturas Betuminosas a Quente - Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, RJ, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) (2006a) **Manual de Estudos de Tráfego**. Publicação IPR 723, 384 p., Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) (2006b) **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2ª Ed., Publicação IPR 720, 310 p., Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

\_\_\_\_\_ ME 135: **Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência**. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

\_\_\_\_\_ ME 136: **Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) (2019) **Instrução de Serviço N° 22/2019**. Disponível em: < <https://www.gov.br/dnit/pt-br/central-de-conteudos/instrucoes-normativas/instrucoes-de-servicos/2019/instrucao-de-servico-22-2019-colegiada-recebimento-de-obras-de-pavimento-novos-e-restaurado-e-anexo.pdf>> Acesso em Março/2021.

DOTY, R. N. (1975) **Study of the Sand Patch and Outflow Meter Methods of Pavement Surface Texture Measurement**. Presented at a symposium in Philadelphia on Surface Texture Versus Skidding: Measurements, Frictional Aspects, and Safety Features of Tire-Pavement Interactions, ASTM Special Technical Publications 583, pp. 42-61.



DRESCH, F. (2016) **Comportamento de Misturas Asfálticas Tipo Camada Porosa de Atrito (CPA)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS.

EBoDE (2010) **Ranking of Environmental Stressors by Health Impact in Europe (EBoDE pilot)**. Disponível em: <<http://en.opasnet.org/w/Ebode>> Acesso em Janeiro/2021.

FAA (1997). **Measurement, Construction, and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces**. Advisory Circular No. 150/5320-12C. Washington, DC: Federal Aviation Administration, US Department of Transportation.

FAA (2001) **Hot Mix Asphalt Paving Handbook**. Advisory Circular No. 150/5370-14A. Washington, DC: Federal Aviation Administration, US Department of Transportation.

FABB, T.R.J. (1997) **Porous Asphalt Surface Courses**. In: C. Nicholls, ed. *Asphalt Surfacing – A Guide to Asphalt Surface and Treatments Used for the Surface Course of Road Pavements*. London: Transport Research Laboratory, 184–218.

FEHRL (2006) **Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces**. EU Fifth Framework Project “SILVIA – Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control”. Bruxelas, Bélgica.

FHWA (2017) **Highway Traffic Noise Analysis and Abatement Policy and Guidance** Disponível em:

<[https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/regulations\\_and\\_guidance/polguide/polguide00.cfm](https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/regulations_and_guidance/polguide/polguide00.cfm)> Acesso em Março/2021.

FLINTSCH, G.W.; MCGHEE, K.K.; IZEPPI, E. L.; NAJAFI, S. (2012) **The Little Book of Tire Pavement Friction Surface Properties Consortium**. Disponível em: <[https://secure.hosting.vt.edu/www.apps.vtti.vt.edu/1-pagers/CSTI\\_Flintsch/The%20Little%20Book%20of%20Tire%20Pavement%20Friction.pdf](https://secure.hosting.vt.edu/www.apps.vtti.vt.edu/1-pagers/CSTI_Flintsch/The%20Little%20Book%20of%20Tire%20Pavement%20Friction.pdf)> Acesso em Fevereiro/2021.

FRANCO, F. A. C. P (2007) **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio De Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

FRIGIO, F.; PASQUINI, E.; FERROTTI, G.; CANESTRARI, F. (2013) **Improved Durability of Recycled Porous Asphalt**. *Construction and Building Materials*, v. 48, pp. 755–763. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.044.

FRIGIO, F.; PASQUINI, E.; PARTL, M. N.; CANESTRARI, F. (2015) **Use of Reclaimed Asphalt in Porous Asphalt Mixtures: Laboratory and Field Evaluations**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 7. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001182.

GERGES, S. N. Y. (2000) **Ruído: Fundamentos e Controle**. 2ª ed., NR Consultoria e Treinamento Editora. Florianópolis, SC.

GIBBS, D.; IWASAKI, R.; BERNHARD, R.; BLEDSOE, J.; CARLSON, D.; CORBISIER, C.; FULTS, K.; HEARNE JR, T.; MCMULLEN, K.; NEWCOMB, D.; ROBERTS, J.;

ROCHAT, J.; SCOFIELD, L.; SWANLUND, M. (2005) **Quiet Pavement Systems in Europe**. Report number FHWA-PL-05-011. American Trade Initiatives. Alexandria, VA.

GOH, S. W.; Z. YOU (2012) **Mechanical Properties of Porous Asphalt Pavement Materials with Warm Mix Asphalt and RAP**. Journal of Transport Engineering, v. 138, n.1, pp. 90-97. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000307.

HAGOS, E. T.; MOLENAAR, A. A. A.; VAN DE VEN, M. F. C.; VOSKUILEN, J. L. M. (2007) **Durability Related Investigation into Porous Asphalt**. Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials. Greece, Athens.

HALL, J.W.; SMITH, K.L.; TITUS-GLOVER, L.; EVANS, L.D.; WAMBOLD, J.C.; YAGER, T.J.; RADO, Z. (2009) **Guide for pavement friction. Contractor's Final Report for National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 01-43**. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. Disponível em: <[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_w108.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w108.pdf)>. Acesso em Fevereiro/2021.

HAN, S.; LIU, M.; FWA, T. F. (2018) **Testing for Low-Speed Skid Resistance of Road Pavements**. Road Materials and Pavement Design, v. 21, n. 5, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1552619>.

HÄNNINEN, O.; KNOL, A. B.; JANTUNEN, M.; LIM, T.; CONRAD, A.; RAPPOLDER, M.; CARRER, P.; FANETTI, A.C.; KIM, R.; BUEKERS, J.; TORFS, R.; IAVANORE, I.; CLASSEN, T.; HORNBERG, C.; MEKEL, O.C.; EBoDE WORKING GROUP (2014) **Environmental Burden of Disease in Europe: Assessing Nine Risk Factors in Six Countries**. Environmental Health Perspectives, v. 122, n. 5, p. 439–446. DOI: 10.1289/ehp.1206154.

HANSON, D. I.; JAMES, R. S. (2004) **Colorado DOT Tire/Pavement Study**. Report No. CDOT-DTD-R-2004-5. Auburn, Alabama, Estados Unidos.

HANSON, D. I. ; DONAVON, P.; JAMES, R. (2005) **Tire/Pavement Noise Characteristics of HMA Pavements**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 74, pp. 1005-1041. Long Beach, CA, Estados Unidos.

HOLANDA, A. S.; PARENTE JR, E.; ARAÚJO, T. D. P.; MELO, L. T. B.; EVANGELISTA JR, F. e SOARES, J. B. (2006) **Finite Element Modeling of Flexible Pavements**. In XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Belém, PA.

HU, L.; YUN, D.; LIU, Z.; DU, S; ZHANG, Z.; BAO, Y. (2016) **Effect of Three-Dimensional Macrotecture Characteristics on Dynamic Frictional Coefficient of Asphalt Pavement Surface**. Construction and Building Materials, v. 126, p. 720–729. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.088.

HUANG (2003) **Kenlayer, Accompanying Software with Pavement Analysis and Design**. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.

HUBER, G. (2000) **Performance Survey on Open-Graded Friction Course Mixes (Synthesis of Highway Practice 284)**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. Disponível em:  
<[http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp\\_syn\\_284.pdf](http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_284.pdf)>. Acesso em Junho/2019.

HUTCHINGS, I.M. (1992) **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. Arnold, Butterworth-Heinemann, London.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS (IPR) (2020) **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método de Análise Mecânico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos – Manual de Utilização do programa MeDiNa**. Disponível em:  
< <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf> > Acesso em Março/2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 11819-1: **Acoustics - Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise - Part 1: Statistical Pass-By Method**. Genebra, 1997.

\_\_\_\_\_ ISO 13473-2: **Characterization of Pavement Texture by Use of Surface Profiles - Part 2: Terminology and Basic Requirements Related to Pavement Texture Profile Analysis**, 2002.

\_\_\_\_\_ ISO 13325-2: **Tyres – Coast-By Methods for Measurement of the Tyre-to-Road Sound Emission**. 2003.

\_\_\_\_\_ ISO 25178-2: **Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface Texture: Areal - Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters**, 2012.

\_\_\_\_\_ ISO 11819-2: **Acoustics — Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise - Part 2: The Close-Proximity Method**. 2017.

\_\_\_\_\_ ISO 11819-3: **Acoustics — Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise - Part 2: Reference Tyres**. 2017.

KANDHAL (2002) **Design, Construction, and Maintenance of Open-Graded Asphalt Friction Courses**. Information Series 115, National Asphalt Pavement Association. Lanham, MD, Estados Unidos.

KANO, T.; NITTA, H.; SASAKI, I.; KAWAKAMI, A.; KUBO, K. (2010) **Highly-Aged and Highly Modified Asphalt Concrete Recycling in Japan**. 11th International Conference on Asphalt Pavements, v. 1. Nagoia, Aichi, Japan.

KASEER, F; ARÁMBULA-MERCADO, E.; MARTIN, A. E. (2019) **A Method to Quantify Reclaimed Asphalt Pavement Binder Availability (Effective RAP Binder) in Recycled Asphalt Mixes**. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, v. 2673, n. 5, pp. 205-216. DOI: 10.1177/0361198118821366.

- KASSEM, E.; AWED, A.; MASAD, E.; LITTLE, D.N. (2013) **Development of Predictive Model for Skid Loss of Asphalt Pavements**. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 2372, pp. 83–96. DOI: <https://doi.org/10.3141/2372-10>.
- KENNEDY, T. W.; TAM, W. O.; SOLAIMANIAN, M. (1998) **Optimizing Use of Reclaimed Asphalt Pavement with the SuperPave System**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 67, p. 311-333.
- KIELY, G. (1999) **Ingenieria Ambiental, Fundamentos, Entornos, Tecnologias y Sistemas de Gestión**. McGraw-Hill/Interamericana de Espana, S.A. Madrid, Espanha. v. 1. 440 p.
- KNABBEN, R. M. (2012) **Estudo do Ruído Pneu Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimentos de Pavimento**. Dissertação de Mestrado., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEC-UFSC), Florianópolis, SC.
- KOGBARA, R. B.; MASAD, E. A.; KASSEM, E.; SCARPAS, A.; ANUPAM, K (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, pp. 602–617. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>.
- KOGBARA, R. B.; MASAD, E. A.; WOODWARD D.; MILLAR, P. (2018a) **Relating Surface Texture Parameters from Close Range Photogrammetry to Grip-Tester Pavement Friction Measurements**. Construction and Building Materials, v. 166, p. 227–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.102>.
- KOGBARA, R. B.; MASAD, E. A.; ANUPAM, K.; SCARPAS, A (2018b) **GipTester measurements and texture-friction relationship**. In: Advances in Materials and Pavement Performance Prediction. Taylor&Francis Group. Doha, Qatar.
- KOŁODZIEJ, V. M. (2016) **Estudo das Propriedades Acústicas, Drenantes e Mecânicas de Revestimentos Asfálticos Porosos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEC-UFSC), Florianópolis, SC.
- KUCHIISHI, A. K.; CALLAI, S. C.; VIEIRA, T.; BERNUCCI, L. L. B. (2014) **Estudo da Macrotextura do Pavimento a Partir de Ensaio de Mancha de Areia e Drenabilidade em Conjunto com Análise da Superfície por Estereoscopia**. Anais do XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Curitiba, PR, Brasil.
- LÁO, V. L. E. S. T. (2004) **Estudo Comparativo do Desempenho Acústico de Diferentes Tipos de Revestimento dos Pavimentos**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- LEACH, R (2012) **Characterisation of Areal Surface Texture**. Springer-Verlag, Berlin.
- LEANDRO, R. P.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B.; BEJA, I. A.; CHAVES, J. M. (2014) **Efeito do Tipo de Compactação no Volume de Vazios de uma Mistura**

**Asfáltica Densa.** 43ª RPAv – Reunião Anual de Pavimentação e 17º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Alagoas, Maceió.

LI, Q. (Joshua); Guangwei, G.; WANG, K. C. P.; ZHAN, Y. (Jason); WANG, C. (2017) **Novel Macro- and Microtexture Indicators for Pavement Friction by Using High-Resolution Three-Dimensional Surface Data.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2641, pp. 164–176.

LOPES, M.; T. GABET; L. BERNUCCI; V. MOUILLET (2015) **Durability of Hot and Warm Asphalt Mixtures Containing High Rates of Reclaimed Asphalt at Laboratory Scale.** Materials and Structures/Materiaux et Constructions, v. 48, n. 12, p. 3937–3948. DOI : 10.1617/s11527-014-0454-9.

LO PRESTI, D.; VASCONCELOS, K.; OREŠKOVIĆ, M.; PIRES, G. M.; BRESSI, S. (2019) **On the Degree of Binder Activity of Reclaimed Asphalt and Degree of Blending with Recycling Agents.** Road Materials and Pavement Design, v. 21, n. 8, pp. 2071-2090. DOI: 10.1080/14680629.2019.1607537.

MACEK, W.; ROZUMEK, D.; KRÓLCZYK, G. M. (2020) **Surface Topography Analysis Based on Fatigue Fractures Obtained with Bending of the 2017A-T4 Alloy.** Measurement, v. 152, pp. 107347, January 2020, 107347. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107347.

MAIA, R. S.; ALECRIM, C. M. C.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; ARAÚJO, V. M. C.; REIS JÚNIOR, H. S. R. (2019) **Utilização de Revestimentos Drenantes do Tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) e de Asfalto Modificado por Polímero (AMP) como Soluções para o Meio Urbano em Fortaleza-CE.** Comunicação técnica apresentada no XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Balneário Camboriú-SC, Brasil.

MAIA, R. S. (2020) **Contributions to the Tire-Pavement Friction Characterization from the Traffic Safety Perspective.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

MALLICK, R. B.; KANDHAL, P. S.; COOLEY JR, L. A.; WATSON, D. E. (2000) **Design, Construction, and Performance of New-Generation Open-Graded Friction Courses (NCAT Report No. 2000-01).** Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, Reno, Nevada.

MALLICK, R. B.; KANDHAL, P. S.; BRADBURY, R. L. (2008) **Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures,** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2051, n. 1, p. 71–79. DOI: 10.3141/2051-09.

MCQUAID, G.; MILLAR, P.; WOODWARD, D.; FRIEL, S. (2013) **Use of Close Range Photogrammetry to Assess the Micro-Texture of Asphalt Surfacing Aggregate.** In: International Journal of Pavements Conference, São Paulo, Brazil, paper 219-2.

MCQUAID, G.; MILLAR, P.; WOODWARD, D. (2015) **Use of 3D Modeling to Assess Pothole Growth.** In: A.F. Nikolaidis (Ed.), 6th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, Taylor & Francis Group, London, 2015, pp. 161–166.

MEDEIROS, M. S.; UNDERWOOD, B. S.; CASTORENA, C. RUPNOW, T.; RAWLS, M. (2016) **3D Measurement of Pavement Macrotecture Using Digital Stereoscopic Vision**. Transportation Research Board 95th Annual Meeting, Washington-DC, United States.

MEDEIROS, M. S.; BABADOPULOS, L. F. A.; MAIA, R. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. (2020) **3D Pavement Macrotecture Parameters from Close Range Photogrammetry**. Road Materials and Pavement Design (Artigo submetido).

MENEZES, S. V.; SOARES, J. B.; BASTOS, J. B. S. (2019) **Análise Laboratorial da Incorporação de Fresado em Misturas Asfálticas Aplicadas em Campo**. Anais do XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Balneário Camboriú-SC, Brasil.

MIEDEMA, H. M. E.; VOS, H. **Associations Between Self-Reported Sleep Disturbance and Environmental Noise Based on Reanalyses of Pooled Data from 24 Studies**. Behavioral Sleep Medicine, v. 5, n. 1, pp. 1–20, 2007. DOI: 10.1207/s15402010bsm0501\_1.

MILLAR, P. A. (2013) **Non-Contact Evaluation of the Geometric Properties of Highway Surfacing Textures Using Close Range Photogrammetry**. PhD thesis, University of Ulster, UK.

MOORE, R. L. (1989) **Structure Value of Asphalt Treated Permeable Base and Open-Graded Asphalt Concrete**. California Department of Transportation, Report No. FHWA/CA/TL-89/11, October.

MOORE, L. M.; HICKS, R. G.; ROGGE, D. F. (2001) **Design , Construction , and Maintenance Guidelines for Porous Asphalt Pavements**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1778, n. 01-0422, pp. 91–99.

MORGAN, P.; SANDBERG, U.; VAN BLOKLAND, G. (2009) **The Selection of New Reference Test Tyres for Use with the CPX Method, to Be Specified in ISO/TS 11819-3**. Innovations in Practical Noise Control - INTERNOISE. Ottawa, Canadá.

MOTTA, L. M. G; F. L. B. RIBEIRO; S. F. ESTEFEN (2010) **Relatório Final: Estudo Comparativo do Comportamento de Fadiga de Misturas Betuminosas com Diferentes Teores de Asfalto**. Convênio PEC 8650, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

NASCIMENTO, L. A. H. (2008) **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

NEWCOMB, D.; L. SCOFIELD (2004) **Quiet Pavements Raise the Roof in Europe: Scanning Tour Reveals European Practice for Noise Mitigation**. September/October edition of Hot Mix Asphalt Technology.

NIELSEN, C.B.; BENDTSEN, H.; ANDERSEN, B., LARSEN, H.J.E. (2005) **Noise Reducing Pavements in Japan – Study Tour Report**. Danish Road Institute Technical Note 31. Denmark: Road Directorate.

PASQUET, A. (1968) **Campagne Nationale de Glissance 1967 en France**. Colloque International sur la Glissance et la Sécurité de la Circulation sur Routes Moullées. Berlin. 16 p.

PEIXOTO, N. G. M.; AZEVEDO FILHO, M. A. N. (2019) **Avaliação do Impacto da Poluição Sonora da Operação do Sistema de Transportes, Estudo de Caso em Fortaleza/CE**. Anais do XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Balneário Camboriú, SC, Brasil, p.732-735.

PIARC (1987) **Report of the Committee on Surface Characteristics**. Permanent International Association of Road Congress (PIARC) XVIII World Road Congress, Brussels.

PIARC (2013) **Quiet Pavement Technologies**. Technical Committee D.2 – Road Pavements. 105 p. Disponível em: <<https://www.piarc.org/ressources/publications/7/19692,2013R10-EN.pdf>>. Acesso em Março/2021.

PINHEIRO, J. H. M.; SOARES, J. B (2005) **Realização e Acompanhamento de Dois Trechos Experimentais com Asfalto-Borracha no Estado do Ceará**. Revista Transportes, v. XIII, n. 1, pp. 57-66. DOI: 10.4237/transportes.v13i1.92.

POMONI, M.; PLATI, C.; LOIZOS, A.; YANNIS, G. (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.

PRATICÒ, F. G.; R. VAIANA (2012) **Improving Infrastructure Sustainability in Suburban and Urban Areas: Is Porous Asphalt The Right Answer? And How?** WIT Transactions on The Built Environment, v. 128, pp. 673–684. DOI: 10.2495/UT120571.

PRATICÒ, F. G.; VAIANA, R.; GIUNTA, M. (2013) **Pavement Sustainability: Permeable Wearing Courses by Recycling Porous European Mixes**. Journal of Architecture Engineering, v.19, n.3, pp. 186-192. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000127.

PRATICÒ, F. G.; VAIANA, R.; GIUNTA, M.; MORO, A.; IUELE, T. (2012) **Permeable Wearing Courses by Recycling PEMs: Strategies and Technical Procedures**. Procedia – Social and Behavioral Sciences, v. 53, pp. 276 – 285. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.880.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (PMF) (2018) <<https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-de-fortaleza-realiza-obras-de-recapeamento-asfaltico-na-av-senador-virgilio-tavora>> Acesso em Janeiro/2021.

RASMUSSEN, R. O.; BERNHARD, R. J.; SANDBERG, U.; MUN, E. P. (2007) **The Little Book of Quieter Pavements**. FHWA, USA. FHWA-IF-08-004.

ROCHA SEGUNDO, I. G.; LANDI JR, S.; OLIVEIRA, S. M. B.; FREITAS, E. F.; CARNEIRO, J. A. O. (2019) **Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency**. Catalysis Today, v. 326, n. July, p. 94–100. DOI: 10.1016/j.cattod.2018.07.012.

SAADEH, S.; RALLA, A.; AL-ZUBI, Y.; WU, R.; HARVEY, J. (2019) **Application of Fully Permeable Pavements as a Sustainable Approach for Mitigation of Stormwater**

**Runoff.** International Journal of Transportation Science and Technology, v. 8, n. 4, p. 338–350. DOI: 10.1016/j.ijtst.2019.02.001.

SANDBERG, U. (1987) **Road Traffic Noise - The Influence of the Road Surface and its Characterization.** Applied Acoustics, v. 21, n. 2, p. 97–118.

SANDBERG, U. (1996) **Design and Maintenance of Low Noise Road Surfacing.** Proceedings of the Third International Symposium on Pavement Surface Characteristics. Christ-Church, New Zealand, September 3-4.

SANDBERG, U. (1997) **Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy and Safety: A State-of-the-Art Study Regarding Measures and Measuring Methods.** VTI notat 53-A, Swedish National Road and Transport Research Institute.

SANDBERG, U; J. A. EJSMONT (2002) **Tyre/Road Noise Reference Book.** Informex, Harg, SE-59040 Kisa, Sweden. 640 p.

SANTOS, A. P. S. (2007) **Estudo da Eficácia na Redução do Ruído de Tráfego em Pavimentos Drenantes.** Tese de Mestrado em Engenharia Rodoviária, Universidade do Minho.

SHAABAN, K.; ABDEL-WARITH, K.; HADDOCK, J. (2019) **Using Pavements to Generate Electricity.** Procedia Computer Science, v. 151, p. 124–131. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.020.

SOARES, J.B.; LEITE, L.M.; MOTTA, L. M. G.; CASTELO BRANCO, J.V. (1999) **O efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas.** XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, São Carlos-SP, Brasil.

SOUSA, F. F. L. M. (2016) **Metodologia de Calibração para Modelos Integrados dos Transportes e Uso do Solo.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

SPECHT, L. P. ; KOHLER, R.; POZZOBON, C. E.; CALLAI, S. C. (2009a) **Causas, Formas de Medição e Métodos para Mitigação do Ruído Decorrente do Tráfego de Veículos.** Revista Tecnologia, v. 30, n. 1, p. 12–26.

SPECHT, L. P.; CALLAI, S. C.; KHATCHATOURIAN, O. A.; KOHLER, R. (2009b) **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.

STEMPIHAR, J. J.; POURSHAMS-MANZOURI, T.; KALOUSH, K. E., RODEZNO, M. C. (2012) **Porous Asphalt Pavement Temperature Effects for Urban Heat Island Analysis.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2293, p. 123–130. DOI: 10.3141/2293-15.



STEPHENS, J. E.; MAHONEY, J.; DIPPOLD, C. (2001) **Determination of the PG Binder Grade to Use in a RAP Mix**, Report No. JHR 00-278, Connecticut Department of Transportation, Rocky Hill, CT.

STEVEN, H. (1990) **Recent German Experience with Open-Pored Surfacing**. Proceedings of the International Tire/Noise Conference, Gothenburg, Sweden, pp. 297-313.

STRUFALDI, E. G. B.; BERNUCCI, L. L. B.; APS, M.; VITTORINO, F.; SOUZA, D. R. (2010) **Traffic Noise Reduction Using Porous Asphalt Course as an Overlay of a Portland Cement Concrete Pavement in Sao Paulo, Brazil**. Proceedings of 39th International Congress on Noise Control Engineering, INTER-NOISE 2010. Lisboa, Portugal.

SURESHA, S. N.; VARGHESE, G.; SHANKAR, A.U.R. (2010) **Laboratory and Theoretical Evaluation of Clogging Behaviour of Porous Friction Course Mixes**. International Journal of Pavement Engineering, v. 11, n. 1, p. 61–70. DOI: 10.1080/10298430902730554.

TIMM, D. H.; VARGAS-NORDCBECK, A. (2012) **Structural Coefficient of Open-Graded Friction Course**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Record 2305, n. 12-0812, pp. 102-110. DOI: 10.3141/2305-11.

TORQUATO e SILVA, S. A.; SOARES, J. B.; HOLANDA, A. S. e OLIVEIRA, J. A. (2014) **Utilização do Método dos Elementos Finitos em Retroanálise de Pavimentos Flexíveis**. In: XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Curitiba, PR.

VIEIRA, T; REDONDO, D. C.; KUCHIISHI, A. K.; CALLAI, S. C.; BERNUCCI, L. L. B. (2013) **Avaliação da Macrotextura Média de Superfícies de Pavimentos: Comparação entre as Técnicas com Drenômetro e com Mancha de Areia**. Anais do XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Belém, PA, Brasil.

WAMBOLD, J.C.; ANTLE, C.E.; HENRY, J.J.; RADO, Z. (1995) **International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements**. Paris, France.

WANG, Y.; LENG, Z.; WANG, G. (2014) **Structural Contribution of Open-Graded Friction Course Mixes in Mechanistic–Empirical Pavement Design**. International Journal of Pavement Engineering, v. 15, n. 8, pp. 731-741. DOI: 10.1080/10298436.2013.857776.

WATSON, D. E.; MOORE, K. A.; WILLIAMS, K.; COOLEY JR, L. A. (2003) **Refinement of New Generation Open-Graded Friction Course Mix Design**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Record 1832, n. 03-3704, pp. 78-85. DOI: 10.3141/1832-10.

WAYSON, R. L. (1998), **Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise**. NCHRP Synthesis of Highway Practice, 268, Transportation Research Board.

WEST, R.C., TIMM, D.H.; WILLIS, J.R.; POWELL, R.B.; TRAN, N.H.; WATSON, D.; SAKHAEIFAR, M.; BROWN, E.R.; ROBBINS, M.M.; VARGAS-NORDCBECK, A.; VILLACORTA, F. L.; GUO, X.; NELSON, J. (2012). **Phase IV NCAT Test Track Findings**. NCAT Report 12-10. National Center for Asphalt Technology, Auburn University.

Auburn, Alabama. Disponível em: <<http://www.ncat.us/files/reports/2012/rep12-10.pdf>>. Acesso em Março/2021.

WEST, R. C.; COPELAND, A. (2015) **High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice - Lessons Learned**. National Asphalt Pavement Association, Information Series 139, 62 p.

WOODWARD D.; MILLAR, P. ; MCQUAID, G. (2014) **Use of 3D Modelling Techniques to Better Understand Road Surface Textures**. In: 4th International Safer Roads Conference, Cheltenham, UK.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (2018) **Environmental Noise Guidelines for the European Region**. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 181 p. 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 Dezembro/2021.

ZHANG, W.; ZHANG, Y. X.; JIA, Z.; WANG, F.; DING, L. (2019) **Test Method and Material Design of Asphalt Mixture with the Function of Photocatalytic Decomposition of Automobile Exhaust**. Construction and Building Materials, v. 215, p. 298–309, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.196.