



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

MAURO FELIPE PATRÍCIO DA COSTA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR SOB CONDIÇÕES DE USINAGEM A QUENTE
DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM AMBIENTES INDUSTRIAL E LABORATORIAL**

FORTALEZA
2025

MAURO FELIPE PATRÍCIO DA COSTA

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR SOB CONDIÇÕES DE USINAGEM A QUENTE
DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM AMBIENTES INDUSTRIAL E LABORATORIAL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C837a Costa, Mauro Felipe Patrício da.
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR SOB CONDIÇÕES DE USINAGEM A QUENTE DE
MISTURAS ASFÁLTICAS EM AMBIENTES INDUSTRIAL E LABORATORIAL / Mauro Felipe
Patrício da Costa. - 2025.
78 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
Campus Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.
1. Misturas asfálticas. 2. Poluição atmosférica. 3. Monitoramento indoor. 4. Monitoramento outdoor. 5.
. Qualidade do ar. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.013272/2025-30

Interessado: Mauro Felipe Patrício da Costa

MAURO FELIPE PATRÍCIO DA COSTA

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR SOB CONDIÇÕES DE USINAGEM A QUENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM AMBIENTES INDUSTRIAL E LABORATORIAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* de Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em: **29/09/2025**.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Daniel Silveira Serra

Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Documento assinado digitalmente
DANIEL SILVEIRA SERRA
Data: 11/10/2025 15:40:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Iuri Sidney Bessa

Universidade Federal do Ceará (UFC)



Documento assinado eletronicamente por **Rinaldo dos Santos Araújo**, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, em 08/10/2025, às 12:54, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iuri Sidney Bessa**, Usuário Externo, em 09/10/2025, às 10:19, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **7933257** e o código CRC **79CF1CD7**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental (PGTGA), em especial, aos mestres e companheiros de pesquisa: Michael Lima e Cícero Janderson, pelo suporte durante a execução deste estudo.

Aos amigos: Tobias Oliveira, Alex França e Camila Brasil do Laboratório de Tecnologia Química (LTQ) que fizeram parte dessa caminhada e contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos pesquisadores do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC), em especial ao professor Dr. Iuri Sidney Bessa e professora Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos pela recepção e acolhimento durante a realização dos estudos desta pesquisa.

Ao meu orientador, professor Dr. Rinaldo dos Santos Araújo pelos momentos de alegria e por compartilhar seus valiosos conhecimentos científicos.

A querida professora Dra. Glória Maria Marinho Silva, por toda a compreensão e assistência prestada durante a minha permanência no mestrado.

A FUNCAP, pelo aporte financeiro (bolsa) concedido para a realização desta pesquisa.

“Sentimos, imaginamos, refletimos, rimos, choramos, abraçamo-nos à dor ou libertamo-nos das penas. Vário é o caminho, mas para a alegria ou a tristeza... é sempre franco.”

Mary Shelley

RESUMO

A indústria de pavimentação desempenha um papel importante no crescimento econômico e bem-estar social nos países em desenvolvimento, entretanto, o uso de combustíveis fósseis e a grande demanda por materiais asfálticos podem ocasionar impactos ambientais relacionados a emissão de diversos poluentes e uma consequente poluição dos recursos naturais. Neste contexto, este estudo avaliou a emissão de poluentes atmosféricos provenientes da usinagem a quente de misturas asfálticas em escalas industrial e laboratorial. Experimentalmente, foram monitoradas as emissões de materiais particulados (PTS, MP_{10} e $MP_{2.5}$), CO_2 , metais (Ca, Mg, Zn, Ni, V e Pb) e benzo(a)pireno. As áreas de estudo incluíram uma usina de produção asfáltica (monitoramento *outdoor*) e um laboratório acadêmico dedicado à atividades de caracterização e formulação de misturas asfálticas (monitoramento *indoor*). O monitoramento na área industrial com 5 coletas de campo indicou concentrações médias de $196,1 \mu g/m^3$ de PTS; $91,9 \mu g/m^3$ de MP_{10} ; $6,52 ng/m^3$ de benzo(a)pireno; $21,1 \mu g/m^3$ de Ca e $5,17 \mu g/m^3$ de Mg, não sendo detectado a presença de Zn, Pb, Ni e V. No ambiente laboratorial em regime usual de operação (6 coletas) as concentrações médias dos poluentes foram de $1153,2 \mu g/m^3$ de PTS; $243,9 \mu g/m^3$ de MP_{10} ; $161,5 \mu g/m^3$ de $MP_{2.5}$; 674 ppm de CO_2 ; $3,8 ng/m^3$ de benzo(a)pireno; $105,8 \mu g/m^3$ de Ca; $63,6 \mu g/m^3$ de Mg e $3,78 \mu g/m^3$ de Zn, com Pb, Ni e V permanecendo abaixo dos limites de detecção do método analítico. No ambiente laboratorial sob regime de operação controlado (5 coletas) os ensaios com misturas contendo pavimento asfáltico fresado recuperado (10% ou 15%) mostraram concentrações médias de $560,9 \mu g/m^3$ de PTS; $100,1 \mu g/m^3$ de MP_{10} ; $66,6 \mu g/m^3$ de $MP_{2.5}$ e 570,2 ppm de CO_2 . Nesta mesma condição operacional, as frações elementares de Ca, Mg e Zn (3 coletas) foram de $27,9 \mu g/m^3$, $11,6 \mu g/m^3$ e $6,71 \mu g/m^3$, respectivamente, enquanto os metais Pb, Ni e V não foram detectados. Em geral, com exceção ao período de precipitação pluviométrica, os resultados encontrados na área industrial revelaram concentrações de particulado inalável (MP_{10}) superior ao limite recomendado na legislação brasileira e pela Organização Mundial da Saúde. Em ambiente laboratorial as frações de materiais particulados foram superiores aos padrões recomendados pelas diretrizes nacionais e internacionais de qualidade do ar interior, o que não foi observado para os diferentes metais avaliados. As determinações de benzo(a)pireno indicaram concentrações deste hidrocarboneto policíclico aromático superiores às estabelecidas pela legislação Europeia de qualidade do ar. Estudos adicionais de conforto ambiental no laboratório de pesquisa mostraram adequação da temperatura e umidade relativa do ar à norma brasileira vigente.

Palavras-chave: Misturas asfálticas. Poluição atmosférica. Monitoramento indoor. Monitoramento outdoor. Qualidade do ar.

ABSTRACT

The paving industry plays a significant role in economic growth and social well-being in developing countries; however, the use of fossil fuels and the high demand for asphaltic materials can cause environmental impacts related to the emission of various pollutants and a consequent pollution of natural resources. Thus, this study evaluated the emission of air pollutants from the hot processing of asphalt mixtures on an industrial and laboratory scales. Experimentally, emissions of particulate matter (TSP, PM₁₀, and PM_{2.5}), CO₂, metals (Ca, Mg, Zn, Ni, V, and Pb), and benzo(a)pyrene were monitored. The study areas included an asphalt production plant (outdoor monitoring) and an academic laboratory dedicated to the characterization and formulation of asphalt mixtures (indoor monitoring). Monitoring in the industrial area, based on 5 field sampling collections, indicated average concentrations of 196.1 µg/m³ of TSP, 91.9 µg/m³ of PM₁₀, 6.52 ng/m³ of benzo(a)pyrene, 21.1 µg/m³ of Ca, and 5.17 µg/m³ of Mg, with no detectable levels of Zn, Pb, Ni and V. In the laboratory environment under routine operating conditions (6 collections), the average concentrations measured were 1153.2 µg/m³ of TSP, 243.9 µg/m³ of PM₁₀, 161.5 µg/m³ of PM_{2.5}, 674 ppm of CO₂, 3.8 ng/m³ of benzo(a)pyrene, 105.8 µg/m³ of Ca, 63.6 µg/m³ of Mg and 3.78 µg/m³ of Zn, with Pb, Ni, and V remaining below detection limits of the analytical method. In a laboratory environment under controlled operating conditions (5 collections), tests with mixtures containing reclaimed milled asphalt pavement (10% or 15%) showed average concentrations of pollutants of 560.9 µg/m³ for TSP, 100.1 µg/m³ for PM₁₀, 66.6 µg/m³ for PM_{2.5}, and 570 ppm for CO₂. Under the same operational conditions, the elemental fractions of Ca, Mg, and Zn (3 collections) were measured at 27.9 µg/m³, 11.6 µg/m³, and 6.71 µg/m³, respectively, while the metals Pb, Ni, and V were not detected. Overall, with exception of the period influenced by rainfall events, the results obtained in the industrial area indicated concentrations of inhalable particulate matter (PM₁₀) exceeding the limits recommended by Brazilian legislation and by the World Health Organization. In the laboratory environment, the particulate matter fractions were higher than the standards established by national and international indoor air quality guidelines, which was not observed for the different metals evaluated. Benzo(a)pyrene determinations indicated concentrations of this polycyclic aromatic hydrocarbon exceeding those established by European air quality legislation. Additional studies of environmental comfort in the research laboratory showed that the temperature and relative humidity of the air are in accordance with current Brazilian legislation.

Keywords: Asphalt mixtures. Atmospheric pollution. Indoor monitoring. Outdoor monitoring. Air quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Percentual mineralógico de óxidos metálicos em agregados naturais e reciclados.....	18
Figura 2 — Principais classes de hidrocarbonetos presentes no asfalto.....	20
Figura 3 — Diagrama de emissões em usina de mistura asfáltica contínua de contrafluxo...	22
Figura 4 — Relação de distribuição das frações de particulados.....	24
Figura 5 — Localização geográfica dos espaços de amostragem representados pela indústria de asfalto (A) e laboratório de mecânica dos pavimentos (B).....	30
Figura 6 — Pátio industrial de processamento das misturas asfálticas na empresa em estudo.....	31
Figura 7 — Amostradores HiVol para determinação de particulados (PTS e MP ₁₀) no pátio industrial de usinagem asfáltica.....	32
Figura 8 — Misturador batelada usado nos ensaios de preparação de misturas asfálticas.....	34
Figura 9 — Curvas granulométricas dos agregados utilizados na usinagem de misturas asfálticas em regime de operação laboratorial controlado.....	36
Figura 10 — Analisadores multiparâmetros e sistema de bombas AirChek XR-5000.....	38
Figura 11 — Determinação analítica de metais em espectrofotômetro de absorção atômica...	40
Figura 12 — Rosa dos ventos e frequência de ventos na área monitorada durante o período de amostragem outdoor.....	41
Figura 13 — Perfil de concentração para PTS no pátio da usina asfáltica em estudo.....	42
Figura 14 — Perfil de concentração para MP ₁₀ no pátio da usina asfáltica em estudo.....	44
Figura 15 — Perfil de temperatura e umidade relativa do ar no ambiente laboratorial em estudo.....	47
Figura 16 — Perfil de concentração para PTS em regime operacional laboratorial não controlado.....	50
Figura 17 — Perfil de concentração para MP ₁₀ e MP _{2,5} em operação laboratorial não controlada.....	51
Figura 18 — Perfil de emissão de CO ₂ em operação laboratorial não controlada.....	53
Figura 19 — Perfil de concentração para PTS em regime operacional laboratorial controlado	57
Figura 20 — Perfil de concentração para MP ₁₀ e MP _{2,5} em operação laboratorial controlada.....	58
Figura 21 — Perfil de emissão de CO ₂ em operação laboratorial controlada.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Análise elementar em ligantes asfálticos.....	19
Tabela 2 — Composição das misturas asfálticas monitoradas em laboratório sob condições operacionais não controladas.....	35
Tabela 3 — Composição das misturas asfálticas monitoradas em laboratório sob condições operacionais controladas.....	37
Tabela 4 — Concentração de metais e benzo(a)pireno associados ao PTS coletado no pátio da usina asfáltica em estudo.....	46
Tabela 5 — Resultados estatísticos das concentrações de particulados e CO ₂ monitorados no laboratório de usinagem asfáltica inativo e sob regime operacional não controlado.....	49
Tabela 6 — Concentração de metais e benzo(a)pireno associados ao PTS coletado no laboratório de usinagem asfáltica sob condições operacionais não controladas.....	55
Tabela 7 — Concentração de metais associados ao PTS coletado no laboratório de usinagem asfáltica sob condições operacionais controladas.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ABCB	Quadro de Códigos de Construção da Austrália
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BaP	Benzo(a)Pireno
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
IARC	Agência Internacional de Pesquisa em Câncer
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
MP	Material Particulado
MP ₁₀	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 µm
MP _{2,5}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 µm
MP _{0,1}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 0,1 µm
NIOSH	Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional dos Estados Unidos
OSHA	Agência Governamental de Administração de Saúde e Segurança Ocupacional dos Estados Unidos
PVC	Policloreto de vinila
PTS	Partículas Totais em Suspensão
ppm	Partes por milhão
RCD	Resíduos da Construção e Demolição

RAP	Pavimento Asfáltico Recuperado
SBS	Estireno-butadieno-estireno
EU	União Europeia
UBA	Agência Ambiental Federal Alemã
US EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
UFC	Universidade Federal do Ceará
WHO	Organização Mundial da Saúde

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3.1	Pavimentação asfáltica.....	16
3.2	Composição química dos materiais asfálticos.....	16
3.2.1	<i>Agregados.....</i>	16
3.2.2	<i>Cimento asfáltico de petróleo (CAP).....</i>	18
3.3	Usinagem asfáltica.....	20
3.4	Emissões asfálticas.....	22
3.4.1	<i>Fumos asfálticos.....</i>	23
3.4.2	<i>Material particulado.....</i>	23
3.4.3	<i>Dióxido de carbono.....</i>	25
3.4.4	<i>Monóxido de carbono.....</i>	26
3.4.5	<i>Dióxido de enxofre.....</i>	26
3.4.6	<i>Dióxido de nitrogênio.....</i>	27
3.4.7	<i>Compostos orgânicos voláteis (COV).....</i>	28
3.4.8	<i>Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA).....</i>	28
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
4.1	Locais de estudo.....	30
4.2	Condições de produção de misturas asfálticas.....	31
4.2.1	<i>Usinagem de misturas asfálticas em escala industrial.....</i>	31
4.2.1.1	<i>Monitoramento outdoor dos poluentes atmosféricos.....</i>	32

4.2.2	Usinagem de misturas asfálticas em escala laboratorial.....	33
4.2.2.1	<i>Monitoramento indoor dos poluentes atmosféricos.....</i>	34
4.3	Caracterizações analíticas.....	37
4.3.1	<i>Conforto ambiental e parâmetros atmosféricos.....</i>	37
4.3.2	<i>Determinação de material particulado.....</i>	38
4.3.3	<i>Determinação de benzo(a)pireno (BaP).....</i>	39
4.3.4	<i>Determinação de metais.....</i>	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1	Monitoramento outdoor das condições atmosféricas.....	41
5.1.1	<i>Parâmetros meteorológicos.....</i>	41
5.1.2	<i>Avaliação de emissões particuladas em usina de mistura asfáltica.....</i>	42
5.1.3	<i>Avaliação de metais e benzo(a)pireno em usina de mistura asfáltica.....</i>	45
5.2	Monitoramento indoor das condições atmosféricas.....	47
5.2.1	<i>Avaliação do conforto ambiental em laboratório de usinagem asfáltica.....</i>	47
5.2.2	<i>Avaliação de emissões atmosféricas em laboratório de usinagem asfáltica.....</i>	49
5.2.2.1	<i>Monitoramento de particulados e dióxido de carbono (CO₂) sob condições operacionais não controladas.....</i>	49
5.2.2.2	<i>Avaliação de metais e benzo(a)pireno sob condições operacionais não controladas.....</i>	55
5.2.2.3	<i>Monitoramento de particulados e dióxido de carbono (CO₂) sob condições operacionais controladas.....</i>	57
5.2.2.4	<i>Avaliação de metais sob condições operacionais controladas.....</i>	61
6	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação se destaca como um setor em atividade constante e que desempenha um papel importante na infraestrutura nacional de transportes (Cardoso; Costa, 2016). Entre os seus aspectos favoráveis pode-se citar a melhoria da qualidade de rolamento para os usuários dos sistemas viários, a segurança, a redução dos custos em manutenção automotiva, diminuição no consumo de combustível e subsequente ganho nos tempos de viagem e acesso às regiões do país (Balbo, 2007; Bernucci *et al.*, 2022).

Os benefícios econômicos, a facilidade de construção e o desempenho mecânico posicionaram o revestimento asfáltico como o principal material predominante na infraestrutura de pavimentação (Li, J. *et al.*, 2024). Em geral, 90% dos pavimentos são constituídos de mistura asfáltica compactada (Li *et al.*, 2021). Segundo dados de 2020, foram utilizados no Brasil cerca de 2,3 milhões de toneladas de asfalto. No mesmo ano, nos Estados Unidos, registrou-se um consumo médio de 26 milhões de toneladas. Ainda, estima-se que em todo mundo até o ano de 2050 devam ser construídos 25 milhões de km de estradas (Bernucci *et al.*, 2022; Aryan; Dikshit; Shinde, 2023).

Em contraste aos seus aspectos favoráveis, o uso indiscriminado dos materiais asfálticos tem de modo recorrente despertado preocupações ambientais emergentes. De modo análogo aos outros segmentos da construção, o processamento de misturas asfálticas é responsável por um elevado consumo de matéria-prima virgem mineral, combustível e demais derivados originados das frações do petróleo (Milad *et al.*, 2022).

Ademais, a tecnologia dos pavimentos asfálticos usinados a quente enfrenta desafios e limitações quanto a sua sustentabilidade, uma vez que a produção e utilização dos materiais asfálticos convencionais têm ocasionado consideráveis danos ambientais, como a elevação das emissões de gases do efeito estufa e a poluição dos recursos naturais (Ma *et al.*, 2016).

O processamento de materiais asfálticos gera fumos, gases (SO_2 , NO_2 , H_2S , HPA, benzeno, xilenos), materiais particulados inaláveis (MP_{10}), respiráveis ($\text{MP}_{2.5}$) e compostos orgânicos voláteis (COV). Devido à grande diversidade de poluentes, estas emissões são responsáveis por ocasionar desde irritações oculares a até doenças pulmonares, cardiovasculares e câncer, podendo afetar principalmente uma parcela de indivíduos sensíveis (Gebreselassie, 2019; Kharat, 2022).

De acordo com Li, J. *et al.* (2024), os impactos da exposição ambiental aos compostos orgânicos voláteis ainda não foram completamente elucidados, ainda carecendo de uma extensiva modelagem da qualidade do ar e pesquisa epidemiológica.

Fontenele *et al.* (2018) em seus estudos para o levantamento de particulados respiráveis em operações de aplicação e usinagem asfáltica constataram concentrações com cerca de 200 vezes acima dos limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA).

Jullien *et al.* (2010) ao correlacionarem dados sobre produção asfáltica em escala laboratorial e industrial concluíram que os processos de combustão atuam nos mecanismos de emissões atmosféricas sob diferentes formas. Os autores relataram que em plantas industriais o consumo energético e a intensidade de combustão impactam diretamente nos níveis de CO₂, SO₂, NO_x e hidrocarbonetos não metânicos (NMHC). Por outro lado, as emissões de CO e CH₄ são fortemente dependentes da eficiência do processo de queima, enquanto os ensaios laboratoriais revelaram forte correlação da temperatura de usinagem com as emissões geradas por hidrocarbonetos.

Jullien *et al.* (2006) conduziram estudo de correlação entre emissões de poluentes e o reuso de pavimentos asfálticos reciclados. As avaliações em campo mostraram um aumento proporcional nas emissões de HPA e COV conforme a adição de 10, 20 e 30% de material fresado na composição de misturas asfálticas. Por outro lado, outras pesquisas têm destacado uma carência na representatividade de dados atmosféricos relacionados a produção de misturas asfálticas em condições controladas (Gaudefroy *et al.*, 2010).

Nos últimos anos a aplicação de revestimentos asfálticos nas camadas de rolamento tem passado por um grande processo de mudança que envolve a composição estrutural, tecnologias de construção, reduções de custos, condições ambientais e até mesmo a reciclagem de materiais (Liu *et al.*, 2020).

Neste contexto, organizações privadas e governamentais têm estimulado a incorporação e uso de diversos materiais residuais, destacando-se a reutilização de pavimentos asfálticos recuperados (RAP), comumente conhecidos como fresado, além de diversos sub-produtos como borrachas de pneus inservíveis, polímeros, fibras de celulose, cinzas volantes e escórias advindas da produção do aço (Williams; Willis, 2024).

Assim, apesar de notória relevância, o reaproveitamento de resíduos e uso de materiais asfálticos ainda carece de um extensivo monitoramento e avaliação técnica criteriosa a respeito dos reais impactos ao meio ambiente, destacando-se a importância de se monitorar as emissões atmosféricas em condição de usinagem a quente de misturas asfálticas em ambientes industrial (*outdoor*) e laboratorial (*indoor*), o que se constitui na proposta principal de investigação deste trabalho de pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a emissão de poluentes atmosféricos resultantes da usinagem de misturas asfálticas a quente sob condições de processamento em escalas industrial e laboratorial.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os parâmetros meteorológicos locais na área industrial monitorada durante o período de estudo.
- Determinar as concentrações de partículas totais em suspensão (PTS) e material particulado inalável (MP₁₀) emitidas durante a usinagem de misturas asfálticas em ambiente industrial (outdoor).
- Estimar as concentrações de materiais particulados (MP_{2.5}, MP₁₀ e PTS) e dióxido de carbono (CO₂) emitidas sob condições controladas e não controladas de usinagem de misturas asfálticas em ambiente laboratorial (indoor).
- Investigar o efeito da adição de pavimento asfáltico recuperado (RAP) no perfil das emissões atmosféricas usinadas a quente em ambiente laboratorial sob condições ambientais controladas.
- Avaliar o conforto térmico em ambiente laboratorial durante a usinagem de misturas asfálticas considerando os parâmetros de temperatura e umidade relativa do ar.
- Quantificar os níveis de metais (Ca, Mg, Zn, Pb, Ni e V) e benzo(a)pireno associados ao material particulado amostrado durante o processamento de misturas asfálticas em ambientes industrial e laboratorial.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Pavimentação asfáltica

A atividade de pavimentação é o processo de criação e manutenção de uma estrutura superficial uniforme revestida, sendo composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir da fundação de um corpo estradal (Balbo, 2007). Os pavimentos asfálticos são constituídos por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. A camada de revestimento, além de impermeabilizar o pavimento, deve resistir as ações de cargas e intemperismos climáticos (Bernucci *et al.*, 2022).

Na execução de uma camada de revestimento consome-se uma elevada quantidade de matéria-prima petrolífera e mineral. O ligante asfáltico constitui-se como um componente essencial utilizado em pavimentação, sendo este caracterizado como um resíduo de fundo proveniente do processo da destilação fracionada e refinamento do petróleo cru (IA, 2001; Madureira, 2023). Apesar de sua importância o ligante asfáltico pode gerar poluentes atmosféricos durante toda a sua cadeia de produção relacionado as etapas de extração, transporte, armazenamento, usinagem asfáltica e aplicação em campo (Piracelli *et al.*, 2020; Qu *et al.*, 2021).

Em geral, um revestimento asfáltico tem seu percentual em massa constituído em torno de 95 % por agregado mineral e 5% de ligante, com eventuais adições de aditivos. O termo agregado é genericamente utilizado para designar areias, pós de pedra, cascalhos e rochas minerais britadas destinadas ao segmento da construção e pavimentação. Além destes componentes naturais, também é possível o uso de agregados reciclados e artificiais (DNIT, 2006; Leite *et al.*, 2021).

3.2 Composição química dos materiais asfálticos

3.2.1 Agregados

Os agregados naturais utilizados na produção de misturas asfálticas apresentam uma estrutura mineralógica complexa em sua composição. A sílica (quartzo) está entre os mais importantes minerais encontrados nas rochas, juntamente do feldspato (na forma de ortoclásio e plagioclásio), minerais ferromagnesianos (muscovita, vermiculita), carbonáticos (calcita e dolomita) e argilosos (ílit, caulinita e montmorilonita) (Roberts *et al.*, 1996).

Em geral, muitos destes minérios podem conter compostos sujeitos a oxidação, hidratação e carbonatação (Baganpadde; Isacson; Kiggundu, 2005; Cala, 2019).

Nos últimos anos, diversos estudos têm caracterizado materiais agregados e verificado a respectiva correlação de efeitos no comportamento mecânico de misturas asfálticas. Entretanto, ainda é incipiente a avaliação das emissões de material particulado inalável contendo óxidos metálicos adsorvidos em superfície e seus efeitos toxicológicos na saúde das pessoas (Vega *et al.*, 2001; Yarkin; Bayran, 2008; Adolfo *et al.*, 2022).

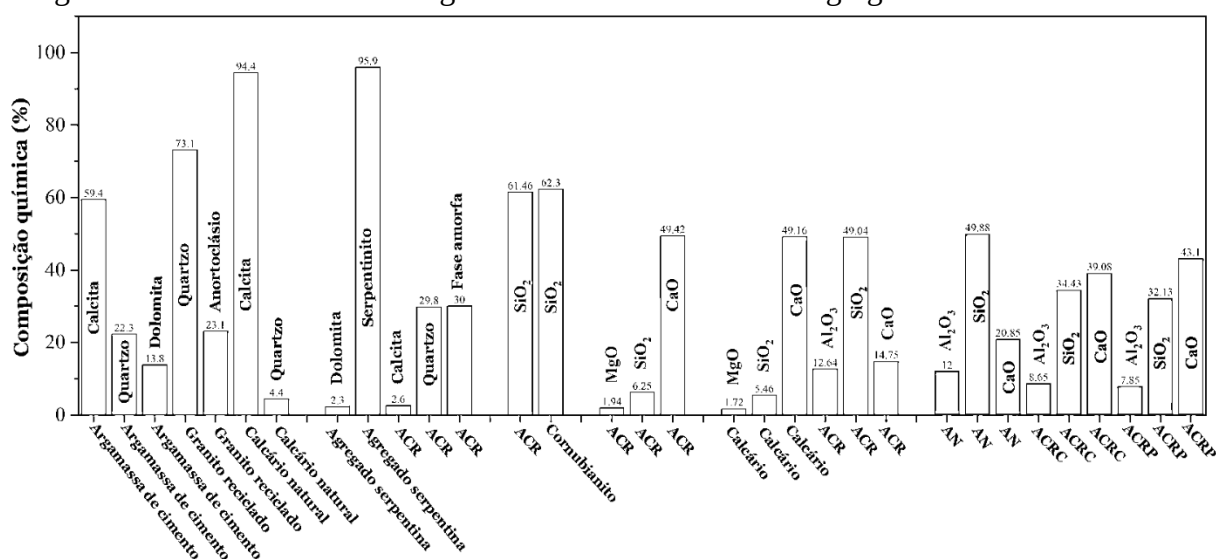
Os agregados artificiais, por sua vez, são tidos como materiais utilizados com o intuito de maximizar o desempenho físico, mecânico e econômico das misturas asfálticas e são provenientes de resíduos de processos industriais, como exemplo da escória de aciaria e alto-forno, argila calcinada e demais subprodutos da indústria do aço. Por outro lado, os materiais reciclados podem advir de entulhos de demolição e construção, produtos da fresagem de pavimentos existentes (*Reclaimed Asphalt Pavement – RAP*), cinzas volantes de incineradores, borrachas de pneus inservíveis e demais materiais sintéticos recicláveis (Balbo, 2007; Leite *et al.*, 2021; Bernucci *et al.*, 2022).

Atualmente, têm-se observado uma crescente busca por soluções ambientalmente sustentáveis e um constante interesse na substituição dos agregados naturais por materiais alternativos. Neste contexto, muitos estudos têm considerado o aproveitamento de subprodutos de processos industriais, assim como de demais resíduos advindos da construção e pavimentação. Além disso, destaca-se a utilização de escórias de aciaria e alto-forno como material agregado em obras viárias e a possibilidade do uso de resíduos da construção e demolição (RCD) em misturas asfálticas (Freitas; Motta, 2008; Quintana; Farias; Lizcano, 2018; Sánchez-Cotte *et al.*, 2020).

Em relação aos resíduos siderúrgicos, estes podem apresentar elevados níveis de óxidos de cálcio, magnésio, alumínio, ferro e quantidades traço de demais elementos devido ao grande volume de fundentes (calcário e dolomita) e de coque necessários na redução do minério de ferro (Quintana; Chaves-Pabón; Escobar, 2018; Costa; Fernandes; Souza, 2019). Os RCD, por sua vez, possuem uma composição heterogênea e usualmente contêm restos de tijolos, concreto, cerâmica, tinta, aço, vidro e plástico, entre outros materiais (Tang *et al.*, 2021).

A Figura 1 exibe o percentual mineral e a relação de óxidos metálicos encontrados em diferentes materiais agregados naturais e reciclados.

Figura 1 — Percentual mineralógico de óxidos metálicos em agregados naturais e reciclados



Legenda: AN - Agregado natural; ACR – Agregado de concreto reciclado; ACRC – Agregado de concreto reciclado de construção; ACRP – Agregado de concreto reciclado de pavimentação.

Fonte: Adaptado de Tang *et al.* (2021).

3.2.2 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O ligante asfáltico ou cimento asfáltico de petróleo (CAP) é caracterizado como um material semissólido, viscoso, de aspecto vítreo e coloração negra intensa a marrom muito escuro. Por natureza, assume a propriedade de um adesivo termoviscoplástico de comportamento reológico complexo, sendo semissólido a baixas temperaturas, viscoelástico em temperatura ambiente e fluido a temperaturas elevadas (Li, G. *et al.*, 2024; Pipintakos *et al.*, 2024).

Os CAP apresentam uma boa flexibilidade, relativa durabilidade e razoável resistência à maior parte dos ácidos, álcalis e sais, além de ser insolúvel em água. Em sua composição possuem em torno de 90 a 95% de hidrocarbonetos e 5 a 10% de heteroátomos de nitrogênio, oxigênio, enxofre e metais (Bernucci *et al.*, 2022). Após o carbono e hidrogênio, o enxofre aparece como o terceiro elemento químico mais abundante em massa nos ligantes asfálticos, sendo encontrado principalmente nos compostos de massa molar elevada na forma de sulfetos, tiofenos e sulfóxidos (Mirwald *et al.*, 2020).

Em relação aos compostos metálicos, pode-se observar, ainda que em menor quantidade, a presença de níquel, ferro e vanádio, além de traços de demais elementos como silício, alumínio, cromo, cobre, zinco e chumbo. O níquel e vanádio, particularmente, aparecem em maior proporção como constituintes na forma de quelatos de metaloporfirinas (Speight, 2006; Shell, 2015).

A composição de um ligante pode variar significativamente de acordo com o tipo de petróleo ao qual foi originado, assim como por modificações físico-químicas induzidas durante o processo de refino, armazenamento (envelhecimento) e usinagem (Balbo, 2007).

A Tabela 1 exibe o conteúdo mássico elementar dos componentes asfálticos a partir de análises conduzidas em ligantes de diversas fontes.

Tabela 1 — Análise elementar em ligantes asfálticos

Elemento Químico						
	Carbono (% p/p)	Hidrogênio (% p/p)	Nitrogênio (% p/p)	Enxofre (% p/p)	Oxigênio (% p/p)	Níquel (ppm)
Faixa	80,2 – 84,3	9,8 – 10,8	0,2 – 1,2	0,9 – 6,6	0,4 – 1,0	10 – 139
Média	82,8	10,2	0,7	3,8	0,7	83
	Ferro (ppm)	Manganês (ppm)	Cálcio (ppm)	Magnésio (ppm)	Sódio (ppm)	Razão Atômica (H/C)
Faixa	5 – 147	0,1 – 3,7	1 – 335	1 – 334	6 – 159	1,42 – 1,50
Média	67	1,1	118	26	63	1,47

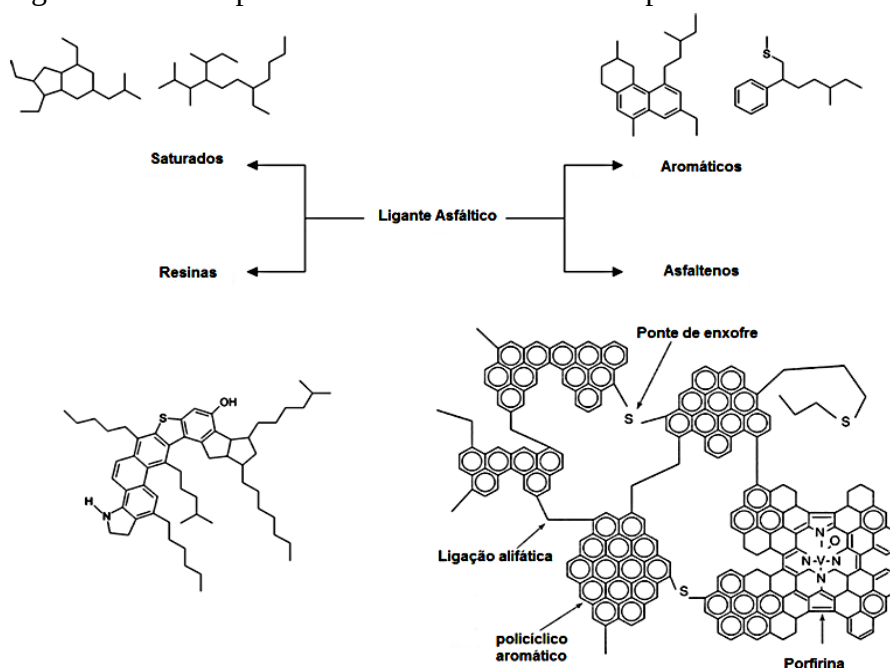
Fonte: Shell (2015).

Em termos simplificados, os constituintes do ligante podem ser divididos em 2 classes de compostos: asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos apresentam-se como a fração sólida dispersa na massa asfáltica, conferindo cor característica e propriedade de dureza ao material. Por outro lado, os maltenos atuam como óleo ou veículo e subdividem-se em hidrocarbonetos saturados (parafínicos), naftênicos, aromáticos e resinas (Nicholls, 1998; Fakher *et al.*, 2020).

Os hidrocarbonetos saturados possuem maior estabilidade química e resistem melhor a ocorrência de mecanismos oxidativos, enquanto a maior parte dos aromáticos tende a se oxidar parcialmente para dar lugar às resinas. Estas, por sua vez, convertem-se em moléculas de asfaltenos ao ter oxidada sua fração mais pesada (Li, G. *et al.*, 2024). Tais transformações químicas são por vezes induzidas ou aceleradas por meio da atuação de agentes externos como a incidência de radiação solar, derramamento de óleos, solventes, combustível e ação de águas ácidas ou sulfatadas (Balbo, 2007).

A Figura 2 exibe o arranjo molecular dos principais hidrocarbonetos presentes nos asfaltos.

Figura 2 — Principais classes de hidrocarbonetos presentes no asfalto



Fonte: Adaptado de Gasthauer *et al.* (2008).

Os hidrocarbonetos asfálticos saturados são tidos como óleos viscosos não polares de coloração amarelo palha ou incolor que possuem peso molecular médio entre 470 e 880 g/mol, representando cerca de 5 a 20% da massa total do ligante. Já os compostos aromáticos são formados por cadeias de carbono apolares ligadas a sistemas de anéis insaturados, possuindo aspecto negro amarronzado, relativo peso molecular (570 a 980 g/mol) e compreendem de 40 a 65% da massa do ligante (Stratiev *et al.*, 2019).

As resinas constituem a fração asfáltica intermediária (5 a 50%), sendo as principais responsáveis pelas características internas de adesividade. Na maioria dos casos, apresentam aspecto entre sólido e semissólido, natureza levemente polar e peso molecular situado entre 780 e 1400 g/mol. Por fim, os asfaltenos destacam-se como a classe de compostos altamente polares, com peso molecular médio variando de 800 a 3500 g/mol. Os asfaltenos representam de 5 a 25% da massa total do ligante asfáltico e exercem um significativo efeito nas funções reológicas do material (Zhang *et al.*, 2020; Duarte; Faxina, 2021).

3.3 Usinagem asfáltica

De acordo com a tecnologia de produção adotada, o processamento industrial de misturas asfálticas pode ser realizado em usinas de fluxo contínuo ou em batelada. Em plantas de mistura em batelada um volume predeterminado de agregado frio é mensurado diretamente

de pilhas de estocagem para o descarregamento em caixas dosadoras. O processo segue com a alimentação do tambor secador/aquecedor, que possui a função de retirar umidade e elevar a temperatura do material para uma faixa ótima ajustada (Roberts *et al.*, 1996; US Army Corps of Engineers, 2000).

Posteriormente, o agregado aquecido, finos (pós de pedra e *filler*) e ligante asfáltico aquecido são introduzidos em uma câmara de mistura composta de lâminas angulares interiores denominada de *pug-mill* (Malaxador) (Rubio *et al.*, 2013). Em geral, o teor de água residual nos agregados pode chegar a 5% em peso do material seco. Logo, a secagem torna-se necessária para permitir a perfeita adesão de uma fina camada de ligante asfáltico e o preenchimento de vazios entre os grãos (Shell, 2015).

Os processos de mistura contínuos (*Drum-mix*) podem ser divididos em sistemas de fluxo paralelo ou contrafluxo. Em sistemas de fluxo paralelo os agregados aquecem e fluem paralelamente na mesma direção dos gases produzidos pela chama de um queimador interno (Sivilevičius; Šukevičius, 2009).

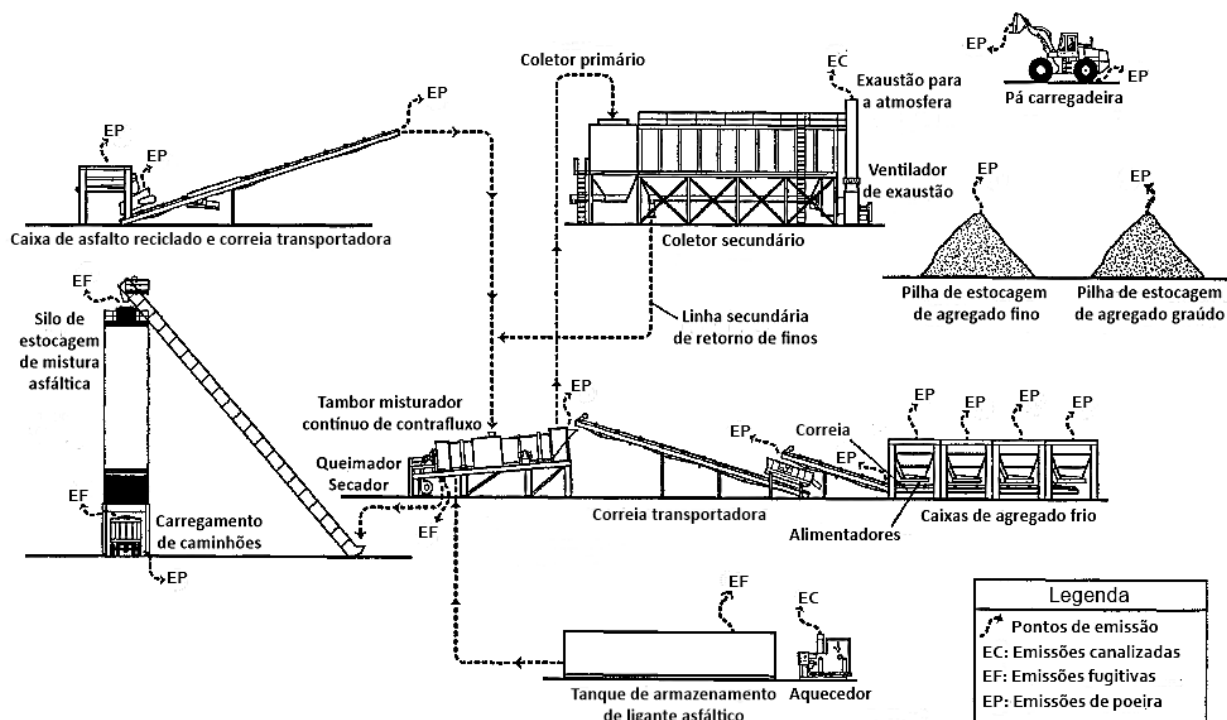
Alternativamente, em usinas de mistura em contrafluxo, o material agregado frio é inserido pela extremidade superior de um tambor rotativo inclinado em um ângulo entre 3 e 4 graus da posição de seu eixo, sendo então conduzido através dos gases de exaustão por meio de canaletas de aço posicionadas em seu percurso interior. O ligante asfáltico, por sua vez, é mantido aquecido em tanques de armazenamento numa temperatura inferior à dos agregados, sendo rapidamente pulverizado e misturado com os mesmos na seção de mistura fora do alcance da chama e da corrente dos gases aquecidos, atrás ou abaixo do queimador (EAPA, 2007; Shell, 2015).

A mistura na saída torna-se necessária para evitar a brusca elevação da temperatura no contato do ligante com os agregados, o que pode ocasionar oxidação excessiva e demasiada perda nas propriedades desejáveis da mistura (Zaumanis; Mallick; Frank, 2014; Yonar *et al.*, 2010). Em geral, ensaios laboratoriais são previamente conduzidos para a definição de parâmetros operacionais referentes ao tempo de mistura, temperatura de usinagem e de proporção de agregados (Rathore; Zaumanis, 2020).

Devido às características inerentes de processamento dos insumos, a operação de usinagem de misturas asfálticas é notadamente reconhecida como uma atividade de potencial impacto ambiental. Para ambos os sistemas de produção verifica-se a existência de diversas fontes de emissão de particulados, bem como um elevado lançamento de fumos e gases voláteis contendo uma gama de compostos orgânicos e inorgânicos (Kharat, 2022; Sun *et al.*, 2024). As

formas de emissão para tais instalações podem ser divididas entre emissões abertas de material particulado, fugitivas e canalizadas, conforme o diagrama ilustrado na Figura 3.

Figura 3 — Diagrama de emissões em usina de mistura asfáltica contínua de contrafluxo



Fonte: Adaptado de US EPA (2004).

As emissões fugitivas resultam diretamente de fontes abertas ou escapes do processo, sendo em geral constituídas por uma combinação de material particulado (MP) e de poluentes gasosos. Por outro lado, as emissões canalizadas estão relacionadas aos sistemas de ventilação, controle de fluxo, limpeza e filtragem de gases, sendo frequentemente reconhecidas como aquelas lançadas para a atmosfera através de chaminés, respiradouros e dutos aéreos (Liu, 2021).

Os sistemas de exaustão de tambores rotativos aparecem como uma significativa fonte de emissões canalizadas, enquanto o fluxo constante de veículos e atividades de carregamento, descarregamento, triagem, manuseio e processamento de agregados destacam-se como meios para emissões fugitivas em muitas plantas industriais (US EPA, 2000; Kharat, 2022).

3.4 Emissões asfálticas

O segmento industrial da pavimentação atrai uma atenção peculiar referente a qualidade do ar devido ao elevado uso de combustível e materiais asfálticos aquecidos. Entre os poluentes

mais comuns relacionados a esta atividade, incluem-se: fumos de asfalto, material particulado (MPs), metais (associados aos particulados), dióxido e monóxido de carbono (CO_2 e CO), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COV) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) (Thives; Ghisi, 2017; Liu, 2021; Monteleone *et al.*, 2024).

3.4.1 Fumos asfálticos

Os fumos asfálticos estão diretamente relacionados as operações de aquecimento. As emissões são formadas principalmente por compostos gasosos adsorvidos e aerossóis finos de partículas orgânicas condensadas (IARC, 2013). Tais partículas são originadas pelo resfriamento de vapores orgânicos lançados durante o processo de mistura do asfalto. A nuvem formada é composta basicamente por uma complexa dispersão de material particulado, pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio e compostos orgânicos voláteis não condensados (Guimarães, 2005; AI; Eurobitume, 2024).

A quantidade de aerossol emitido depende em grande parte da temperatura de contato do ligante com os agregados. Emissões visíveis são normalmente iniciadas a 150 °C e geralmente dobram para cada 12 °C de incremento na temperatura do material (Shell, 2015). O contato e exposição a estes fumos e vapores pode desencadear reações adversas como irritações nos olhos, irritações de mucosas nasais e alvéolos pulmonares, dificuldades para respirar, dores de cabeça, tontura e náusea (NIOSH, 2000).

O NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) atua na regulação de dados disponíveis sobre os efeitos de exposição ocupacional a fumos poluentes, e particularmente, recomenda um limite de 5 mg/m^3 no ar de fumos asfálticos, desde que medidos como particulado total durante qualquer série de quinze minutos. No Reino Unido, este mesmo limite é estabelecido para uma jornada de 8 h de trabalho (NIOSH, 2000; Sandaka; Gouveia; Senger, 2018; HSE, 2020). Em 2011, a agência internacional de pesquisa sobre o câncer (IARC) classificou a exposição aos fumos asfálticos como possivelmente carcinogênico a humanos (Grupo 2B) (IARC, 2013; Moo *et al.*, 2019).

3.4.2 Material particulado

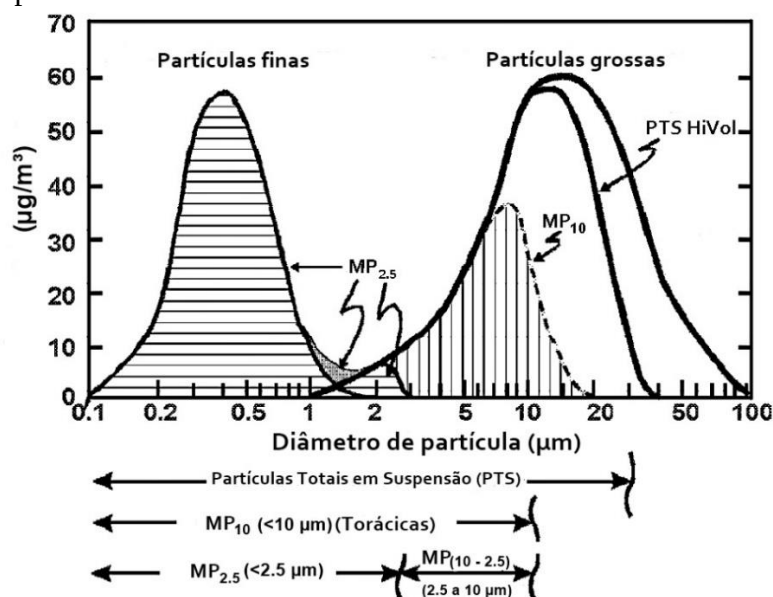
O material particulado (MP) consiste de uma mistura de partículas sólidas e gotículas líquidas capazes de permanecerem suspensas no ar por longos períodos, podendo variar em

tamanho microscópico, composição e origem. Com base em sua origem, o material particulado pode ser classificado como primário ou secundário (Panyacosit, 2000).

As partículas primárias são emitidas na atmosfera a partir de uma fonte de geração em atividades como a mineração, construção, processos industriais e tráfego de veículos. Por outro lado, as partículas secundárias são formadas pelo resultado de reações gasosas sob condições atmosféricas. Entre os principais gases envolvidos na formação de partículas secundárias estão os óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH_3) e compostos orgânicos voláteis (COV) (Nagar; Akolkar; Kumar, 2014).

O particulado em suspensão pode ser classificado de acordo com o seu tamanho em diferentes categorias. As partículas inaláveis (MP_{10}) são as que detêm diâmetro aerodinâmico médio de corte situado entre 2,5 e 10 μm , enquanto as partículas respiráveis finas ($\text{MP}_{2.5}$) apresentam diâmetros iguais ou menores que 2,5 μm . Em adição, também podem ser encontradas no ar frações de partículas ultrafinas ($\text{MP}_{0.1}$), com diâmetros inferiores a 0,1 μm . O particulado total em suspensão (PTS) abrange em grande parte todas as faixas destas partículas (Wilson; Suh, 1997; US EPA, 2020). Na Figura 4 encontra-se representada uma distribuição idealizada, caracterizando a divisão normalmente observada dos particulados aerotransportados.

Figura 4 — Relação de distribuição das frações de particulados



Fonte : Adaptado de Wilson e Suh (1997).

Segundo Foster (1999), mecanismos primários e secundários determinam o processo de deposição dos particulados. A deposição primária refere-se aos movimentos ditados pela forma,

tamanho e densidade, incluindo a sedimentação, impactação inercial ou difusão (movimento Browniano). Os mecanismos secundários são mais dependentes da carga e reatividade das partículas, resultando em fenômenos superficiais de interceptação e atração eletrostática.

Quanto menor o diâmetro dos particulados, maiores são os riscos de danos à saúde, pois são capazes de penetrar em qualquer área do trato respiratório. O material particulado inalável (MP_{10}) se deposita preferencialmente nas mucosas das vias aéreas superiores. Em contrapartida, as partículas finas ($MP_{2.5}$) invadem a traquéia e chegam facilmente aos alvéolos pulmonares. Já os particulados ultrafinos ($MP_{0.1}$) são os que representam maior risco, devido sua capacidade de ultrapassar a membrana capilar alveolar e adentrar na corrente sanguínea (Schraufnagel *et al.*, 2019; Zoran *et al.*, 2020).

Diversos estudos têm evidenciado que a superfície dos materiais particulados pode adsorver uma série de substâncias tóxicas e conter desde íons inorgânicos (amônio, cloreto, nitratos, sulfatos, sódio, potássio, magnésio e cálcio) a compostos orgânicos (COV e HPA), biológicos (endotoxinas e fragmentos celulares) e elementos metálicos (ferro, cobre, níquel, chumbo, zinco e vanádio) (WHO, 2013; Yang *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2022).

Os materiais particulados são frequentemente considerados como um grupo quimicamente complexo, pois são capazes de carrear várias dessas substâncias e disseminá-las no ar. Portanto, o efeito adverso dos particulados envolve outros poluentes e suas possíveis ações interativas. Em virtude de suas características químicas, a exposição aos particulados tem sido associada a muitos distúrbios e feitos deletérios que envolvem principalmente sintomas respiratórios, doenças pulmonares, cardiovasculares e câncer (Losacco; Perillo, 2018; Singh; Tripathi, 2021).

3.4.3 Dióxido de carbono

O dióxido de carbono (CO_2) é um gás de grande importância no ciclo biogeoquímico do carbono. Na temperatura e pressão normais apresenta-se como um gás inodoro, incolor e mais pesado que o ar (Nanthakumar; Sakthikumaran; Sivashankar, 2018). Este gás pode ser emitido tanto de forma natural por meio da respiração, fermentação e decomposição orgânica quanto por atividades humanas através da queima de combustíveis fósseis, desmatamentos e queimadas (Eldesouki; Rashed; El-Moneim, 2023).

A presença de CO_2 na atmosfera contribui de forma significativa para o efeito estufa através da retenção de energia dos raios ultravioleta, resultando em um aumento substancial da

temperatura global. O CO₂ exerce grande impacto nas mudanças climáticas e contribui para a formação dos chamados poluentes secundários (Afifa *et al.*, 2024).

Os impactos ambientais do aumento das concentrações de CO₂ são profundos e abrangem alterações climáticas, acidificação dos oceanos e perdas na biodiversidade. As mudanças climáticas impulsionadas pelo CO₂ também provocam elevação das temperaturas médias, alterações nos padrões de precipitação e eventos climáticos extremos (Prentice *et al.*, 2021; Eldesouki; Rashed; El-Moneim, 2023).

As emissões de CO₂ em usinas de produção asfáltica estão diretamente relacionadas ao tipo de combustível utilizado, consumo energético necessário para a retirada de umidade residual dos agregados e aquecimento dos tanques de armazenamento de ligante. Desta forma, os níveis de emissão são predominantemente determinados pela eficiência total do processo (Thives; Ghisi, 2017).

3.4.4 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é caracterizado como um gás totalmente inodoro e incolor, sendo originado como um subproduto da queima incompleta de combustíveis carbonáceos como o petróleo, gasolina, carvão e madeira. Entre os principais contribuintes para a sua emissão em ambientes externos pode-se citar os escapamentos de veículos automotores, caldeiras a vapor e processos industriais de aquecimento. Por outro lado, as fontes internas incluem os aquecedores residenciais, fogões a lenha ou carvão e o uso indevido de geradores elétricos (Levy, 2015).

O CO também é reconhecido por sua elevada reatividade e toxicidade e quando inalado se fixa à emoglobina do sangue com uma afinidade cerca de 234 vezes maior do que o oxigênio, impedindo o transporte e a liberação de moléculas de oxigênio para as células. A dor de cabeça, náusea, confusão, esturpor e coma estão entre os principais sinais de envenenamento agudo por monóxido de carbono (Widdop, 2002; Baird; Cann, 2011).

3.4.5 Dióxido de enxofre

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás incolor com um odor pungente característico, sendo principalmente associado à queima de combustíveis fósseis em usinas e indústrias, bem como por erupções vulcânicas e processos naturais menores. Apresenta-se como um gás de propriedades químicas e físicas específicas que desempenha um papel significativo na poluição

atmosférica por meio da formação de poluentes secundários e chuva ácida (Roy; Sardar, 2015; Zhong *et al.*, 2020).

A exposição ao dióxido de enxofre pode provocar irritação das vias respiratórias, exacerbar condições crônicas e reduzir a função pulmonar. Ainda, ambientalmente, o SO₂ é um fator chave para a acidificação dos solos e corpos d'água, afetando negativamente a vegetação e a fauna aquática (Orellano; Reynoso; Quaranta, 2021).

3.4.6 Dióxido de nitrogênio

O dióxido de nitrogênio (NO₂) é caracterizado como um poluente gasoso de odor acre e de coloração laranja amarronzada que pode ser produzido através de fenômenos naturais ou ações antropogênicas. As erupções vulcânicas, relâmpagos e ação bacteriológica em processos de decomposição estão entre as principais fontes naturais responsáveis pela geração deste gás. Por outro lado, as maiores fontes antropogênicas incluem os motores a combustão interna de veículos, unidades geradoras de energia térmica e incineradores industriais (Vieira, 2009).

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) podem ser gerados em reações de combustão a elevadas temperaturas, sendo uma parte proveniente do próprio conteúdo de nitrogênio contido no combustível (Simmons; Seakins, 2012). No entanto, a maior parcela das emissões advém do processo de oxidação ocasionado durante a passagem do nitrogênio e oxigênio molecular atmosférico em chamas de elevadas temperaturas (Baird; Cann, 2011).

Em usinas de asfalto as emissões de NO_x são produzidas principalmente a partir da chama do queimador no tambor secador. Em grande parte, os níveis de dióxido de nitrogênio emitidos depende do tipo de combustível utilizado, da quantidade de ar em excesso no tambor de secagem, da temperatura da chama e do tipo de queimador (Florkova; Sedivy; Pastorkova, 2021).

Diversos estudos têm investigado em campo a influência da radiação ultravioleta (UV), umidade e da temperatura no envelhecimento de camadas asfálticas. Estes fatores influenciam os processos químicos que ocorrem na superfície do pavimento asfáltico durante o seu envelhecimento e, portanto, espera-se que emissões de compostos gasosos pelos materiais asfálticos também sejam sensíveis a tais parâmetros, uma vez que espécies contendo nitrogênio e oxigênio estão naturalmente presentes no ligante (Villegas-Villegas *et al.*, 2018; Gratsea *et al.*, 2021; Lasne *et al.*, 2023).

O NO₂ é um precursor para particulados finos, dando origem a aerossóis de nitrato ao reagir na atmosfera com outros gases. Este poluente também tem seu ciclo atmosférico

intimamente associado a formação de ozônio troposférico (O_3), pois libera oxigênio atômico reativo ao ser incidido pelos raios de luz ultravioleta. Além disso, é capaz de gerar chuva ácida devido a formação de ácido nítrico (HNO_3) através da reação com radicais hidroxila (Vallero, 2014; Mohajan, 2018). A exposição ao NO_2 tem sido associada a ocorrências de internações hospitalares envolvendo bronquite em crianças asmáticas, doença crônica obstrutiva pulmonar e problemas cardiovasculares, além da elevação nos índices de morbidez e mortalidade (Kraft *et al.*, 2005; Zhang; Wang; Lu, 2018; Meng *et al.*, 2021).

3.4.7 Compostos orgânicos voláteis (COV)

Os compostos orgânicos voláteis compreendem uma variedade de hidrocarbonetos que na temperatura e pressão ambiente possuem baixo ponto de ebulição e pressão de vapor acima de 0,01 kPa a 20 °C, sendo intensamente liberados na atmosfera por meio da manipulação de substâncias e processos de aquecimento (Irga *et al.*, 2024; Mangotra; Singh, 2024). As emissões de COV podem abranger desde hidrocarbonetos aromáticos como BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) a hidrocarbonetos halogenados (tricloroetileno e tetracloroetileno), hidrocarbonetos policíclicos (HPA), compostos sulfurados, nitrogenados e oxigenados (formaldeído) (Yadav; Pandey, 2018; Wang *et al.*, 2018; Chang *et al.*, 2022).

Os compostos presentes nas emissões de COV podem agir como precursores na formação de ozônio troposférico (O_3), material particulado fino ($< MP_{2.5}$) e aerossóis orgânicos secundários através de reações fotoquímicas na atmosfera com óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e amônia (NH_3) (Mohammed; Saleh, 2023). Emissões de COV podem ser produzidas quando a temperatura de aquecimento do ligante atinge o ponto de ebulição, ocasionando a volatilização de componentes presentes na matriz asfáltica. Ainda, diferentes substâncias podem reagir entre si ou oxidar-se na presença de oxigênio para tornarem-se mais voláteis (Chang *et al.*, 2022). Diversos efeitos crônicos e agudos como irritações de pele, dores de cabeça, problemas cardiovasculares, neurotóxicos, respiratórios e câncer têm sido atribuídos a exposição aos COV (Irga *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025).

3.4.8 Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA)

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos representam uma classe de compostos orgânicos que contém dois ou mais anéis benzênicos conjugados em sua estrutura, sendo

capazes de se volatilizar através de processos de combustão de materiais carbonáceos em elevadas temperaturas (Alegbeleye; Opeolu; Jackson, 2017).

As erupções vulcânicas e incêndios florestais são as duas maiores fontes naturais de lançamento de HPA na atmosfera. Entre as contribuições antropogênicas estão incluídos os processos de combustão e aquecimento realizados em plantas industriais, refinarias de petróleo, usinas de energia térmica, produção de coque, motores veiculares, derramamentos de óleo e gasolina e fumaças de churrasco e cigarro (Bansal; Kim, 2015; Dat; Chang, 2017).

Os HPA podem estar presentes no ar tanto na fase gasosa como adsorvidos aos particulados. Em geral, as moléculas de baixo peso molecular compostas por dois a três anéis aromáticos ocorrem predominantemente na fase vapor, enquanto as de cinco e seis anéis estão em sua maior parte associadas às partículas. Os HPA de peso molecular intermediário (quatro ou mais anéis aromáticos) encontram-se divididos tanto na fase gás quanto na particulada, sendo este comportamento regulado pela natureza das emissões e condições ambientais como a pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa (Abbas *et al.*, 2018; Munyeza; Rohwer; Forbes, 2019).

Os HPA são altamente tóxicos e têm sido associados a efeitos adversos à saúde, incluindo carcinogenicidade, problemas respiratórios, anormalidades metabólicas, mutações e câncer em múltiplos órgãos (Kim *et al.*, 2013; Venkatraman *et al.*, 2024).

Devido ao seu potencial efeito adverso aos ecossistemas, a agência de proteção ambiental dos estados unidos (US EPA) identificou como prioritários 16 moléculas de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, representadas por: naftaleno, acenaftaleno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)antraceno, benzo(g,h,i)perileno e indeno(1,2,3-cd)pireno (Dat; Chang, 2017; Venkatraman *et al.*, 2024).

Em geral, os efeitos adversos dessas substâncias na saúde pode ser relacionado a estimativas de levantamento do potencial toxicológico segundo um fator de equivalência tóxica (TEF). Em particular, a molécula de benzo(a)pireno (BaP) é considerada como um importante marcador da exposição total aos HPA devido ao seu destacado potencial carcinogênico (Nisbet; Lagoy, 1992; Bukowska; Mokra; Michalowicz, 2022).

Embora os HPA de menor peso molecular sejam menos tóxicos, eles são capazes de reagir com outros poluentes gasosos como óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre e ozônio para formar compostos ácidos e hidrocarbonetos policíclicos derivados de caráter danoso (Kim *et al.*, 2013; Abbas *et al.*, 2018).

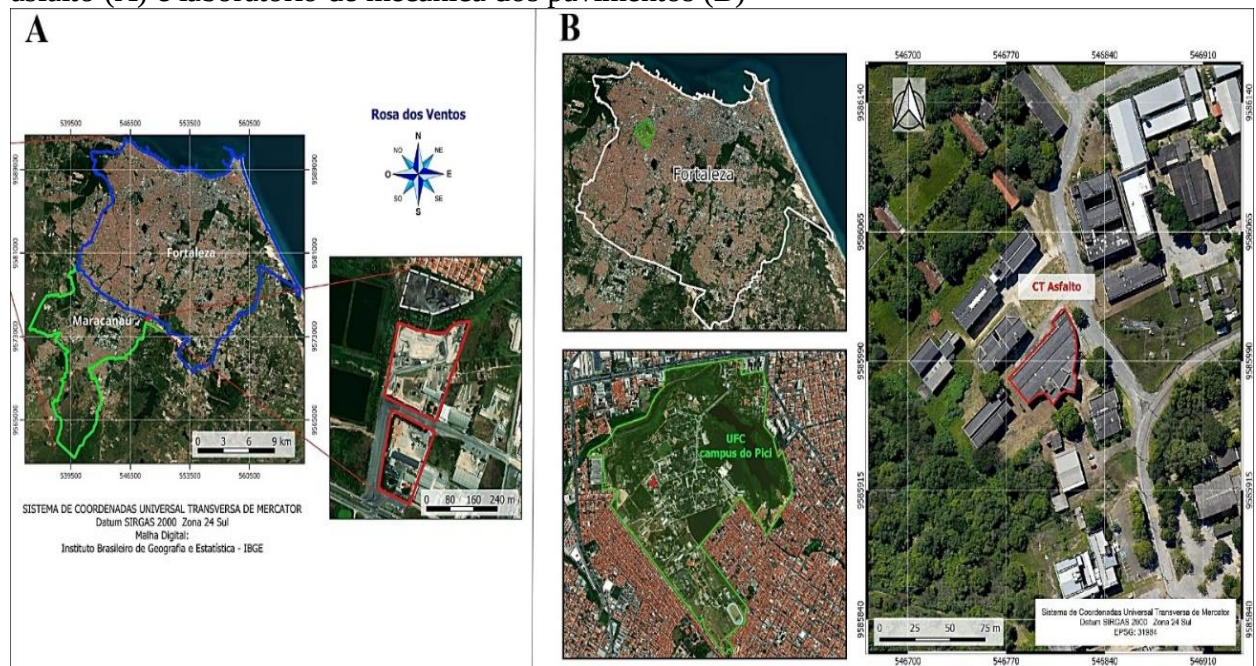
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Locais de estudo

O monitoramento das emissões relativas ao processamento de materiais asfálticos foi conduzido tanto a nível interno (*indoor*), nas dependências de um Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) de uma universidade pública, quanto em ambiente externo (*outdoor*) em uma indústria de usinagem asfáltica. O LMP faz parte do Centro de Tecnologia em Asfalto Norte/Nordeste da Universidade Federal do Ceará (UFC) e desenvolve estudos de infraestrutura de transportes por meio da caracterização de materiais, formulação de misturas asfálticas e ensaios mecânicos, sendo estruturado em três subunidades de pesquisa: Laboratório de Química e Reologia de Ligantes Asfálticos, Laboratório de Solos e Laboratório de Misturas Asfálticas e Ensaios Mecânicos, onde particularmente o monitoramento das emissões em ambiente interno foi realizado. A indústria em questão atua em serviços de pavimentação asfáltica, fresagem de pavimentos, restauração e manutenção de rodovias, possuindo sua matriz localizada em Maracanaú, cidade da Região Metropolitana de Fortaleza.

A Figura 5 mostra a localização dos espaços de amostragem *outdoor* e *indoor*.

Figura 5 — Localização geográfica dos espaços de amostragem representados pela indústria de asfalto (A) e laboratório de mecânica dos pavimentos (B)



Fonte: Autor (2025).

4.2 Condições de produção de misturas asfálticas

4.2.1 Usinagem de misturas asfálticas em escala industrial

A usinagem industrial de misturas asfálticas foi realizada em uma usina de produção contínua (*Drum-mix*) de atuação em contrafluxo, que usa óleo pesado e gás natural como combustível para aquecimento dos insumos (ligante asfáltico e agregados) e com uma capacidade máxima de produção de 160 toneladas por hora (Alcantara *et al.*, 2023). O pátio industrial conta com uma área a céu aberto para armazenamento temporário do material britado e reciclado, pás carregadeiras, 4 caixas dosadoras de agregados, correia transportadora de alimentação, 1 caixa lateral adaptada para aproveitamento de pavimentos asfálticos fresados recuperados (RAP), dois tanques para armazenamento de CAP, tambor secador/misturador, unidade filtrante de particulados e um silo revestido para estocagem do asfalto produzido (Figura 6).

Figura 6 — Pátio industrial de processamento das misturas asfálticas na empresa em estudo



Fonte: Autor (2025).

O processo de usinagem tem início a partir do carregamento mecânico das caixas de agregados por meio de pás carregadeiras. Cada classe granular de agregados é disposta separadamente dentro de tremonhas para a adequada dosagem dos insumos na correia transportadora que controla o fluxo de alimentação na parte superior do tambor secador/aquecedor. O material segue conduzido em contrafluxo no tambor através de aletas e canais internos para a homogeneização e infiltração dos gases produzidos pela chama. O aquecimento e retirada de umidade residual é realizado na temperatura média de 160 °C na

primeira seção do secador, sendo o ligante asfáltico pulverizado na porção final do misturador. Uma unidade filtrante é responsável pela coleta e retorno de partículas finas ao processo. No caso da demanda de produção de misturas asfálticas com incremento de pavimento asfáltico recuperado (RAP), o processamento é realizado com a alimentação do mesmo na porção central do tambor secador. Segundo Barbosa (2019), o teor de CAP, brita e pó de pedra são balanceados por meio da caracterização prévia do material fresado quando utilizado, sendo a compensação realizada pelo operador local no momento da usinagem.

4.2.1.1 Monitoramento outdoor dos poluentes atmosféricos

Para o monitoramento dos poluentes atmosféricos durante a usinagem industrial de misturas asfálticas (*outdoor*) utilizou-se amostradores de grandes volumes HiVol HVS-3000 da Ecotech Ltda equipados com cabeças de separação inercial de partículas (*inlets*). Os equipamentos foram ajustados para uma vazão média de $1,13 \text{ m}^3/\text{min}$ ($67,8 \text{ m}^3/\text{h}$) e logo em seguida aparelhados com filtros de fibra de vidro com dimensões de 254 mm de comprimento e 203 mm de largura. Os pontos de monitoramento externo foram definidos a partir de recomendações de segurança da equipe técnica da empresa visando a devida proteção dos amostradores. Os equipamentos foram dispostos à 2 metros de distância entre si a fim de evitar interferências durante o procedimento de coleta, conforme recomendado pela US EPA (1999a).

A Figura 7 mostra o posicionamento dos equipamentos no pátio industrial da usina.

Figura 7 — Amostradores HiVol para determinação de particulados (PTS e MP_{10}) no pátio industrial de usinagem asfáltica



Fonte: Autor (2025).

As amostragens foram realizadas em dois períodos, compreendendo uma coleta de 7:00 às 8:00 horas da manhã e outra coleta de 8:30 às 9:30 da manhã para um tempo de amostragem total de 2 horas envolvendo as etapas de processamento dos agregados minerais e usinagem asfáltica. O monitoramento de emissões no momento de inatividade da usina foi conduzido considerando uma coleta individual de 8:30 às 9:30 da manhã. No total, 3 campanhas foram conduzidas no pátio da empresa, totalizando 5 amostras (filtros) coletadas nas datas de 02/04/2024, 12/04/2024 e 25/04/2024, visando o levantamento de parâmetros relativos às partículas totais em suspensão (PTS), material particulado inalável (MP₁₀), benzo(a)pireno e metais (Ca, Mg, Zn, Pb, Ni e V) associados aos particulados. Ademais, para a devida compreensão dos fenômenos de deposição e dispersão, dados meteorológicos de temperatura, precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar, direção e velocidade dos ventos foram descritos a partir da estação automática de monitoramento atmosférico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) situada a cerca de 10 km da empresa. Devido a particularidades operacionais da indústria em estudo não foi possível o levantamento dos traços das misturas usinadas durante o monitoramento.

4.2.2 Usinagem de misturas asfálticas em escala laboratorial

As formulações laboratoriais de misturas asfálticas usinadas à quente foram executadas em um misturador de asfaltos horizontal Solotest[®] (Figura 8). O equipamento segue a norma europeia EN 12697-35 para ensaio de misturas betuminosas, permitindo a homogeneização dos materiais em cuba fechada (CEN, 2016). A cuba possui capacidade útil de 20 litros, temperatura de usinagem controlável e ajuste de rotação dos batedores entre 5 e 35 rpm. Inicialmente, visando a remoção de umidade, os agregados britados, pó de pedra e demais materiais a serem utilizados são especificamente dosados e postos em estufa de secagem na temperatura de compactação requerida para a mistura por um período de 2 horas.

Figura 8 — Misturador batelada usado nos ensaios de preparação de misturas asfálticas



Fonte: Autor (2025).

Paralelamente, para cada mistura, realiza-se a pesagem do teor de ligante (CAP), que é posteriormente aquecimento e homogeneização. Na etapa final a cuba de preparação é alimentada com os agregados secos e o ligante asfáltico aquecido, permanecendo o sistema sob agitação na temperatura determinada para a usinagem até o descarregamento da mistura pronta.

No presente estudo foram avaliados dois perfis de produção de misturas asfálticas. Para um primeiro momento, avaliou-se uma condição de manuseio e usinagem dos materiais sem qualquer interferência nas atividades usualmente executadas no laboratório. Já em uma segunda etapa do monitoramento interno foi estabelecida uma condição de usinagem de misturas asfálticas em regime operacional controlado, o que envolveu a restrição do fluxo de pessoas e ausência de manuseio paralelo de materiais, sistemas mecânicos e químicos nas dependências internas do laboratório.

4.2.2.1 Monitoramento indoor dos poluentes atmosféricos

Em uma primeira etapa do monitoramento em ambiente interno (*indoor*) foram avaliadas as emissões atmosféricas em condições usuais (não controladas) de usinagem laboratorial de misturas asfálticas (sem controle pré-definidos de atividades/ensaios, composição de materiais ou restrição ao fluxo de pessoas). Neste regime de operação foram avaliadas misturas a partir de diferentes proporções de agregados e o uso de um CAP modificado por polímero elastomérico do tipo SBS (estireno-butadieno-estireno) com temperatura de usinagem ajustada para 169,5 °C (Tabela 2).

Tabela 2 — Composição das misturas asfálticas monitoradas em laboratório sob condições operacionais não controladas

Mistura	Traço da mistura			Operação		
	CAP 60/85 (%)	Brita 3/4” (%)	Brita 3/8” (%)	Pó de pedra (%)	Temp. de usinagem (°C)	Tempo (min.)
ONC-1	5,5	38,74	24,57	31,19	169,5	12
ONC-2	5,5	38,74	24,57	31,19	169,5	15
ONC-3	5,0 (+ 0,3 fibra)	40,82	22,63	31,25	169,5	21
ONC-4	5,0	40,82	22,63	31,55	169,5	09
ONC-5	5,2 (+0,3 fibra)	40,73	22,58	31,19	169,5	32
ONC-6	5,0 (+0,3 fibra)	40,82	22,63	31,25	169,5	10

ONC: Operação não controlada, °Temp.: Temperatura.

Fonte: Autor (2025).

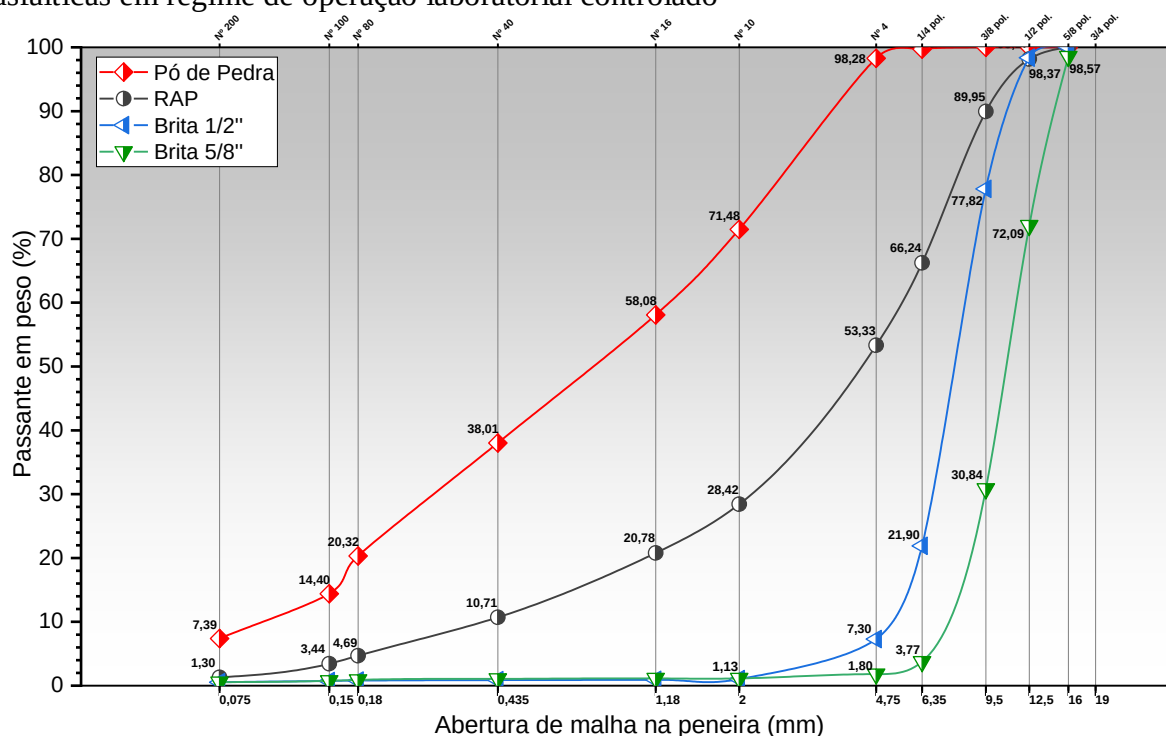
As coletas em regime não controlado de usinagem em ambiente laboratorial foram realizadas entre 09/04/2024 e 29/05/2024, enquanto os monitoramentos em condição de inatividade laboratorial (brancos) foram conduzidos nas segundas-feiras após o recesso de cada fim de semana, correspondente aos dias 06/05/2024, 13/05/2024 e 20/05/2024.

Na segunda etapa do monitoramento *indoor* (regime controlado) as coletas foram realizadas sob controle de fluxo de usuários, temperatura de climatização (definida em 20 °C) e sem operações simultâneas de manipulação e/ou ensaios de caracterização de materiais nas dependências internas do laboratório. As avaliações das emissões atmosféricas na segunda etapa do monitoramento foram realizadas entre as datas de 22/04/2025 a 26/05/2025.

As composições das misturas analisadas foram definidas a partir de um traço usualmente empregado em serviços de recuperação de pavimentos na região metropolitana de Fortaleza, conforme indicações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Experimentalmente, para este estudo de monitoramento, foram coletados agregados minerais diretamente do pátio de estocagem da usina (brita 1/2”, brita 5/8” e pó de pedra), material fresado (RAP) e ligante asfáltico. Em seguida, procedeu-se a caracterização granulométrica dos agregados e material fresado (Figura 9) de acordo com a norma DNIT 412/2019 - ME (IPR, 2019). Os traços foram formulados com incremento de 10 e 15% de material fresado (RAP), definindo-se como peneira de corte aquela que continha malha de ¼ de polegada (6,35 mm).

Figura 9 — Curvas granulométricas dos agregados utilizados na usinagem de misturas asfálticas em regime de operação laboratorial controlado



Fonte: Autor (2025).

Assim, levando em conta a análise granulométrica do agregado fresado reciclado (Figura 9), 66,24% deste material foi considerado para balanço da composição como pó de pedra e 33,76% como o percentual de substituição para a brita de 1/2 polegada.

Adicionalmente, seguindo os procedimentos da norma NBR 16208, foi determinado em um centrifugador manual do tipo Rotarex um teor de 5,37% de betume no RAP para desconto de ligante no balanço dos traços das misturas com incremento de material fresado reciclado (ABNT, 2013). Para cada ensaio de usinagem considerou-se a taxa de ativação de 100% do ligante contido no material fresado.

Por fim, a partir da norma NBR 15184 foram estabelecidas por meio do ensaio do ligante no teste de viscosidade Brookfield as respectivas temperaturas de 155 °C e 143 °C para a usinagem e compactação das misturas asfálticas (ABNT, 2021).

A Tabela 3 relaciona a composição dos traços formulados e usinados na segunda etapa do monitoramento em ambiente interno para uma massa total de 10 kg de material.

Tabela 3 — Composição das misturas asfálticas monitoradas em laboratório sob condições operacionais controladas

Mistura	Traço da mistura					Operação	
	CAP 50/70 (%)	Brita 1/2" (%)	Brita 5/8" (%)	Pó de pedra (%)	RAP ^b (%)	Temp ^a . de usinagem (°C)	Tempo (min.)
OC-1	5,70	17,46	1,94	74,90	–	155	10
OC-2	5,70	17,46	1,94	74,90	–	155	10
OC-3	5,16	14,27	1,94	68,63	10	155	10
OC-4	4,89	12,67	1,94	65,50	15	155	10
OC-5	4,89	12,67	1,94	65,50	15	155	10

OC: Operação controlada, ^aTemp.: Temperatura, ^bRAP: pavimento asfáltico recuperado.
 Fonte: Autor (2025).

4.3 Caracterizações analíticas

4.3.1 Conforto ambiental e parâmetros atmosféricos

Os parâmetros de conforto ambiental para CO₂, temperatura e umidade relativa do ar no ambiente laboratorial foram determinados usando um medidor CO₂ AZ-77535 da AKSO[®] Ltda. Para a avaliação das composições relativas ao manuseio de materiais asfálticos em ambiente interno foram utilizados analisadores multiparâmetros equipados com sensores eletroquímicos e no infravermelho. Para o levantamento em tempo real das concentrações de particulado inalável (MP₁₀) e respirável fino (MP_{2.5}) foi usado um analisador Temptop M2000 da Elitech[®] Ltda. Adicionalmente, empregaram-se duas bombas AirChek XR-5000 da SKC[®] Ltda para cada coleta visando as análises gravimétrica e química relacionadas às determinações de partículas totais em suspensão (PTS), benzo(a)pireno (BaP) e metais (Ca, Mg, Zn, Pb, Ni e V).

A Figura 10 destaca o conjunto de equipamentos utilizados na obtenção dos parâmetros de qualidade do ar interior e conforto ambiental.

Figura 10 — Analisadores multiparâmetros e sistema de bombas AirChek XR-5000



Fonte: Autor (2025).

Especificamente para a quantificação dos particulados totais em suspensão (aerodispersóides totais) no ambiente interno (*indoor*), utilizou-se acoplado às bombas de amostragem dois cassetes em acrílico de 37 mm equipados com filtro em PVC para análises de PTS e BaP a este associado e outro em acetato de celulose para a análise de PTS e metais a este associado. Os filtros (membranas) foram fornecidos, respectivamente, pela Instrutherm Ltda e Sartorius Stedim e possuem porosidade nominal de 5 μm . As coletas foram conduzidas em um período de 2 horas com as bombas calibradas a uma vazão de 3 L/min. Cada amostragem foi realizada com frequência amostral semanal tanto no período de inatividade laboratorial quanto durante a execução de misturas asfálticas, perfazendo assim um total de 9 coletas na primeira etapa do monitoramento.

Na segunda etapa do monitoramento interno foram estabelecidas 5 coletas representativas, sendo duas para uma mistura tradicional, uma coleta para o uso de 10% de RAP e duas coletas para 15% de RAP (misturas recicladas). Todos os equipamentos foram dispostos a 1,5 m do nível do solo, na parte central do ambiente e fora do alcance de barreiras físicas conforme os procedimentos recomendados na NBR 17037 (ABNT, 2023).

4.3.2 Determinação de material particulado

As concentrações de PTS e MP_{10} nos filtros coletados em ambos os locais de estudo (ambientes indoor e outdoor) foram obtidas por meio da análise gravimétrica de acordo com os procedimentos apresentados nas normas técnicas NBR 13412 e NBR 9547 (ABNT, 1995, 1997). Para a determinação, as membranas em PVC usadas na amostragem interior e os filtros em fibra de vidro usados na amostragem exterior foram acondicionados em sala climatizada

contendo sistema de desumidificação. Para a retirada da umidade superficial, realizou-se o armazenamento em dessecadora munida de termo-higrômetro por no mínimo 24 horas. Em cada amostragem, determinou-se o peso inicial dos materiais filtrantes antes e após a coleta usando uma balança analítica com precisão de $\pm 0,01$ mg de modelo AUW220D (Shimadzu®). Por fim, as concentrações de particulados foram então estimadas a partir da Equação 1.

$$C_{[MP]} \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = \frac{(mf - mi) \times 10^6}{Var} \quad (1)$$

Onde: $C_{[MP]}$ é a respectiva concentração do material particulado em $\mu g/m^3$; mf é a massa final do filtro em gramas (g); mi é a massa inicial do filtro em gramas (g); Var é o volume de ar amostrado (m^3) e 10^6 é o fator de conversão de grama para micrograma.

4.3.3 Determinação de benzo(a)pireno (BaP)

As membranas em PVC e os filtros em fibra de vidro usados em ambiente exterior e interior, respectivamente, foram submetidos a extração por solventes em extrator Soxhlet para a devida quantificação de benzo(a)pireno (BaP) adsorvido na superfície do material particulado total (PTS) e inalável (MP_{10}), respectivamente. Nesta etapa, utilizou-se cartuchos de celulose e mistura de solventes: acetona/hexano grau cromatográfico na proporção 1:1 (v/v). Para cada ciclo de extração realizou-se a limpeza prévia e condicionamento dos cartuchos através de refluxo da mistura de solventes por 4 horas. Após este processo, inseriu-se os filtros contendo o material particulado nos cartuchos limpos e secos e então se iniciou o refluxo das amostras no mesmo extrator Soxhlet durante um período de 5 horas para o particulado outdoor e 10 horas para o particulado indoor.

Os extratos orgânicos obtidos foram filtrados em filtros seringa PES hidrofílico e posteriormente analisados por cromatografia líquida de alta eficiência (*High Performance Liquid Chromatography – HPLC*) em um cromatógrafo Varian ProStar com detector de arranjo de diodos (DAD) utilizando uma coluna Hypersil Green PAH (25 cm x 4,6 mm x 5 μm), comprimento de onda em 225 nm e volume de injeção de 20 μL , vazão de 1,25 mL/min e fase móvel acetonitrila/água com proporção de solventes à 80% ACN/20% H_2O (modo isocrático).

As concentrações de BaP foram determinadas usando uma curva de calibração construída a partir de um padrão de HPA (10 $\mu g/mL$) fornecido pela Supelco®.

4.3.4 Determinação de metais

A especiação de metais para Ca, Mg, Zn, Pb, Ni e V foi realizada através da digestão ácida a quente do PTS coletado nos filtros de fibra de vidro (coletas *outdoor*) e acetato de celulose (coletas *indoor*). Os filtros de acetato de celulose foram facilmente digeridos usando uma mistura de água-régia (HCl/HNO₃ 3:1) e HF (1:1), enquanto o material de fibra de vidro seguiu a preparação descrita no método IO-3.1 da US EPA (US EPA, 1999b), usando para digestão uma mistura ácida de 10 mL de água régia e 2 mL de HF grau analítico. A digestão ácida foi realizada em tubos hermeticamente fechados a 200 °C por 4 horas. As amostras digeridas foram resfriadas em bancada na temperatura ambiente, filtradas e diluídas em balões volumétricos a 50 mL com água ultrapura.

As concentrações de cada analito foram então determinadas por meio de curvas de calibração construídas a partir de padrões analíticos dos respectivos metais, usando um espectrofotômetro de absorção atômica iCE 3000 da Thermo Scientific (Figura 11).

Figura 11 — Determinação analítica de metais em espectrofotômetro de absorção atômica



Fonte: Autor (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

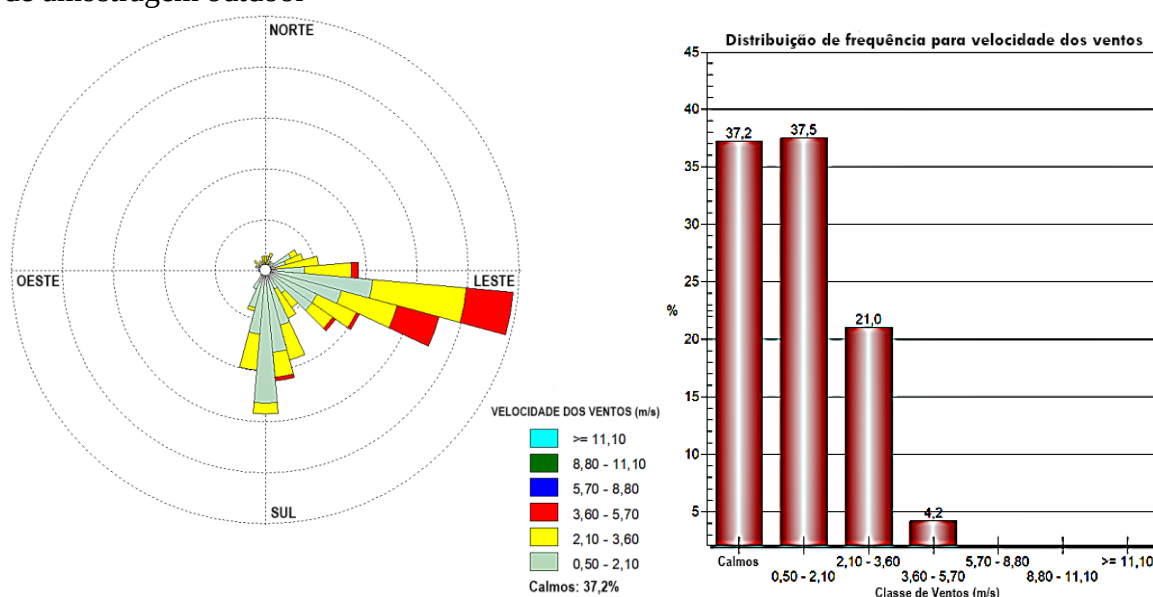
Nesta seção serão apresentados os resultados dos parâmetros meteorológicos relativos aos estudos na área industrial de usinagem asfáltica e de conforto térmico em ambiente interno, bem como do monitoramento das emissões de poluentes atmosféricos advindos da manufatura de misturas asfálticas em escalas industrial e laboratorial.

5.1 Monitoramento outdoor das condições atmosféricas

5.1.1 Parâmetros meteorológicos

A avaliação do perfil de distribuição dos poluentes atmosféricos em ambiente exterior depende em grande parte da compreensão dos fenômenos meteorológicos locais. A seguir, são apresentados os parâmetros de direção e frequência dos ventos, pluviometria, temperatura ambiente e umidade relativa do ar para a área industrial em estudo (Figura 12).

Figura 12 — Rosa dos ventos e frequência de ventos na área monitorada durante o período de amostragem outdoor



Fonte: Autor (2025).

Como observado na Figura 12 houve uma predominância na convergência dos ventos nas direções sul e leste-sudeste. Ainda, de acordo com a frequência de distribuição 37,5 % dos ventos estavam situados entre 0,5 e 2,1 m/s e 37,2% foram categorizados como calmos (< 0,5 m/s). Este perfil é semelhante as observações realizadas por Barbosa (2019) para a mesma área monitorada, onde foi indicado o mesmo sentido de distribuição dos ventos.

Os dados de temperatura demonstraram grande variabilidade, apresentando um registro mínimo de 24,7 °C e máximo de 33,4 °C durante a amostragem em abril de 2024. A temperatura média para este mês foi de 29,1 °C com alternância entre dias ensolarados e nublados.

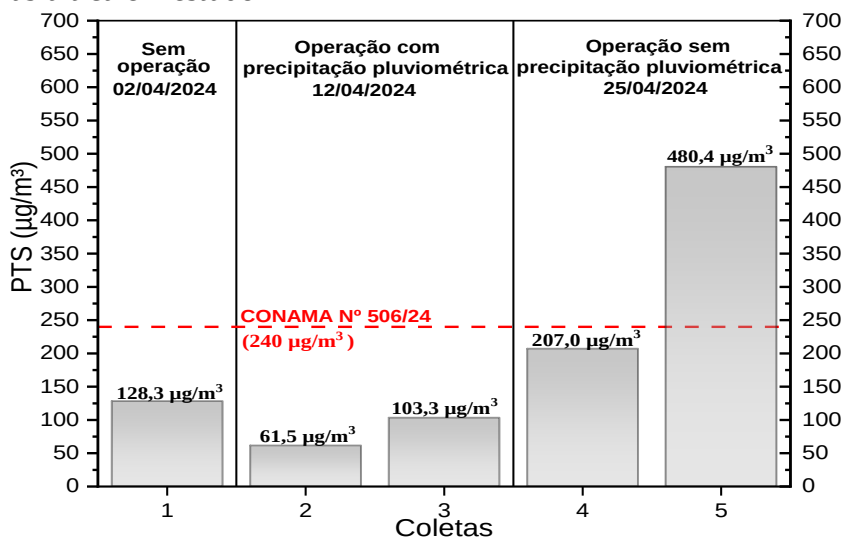
A precipitação pluviométrica foi levemente alta para um mês da quadra chuvosa, com registro máximo diário de 31,6 mm e um acumulado de 176,6 mm para a área do distrito industrial de Maracanaú, onde se localiza a indústria monitorada. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foi registrado em Fortaleza, CE, durante todo o mês de abril de 2024, 23 dias de chuva com medida igual ou superior a 1 mm e um acumulado total mensal de 410,3 mm; o que correspondeu a um incremento de 6% acima do esperado para a temporada normal climatológica (INMET, 2024). Em tempo, os valores de umidade relativa do ar variaram entre 50 e 95 %, o que demonstrou uma elevada evaporação atmosférica para a estação chuvosa.

Os parâmetros climatológicos são de suma importância para o mapeamento local e influenciam diretamente na concentração dos poluentes atmosféricos monitorados, pois são capazes de atuar nos fenômenos de sedimentação, dispersão, deposição seca, úmida e na coalescência de partículas por meio da indução de cargas estáticas (Vallero, 2014; Farmer; Boedicker; Debolt, 2021).

5.1.2 Avaliação de emissões particuladas em usina de mistura asfáltica

A Figura 13 a seguir destaca o perfil de concentração para PTS no entorno do pátio industrial da usina asfáltica sob monitoramento.

Figura 13 — Perfil de concentração para PTS no pátio da usina asfáltica em estudo



Fonte: Autor (2025).

Para a devida compreensão do perfil de emissão de particulados foi conduzida uma avaliação prévia com a usina em estado de inatividade (Figura 13), a qual apresentou uma concentração de $128,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ do PTS neste dia de amostragem (coleta 1). Por outro lado, foram constatados níveis de emissão de $61,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $103,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a segunda amostragem durante a execução das operações de usinagem asfáltica sob regime de chuva (coletas 2 e 3). As reduções na emissão de PTS nestas coletas podem ser explicadas devido ao fenômeno de deposição úmida, pois foi registrado na estação do INMET um nível instantâneo de precipitação pluviométrica de 7,4 mm às 7:00 horas da manhã e um acumulado diário de 20,2 mm na região do complexo industrial de Maracanaú (INMET, 2024).

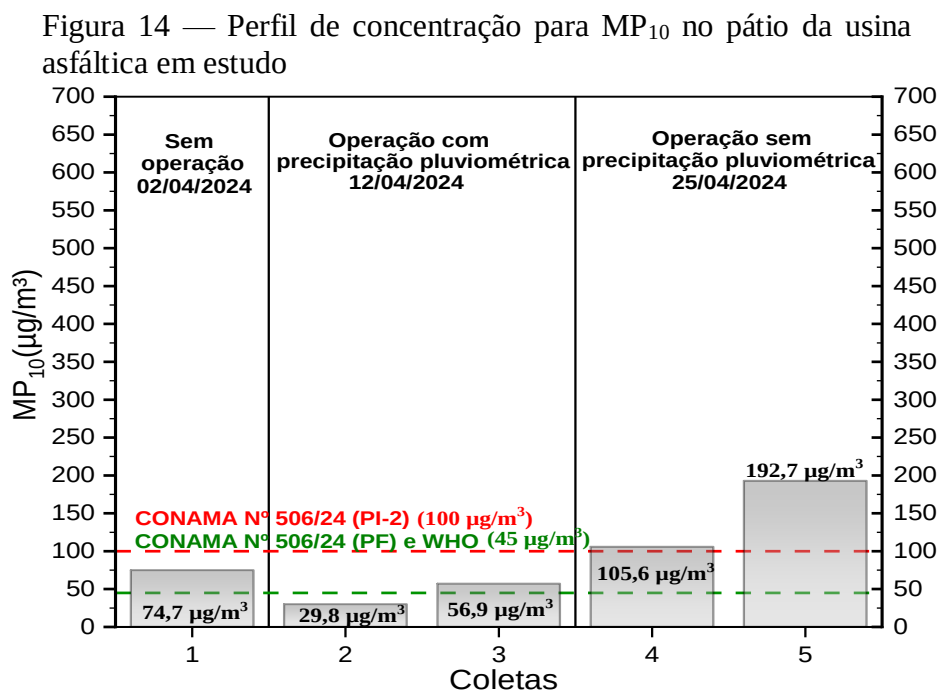
Em contraste, foram constatados níveis de emissão de PTS bem elevados para os filtros coletados durante o terceiro dia de amostragem, com medidas de $207,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1ª hora) e $480,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2ª hora) para as coletas 4 e 5, respectivamente. Oportunamente, os resultados das concentrações de poluentes em condição outdoor foram comparados, quando pertinente, às legislações do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e da Organização Mundial de Saúde (OMS). Assim, foi verificado uma ultrapassagem instantânea do padrão de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PTS da resolução CONAMA Nº 506/2024 (Brasil, 2024) durante a coleta 5. As demais amostragens apresentaram níveis inferiores ao padrão nacional de emissão para este poluente. O padrão elevado de emissão está relacionado tanto ao tráfego de veículos pesados nas dependências internas da usina como pela intensa produção de misturas asfálticas no período do monitoramento. Em termos, a concentração média de $196,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5 coletas) para PTS na área em estudo é próximo ao limite recomendado pela legislação brasileira ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Elihn e colaboradores (2008) avaliaram, na Noruega, o nível de exposição ocupacional dos trabalhadores em três usinas de produção asfáltica. O monitoramento realizado mostrou níveis de exposição ao particulado total de $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para os condutores de escavadeira e $1150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para os operadores de sala de controle responsáveis pelas operações de usinagem asfáltica. Estes valores são próximos as observações realizadas na área em estudo durante a quarta e quinta coleta.

Rubio *et al.* (2013) realizaram o levantamento do PTS emitido por fontes difusas em uma planta de produção descontínua de misturas asfálticas a quente. Os autores estimaram, por meio da medida em três posições próximas ao tambor secador, um nível médio de emissão para 24 horas de $5725,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kharat (2022) quantificou na Índia as emissões de material particulado em 15 usinas de produção a quente de misturas asfálticas. O monitoramento realizado no escape das chaminés apresentou concentrações variando entre 99.000 e 182.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para usinas do tipo batelada, e de 84.000 a 409.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para usinas de produção contínua. Estes resultados demonstram um extremo nível de emissão para este poluente.

A Figura 14 apresenta as concentrações de MP_{10} no pátio da indústria de usinagem asfáltica.



Fonte: Autor (2025).

O perfil de concentração para o particulado inalável assemelhou-se ao padrão de emissão observado no PTS, embora em menor magnitude. Os maiores níveis de MP_{10} foram verificados nos filtros da quarta e quinta coleta, com concentrações de 105,6 e 192,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Ademais, pode ser constatado a ultrapassagem do atual padrão intermediário de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da resolução CONAMA N° 506/2024 em ambas as coletas, enquanto o limite de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendado pela OMS só não foi ultrapassado na 2ª coleta sob condição de chuva (WHO, 2021; Brasil, 2024).

A amostragem conduzida durante a ausência de operações exibiu um valor máximo de 74,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o qual ainda é superior ao valor limite da OMS. Este perfil de emissão infere uma condição permanente de elevadas concentrações de MP_{10} no entorno do pátio de armazenamento e processamento de agregados. Por fim, obteve-se para a segunda e terceira coletas medidas de 29,8 e 56,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

A concentração global média de MP_{10} na área em estudo foi de $91,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5 coletas), a qual é relativamente alta para este poluente quando se considera padrões de qualidade do ar exterior em algumas legislações ambientais, como os indicados na União Europeia e em Hong Kong (EU; 2024; EPD, 2025).

Em pesquisa conduzida por Barbosa (2019) na mesma usina asfáltica monitorada neste estudo foram observadas variações nos níveis de MP_{10} entre $277,3$ e $3.777,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A elevada discrepância entre as concentrações foram relacionadas ao posicionamento do equipamento de amostragem e condições meteorológicas. Oportunamente, o autor encontrou no estado de inatividade operacional da usina um nível médio de MP_{10} de $98,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o qual se assemelha ao observado no atual estudo.

Alcantara *et al.* (2023) também monitoraram a emissão de MP_{10} na respectiva indústria e verificaram um nível $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante um regime de clima chuvoso. As concentrações tomadas próximas à saída do tambor secador/misturador foram de 1090 e $2190 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ribas *et al.* (2025) quantificaram a emissão de particulados numa planta industrial de mistura asfáltica com temperatura de usinagem ajustada a 165°C e capacidade de produção de 200 toneladas. O monitoramento realizado em 3 posições relativas ao tambor misturado apresentou concentrações de MP_{10} entre 1100 ± 40 e $4600 \pm 700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no momento da produção de misturas asfálticas. Ademais, os pesquisadores observaram um nível de fundo de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para esta fração de particulado durante o período de inatividade da usina.

Bingül e Altikat (2020) realizaram o levantamento do particulado inalável em uma usina de produção de asfaltos na Turquia e verificaram medidas para MP_{10} de $1220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nas vias de fluxo da fábrica e $1080 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na área de armazenamento de materiais agregados.

5.1.3 Avaliação de metais e benzo(a)pireno em usina de mistura asfáltica

A Tabela 4 apresenta as concentrações de metais e BaP associados ao PTS coletado durante o monitoramento da usinagem industrial de misturas asfálticas.

Tabela 4 — Concentração de metais e benzo(a)pireno associados ao PTS coletado no pátio da usina asfáltica em estudo

Coleta	Ca ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Zn ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	V ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BaP (ng/m^3)
1	10,2	2,31	ND	ND	ND	ND	10,8
2	23,5	2,30	ND	ND	ND	ND	10,5
3	26,3	2,64	ND	ND	ND	ND	ND
4	22,0	7,68	ND	ND	ND	ND	11,3
5	23,4	10,9	ND	ND	ND	ND	ND
Média	21,1	5,16	—	—	—	—	6,52

ND: Não detectado.

Fonte: Autor (2025).

A determinação de metais no PTS coletado a partir do monitoramento no pátio industrial de usinagem asfáltica revelou a presença de cálcio e magnésio nas amostras. A análise demonstrou uma maior contribuição de Ca no segundo dia de amostragem, com os filtros da segunda e terceira coleta exibindo concentrações de $23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $26,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

O magnésio, por sua vez, apresentou valores inferiores aos observados para o cálcio em todas as coletas com concentrações entre $2,30$ e $10,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Na amostragem sem operação e sob regime leve de chuvas os níveis de Mg foram muito semelhantes ($2,30$ a $2,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Nas condições operacionais de maior difusão dos poluentes (coletas 4 e 5), os valores de Mg foram notadamente superiores, correspondente a concentrações de $7,68$ e $10,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Os metais Zn, Pb, Ni e V não foram detectados na condição de processamento e da quantificação analítica empregada, o que é relevante do ponto de vista da qualidade do ar local.

Adolfo *et al.* (2022) investigaram a presença de espécies metálicas de níquel (Ni) e vanádio (V) na fração orgânica de amostras de material particulado coletado em duas usinas de produção de misturas asfálticas a quente (165°C). As concentrações de Ni variaram entre $0,42$ e $0,84 \text{ ng}/\text{m}^3$ para o momento da usinagem, enquanto uma maior variação de concentração foi observada para V, com níveis entre $0,08$ e $1,79 \text{ ng}/\text{m}^3$. Neste trabalho, o período de inatividade em ambas as usinas mostrou apenas a presença de Ni, com um nível máximo de $0,48 \text{ ng}/\text{m}^3$. Entretanto, ressalta-se que para este levantamento os autores posicionaram o equipamento de amostragem próximo ao ponto de descarregamento do tambor misturador, uma zona típica de elevada emissão de particulados.

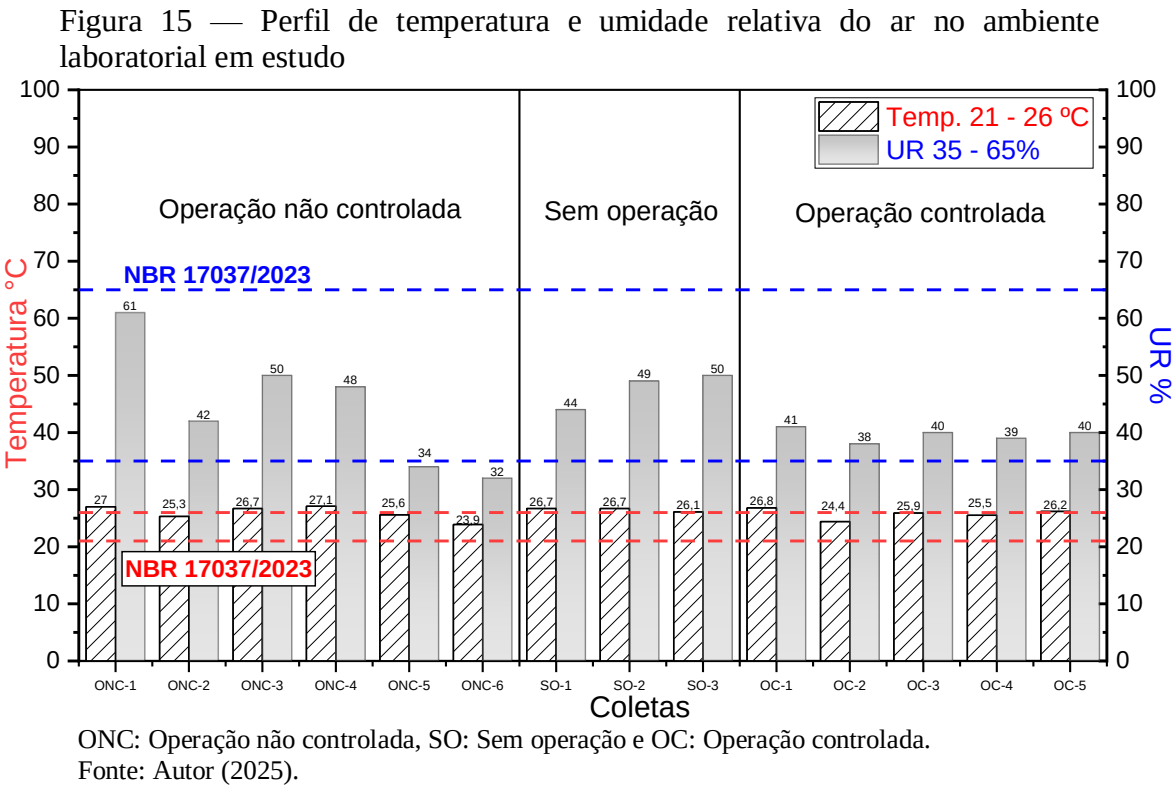
Yatkin e Bayran (2008) realizaram a coleta de particulados diretamente da chaminé de uma usina de asfalto. Os autores promoveram a ressuspensão deste material em uma câmara de amostragem controlada e observaram que o cálcio aparecia como um elemento majoritário entre vários metais analisados.

A análise cromatográfica do particulado inalável (MP₁₀) coletado no pátio industrial de usinagem asfáltica revelou concentrações de 10,8, 10,5 e 11,3 ng/m³ de BaP nas coletas 1, 2 e 4, respectivamente. Estes valores possuem magnitude semelhante as observadas por Alcantara *et al.* (2023) durante estudos conduzidos na mesma unidade industrial. Oportunamente, destaca-se que os níveis de benzo(a)pireno se configuraram bem acima do limite de 1 ng/m³ definido pela União Europeia (EU, 2024).

5.2 Monitoramento indoor das condições atmosféricas

5.2.1 Avaliação do conforto ambiental em laboratório de usinagem asfáltica

Para a avaliação do impacto ambiental na usinagem a quente em ambiente laboratorial foram inicialmente levantados os parâmetros de conforto térmico. A Figura 15 apresenta as médias dos valores de temperatura e umidade relativa do ar registrados minuto a minuto durante o período de monitoramento no laboratório de misturas asfálticas.



As temperaturas registradas durante o expediente laboratorial atingiram o valor máximo de 27,1 °C e mínimo de 23,9 °C durante a quarta e sexta coleta sem condições operacionais controladas (ONC-1 a ONC-6), respectivamente. Em contrapartida, médias situadas entre 26,1 e 26,7 °C foram encontradas no período de inatividade (SO-1 a SO-3) do laboratório (laboratório fechado). Este comportamento pode ser explicado devido ao menor fluxo de pessoas e a ausência de ensaios que dependem diretamente do uso de estufas com agregados e materiais asfálticos aquecidos.

A norma NBR 17037 estabelece níveis de adequação térmica em ambientes não residenciais climatizados artificialmente e segundo a mesma, as temperaturas do ar ambiente devem situar-se entre 21 e 26 °C (ABNT, 2023). Deste modo, as temperaturas registradas durante os ensaios de mistura asfáltica apresentaram uma discreta inadequação aos valores recomendados.

Na operação laboratorial sob condições controladas (OC-1 a OC-5) as temperaturas ambientes variaram entre 24,4 °C e 26,8 °C, valores similares aos encontrados na operação sem controle (23,9 °C a 27,1 °C) e indicativos da ultrapassagem do valor superior da faixa de temperatura. Em geral, foi constatada uma boa manutenção dos níveis térmicos nos três regimes de funcionamento e avaliação da qualidade do ar do laboratório.

Fohimi *et al.* (2023) em estudo de avaliação térmica conduzido em um laboratório de termodinâmica encontraram o valor mínimo de 22,1 °C e máximo de 25,1 °C para a temperatura ambiente. Tais resultados estão próximos aos registros observados no presente estudo.

Em tempo, o parâmetro de umidade relativa do ar (UR) apresentou uma grande variabilidade durante os procedimentos de mistura no ambiente laboratorial sem condições operacionais controladas (ONC), com valores entre 32% e 61%, os quais são próximos a faixa de 35% e 65% recomendada pela norma NBR 17023. Por sua vez, os dados de UR observados nos momentos de inatividade (SO) das operações apresentaram médias entre 44% e 50%, as quais também estão dentro do indicado pela legislação brasileira.

Na operação laboratorial sob condições controladas (OC) os valores de UR variaram entre 38% e 41%, valores distintos dos observados na operação sem controle, mas ainda dentro da faixa recomendada pela referida norma. No geral, assim como observado para os registros de temperatura, pode-se relatar que o controle das condições ambientais apresentou pouco efeito significativo sobre os níveis locais de umidade relativa do ar.

5.2.2 Avaliação de emissões atmosféricas em laboratório de usinagem asfáltica

5.2.2.1 Monitoramento de particulados e dióxido de carbono (CO₂) sob condições operacionais não controladas

A quantificação de material particulado em suspensão foi conduzida considerando todas as parcelas de partículas emitidas, pois fumos de asfalto também são gerados durante a etapa de aquecimento das matérias-primas. Assim, a massa do particulado tota (PTS) coletado nos filtros pode incluir tanto a matéria orgânica quanto a inorgânica de diversas fontes como agregados minerais, ligante asfáltico, aditivos e reagentes químicos de limpeza.

Os resultados estatísticos relacionados às concentrações dos poluentes em estudo durante o período de monitoramento em condições ambientais/operacionais não controladas (ONC) e sem atividades laborais (SO) estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 — Resultados estatísticos das concentrações de particulados e CO₂ monitorados no laboratório de usinagem asfáltica inativo e sob regime operacional não controlado

Parâmetro	Condição	Análise estatística					
		N	$\bar{X}$	σ	CV (%)	Máximo	Mínimo
PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO	3	51,7	8,76	17,0	57,9	41,7
	ONC	6	1153,2	522,6	45,3	2163,9	810,2
MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO	3	7,0	0,91	12,7	7,9	6,1
	ONC	6	243,9	56,5	23,1	356,9	207,0
MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO	3	4,1	0,54	12,2	4,6	3,5
	ONC	6	161,5	40,8	25,3	244,0	139,5
CO ₂ (ppm)	SO	3	537,0	22,5	4,22	553,9	511,4
	ONC	6	674,0	89,7	13,3	788,2	547,5

ONC: Operação não controlada, SO: Sem operação.

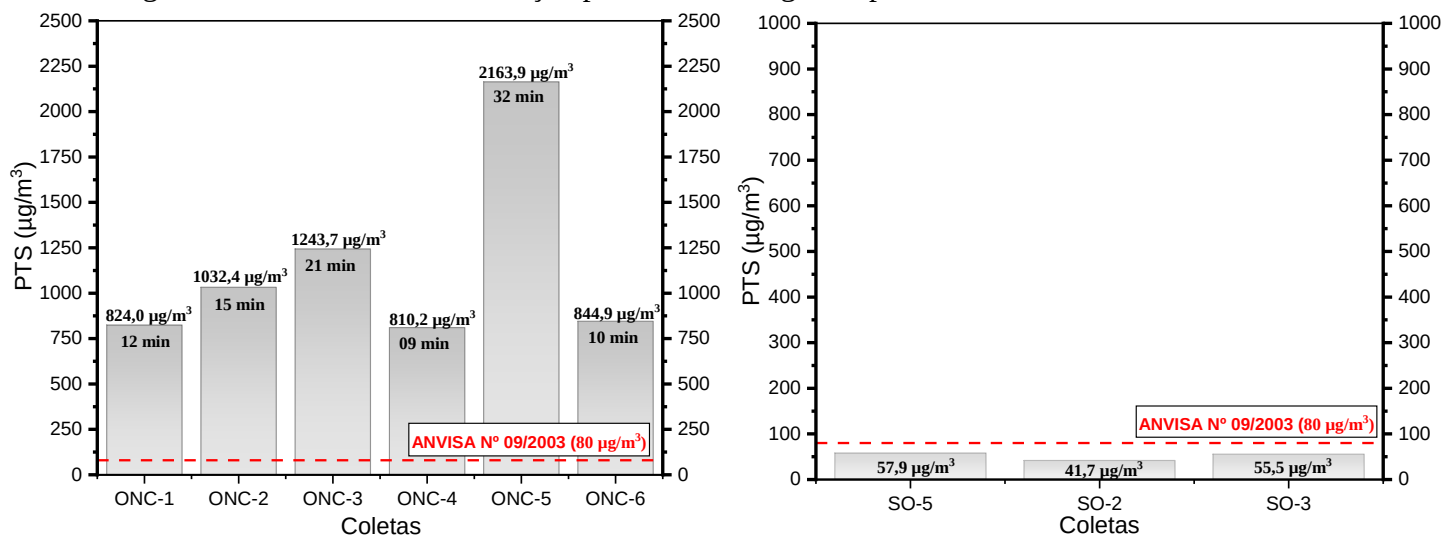
N: número de amostras; $\bar{X}$: média; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: Autor (2025).

O monitoramento das frações de particulados em suspensão durante os ensaios de usinagem a quente das misturas asfálticas apresentou médias de concentração de 1153,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o PTS, 243,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o MP₁₀ e 161,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o MP_{2,5}. Em contraste, foram observados baixos níveis de particulados no período de inatividade do laboratório, com o PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} exibindo médias de 51,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 7,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 4,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Por sua vez, os níveis de CO₂ apresentaram variações de 547,5 a 788,2 durante o período das atividades laborais e de 511,4 a 553,9 ppm na ausência das atividades no laboratório.

O perfil detalhado das concentrações de particulado total em suspensão (PTS) no período de amostragem indoor sob condições ambientes não controladas (ONC) está apresentado na Figura 16.

Figura 16 — Perfil de concentração para PTS em regime operacional laboratorial não controlado



ONC: Operação não controlada, SO: Sem operação.

Fonte: Autor (2025).

As composições relativas ao processamento de misturas asfálticas apresentaram medidas de PTS bem elevadas. As concentrações observadas na segunda, terceira e quinta mistura exibiram picos de 1032,4 µg/m³, 1243,7 µg/m³ e 2163,9 µg/m³, respectivamente. Este comportamento segue uma relação direta com os tempos de usinagem de 15, 21 e 32 minutos. Por outro lado, as concentrações de PST durante a primeira, quarta e sexta mistura, executadas com tempos de usinagem de 12, 9 e 10 minutos, foram de 824,0 µg/m³, 810,2 µg/m³ e 844,9 µg/m³, respectivamente.

Ao analisar o conteúdo mássico dos agregados utilizados em todas as misturas usinadas, constata-se que o perfil de concentração não apresentou relação proporcional com as frações de finos destacada (pó de pedra). Este fato sugere que grande parte do PTS coletado pode estar relacionado a uma transformação excessiva do CAP e consequente emissão de fumos de asfalto.

Em relação aos aerodispersóides totais a resolução N° 9 da ANVISA preconizava um valor máximo de 80 µg/m³ como indicador de pureza do ar em ambiente climatizado (Brasil, 2003). Em tempo, observa-se a ultrapassagem deste limite em todas as coletas realizadas durante os ensaios de dosagem de mistura asfáltica. Por outro lado, percebe-se uma adequação dos níveis internos de PTS a esta antiga resolução quando não há a realização de atividades no ambiente laboratorial, com registros de concentração entre 41,7 µg/m³ e 57,9 µg/m³. Em tempo, este poluente não é mais contemplado na norma brasileira (NBR 17037/2023) de qualidade do

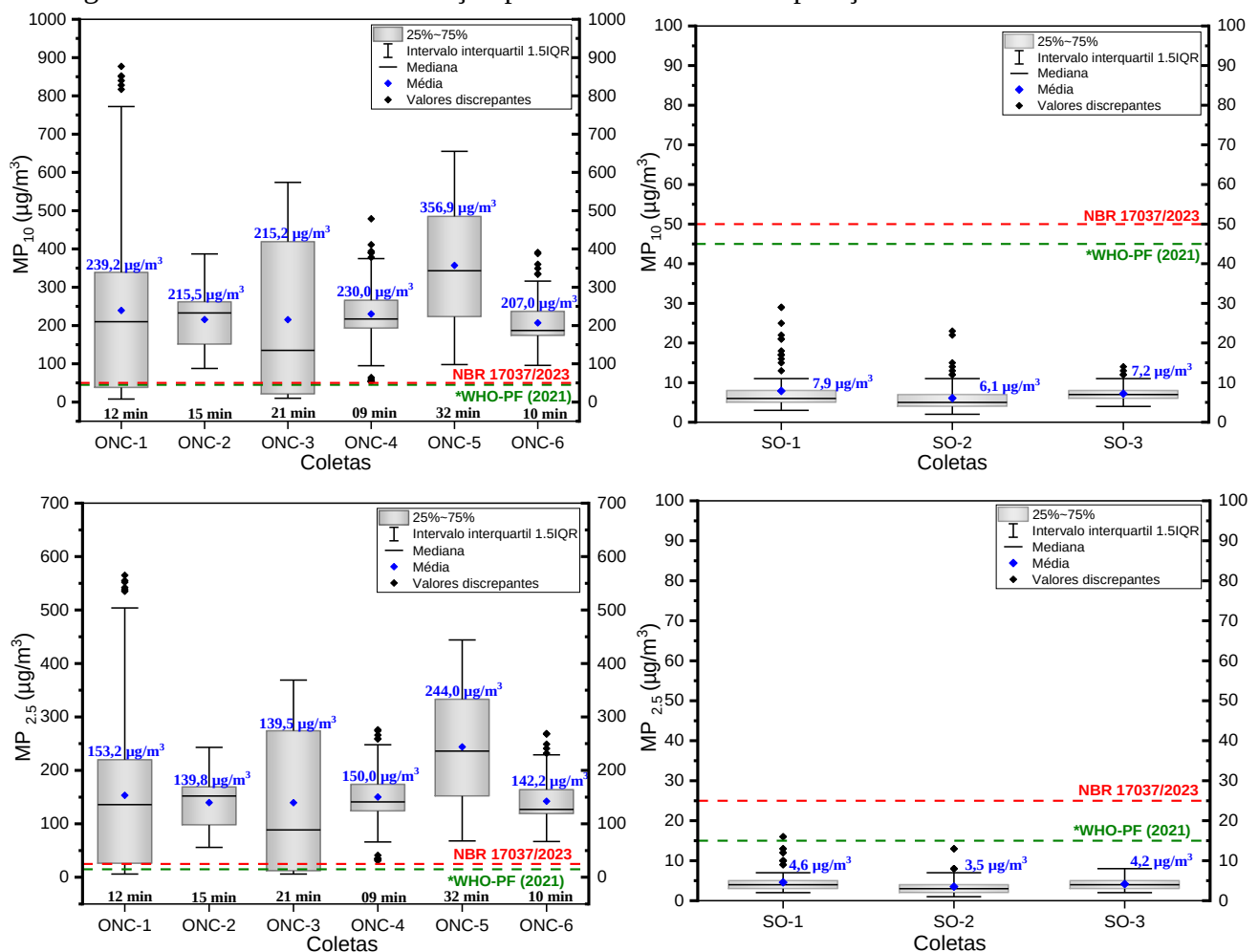
ar para ambientes interiores não residenciais climatizados artificialmente (ABNT, 2023). Entretanto, levando em conta a ausência de outra normativa para PTS em ambiente interno, o antigo valor padrão da resolução N° 9 da ANVISA foi utilizado como referência na pesquisa.

Em pesquisa realizada por Martin, Kerstin e Joachim (2019) para a coleta do PTS emitido de um misturador laboratorial de asfaltos foi observado que os níveis de emissão de particulados são essencialmente influenciados pela temperatura de usinagem empregada. Os autores encontraram na temperatura de 164 °C uma concentração de PTS de 5200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Xiu *et al.* (2020) coletaram em câmaras semicirculares de aço inoxidável o material particulado total emitido por misturas asfálticas compostas de ligantes modificados com polímero SBS e borracha. Os autores registraram a 165 °C um nível máximo de emissão de 1800 e 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a mistura asfáltica composta por polímero e borracha, respectivamente.

A Figura 17 mostra o perfil detalhado do monitoramento das concentrações interiores dos particulados MP_{10} e $\text{MP}_{2.5}$.

Figura 17 — Perfil de concentração para MP_{10} e $\text{MP}_{2.5}$ em operação laboratorial não controlada



ONC: Operação não controlada, SO: Sem operação.

Fonte: Autor (2025).

As medidas de MP_{10} mostraram concentrações internas variando entre $207,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $356,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante o período de usinagem a quente das misturas asfálticas sob condições usuais de funcionamento laboratorial. Os maiores registros desta fração de particulados foram observados durante a primeira, quarta e quinta coleta, com as concentrações médias atingindo os valores de $239,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $230,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $356,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Os perfis de concentração na Figura 16 destacam uma inadequação desta fração de particulados em relação aos limites recomendados tanto na diretriz da OMS quanto pela NBR 17037 (WHO, 2021; ABNT, 2023). Em contrapartida, pode-se perceber uma queda significativa nos níveis deste particulado nos momentos de inatividade laboratorial, com um registro máximo de $29,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e médio de $7,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na primeira coleta (SO-1).

Os dados de monitoramento para o particulado respirável ($MP_{2.5}$) exibiram uma concentração máxima de $244,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e mínima de $139,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Os maiores registros para esta fração de sólidos também foram obtidos durante a primeira, quarta e quinta coleta, com as respectivas concentrações médias de $153,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $150,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $244,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Desta forma, observa-se que o padrão de concentração de $MP_{2.5}$ durante a execução das misturas asfálticas seguiu a mesma tendência observada para o MP_{10} , permanecendo bem acima do limite de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da norma brasileira e do valor de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na diretriz da OMS. Ainda, foi registrada uma ultrapassagem de $16,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SO-1) durante o monitoramento no período ocioso do laboratório, o que pode estar associado a partículas residuais ainda presentes em bancadas e equipamentos mesmo após o recesso de atividades no fim de semana.

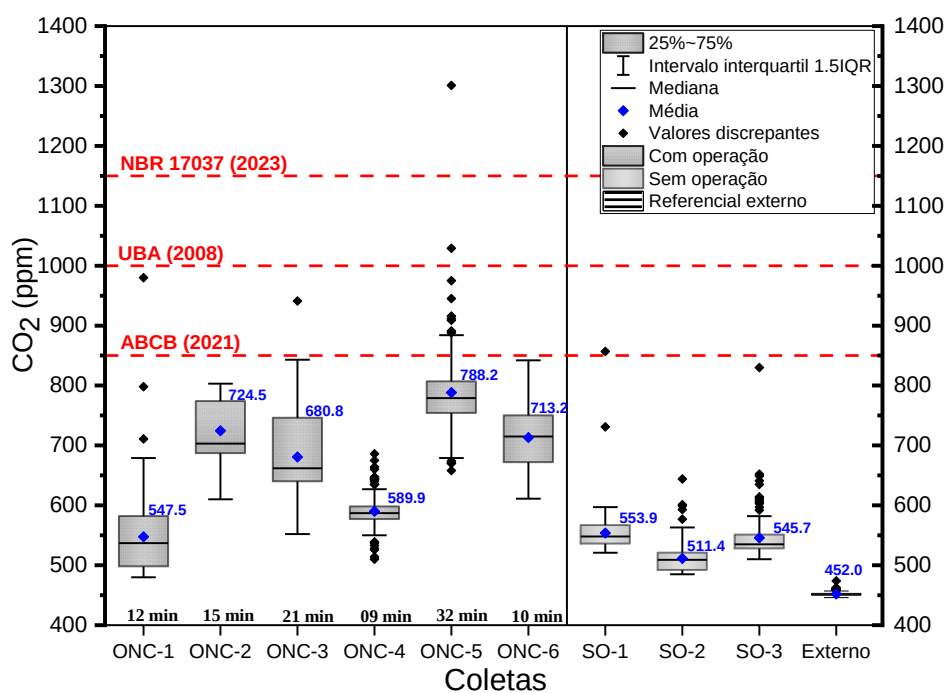
Em geral, houve uma prevalência de MP_{10} no ambiente interior nos monitoramentos realizados durante primeiro, quarto e quinto dia de atividades laboratoriais. Adicionalmente, verifica-se que com exceção do quinto dia de coleta os perfis de emissão destas frações de particulados (MP_{10} e $MP_{2.5}$) não seguiram o mesmo comportamento observado para o particulado total amostrado (PTS).

Weiss *et al.* (2018) realizaram um estudo controlado em laboratório para avaliar a emissão de particulados a partir da mistura de concreto asfáltico mastique. Os resultados mostraram elevados níveis de emissão para MP_{10} , com as concentrações atingindo valores de 9700 e $7500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a 1 e 2,5 metros de distância do misturador. Ainda, foi verificado que as partículas até $0,8 \mu\text{m}$ representavam cerca de 80 % da massa de todo o particulado coletado.

Tang *et al.* (2020) avaliaram por meio de um medidor de partículas portátil o perfil de concentração de $MP_{2.5}$ a partir do beneficiamento de um ligante AH-90. Os níveis de emissão observados para este particulado na temperatura de 160°C rapidamente alcançaram o limite de detecção de $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para a análise de contribuições decorrentes de processos de aquecimento e ocupação interna nas dependências do laboratório, monitorou-se os níveis de dióxido de carbono (CO_2) tanto na ausência de atividades quanto durante a execução das misturas asfálticas. A Figura 18 descreve os gráficos *boxplot* das concentrações observadas.

Figura 18 — Perfil de emissão de CO_2 em operação laboratorial não controlada



ONC: Operação não controlada, SO: Sem operação.

*A NBR 17037/2023 estabelece um nível de 700 ppm acima da concentração externa (450 ppm).

Fonte: Autor (2025).

Os dados obtidos durante a formulação de misturas asfálticas demonstram uma grande variabilidade nas concentrações internas de CO_2 entre as amostragens (média de 674 ppm), com um valor mínimo de 547,5 ppm e máximo de 788,2 ppm para o primeiro e quinto dia de coleta, respectivamente. Os níveis de emissão registrados apresentam uma relação com o conteúdo de CAP e o tempo de usinagem das misturas asfálticas, ocasionando um aumento nas concentrações internas de CO_2 . Este comportamento está relacionado a manutenção de estufas aquecidas com materiais asfálticos e ao processo de oxidação ocasionado durante a mistura do ligante com os agregados.

As concentrações internas de CO_2 durante a segunda, terceira, quinta e sexta coleta apresentaram médias de 724,5 ppm, 680,8 ppm, 788,2 ppm e 713,2 ppm, respectivamente. Ademais, pode ser observada uma razoável discrepância na concentração de CO_2 durante a quarta (589,9 ppm) e sexta coleta (713,2 ppm), apesar da pequena diferença entre o traço e

tempo de execução destas misturas. A variabilidade observada pode sugerir uma adição deste gás no ambiente devido ao maior fluxo de pessoas nas dependências internas do laboratório.

Os monitoramentos realizados durante a ausência de ensaios laboratoriais exibiram concentrações bem estáveis, com médias de 553,9 ppm, 511,4 ppm e 545,7 ppm para o primeiro, segundo e terceiro dia de coleta, respectivamente.

O comitê de qualidade do ar em ambientes internos Alemão (UBA, 2008) estabelece o valor higiênico de 1000 ppm para as concentrações de dióxido de carbono, o mesmo anteriormente recomendado pela Resolução N° 9 da ANVISA, sendo este nível considerado como seguro ao bem-estar e conforto humano. Apenas em dois momentos durante a quinta coleta houve a presença de *Outliers* com ultrapassagens deste limite, com as concentrações internas de CO₂ atingindo níveis de 1029 e 1301 ppm.

O código de construção Australiano recomenda um nível de 850 ppm de CO₂ no ambiente como sinal de renovação do ar interior para odor corporal (ABCB, 2021). Assim, foi possível verificar registros instantâneos acima deste valor recomendado durante a primeira (980 ppm), terceira (941 ppm) e quinta (1301 ppm) coleta, bem como uma ultrapassagem pontual durante o primeiro monitoramento em regime de inatividade laboratorial (857 ppm).

Por sua vez, a NBR 17037/2023 determina um nível de 700 ppm de CO₂ acima da medida de concentração verificada no ar ambiente exterior da respectiva edificação (ABNT, 2023). Como pode ser observado esta recomendação foi apenas temporariamente descumprida durante a quinta coleta, confirmando a boa qualidade do ar local para este gás.

Mallick e Bergendahl (2009) avaliaram emissões de CO₂ em usinagem usando um ligante de categoria 64/28 durante a usinagem de misturas asfálticas em diferentes temperaturas. O experimento mostrou níveis de 966,6 ppm, 1016,6 ppm e 1033,3 ppm de CO₂ a 155 °C quando utilizado as proporções de 5,0%, 5,5% e 6% de ligante, respectivamente.

Abdullah *et al.* (2016) observaram os níveis de emissão de gases com a utilização de uma mistura asfáltica controle formulada com ligante 80/100 e usinada a 165 °C. Os autores reportaram um valor médio de 889,67 ppm na concentração interna de CO₂ entre o décimo e décimo terceiro minuto de execução dos testes. Estes valores são próximos aos encontrados nesta pesquisa.

Sharma e Lee (2017) utilizaram um analisador portátil para realizar o monitoramento de emissões de CO₂ a partir da usinagem de concreto asfáltico em diferentes temperaturas. Segundo os dados de monitoramento foi verificado uma elevação exponencial das emissões, com concentrações de 700 ppm a 120 °C, 1100 ppm em 140 °C e 7300 ppm a 180 °C.

Li *et al.* (2022) conduziram uma análise experimental com 4,0 g de asfalto base na temperatura de 200 °C em capsula de aquecimento controlada. Os autores observaram um nível de emissão de CO₂ de 171 ppm e 412 ppm em tempos de análise de 20 e 40 minutos, respectivamente.

5.2.2.2 Avaliação de metais e benzo(a)pireno sob condições operacionais não controladas

A Tabela 6 apresenta as concentrações de metais e de benzo(a) pireno (BaP) associados ao PTS na área do ambiente laboratorial em condições ambientais não controladas.

Tabela 6 — Concentração de metais e benzo(a)pireno associados ao PTS coletado no laboratório de usinagem asfáltica sob condições operacionais não controladas

Coleta	Ca (µg/m ³)	Mg (µg/m ³)	Zn (µg/m ³)	Pb (µg/m ³)	Ni (µg/m ³)	V (µg/m ³)	BaP (ng/m ³)
SO	18,4	5,22	ND	ND	ND	ND	ND
ONC-1	76,4	26,8	1,40	ND	ND	ND	ND
ONC-2	96,1	45,9	2,61	ND	ND	ND	4,8
ONC-3	93,5	61,0	3,92	ND	ND	ND	6,4
ONC-4	98,8	35,5	3,21	ND	ND	ND	ND
ONC-5	173,8	124,2	9,42	ND	ND	ND	6,6
ONC-6	96,2	88,2	2,13	ND	ND	ND	5,5
Média*	105,8	63,6	3,78	—	—	—	3,8

ONC: Operação não controlada, SO: Sem operação, ND: Não detectado.* Somente amostras ONC.
Fonte: Autor (2025).

A determinação de metais revelou a presença majoritária de Ca, Mg e traços de Zn no particulado total coletado durante a usinagem das misturas asfálticas. As maiores concentrações de Ca foram observadas no quarto e quinto dia de coleta. O Mg e Zn, por sua vez, foram prevalentes durante o quinto ensaio de mistura asfáltica. O monitoramento durante a ausência de atividades laboratoriais permitiu observar concentrações de 18,4 µg/m³ para Ca e 5,22 µg/m³ para Mg. As demais espécies metálicas de Zn, Pb, Ni e V não foram detectadas no particulado coletado, possivelmente por ocorrerem naturalmente em proporções bem menores do que os demais elementos terrosos. Em condições de processamento das misturas asfálticas os níveis de Ca aumentaram na ordem de 4 a 9 vezes quando comparados à ausência de operações no laboratório. Nesta mesma abordagem foram verificados para o Mg incrementos de 5 até 24 vezes aos valores obtidos durante o período de inatividade.

O Zn, anteriormente não detectado na condição de monitoramento outdoor na área industrial passou a ser identificado na atmosfera interior do ambiente laboratorial com concentrações entre 1,4 e 9,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estes valores ratificam o efeito de confinamento atmosférica de poluentes, que tende a aumentar a quantidades dos materiais na fase gasosa.

A Agência de Administração da Saúde e Segurança ocupacional (OSHA) e o Instituto Nacional de Saúde e Segurança Ocupacional (NIOSH), ambos dos Estados Unidos, atualizam periodicamente os limites laborais permitidos para fumos e óxidos metálicos. Particularmente, para os metais analisados nesta pesquisa são sugeridos os seguintes limites para uma jornada de 8 horas de trabalho: 2 mg/m^3 para CaO; 10 mg/m^3 para MgO; 5 mg/m^3 para ZnO; 0,5 mg/m^3 para Ni e 0,05 mg/m^3 para V_2O_5 (NIOSH, 2007; OSHA, 2024).

Desta forma, a partir dos valores encontrados no ambiente laboratorial em todas as coletas, observa-se de forma favorável uma adequação das concentrações observadas no presente estudo para o Ca expresso como CaO (0,026 mg/m^3 a 0,243 mg/m^3), Mg expresso como MgO (0,009 mg/m^3 a 0,207 mg/m^3) e Zn expresso como ZnO (0,002 mg/m^3 a 0,012 mg/m^3) frente aos padrões internacionais recomendados, o que é relevante do ponto de vista da segurança ocupacional dos usuários no espaço de trabalho.

Iwuoha e Udoh (2016) realizaram a especiação química de metais em dois diferentes tipos de concreto asfáltico e observaram que, depois do Ni e V, o Zn aparecia como o terceiro elemento mais abundante em massa para as amostras analisadas.

Em relação ao benzo(a)pireno, as concentrações encontradas apresentaram um valor mínimo de 4,8 ng/m^3 e máximo de 6,6 ng/m^3 para o segundo e quinto dia de mistura asfáltica, respectivamente. Em especial, este marcador não foi detectado no primeiro e quarto dia de coleta, assim como no período de ausência de atividades laborais.

O BaP é um hidrocarboneto aromático de elevada massa molar tipicamente formado em processos de combustão de materiais carbonáceos em altas temperaturas, sendo frequentemente associado ao material particulado condensado (IARC, 2013). Este composto também é o único entre todos os HPA prioritários atualmente classificado como carcinogênico para humanos (Grupo 1) (IARC, 2010; WHO, 2010).

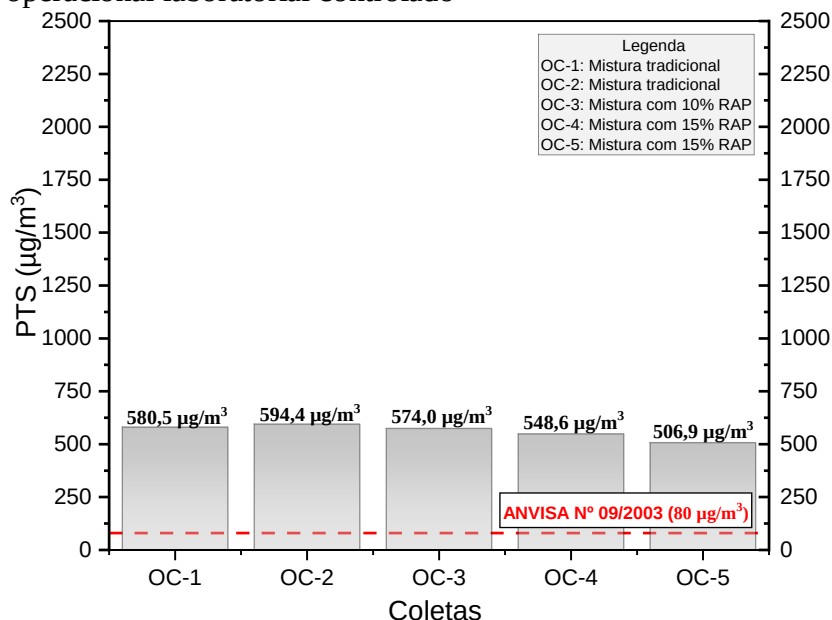
A comunidade europeia estipula sem distinção uma média anual para benzo (a) pireno de 1 ng/m^3 , enquanto a agência ambiental federal alemã (UBA) tem atualmente sugerido um valor guia preliminar para ambientes internos de 0,8 ng/m^3 (EU, 2024; UBA, 2020). Os níveis observados no presente estudo mostraram no ambiente sob monitoramento algumas ultrapassagens destes valores legais, o que pode ser preocupante do ponto de vista da saúde ocupacional dos usuários locais.

5.2.2.3 Monitoramento de particulados e dióxido de carbono (CO₂) sob condições operacionais controladas

Esta seção destaca o monitoramento interno nos ensaios de mistura asfáltica em ambiente laboratorial controlado, com foco especial no uso de diferentes proporções de pavimento asfáltico fresado recuperado (RAP), caracterizando uma atual perspectiva de sustentabilidade ambiental no segmento da pavimentação.

A Figura 19 apresenta as concentrações do PTS amostrado no decorrer da usinagem de um traço de misturas tradicional e com adição de 10 e 15% de RAP.

Figura 19 — Perfil de concentração para PTS em regime operacional laboratorial controlado



OC: Operação controlada.

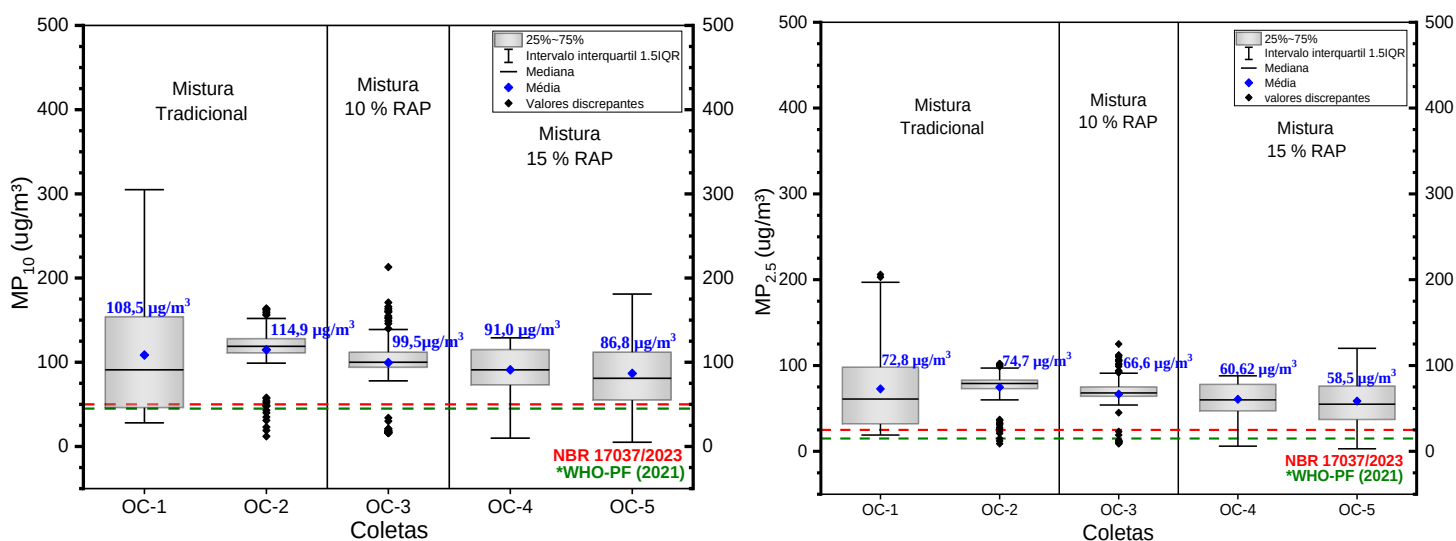
Fonte: Autor (2025).

A usinagem de misturas asfálticas em ambiente laboratorial controlado mostrou uma queda na concentração interna de particulados (média de 560,9 µg/m³) a partir do incremento de material fresado na composição das misturas asfálticas. As coletas OC-1 e OC-2, correspondentes ao monitoramento das misturas tradicionais, apresentaram concentração média de 587,5 µg/m³. Um menor registro de PTS foi observado para a adição de 10% de RAP (574,0 µg/m³) e 15% de RAP (média de 527,8 µg/m³), os quais correspondem aproximadamente a reduções de 2 e 10% na emissão total de particulados. Este comportamento pode estar relacionado a gradativa redução no percentual de pó de pedra a partir do incremento de RAP na composição das misturas asfálticas. Ademais, o balanço mássico das misturas com a adição de

material reciclado ocasiona uma redução na quantidade útil de CAP virgem necessário. Em geral, mesmo com o uso do material reciclado e menor temperatura de operação os níveis de PTS ainda se encontram bem acima do padrão estipulado na Resolução N° 9 da ANVISA (Brasil, 2003), o que pode sugerir uma readequação nas medidas de proteção individuais e coletivas no ambiente de trabalho.

A Figura 20 exibe os gráficos *boxplot* das concentrações de MP_{10} e $MP_{2.5}$ durante o monitoramento da usinagem a quente da mistura controle tradicional e com incremento de material fresado reciclado.

Figura 20 — Perfil de concentração para MP_{10} e $MP_{2.5}$ em operação laboratorial controlada



OC: Operação controlada.
Fonte: Autor (2025).

As concentrações do particulado respirável ($MP_{2.5}$) e inalável (MP_{10}) apresentaram um padrão semelhante ao perfil observado para o PTS coletado. A mistura tradicional exibiu concentração de média de $111,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP_{10} em regime controlado. Em contrapartida, foi observado um nível de emissão de $99,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para adição de 10% de RAP e uma média de $88,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a mistura com 15% de RAP, os quais mostraram uma redução mais significativa das emissões de particulado inalável até $10 \mu\text{m}$ em relação a mistura tradicional ($\sim 11\%$ e 20%).

Os registros da fração de $MP_{2.5}$ também mostraram uma queda proporcional à medida que se acrescentou um maior percentual de fresado ao conteúdo das misturas asfálticas tradicionais. Desta forma, os níveis internos para este poluente atingiram as concentrações de $66,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e média de $59,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para as adições de 10% e 15% de pavimento asfáltico fresado recuperado.

Quando comparados às misturas tradicionais (média de $73,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2.5}$), as reduções de $\text{MP}_{2.5}$ foram de aproximadamente 10 a 19 % para composições contendo 10% e 15 % de RAP, respectivamente, as quais são da mesma ordem de magnitude das observadas para o MP_{10} (~ 11 e 20%) e superiores ao PTS (~ 2 a 10%) para as condições de processamento utilizadas.

Em geral, estas reduções de emissões na operação sob condições controladas (OC) podem ser associadas tanto a composição química das amostras como a temperatura inferior de processamento nesta etapa (155°C), quando comparada a usinagem das misturas com CAP modificado por polímeros ($169,5^\circ\text{C}$) no estudo anterior desta pesquisa sob condições não controladas de execução das atividades laboratoriais (ONC).

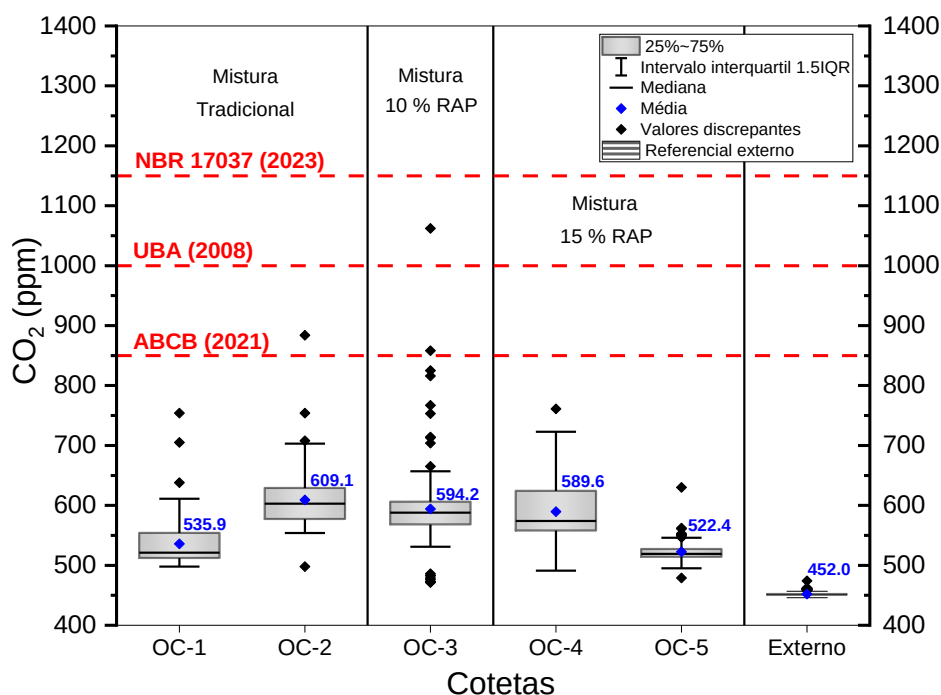
Em termos, constata-se que mesmo nos regimes distintos de operação (ONC e OC), o perfil de concentração de todos os particulados ultrapassaram os valores recomendados tanto nas normas brasileiras quanto nas diretrizes da OMS (Brasil, 2003; ABNT, 2023; WHO, 2021), principalmente para o particulado grosso (PTS). Por outro lado, as reduções nas emissões de particulados inaláveis entre 10 e 20% já podem ser consideradas promissoras para aplicações sustentáveis em grande escala para produções de misturas asfálticas processadas a quente.

Shiying, Wingtat e Zhen (2016) avaliaram emissões atmosféricas geradas a partir de quatro tipos de misturas asfálticas amplamente empregadas em Hong Kong. As medições em ambiente laboratorial demonstraram concentrações de $\text{MP}_{2.5}$ variando entre $31,6$ e $115,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante um intervalo de 5 minutos de mistura. Os pesquisadores atribuíram estes níveis de particulados ao conteúdo de material fino nos agregados (filler), bem como a elevada temperatura de trabalho para o manuseio de um ligante modificado com polímeros do tipo SBS.

Bualuang *et al.* (2025) investigaram em laboratório a emissão de particulados durante a usinagem de dois tipos mistura asfáltica. O monitoramento realizado na temperatura de usinagem de 165°C apresentou concentrações de $\text{MP}_{2.5}$ na ordem de $280 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma mistura convencional e de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma mistura incorporada de plástico reciclado, os quais são bem superiores aos observados nos respectivos ensaios laboratoriais controlados de misturas tradicionais e com adição de material fresado reciclado.

A seguir são apresentados os resultados de monitoramento das emissões de CO_2 durante o processamento das misturas asfálticas em condições controladas (Figura 21).

Figura 21 — Perfil de emissão de CO₂ em operação laboratorial controlada



OC: Operação controlada.

Fonte: Autor (2025).

O manuseio de materiais asfálticos em condições de operação controlada permitiu observar de forma geral uma leve diminuição nas emissões internas de CO₂, quando se considera a média de 572,5 ppm observada na usinagem asfáltica das misturas tradicionais. Em tempo, o monitoramento das misturas compostas de material reciclado, mostrou uma concentração de 594,2 ppm em (OC-3) para o uso de 10% de RAP e uma média de 556 ppm de CO₂ (OC-4 e OC-5) para o emprego de 15% de RAP. Assim, somente para essa maior adição de fresado é que pode se inferir alguma redução das emissões de CO₂, correspondente a cerca de apenas 3%. Apesar da grande variabilidade de concentrações e a exceção de alguns valores discrepantes (*Outliers*), os níveis de CO₂ no ambiente laboratorial se mostraram adequados às recomendações da legislação nacional e internacional utilizadas para comparação da qualidade do ar interior.

Sol-Sánchez *et al.* (2016) avaliaram a produção industrial de misturas asfálticas para o uso de ligante convencional (B50/70) e outro modificado com surfactantes. Os autores observaram que a usinagem de mistura a quente (HMA) apresentou uma contribuição de 2,5% nas emissões de CO₂, enquanto um percentual de 1,6% foi verificado na fabricação de misturas mornas (WMA). Estes resultados apresentam concordância com o observado por Rubio *et al.* (2013).

A usinagem de misturas asfálticas mornas (WMA) foi avaliada quanto ao consumo energético e volume de emissões por Hamzah, Jamshidi e Shahadan (2010). Os autores utilizaram um ligante com grau de penetração 80/100 e estimaram uma redução de 3% de Kg de CO₂ por tonelada de mistura para cada incremento percentual do aditivo Sasobit®.

5.2.2.4 Avaliação de metais sob condições operacionais controladas

A Tabela 7 destaca a quantificação de metais associados ao PTS coletado sob regime de operação laboratorial controlado.

Tabela 7 — Concentração de metais associados ao PTS coletado no laboratório de usinagem asfáltica sob condições operacionais controladas*

Coleta	% RAP	Ca (µg/m ³)	Mg (µg/m ³)	Zn (µg/m ³)	Pb (µg/m ³)	Ni (µg/m ³)	V (µg/m ³)
OC-2	—	30,2	12,2	7,21	ND	ND	ND
OC-3	10	27,4	11,7	6,65	ND	ND	ND
OC-4	15	26,1	10,9	6,27	ND	ND	ND
Média	—	27,9	11,6	6,71	—	—	—

OC: Operação controlada, ND: Não detectado. * Nesta etapa não foi possível avaliar as concentrações de B(a)P. Fonte: Autor (2025).

A análise dos filtros coletados durante a usinagem controlada de misturas asfálticas permitiu constatar reduções gradativas de metais associados aos particulados. O cálcio aparece em fração majoritária entre os elementos analisados, apresentando uma concentração de 30,2 µg/m³ para a mistura controle tradicional (OC-2) usada na determinação. Já os ensaios conduzidos com 10 e 15% de RAP apresentaram níveis de 27,4 e 26,1 µg/m³, respectivamente, os quais correspondem a reduções próximas a 13% de emissão deste metal. Da mesma forma foi possível estimar reduções máximas de aproximadamente 10% para a emissão de Mg e 13% para as emissões de Zn a partir das misturas sustentáveis contendo fresado (RAP) em sua composição. Os demais metais como Pb, Ni e V não foram detectados nos extratos ácidos dos particulados. A ausência destes elementos metálicos representa um bom indicativo ocupacional para os usuários do laboratório. Contudo, considerando a sensibilidade analítica das determinações, medidas de controle individuais podem ser recomendadas.

A redução gradativa de elementos metálicos nos filtros coletados pode estar associada a uma diminuição de filler (pó) no traço das misturas, visto que o volume e o manuseio de materiais agregados no início da usinagem configuram-se como um complicador da qualidade

do ar, uma vez que finos de poeira mineral são intensamente suspensos na etapa de alimentação do misturador.

Bualuang *et al.* (2025) investigaram a presença de metais pesados em particulados emitidos durante a fase de usinagem de misturas asfálticas. A especiação química do $MP_{2.5}$ revelou concentrações de $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para chumbo (Pb), $2,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para mercúrio (Hg) e $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de cromo (Cr). Ademais, foram observadas quantidades traço ($< 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de cádmio (Cd) e arsênio (As). Advertidamente, observa-se que a elevada presença de chumbo e mercúrio no estudo supracitado representa um indicativo preocupante para a saúde das pessoas.

6 CONCLUSÃO

O monitoramento de composições relativas a emissões atmosféricas em ambiente externo na área industrial revelou níveis elevados de particulados na usina de mistura asfáltica. Os registros obtidos durante o momento da atividade industrial denotaram concentrações de PTS e MP_{10} acima do padrão de qualidade do ar estipulado na legislação brasileira. Para este período foram observados níveis de até $480,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PTS e $192,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} . Particularmente, observa-se que apenas durante o regime de precipitação pluviométrica e inatividade da usina houve uma adequação aos regulamentos da legislação vigente.

A análise de metais no PTS coletado durante a usinagem industrial de misturas asfálticas revelou valores máximos de $26,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $7,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Ca e Mg, respectivamente. A ausência de espécies de Pb, Ni e V no particulado coletado representou um bom indicativo para a saúde dos operários locais, especialmente em relação ao chumbo, que é contemplado na resolução Nº 506 do CONAMA. Por outro lado, o hidrocarboneto policíclico aromático benzo(a)pireno foi detectado em magnitudes até 10 vezes acima do valor normalmente recomendado pela União Europeia, o que representa uma preocupação com a saúde ambiental.

A avaliação da atmosfera interior no laboratório de misturas asfálticas revelou que os níveis de particulados (PTS, MP_{10} e $MP_{2.5}$) sofrem grande influência da temperatura e tempo de usinagem empregados e das condições de manuseio dos materiais agregados. Os níveis de emissão de PTS atingiram $1153,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no ambiente laboratorial não controlado, enquanto a execução planejada de misturas asfálticas revelou uma concentração média de $560,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Desta forma, a adoção de medidas de controle no ambiente interno resultou numa queda de 51,3% na emissão do particulado total.

As medidas laboratoriais de particulados inaláveis (MP_{10}) resultaram em médias globais de $243,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (6 coletas) e $100,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5 coletas) para o regime de operação não controlado (ONC) e controlado (OC), respectivamente. Por sua vez, os níveis de emissão para $MP_{2.5}$ apresentaram concentrações médias de $161,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na ONC e de $66,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a OC. Os valores encontrados são preocupantes do ponto de vista da qualidade do ar, pois todos se mostraram inadequados aos limites de emissão recomendados tanto nas diretrizes da OMS quanto pela NBR 17037. Em princípio, a correlação entre a natureza dos materiais utilizados e o perfil de emissão verificado pressupõe que grande parcela dos particulados emitidos são decorrentes dos fumos de asfalto.

As emissões de dióxido de carbono (CO_2) em ambiente laboratorial durante todos os regimes de monitoramento mostraram grande variabilidade das concentrações, apresentando média global de 674,0 ppm sob o regime de operação laboral não controlado. Por outro lado, foi registrada uma concentração média de 570,2 ppm a partir do controle das condições operacionais no laboratório, o que representa uma diminuição de cerca de 15,4% nos níveis de emissão deste poluente. Em geral, os registros de concentração de CO_2 se mostraram adequados às legislações nacionais (NBR 17037) e internacionais (UBA e ABCB) usadas como referência da exposição ocupacional.

A análise química dos particulados coletados em ambiente interno constatou a prevalência de Ca e Mg nas amostras, embora o Zn também tenha sido detectado. A presença majoritária de elementos terrosos está associada à origem mineralógica dos agregados, bem como das condições de manuseio destes materiais nas dependências do laboratório. Em tempo, as concentrações de metais nos particulados coletados estiveram sempre de acordo com os limites permitidos nas normas ocupacionais internacionais.

A determinação de HPA no ambiente laboratorial revelou a presença de benzo(a)pireno em quatro coletas realizadas durante os ensaios de mistura asfáltica (regime ONC), com um registro de concentração máximo de $6,6 \text{ ng/m}^3$. Em todos os casos as concentrações encontradas não atenderam ao critério internacional para ambientes internos recomendados pela legislação Europeia.

O reaproveitamento de pavimento asfáltico reciclado (RAP) nas adições de 10% e 15% resultou numa redução das emissões de particulados e nos níveis médios de CO_2 quando se comparam os regimes de operação sem controle e com controle das condições laboratoriais. Ainda, constatou-se uma diminuição substancial da poluição atmosférica decorrente do incremento gradual do material fresado na usinagem das misturas asfálticas. Em tempo, é necessário ressaltar que este comportamento pode variar dependendo do percentual de substituição e das características dos materiais utilizados no processo de usinagem asfáltica.

O monitoramento das emissões atmosféricas nas etapas de produção de misturas asfálticas usinadas a quente mostrou-se importante para o levantamento de dados que possam orientar uma gestão eficiente da qualidade do ar em ambientes externos ou internos impactados por poluentes como: PTS, MP_{10} , $\text{MP}_{2.5}$, CO_2 , Ca, Mg, Zn, Pb, Ni, V e benzo(a)pireno. Notadamente, os resultados encontrados podem contribuir para a formulação de políticas públicas regulatórias que assegurem a saúde ocupacional e a qualidade de vida das pessoas envolvidas no ciclo de produção da pavimentação asfáltica.

Considerando a continuidade no mapeamento de poluentes atmosféricos emitidos durante o manuseio de misturas asfálticas, são sugeridas algumas abordagens de investigação que podem constituir temáticas interessantes para pesquisas futuras, tais como:

- Avaliar espacialmente a influência dos parâmetros meteorológicos nos níveis de emissão de poluentes atmosféricos em planta industrial de mistura asfáltica.
- Investigar a emissão de outros poluentes gasosos de interesse para a qualidade do ar local como: NO₂, SO₂, CO, O₃, COV, BTEX e NMHC.
- Avaliar a emissões de poluentes a partir de maiores percentuais de substituição de RAP na composição de misturas asfálticas usinadas a quente.
- Estimar as contribuições de emissão/poluição atmosférica das diferentes etapas de ensaio e caracterização de materiais em ambiente interno.
- Estabelecer banco de dados correlacionando os materiais empregados na usinagem de misturas asfálticas aos seus respectivos níveis de emissão de poluentes atmosféricos.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, I.; BADRAN, G.; VERDIN, A.; LEDOUX, F.; ROUMIÉ, M.; COURCOT, D.; GARÇON, G. Polycyclic aromatic hydrocarbon derivatives in airborne particulate matter: sources, analysis and toxicity. **Environmental Chemistry Letters**, v. 16, p. 439–475, 2018.
- ABCB. **Handbook**: indoor air quality. Australia: Australian Building Codes Board, 2021.
- ABDULLAH, M. E.; HAININ, M. R.; YUSOFF, N. I. M.; ZAMHARI, K. A.; HASSAN, N. Laboratory evaluation on the characteristics and pollutant emissions of nanoclay and chemical warm mix asphalt modified binders. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 488–497, 2016.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13412**: material particulado em suspensão na atmosfera: determinação da concentração de partículas inaláveis pelo método do amostrador de grande volume acoplado a um separador inercial de partículas. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9547**: material particulado em suspensão no ar ambiente: determinação da concentração total pelo método do amostrador de grande volume. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: materiais betuminosos: determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16208**: misturas asfálticas: determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17037**: qualidade do ar interior em ambientes não residenciais climatizados artificialmente: padrões referenciais. Rio de Janeiro, 2023.
- ALCANTARA, A. P. M. P.; RIBEIRO, J. P.; ROCHA SEGUNDO, I. G.; SILVA, D. B.; CARVALHO, L. M.; DOGNINI, J.; CARNEIRO, J. A. S. A. O.; SOUZA, F. W.; BRANCO, V. T. F. C. Diagnóstico de emissões de poluentes atmosféricos na produção de misturas asfálticas. **Transportes**, v. 31, n. 3, p. 1–12, 2023.
- ADOLFO, F. R.; CLAUSSEN, L. E.; CARGNIN, R. S.; BRUDI, L. C.; GRASMANN, C. S.; NASCIMENTO, P. C.; CRAVO, M.; NASCIMENTO, L. A.; ALCANTARA, A. P. M. P.; BRANCO, V. T. F. C.; CARVALHO, L. M. Influence of thermal aging and long term-aging on Ni and V content in asphalt fractions and their determination in air particulate matter from asphalt mixing plants. **Fuel**, v. 324, p. 124289, 2022.
- AFIFA; ARSHAD, K.; HUSSAIN, N.; ASHRAF, M. H.; SALEEM, M. Z. Air pollution and climate change as grand challenges to sustainability. **Science of the Total Environment**, v. 928, p. 172370, 2024.

AI; EUROBITUME. Asphalt Institute and Eurobitume. **IS-230. The bitumen industry - a global perspective: production, chemistry, use, specification and occupational exposure**. 4th ed. Netherlands: Asphalt Institute Inc. and European Bitumen Association, 2024.

ALEGBELEYE, O. O.; OPEOLU, B. O.; JACKSON, V. A. Polycyclic aromatic hydrocarbons: a critical review of environmental occurrence and bioremediation. **Environmental Management**, v. 60, p. 758–783, 2017.

ARYAN, Y.; DIKSHIT, A. K.; SHINDE, A. M. A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures. **Journal of Environmental Management**, v. 336, p. 1–19, 2023.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 p.

BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U.; KIGGUNDU, B. M. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. **The International Journal of Pavement Engineering**, v. 6, n. 4, p. 229–239, 2005.

BANSAL, V.; KIM, K-H. Review of PAH contamination in food products and their health hazards. **Environment International**, v. 84, p. 26–38, 2015.

BARBOSA, L. M. **Avaliação das concentrações de material particulado, NO₂ e SO₂ resultantes dos serviços de pavimentação asfáltica em um ambiente urbano**. 2019. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2022.

BİNGÜL, Z.; ALTİKAT, A. Environmental permit process on emissions of asphalt plant. **Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering**, v. 21, n. 1, p. 106–113, 2020.

BUALUANG, T.; JITSANGIAM, P.; JAKRAWATANA, N.; TEERATITAYANGKUL, P.; VONGRUANG, P.; THIENCHAI, C.; WONGCHANA, P.; PROMMARIN, J. Utilization of plastic waste in hot mix asphalt using dry mixing processes: Laboratory assessment of airborne microplastics. **Results in Engineering**, v. 25, p. 104464, 2025.

BUKOWSKA, B.; MOKRA, K.; MICHALOWICZ, J. Benzo[a]pyrene – Environmental occurrence, human exposure and mechanisms of toxicity. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 11, p. 1–30, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima/Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Nº 506, de 5 de julho de 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 162, n. 130, p. 133, 9 jul. 2024. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=09/07/2024&jornal=515&pagina=133&totalArquivos=249>. Acesso em: 20 nov. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução Nº 9, de 16 de janeiro de 2003. Determina orientação técnica elaborada por grupo técnico assessor sobre padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 140, n. 14, p. 35, 20 jan. 2003. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=20/01/2003&jornal=1&pagina=35&totalArquivos=64>. Acesso em: 25 nov. 2024.

CALA, A.; CARO, S.; LIERAS, M.; ROJAS-AGRAMONTE, Y. Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 661–672, 2019.

CARDOSO, B.; COSTA, A. C. **ABEDA**: 50 anos na estrada do asfalto. Rio de Janeiro: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2016. 267 p.

CEN. Comité Européen de Normalization. **EN 12697-35**: bituminous mixtures: test methods – part 35: laboratory mixing. Brussels, Belgium, 2016.

COSTA, W. F. S.; FERNANDES, O. J. C.; SOUSA, M. S. C. Caracterização de escórias de aciaria e de alto-forno produzidas em usinas ao longo da estrada de ferro carajás para aplicação industrial. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 28., 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Minas Gerais: UFMG, 2019. p. 1–8.

CHANG, X.; XIAO, Y.; LONG, Y.; WANG, F.; YOU, Z. Temperature dependency of VOCs release characteristics of asphalt materials under varying test conditions. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 9, n. 2, p. 280–292, 2022.

DAT, N-D.; CHANG, M. B. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 682–693, 2017.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 274 p.

DUARTE, G. M.; FAXINA, A. L. Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: a literature review. **Construction and Building Materials**, v. 312, p. 125408, 2021.

EAPA. **Environmental guidelines on best available techniques (BAT) for the production of asphalt paving mixes**. Brussels: European Asphalt Pavement Association., 2007. 54 p.

ELDESOUKI, M. H.; RASHED, A. E.; EL-MONEIM, A. A. A comprehensive overview of carbon dioxide, including emission sources, capture technologies, and the conversion into value-added products. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25, p. 3131–3148, 2023.

ELIHN, K.; UIVESTAD, B.; HETLAND, S.; WALLÉN, A.; RANDEM, B. G. Exposure to ultrafine particles in asphalt work. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 5, n. 12, p. 771–779, 2008.

EU. European Commission. Directive (EU) 2024/2881 of the European parliament and of the council of 23 October, 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe. **Official Journal of the European Union**: L series, Strasbourg, FR, 20 Nov. 2024. 70 p.

EPD. Environmental Protection Department. **Hong Kong's Air Quality Objectives (AQOs)**. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong, 11 Apr. 2025. Disponível em: https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/air_quality_objectives/air_quality_objectives.html. Acesso em: 3 jul. 2025.

FAKHER, S.; AHDAYA, M.; ELTURKI, M.; IMQAM, A. Critical review of asphaltene properties and factors impacting its stability in crude oil. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, v. 10, p. 1183–1200, 2020.

FARMER, D. K.; BOEDICKER, E. K.; DEBOLT, H. M. Dry deposition of atmospheric aerosols: approaches, observations and mechanisms. **The Annual Review of Physical Chemistry**, v. 72, p. 375–397, 2021.

FONTENELE, P. V. G.; BRANCO, V. T. F. C.; CAVALCANTE, R. M.; FERREIRA, W. L. G.; ROCHA, C. A. Avaliação da exposição e risco de câncer em trabalhadores da pavimentação: um estudo baseado nos níveis de partículas respiráveis presentes nos fumos de asfalto. **Transportes**, v. 26, n. 2, p. 16–30, 2018.

FOHIMI, N. A. M.; HYIE, K. M.; NASIR, S. S. M.; HUSSIN, N.; IDRUS, F. Experimental study of indoor air temperature in the laboratory. **Journal of Advanced Research in Experimental Fluid Mechanics and Heat Transfer**, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2023.

FOSTER, W. M. Deposition and clearance of inhaled particles. In: HOLGATE, S. T.; SAMET, J. M.; KOREN, H. S.; MAYNARD, R. L. **Air pollution and health**. London: Academic Press, 1999. p. 295–324.

FLORKOVA, Z.; SEDIVY, S.; PASTORKOVA, J. The environmental impact of asphalt mixtures production for road infrastructure. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1015, 2021.

FREITAS, H. B.; MOTTA, L. M. G. Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. **Transportes**, v. 16, n. 2, p. 5–12, 2008.

GASTHAUER, E.; MAZÉ, M.; MARCHAND, J. P.; AMOUROUX, J. Characterization of asphalt fume composition by GC/MS and effect of temperature. **Fuel**, v. 87, n. 7, p. 1428–1434, 2008.

GEBRESELASSIE, A. G. **Community exposure to particulate matter and its impact for students and residents near a construction asphalt plant: a case study**. 2019. Thesis (Master's degree in Public Health) – University of Nevada, Las Vegas, 2019.

GAUDEFROY, V.; VIRANAIKEN, V.; PARANHOS, R.; JULLIEN, A.; DE LA ROCHE, C. Laboratory assessment of fumes generated by bituminous mixtures and bitumen. **Road Materials and Pavement Design**, v. 11, n. 1, p. 83–100, 2010.

GUIMARÃES, J. R. P. F. **Riscos para saúde dos trabalhadores de pavimentação com asfalto: as emissões tóxicas do asfalto**. Texto técnico, 3ª Conferência Nacional da Saúde dos Trabalhadores. Brasília DF, 2005. Disponível em: https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/trabalhador/pdf/texto_pavimentacao_ruas.pdf. Acesso em: 20 Ago. 2024.

GRATSEA, M.; ATHANASOPOULOU, E.; KAKOURI, A.; RICHTER, A.; SEYLER, A.; GERASOPOULOS, E. Five years of spatially resolved ground-based MAX-DOAS measurements of nitrogen dioxide in the urban area of Athens: synergies with in situ measurements and model simulations. **Atmosphere**, v. 12, n. 12, p. 1–19, 2021.

HAMZAH, M. O.; JAMSHIDI, A.; SHAHADAN, Z. Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO₂ emission in the asphalt industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 18, p. 1859–1865, 2010.

HSE. Health and Safety Executive. **EH40/2005 Workplace exposure limits for use with the control of substances hazardous to health regulations 2002**. 4th ed. London: TSO (The Stationery Office), 2020.

IA. INSTITUTO DE ASFALTO. **Manual de asfalto No. 4 (MS-4)**. Rio de Janeiro: IA, 2001.

IARC. International Agency for Research on Cancer. **Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures**. v. 92. Lyon, France: Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010. ISBN: 978-092-832-1292-8.

IARC. International Agency for Research on Cancer. **Bitumens and bitumen emissions, and some N- and S- heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons**. v. 103. Lyon, France: Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2013. ISBN: 978-92-832-1326-0

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Balanço de abril de 2024 em Fortaleza, CE**. Recife: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, maio de 2024. Disponível em: < <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Balan%C3%A7o-Fortaleza-Abril-2024-Revisado.pdf> >. Acesso em: 20 set. 2024.

IPR. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **NORMA DNIT 412/2019 – ME: pavimentação: misturas asfálticas: análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento: método de ensaio**. Brasília, DF, 2019.

IRGA, P. J.; MULLEN, G.; FLECK, R.; MATHESON, S.; WILKINSON, S. J.; TORPY, F. R. Volatile organic compounds emitted by humans indoors – a review on the measurement, test conditions, and analysis techniques. **Building and Environment**, v. 255, p. 111442, 2024.

IWUOHA, G. N.; UDOH, C. Volatile organic compounds and heavy metals in asphalt concrete used in road surfacing of east west road, Nigeria. **Journal of Chemical Society of Nigeria**, v. 41, n. 1, p. 94–98, 2016.

JULLIEN, A.; GAUDEFROY, V.; VENTURA, A.; DE LA ROCHE, C.; PARANHOS, R.; MONÉRON, P. Airborne emissions assessment of hot asphalt mixing: methods and limitations. **Road Materials and Pavement Design**, v. 11, n. 1, p. 149–169, 2010.

JULLIEN, A.; MONÉRON, P.; QUARANTA, G.; GAILLARD, D. Air emissions from pavement layers composed of varying rates of reclaimed asphalt. **Resources Conservation & Recycling**, v. 47, n. 4, p. 356–374, 2006.

KHARAT, D. S. Emissions from hot mix asphalt plants and their impact on ambient air quality. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, n. 464, p. 1–9, 2022.

KIM, K-H.; JAHAN, S. A.; KABIR, E.; BROWN, R. J. C. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. **Environment International**, v. 60, p. 71–80, 2013.

KRAFT, M.; EIKMANN, T.; KAPPOS, A.; KÜNZLI, N.; RAPP, R.; SCHNEIDER, K.; SEITZ, H.; VOSS, J-U.; WICHMANN, H-E. The German view: effects of nitrogen dioxide on human health – derivation of health-related short-term and long-term values. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 208, n. 4, p. 305–318, 2005.

LASNE, J.; LOSTIER, A.; SALAMEH, T.; ATHANASOPOULOU, E.; KARAGIANNIS, D.; KAKOURI, A.; VASSAUX, S.; LESUEUR, D.; ROMANIAS, M. N. NO_x emissions by real-world fresh and old asphalt mixtures: impact of temperature, relative humidity and UV-irradiation. **Urban Climate**, v. 49, p. 1–17, 2023.

LEITE, L. M. F.; MOTTA, L. M. G.; COSTA, E. C.; TEIXEIRA, L. H.; MORILHA, A.; MARTINS, L. D. **Informações básicas sobre materiais asfálticos**: a importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), 2021. 191 p.

LEVY, R. J. Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: a public health concern. **Neurotoxicology and Teratology**, v. 49, p. 31–40, 2015.

LI, G.; QI, C.; HAN, S.; LI, M.; WANG, X.; FAN, L.; YAO, Y.; KUANG, D. From crude oil to bitumen: Genetic variability in chemistry and its influence on viscoelastic of binders. **Construction and Building Materials**, v. 444, p. 1–15, 2024.

LI, J.; QIN, Y.; ZHANG, X.; SHAN, B.; LIU, C. Emission characteristics, environmental impacts, and health risks of volatile organic compounds from asphalt materials: A state-of-the-art review. **Energy & Fuels**, v. 38, p. 4787–4802, 2024.

LI, N.; JIANG, Q.; WANG, F.; CUI, P.; XIE, J.; LI, J.; WU, S.; BARBIERI, D. M. Comparative assessment of asphalt volatile organic compounds emission from field to laboratory. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123479, 2021.

LI, X.; YUAN, F.; SHEN, J.; JIA, J.; GAO, J. Application of wood powder for asphalt CO₂ emission reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134127, 2022.

LIU, Y.; SU, P.; LI, M.; YOU, Z.; ZHAO, M. Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 7, n. 5, p. 573–599, 2020.

LIU, T. Air pollution control for a hot mix asphalt plant. **Academic Journal of Architecture and Geotechnical Engineering**, v. 3, n. 1, p. 52–66, 2021.

LOSACCO, C.; PERILLO, A. Particulate matter air pollution and respiratory impact on humans and animals. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 33901–33910, 2018.

MADUREIRA, L. A. B. **Misturas asfálticas: conceituação, materiais e dosagem**. Brasília: DNIT, 2023. 31 p.

MALLICK, R. B.; BERGENDAHL, J. A laboratory study on CO₂ emission from asphalt binder and its reduction with the use of warm mix asphalt. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 2, n. 4, p. 275–283, 2009.

MARTIN, H.; KERSTIN, Z.; JOACHIM, M. Reduced emissions of warm mix asphalt during construction. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. S2, p. S568–S577, 2019.

MA, F.; SHA, A.; LIN, R.; HUANG, Y.; WANG, C. Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: a case study in China. **Environmental Research and Public Health**, v. 13, n. 3, p. 1–15, 2016.

MA, Y.; HUANG, Y.; WU, J.; E, J.; ZHANG, B.; HAN, D.; ONG, H. C. A review of atmospheric fine particulate matters: chemical composition, source identification and their variations in Beijing. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 44, n. 2, p. 4783–4807, 2022.

MANGOTRA, A.; SINGH, S. K. Volatile organic compounds: a threat to the environment and health hazards to living organisms – a review. **Journal of Biotechnology**, v. 382, p. 51–69, 2024.

MENG, X. *et al.* Short term associations of ambient nitrogen dioxide with daily total, cardiovascular, and respiratory mortality: multilocation analysis in 398 cities. **The British Medical Journal**, v. 372, n. 534, 2021.

MILAD, A. *et al.* A Comparative review of hot and warm mix asphalt technologies from environmental and economic perspectives: towards a sustainable asphalt pavement. **Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 22, p. 1–23, 2022.

MIRWALD, J.; WERKOVITS, S.; CAMARGO, I.; MASCHAUER, D.; HOFKO, B.; GROTHE, H. Understanding bitumen ageing by investigation of its polarity fractions. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 1–10, 2020.

MOHAJAN, H. K. Acid rain is a local environment pollution but global concern. **Open Science Journal of Analytical Chemistry**, v. 3, n. 5, p. 1–19, 2018.

MOHAMMED, A. M. F.; SALEH, I. A. A review of environmental emissions from asphalt plants and paving. **Material Science & Engineering International Journal**, v. 7, n. 2, p. 59–66, 2023.

MONTELEONE, M.; DI LUCA, G.; FILOMIA, M.; FUOCO, A.; FIGOLI, A.; JANSEN, J. C. Odours in asphalt: analysis of the release of H₂S from bitumen by a mass spectrometric residual gas analyser. **Methods and Protocols**, v. 7, n. 4, p. 1–10, 2024.

MOO, A.; BYWOOD, P.; SILVA, D.; MCMILLAN, J. **Bitumen contents and fumes: health effects associated with exposure to bitumen**. Australia: Institute for Safety, Compensation and Recovery Research, 2019. 33 p.

MUNYEZA, C. F.; ROHWER, E. R.; FORBES, P. B. C. A review of monitoring of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons: an African perspective. **Trends in Environmental Analytical Chemistry**, v. 24, p. 1–11, 2019.

NAGAR, J. K.; AKOLKAR, A. B.; KUMAR, R. A review on airborne particulate matter and its sources, chemical composition and impact on human respiratory system. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 5, n. 2, p. 447–463, 2014.

NANTHAKUMAR, C.; SAKTHIKUMARAN, M.; SIVASHANKAR, G. Carbon dioxide – The frontline greenhouse gas. **International Journal of Computing Algorithm**, v. 7, n. 1, p. 4–10, 2018.

NICHOLLS, J. C. **Asphalt surfacings: a guide to asphalt surfacings and treatments used for the surface course of road pavements**. London, UK: E & FN Spon, 1998.

NIOSH. **Hazard review: health effects of occupational exposure to asphalt**. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health, 2000. 132 p.

NIOSH. **NIOSH pocket guide to chemical hazards**. 3. ed. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health, 2007. 424 p. Disponível em: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/21265#tabs-2>. Acesso em: 22 nov. 2024.

NISBET, I. C. T.; LAGOY, P. K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 16, n. 3, p. 290–300, 1992.

ORELLANO, P.; REYNOSO, J.; QUARANTA, N. Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: a systematic review and meta-analysis. **Environment International**, v. 150, p. 1–14, 2021.

OSHA. Occupational safety and health administration. **Permissible exposure limits – Annotated table Z-1**. Washington, DC, 2024. Disponível em: <https://www.osha.gov/annotated-pels/table-z-1>. Acesso em: 22 nov. 2024.

PANYACOSIT, L. **A review of particulate matter and health**: focus on developing countries (Interim Report IR-00-005). Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2000.

PIPINTAKOS, G.; SREERAM, A.; MIRWALD, J.; BHASIN, A. Engineering bitumen for future asphalt pavements: A review of chemistry, structure and rheology. **Materials & Design**, v. 244, p. 113157, 2024.

PIRACELLI, V. P.; AMADOR, I. R.; SABINO, F. C.; PINTO, J. P.; SILVA, C. R.; SOLCI, M. C. Emissões de poluentes atmosféricos em condições reais de pavimentação asfáltica: material particulado, black carbon e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. **Química Nova**, v. 43, n. 4, p. 404–412, 2020.

PRENTICE, I. C. *et al.* The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P. J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. **Climate change 2001**: the Scientific basis, Intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001. p. 183–237.

QUINTANA, H. A. R.; FARIAS, M. M.; LIZCANO, F. A. R. Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión. **Revista Ingenierías Universidad de Medellín**, v. 17, n. 33, p. 71–97, 2018.

QUINTANA, H. R.; CHAVES-PABÓN, S.; ESCOBAR, D. A. Evaluation of a warm mix asphalt manufactured with blast furnace slag. **Modern Applied Science**, v. 12, n. 12, p. 28–40, 2018.

QU, S.; FAN, S.; WANG, G.; HE, W.; XU, K.; NIE, L.; ZHAO, Y.; ZHU, Q.; LI, T.; LI, G. Air pollutant emissions from the asphalt industry in Beijing, China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 109, p. 57–65, 2021.

RATHORE, M.; ZAUMANIS, M. Impact of laboratory mixing procedure on the properties of reclaimed asphalt pavement mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120709, 2020.

RIBAS, L. V. S.; ALCANTARA, A. P. M. P.; BARBOSA, L. M.; BRITO, J. I. C.; BRANCO, V. T. F. C. Asphalt emissions in paving production, transportation, placement and in-service temperature conditions. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1–17, 2025

ROBERS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D-Y.; KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt material, mixture design, and construction**. 2nd ed. Maryland: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996.

ROY, P.; SARDAR, A. SO₂ emission control and finding a way out to produce sulphuric acid from industrial SO₂ emission. **Journal of Chemical Engineering & Process Technology**, v. 6, n. 2, p. 1–7, 2015.

RUBIO, M. C.; MORENO, F.; MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M. J.; MARTÍNEZ, G.; VÁZQUEZ, J. M. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 1–6, 2013.

SÁNCHEZ-COTTE, E. H.; PACHECO-BUSTOS, C. A.; FONSECA, A.; TRIANA, Y. P.; MERCADO, R.; YEPES-MARTÍNEZ, J.; ESPINOZA, R. G. L. The chemical-mineralogical characterisation of recycled concrete aggregates from different sources and their potential reactions in asphalt mixtures. **Materials**, v. 13, n. 24, p. 5592, 2020.

SANDAKA, G.; GOUVEIA, L. T.; SENGER, L. J. Emissões do asfalto e seus efeitos na saúde humana. **Transportes**, v. 26, n. 2, p. 167–179, 2018.

SINGH, K.; TRIPATHI, D. Particulate matter and human health (Chapter 3). *In*: OTSUKI, T. **Environmental health**. London: IntechOpen, 2021. p. 33–48. DOI: 10.5772/intechopen.100550

SIMMONS, W. A.; SEAKINS, P. W. Estimations of primary nitrogen dioxide exhaust emissions from chemiluminescence NO_x measurements in a UK road tunnel. **Science of the Total Environment**, v. 438, p. 248–259, 2012.

SIVILEVIČIUS, H.; ŠUKEVIČIUS, Š. Manufacturing technologies and dynamics of hot-mix asphalt mixture production. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 15, n. 2, p. 169–179, 2009.

SOL-SÁNCHEZ, M.; MORENO-NAVARRO, F.; GARCÍA-TRAVÉ, G.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Analysing industrial manufacturing in-plant and in-service performance of asphalt mixtures cleaner technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 56–63, 2016.

SUN, G.; NING, W.; JIANG, X.; QIU, K.; CAO, Z.; DING, Y. A comprehensive review on asphalt fume suppression and energy saving technologies in asphalt pavement industry. **Science of the Total Environment**, v. 913, p. 169726, 2024.

SCHRAUFNAGEL, D. E. *et al.* Air pollution and noncommunicable diseases – a review by the forum of international respiratory societies' environmental committee, Part 1: the damaging effects of air pollution. **Chest**, v. 155, n. 2, p. 409–416, 2019.

SHARMA, A.; LEE, B-K. Energy savings and reduction of CO₂ emission using Ca(OH)₂ incorporated zeolite as an additive for warm and hot mix asphalt production. **Energy**, v. 136, p. 142–150, 2017.

SHELL. **The shell bitumen handbook**. 6th ed. London: ICE Publishing, 2015. 808 p.

SHIYING, L.; WINGTAT, H.; ZHEN, L. Air pollutant emissions and acoustic performance of hot mix asphalts. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 1–10, 2016.

SPEIGHT, J. G. **The chemistry and technology of petroleum**. 4th ed. London: CRC Press, 2006. 984 p.

STRATIEV, D.; SHISHKOVA, I.; TANKOV, I.; PAVLOVA, A. Challenges in characterization of residual oils: A review. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 178, p. 227–250, 2019.

TANG, N.; YANG, K-K.; ALREFAEI, Y.; DAI, J-G.; WU, L-M.; WANG, Q. Reduce VOCs and PM emissions of warm-mix asphalt using geopolymer additives. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118338, 2020.

TANG, Q.; XIAO, P.; KOU, C.; LOU, K.; KANG, A.; WU, Z. Physical, chemical and interfacial properties of modified recycled concrete aggregates for asphalt mixtures: A review. **Construction and Building Materials**, v. 312, p. 1–20, 2021.

THIVES, L. P.; GHISI, E. Asphalt mixtures emission and energy consumption: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 473–484, 2017.

UBA. Umweltbundesamt. **Risk-related or preliminary guide values for carcinogenic substances in indoor air**. German Committee on Indoor Air Guide Values. Dessau-Roßlau, 2020. Disponível em:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/bilder/dateien/risk-related_guide_values_20230201_en.pdf. Acesso em: 12 nov. 2024.

UBA. Umweltbundesamt. **Hygienic guide values for carbon dioxide**. German Committee on Indoor Air Guide Values. Dessau-Roßlau, 2008. Disponível em:

<https://www.umweltbundesamt.de/en/image/hygienic-guide-values-for-indoor-air>. Acesso em: 12 nov. 2024.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hot-mix asphalt paving handbook 2000**. USA: United States Army Corps of Engineers, 2000. 219 p.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. **Compendium method IO-2.1–Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (SPM) and PM₁₀ using high volume (HV) sampler**. In: EPA Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambiente air (EPA/625/R-96/010a). Cincinnati (OH), 1999a.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. **Compendium method IO-3.1–Selection, preparation and extraction of filter material**. In: EPA Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air (EPA/625/R-96/010a). Cincinnati (OH), 1999b.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. **Hot mix asphalt plants emission assessment report No. EPA-454/R-00–019**. Research Triangle Park, 2000.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. **Emission factor documentation for AP-42, Section 11.1. Hot mix asphalt plants final report**. Research Triangle Park, 2004.

US EPA. United States Environmental Protection Agency, **Policy assessment for the review of the national ambient air quality standards for particulate matter (EPA-452/R-20-002)**. Research Triangle Park, 2020.

VALLERO, D. A. **Fundamentals of air pollution**. 5th ed. Waltham, MA: Academic Press, 2014. 996 p.

VEGA, E.; MUGICA, V.; REYES, E.; SÁNCHEZ, G.; CHOW, J. C.; WATSON, J. G. Chemical composition of fugitive dust emitters in Mexico City. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 23, p. 4033–4039, 2001.

VENKATRAMAN, G.; GIRIBABU, N.; MOHAN, P. S.; MUTTIAH, B.; GOVINDARAJAN, V. K.; ALAGIRI, M.; RAHMAN, P. S. A.; KARSANI, S. A. Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: a detailed review. **Chemosphere**, v. 351, p. 1–13, 2024.

VIEIRA, N. R. **Poluição do ar**: indicadores ambientais. Rio de Janeiro: E-Papers, 2009. 220 p.

VILLEGAS-VILLEGAS, R. E.; BALDI-SEVILLA, A.; AGUIAR-MOYA, J. P.; LORIA-SALAZAR, L. Analysis of asphalt oxidation by means of accelerated testing and environmental conditions. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2672, n. 28, p. 244–255, 2018.

WANG, Q.; WANG, C.; HOU, L.; LV, B.; WANG, C. Pollution data analysis and characteristics of volatile organic compounds in the environment. **E3S Web of Conferences**, v. 38, n. 1004, p. 1–5, 2018. Work presented at the 4th International Conference on Energy Materials and Environment Engineering (ICEMEE), 2018, Kuala Lumpur, Malaysia.

WANG, L.; DU, J.; WU, X.; GAN, Z. Assessing the impact of volatile organic compounds on cardiovascular health: insights from the national health and nutrition examination survey 2011–2020. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 293, p. 118050, 2025.

WEISS, F.; BALOH, P.; PFALLER, C.; CETINTAS, E. C.; KASPER-GIEBL, A.; WONASCHÜTZ, A.; DIMITROV, M.; HOFKO, B.; RECHBERGER, H.; GROTHE, H. Reducing paving emissions and workers' exposure using novel mastic asphalt mixtures. **Building and Environment**, v. 137, p. 51–57, 2018.

WILLIAMS, B. A; WILLIS, J. R. **Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2023**, 14th Annual Survey (IS 138). Greenbelt, Maryland: National Asphalt Pavement Association, 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.31233.36960.

WILSON, W. E.; SUH, H. H. Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 47, n. 12, p. 1238–1249, 1997.

WIDDOP, B. Analysis of carbon monoxide. **Annals of Clinical Biochemistry: International Journal of Laboratory Medicine**, v. 39, n. 4, p. 378–391, 2002.

WHO. **Health effects of particulate matter**: policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and Central Asia. Copenhagen, DK: World Health Organization, 2013.

WHO. **WHO guidelines for indoor air quality**: selected pollutants. Copenhagen, DK: World Health Organization, 2010.

WHO. **WHO global air quality guidelines:** particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. Acesso em: 20 set. 2024.

XIU, M.; WANG, X.; MORAWSKA, L.; PASS, D.; BEECROFT, A.; MUELLER, J. F.; THAI, P. Emissions of particulate matters, volatile organic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons from warm and hot asphalt mixes. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 123094, 2020.

YADAV, R.; PANDEY, P. A review on volatile organic compounds (VOCs) as environmental pollutants: fate and distribution. **International Journal of Plant and Environment**, v. 4, n. 2, p. 14–26, 2018.

YANG, Y.; PUN, V. C.; SUN, S.; LIN, H.; MASON, T. G.; QIU, H. Particulate matter components and health: a literature review on exposure assessment. **Journal of Public Health and Emergency**, v. 2, n. 3, p. 1–8, 2018.

YATKIN, S.; BAYRAM, A. Determination of major natural and anthropogenic source profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey. **Chemosphere**, v. 71, n. 4 p. 685–696, 2008.

YONAR, F.; IYINAM, S.; IYINAM, A. F.; ERGUN, M. Evaluation of asphalt plants in terms of performance: a case study for Turkey. *In: 2nd International Conference on Transport Infrastructures*, p. 317–326, 2010.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. 100% recycled hot mix asphalt: a review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 92, p. 230–245, 2014.

ZORAN, M. A.; SAVASTRU, R. S.; SAVASTRU, D. M.; TAUTAN, M. N. Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. **Science of the Total Environment**, v. 738, p. 139825, 2020.

ZHANG, M.; HAO, P.; DONG, S.; LI, Y.; YUAN, G. Asphalt binder micro-characterization and testing approaches : A review. **Measurement**, v. 151, p. 107255, 2020.

ZHANG, Z.; WANG, J.; LU, W. Exposure to nitrogen dioxide and chronic obstructive pulmonary disease (COPD) in adults: a systematic review and meta-analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 15133–15145, 2018.

ZHONG, Q.; SHEN H.; YUN, X.; CHEN, Y.; REN, Y.; XU, H.; SHEN, G.; DU, W.; MENG, J.; LI, W.; MA, J.; TAO, S. Global sulfur dioxide emissions and the driving forces. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 11, p. 6508–6517, 2020.