

Análise da influência do tipo de pavimento nas emissões de poluentes veiculares



Victor Cardoso Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes,
Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil.
ORCID: 0009-0003-8385-2160

Julie Anne Holanda Azevedo

Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira. Fortaleza, Brasil.
ORCID 0000-0002-9821-7392

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes,
Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil.
ORCID: 0000-0002-1459-1740

Recibido: 31.01.2025. Aceptado: 21.04.2025..

Resumo

A poluição do ar tornou-se um desafio ambiental significativo nos tempos modernos, com uma parte substancial das emissões atmosféricas originando-se do setor de transporte, particularmente o transporte rodoviário. Diversos fatores podem influenciar os níveis de emissão de gases veiculares, variando desde as características dos veículos e o comportamento do condutor até as condições da infraestrutura viária. Este estudo tem como objetivo investigar o impacto das superfícies (concreto e asfalto) de pavimentos rodoviários nas emissões de poluentes veiculares. Para realizar esta pesquisa, foram utilizados Sistemas Portáteis de Medição de Emissões (PEMS, do inglês *Portable Emission Measurement Systems*) para coletar dados de emissões de gases de veículos. A análise envolveu o uso do teste ANOVA para comparar as médias de emissão de CO₂, CO e NO_x. Os resultados revelaram que as emissões médias de NO_x foram menores em pavimentos de concreto, mas não foram observadas diferenças significativas nas emissões de CO₂ e CO entre os dois tipos de pavimento. Compreender a influência das diferentes superfícies de pavimentos nas emissões de gases veiculares pode contribuir no planejamento urbano e na formulação de políticas voltadas à mitigação da poluição do ar. Esses resultados destacam a importância de se considerar a infraestrutura viária como um potencial fator na gestão dos impactos ambientais causados pelo setor de transportes.

PALAVRAS-CHAVES: POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA, EMISSÃO DE POLUENTES VEICULARES, PEMS, SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS.

Analysis of the Influence of Pavement Type on Vehicle Pollutant Emissions

Abstract

Air pollution has become a significant environmental challenge in modern times, with a substantial portion of atmospheric emissions originating from the transportation sector, particularly road transport. Numerous factors can influence the emission levels of vehicular gases, ranging from vehicle characteristics and driving behavior to the condition of road infrastructure. This study aims to investigate the impact of road pavement surfaces (concrete and asphalt) on vehicular air pollutant emissions. To conduct this research, Portable Emission Measurement Systems (PEMS) were utilized for collecting vehicle gas emission data. The analysis involved employing the ANOVA test to compare the emission averages of CO₂, CO, and NO_x. Our findings revealed that average NO_x emissions were lower on concrete pavements, but no significant differences were observed in CO₂ and CO emissions between both pavement types. Understanding the influence of different pavement surfaces on vehicular gas emissions can contribute to urban planning and the formulation of policies aimed at mitigating air pollution. These findings underscore the importance of considering road infrastructure as a potential factor in managing environmental impacts caused by the transportation sector.

KEYWORDS: ATMOSPHERIC POLLUTION, VEHICLE POLLUTANT EMISSIONS, PEMS, PAVEMENT SURFACE.

1. Introdução

A qualidade do ar é uma preocupação global crítica, com quase toda a população mundial (99%) exposta a um ar que ultrapassa os limites de qualidade estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2023). As implicações da poluição do ar para a saúde pública e a expectativa de vida são profundas, pois mais de 90% da população global enfrenta riscos associados à má qualidade do ar, aproximadamente 11,6% de todas as mortes no mundo estão relacionadas a esse fenômeno, resultando em 6,7 milhões de mortes anuais (OMS, 2023).

No contexto da poluição do ar, o Brasil não escapou dos efeitos prejudiciais, como evidenciado pelo preocupante número de mortes atribuídas à toxicidade do ar, que alcançou 51.000 em 2016 (OPAS, 2018). Notavelmente, esse número supera a soma das mortes causadas por homicídios e acidentes de trânsito no país. Para se ter uma ideia, os homicídios registrados, em 2022, foram de 46.409, e 34.892 mortes estiveram relacionadas a acidentes de trânsito (IPEA, 2024).

Um dos principais contribuintes para a poluição do ar em todo o mundo é o setor de transporte, responsável pela emissão de 8 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) em 2022, representando mais de um terço das emissões dos setores de uso final (IEA, 2023). As emissões do setor de transporte cresceram a uma taxa média anual de 1,7% de 1990 a 2022, mais rápido do que qualquer outro setor de uso final (IEA, 2023). Entre os diversos modos de transporte, o rodoviário, incluindo carros, caminhões, ônibus e veículos de duas ou três rodas, é o principal responsável, gerando quase três quartos das emissões de CO₂ do setor (IEA, 2023). No Brasil, o impacto do setor de

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

transporte é significativo, contribuindo com 9% das emissões totais de CO₂, segundo dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2024).

Com o objetivo de enfrentar a poluição atmosférica, a OMS (2023) defende o monitoramento da qualidade do ar, a identificação das fontes de poluição, a implementação de padrões rigorosos de emissões e eficiência de veículos e a imposição de inspeções e manutenções veiculares obrigatórias. Como um indicador importante de um sistema de transporte sustentável, o consumo de combustível e a emissão de poluentes, como Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Enxofre (SO_x) e Óxidos de Nitrogênio (NO_x), têm impacto direto na saúde pública (Kharbach e Chfadi, 2017). Além disso, características específicas dos pavimentos rodoviários, como microtextura, macrotextura, megatextura e o Índice de Irregularidade Internacional (IRI, do inglês, *International Roughness Index*), podem influenciar o consumo de combustível e as emissões subsequentes de gases tóxicos. Estudos anteriores (Sharare *et al.*, 2017 e Azevedo, 2019), utilizando o modelo de Desenvolvimento e Gestão de Rodovias (HDM-4, do inglês *Highway Development and Management Model – Version 4*) (ETSU, 1997 e An *et al.*, 1997) para estimar as emissões de CO₂, CO, NO_x e SO_x com base nos dados do IRI, demonstraram correlações promissoras (R = 0,6~0,8). No entanto, esses resultados exigem validação por meio de métodos de coleta de dados embarcados para garantir a adequação do modelo às condições locais avaliadas. Chatti e Zaaber (2012) concluíram que o modelo HDM-4 subestima os efeitos do tipo de superfície das rodovias em relação aos níveis de emissões dos veículos. De acordo com Fontaras *et al.*, (2017), essa diferença entre os modelos de previsão e as emissões reais podem chegar a 50%.

Pesquisas realizadas na Suécia e nos Países Baixos destacaram o impacto do tipo de pavimento no consumo de combustível. Os resultados indicaram um aumento de 0,8% e 2,7%, respectivamente, no consumo de combustível em pavimentos de concreto a velocidades médias de 50 km/h e 90 km/h em comparação com pavimentos asfálticos (EAPA, 2004). Em contraste, um estudo realizado nos Estados Unidos revelou a redução de aproximadamente 4% nas emissões de CO₂ oriundas de veículos que trafegavam em pavimentos de concreto em regiões urbanas com velocidades em torno de 50 km/h, em comparação às geradas em pavimentos asfálticos (Sumitsawan, 2001).

No entanto, é importante reconhecer que modelos de previsão de emissões, como o HDM-4, dependem de dados de laboratório coletados em regiões com climas condizentes com todas as realidades investigadas para realizar a calibração dos modelos de emissões (Claben *et al.*, 2021). As relações entre as características dos pavimentos e as emissões podem variar sob as condições climáticas tropicais do Brasil. Além disso, os avanços na tecnologia dos motores e uma maior restrição da legislação local em relação as emissões de gases veiculares exigem a calibração do modelo para refletir as condições veiculares atuais (Claben *et al.*, 2021; Salvo Junior e Souza, 2018).

O objetivo desse trabalho é avaliar a influência do tipo de revestimento de pavimentos nos níveis de emissões veiculares a partir de dados reais coletados em campo em um país com clima tropical. A literatura atual concentra-se mais em aspectos ligados ao consumo de combustível e não é clara quanto às emissões de poluentes (Claben *et al.*, 2021). Esta pesquisa utilizou o método de coleta a bordo. Essa abordagem envolve a realização de medições em tempo real das emissões de CO₂, CO e NO_x diretamente do escapamento de veículos enquanto são conduzidos em rodovias na Região Metropolitana de Fortaleza

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

(RMF), Ceará, Brasil. Por meio do método de coleta a bordo, o estudo buscou garantir a aquisição de dados confiáveis e específicos para a região, considerando as características e as condições de tráfego na área de estudo. Isso permitiu obter informações mais representativas e atualizadas sobre os níveis de emissões em diferentes tipos de pavimento, especificamente de concreto de cimento Portland que chamaremos apenas de “concreto” e pavimento flexível do tipo CA (Concreto Asfáltico) que chamaremos apenas de “asfáltico”, na RMF.

2. Materiais e métodos

2.1. Veículo de Teste

Para representar a frota típica de veículos brasileiros, foi selecionado um veículo leve modelo Chevrolet Classic 2014 com motor *flex* 1.0 litro (1000 cilindradas), uma vez que 76,2% da frota é composta por veículos *flex* (SINDIPEÇAS, 2024). O veículo escolhido possui certificação de emissão de gases do PROCONVE-L6 (CONAMA, 2009), o que significa que está em conformidade com os regulamentos de emissões vigentes no Brasil. O veículo foi abastecido com gasolina e os levantamentos foram realizados com o tanque cheio (54 litros). Os pneus são da marca Goodyear, medidas 175/70R13 com pressão de 32 psi. Esse aspecto garante que os dados de emissões coletados estejam alinhados com as diretrizes locais de emissões (CONAMA, 2009). O modelo do veículo tem capacidade para até 5 pessoas, porém os levantamentos foram realizados com uma ocupação de 3 pessoas. O veículo tem consumo homologado de 13km por litro de gasolina em rodovias e possui 50 mil quilômetros rodados. É importante ressaltar que o veículo é amplamente utilizado e facilmente acessível no mercado automotivo brasileiro.

2.2. Localização das coletas embarcadas

A coleta de dados de emissões foi realizada na RMF, Ceará, Brasil. De acordo com Magalhães e Zanella (2011), a RMF possui um clima tropical quente, com temperaturas médias anuais em torno de 27 °C. Moura (2008) destaca que a urbanização intensa de Fortaleza contribui para a formação de ilhas de calor, fenômeno em que as áreas urbanas registram temperaturas mais elevadas em comparação às zonas rurais circundantes. Essas ilhas de calor são mais pronunciadas durante o dia, especialmente entre 7h e 15h, e se concentram nos setores sudoeste, oeste, noroeste e na porção central da cidade

As rodovias foram cuidadosamente selecionadas com base em critérios de conforto ao rolamento para garantir resultados que não tivessem influência da condição funcional dos pavimentos. As vias escolhidas foram caracterizadas por um fluxo de tráfego ininterrupto, evitando deliberadamente curvas e inclinações para manter velocidade constante do veículo e potência do motor. Além disso, foi dada prioridade a rodovias com velocidade média de pelo menos 60 km/h e trechos de medição com pelo menos 1 km de extensão, assegurando um volume adequado de dados para análise subsequente. Adicionalmente, rodovias com diferentes tipos de pavimento foram incluídas, garantindo, ao mesmo tempo, qualidade funcional comparável, com o objetivo de capturar variações nas emissões atribuídas às distintas superfícies viárias.

Após uma avaliação de 10 vias na região com o uso do SmartIRI, desenvolvido por Almeida (2018), que identifica a irregularidade longitudinal das vias, foram identificadas

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

duas localizações adequadas para a coleta de dados: a Rodovia 1 possui um pavimento flexível, cuja superfície é composta por Concreto Asfáltico (CA), enquanto a Rodovia 2 apresenta um pavimento rígido, com superfície constituída por concreto de cimento Portland (Figura 1). Cada uma dessas rodovias possuía duas faixas de tráfego em cada direção, de 3,5 metros de largura, separadas por um canteiro central, altitude plana e IRI aproximadamente igual a 2 m/km.

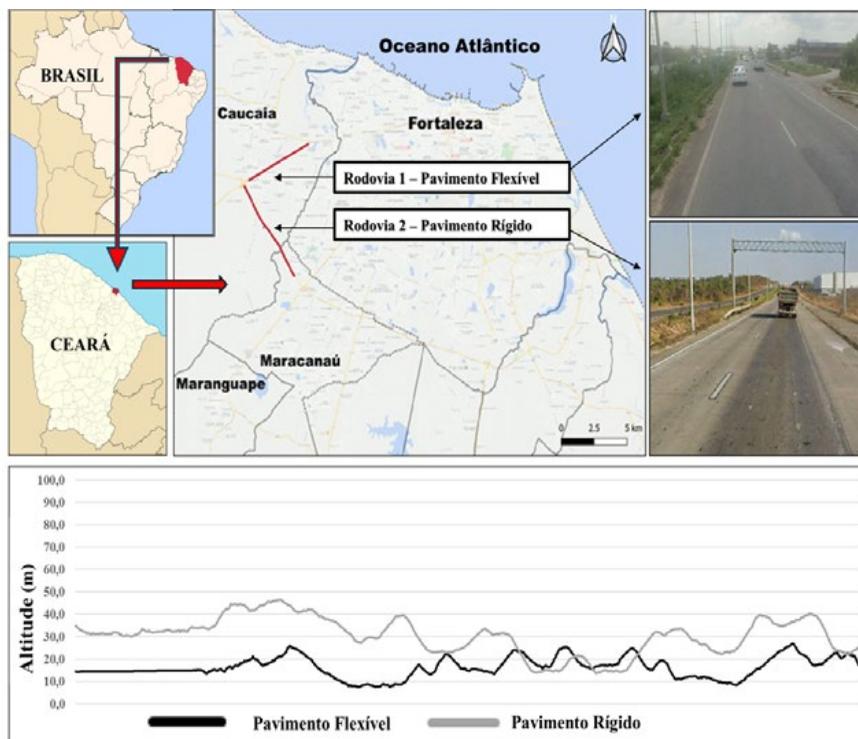


Figura 1. Localização das rodovias.

2.3. Metodologia de Coleta

Para a coleta de emissões veiculares, utilizou-se um equipamento do tipo de Sistema Portáteis de Medição de Emissões (PEMS, do inglês *Portable Emission Measurement Systems*) para registrar as emissões em uma taxa constante sob condições reais de tráfego e via. Neste equipamento uma amostra de gás é retirada pela sonda por uma bomba de sucção diafragma, posteriormente a amostra é limpa com relação à umidade e às impurezas por um filtro de condensação. O gás é então analisado com relação aos seus componentes através de sensores eletroquímicos e infravermelhos (Ecil, 2020). O método de amostragem ativa permitiu a coleta de gases por meio de uma bomba de sucção interna, e as concentrações foram analisadas (Frey *et al.*, 2003; Cassiano, 2016; Weiss *et al.*, 2011).

Os dados foram adquiridos com uma frequência de 1 Hz, garantindo alta precisão e medições instantâneas. A Figura 2 apresenta o esquema de montagem para a coleta de gases a bordo no veículo de teste escolhido.

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO



Figura 2. Esquema de montagem dos equipamentos utilizados.

2.4. Análise dos dados

Os dados de concentração de gás foram apresentados em ppm e, em seguida, convertidos para g/s utilizando, respectivamente, as Equações 1 e 2:

- De ppm para g/L:

$$ppm \cdot 0,001 = \frac{g}{L} \quad (1)$$

- De g/L para g/s:

$$\frac{g}{s} = \frac{g}{L} \cdot \left(\frac{L}{s}\right)_i \quad (2)$$

i = fluxo instantâneo de gases de escape

O uso de testes de hipótese de Análise de Variância (ANOVA) foi justificado neste estudo para comparar efetivamente as médias de velocidade média, emissões de CO₂, CO e NO_x entre diferentes tipos de pavimento na RMF. ANOVA é uma ferramenta estatística usada para avaliar diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos. Ao aplicar o ANOVA, o objetivo foi determinar se os dados de emissões pertenciam à mesma população, considerando a influência das diversas superfícies de pavimento. Essa abordagem permitiu identificar variações estatisticamente significativas nas emissões de gases veiculares associadas aos diferentes tipos de pavimento.

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

Além disso, a decisão de não realizar testes de normalidade para os dados com tamanho de amostra superior a 40 foi baseada no Teorema do Limite Central (Devore, 2006), que sustenta a validade dos resultados do ANOVA nesses casos. Esses passos metodológicos foram importantes para garantir a robustez e a validade dos achados, fornecendo hipóteses valiosas sobre o impacto de diferentes tipos de pavimento nas emissões de gases veiculares na RMF. Ademais, as emissões médias por quilômetro foram comparadas com os limites permissíveis estabelecidos pelas normas brasileiras e, no caso do CO₂, com os padrões europeus e norte-americanos (EU, 2009 e EPA, 2010).

3. Resultados e discussões

3.1. Descrição dos dados

Foram realizados levantamentos com duração de 3 dias para cada rodovia, em ambos os sentidos de tráfego, preferencialmente na faixa da direita, entre 9h e 16h, com temperatura entre 29-33 °C e umidade relativa entre 59-73%. Posteriormente, foram calculadas as médias de emissões por dia. Cada via recebeu um código representando o tipo de revestimento (A-Asfalto e C-Concreto e) e a ordem do levantamento (01, 02 e 03), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos dos levantamentos realizados nas rodovias

Levantamento	Via	Superfície	Extensão (m)	Código
01	Rodovia 1	Asfalto	5.510	A01
02			5.037	A02
03			5.060	A03
01	Rodovia 2	Concreto	3.871	C01
02			7.367	C02
03			6.929	C03

Vale destacar que, além da premissa de velocidade aproximadamente constante, buscou-se levantar o mesmo número de trechos, ou seja, uma extensão similar em todos os levantamentos. No entanto, no primeiro dia de análise realizada (C01), não foi possível realizar o levantamento em toda a extensão útil da rodovia devido à existência de barreiras de contenção durante o período desse levantamento.

3.2. Velocidade média nas coletas

Como mencionado anteriormente, as velocidades médias em pavimentos de concreto e asfáltico foram definidas com o objetivo de se aproximarem de 60 km/h, tendo velocidades constantes como premissa. A Tabela 2 apresenta as estatísticas das velocidades médias durante os levantamentos, juntamente com seus valores máximos, mínimos e os desvios padrão. A Figura 3 exibe um diagrama de caixas (*Boxplot*) ilustrando a distribuição dos dados de velocidade para as rodovias avaliadas.

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

Tabela 2. Parâmetros estatísticos da velocidade

Parâmetro	C01	C02	C03	A01	A02	A03
Vel. Média (km/h)	57,7	59,5	61,0	56,4	59,9	61,0
Vel. Max. (km/h)	62,0	62,3	66,3	61,7	62,8	66,3
Vel. Min. (km/h)	52,7	53,4	53,7	50,1	56,6	55,9
Desvio Padrão (km/h)	2,3	1,6	2,2	2,4	1,6	1,9
Coefficiente de Variação (%)	4,0	2,8	3,5	4,2	2,6	3,0
Número de Pontos	36,0	69,0	66,0	46,0	47,0	48,0

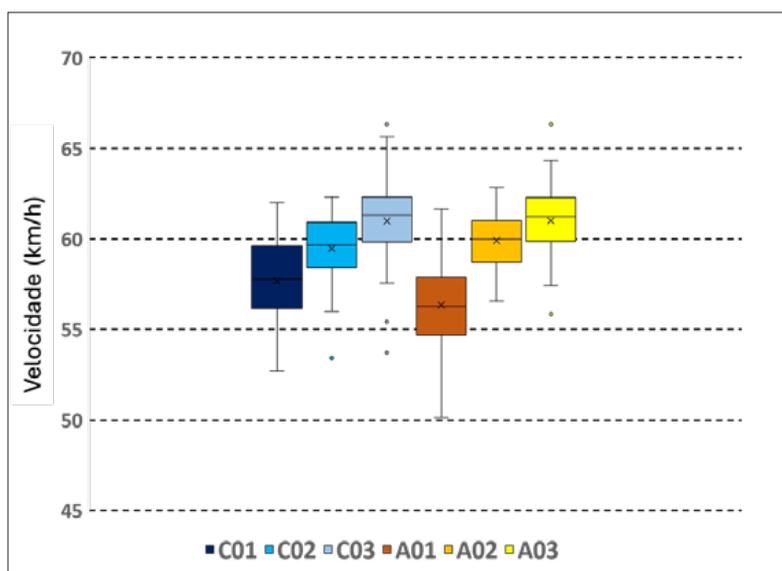


Figura 3. Diagrama de caixas da velocidade.

Durante os levantamentos iniciais (C01 e A01), as velocidades médias ficaram ligeiramente abaixo de 60 km/h, com desvios de aproximadamente 4% e 6%, respectivamente. No entanto, os levantamentos subsequentes alcançaram médias mais próximas do alvo. *Outliers* foram observados nos levantamentos C02, C03 e A03, provavelmente influenciados pelas condições variáveis de tráfego durante a coleta de dados. Vale destacar que o uso de um marcador de velocidade analógico pode ter contribuído para pequenas variações nas velocidades médias registradas.

Para comparar as médias das velocidades entre os levantamentos, realizamos um teste de hipótese (ANOVA) com intervalo de confiança bilateral de 99%. Os resultados estão apresentados na Tabela 3. A hipótese nula (H_0) assume a igualdade entre as médias das velocidades nos trechos pesquisados.

A análise revelou rejeições da hipótese nula para C01 e A01 em comparação com todos os outros levantamentos, exceto entre si. Além disso, C02 não apresentou rejeição da hipótese nula apenas quando comparado a A02. A pequena amplitude entre os dados, o baixo coeficiente de variação (inferior a 5%) e as diferenças mínimas entre as médias contribuíram para esses resultados.

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

Tabela 3. Teste ANOVA para os valores de velocidade em diferentes pavimentos

	C01	C02	C03	A01	A02	A03
C01		Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita
C02	0,0002		Rejeita	Rejeita	Não Rejeita	Rejeita
C03	0,0000	0,0001		Rejeita	Rejeita	Não Rejeita
A01	0,0116	0,0000	0,0000		Rejeita	Rejeita
A02	0,0000	0,2362	0,0007	0,0000		Não Rejeita
A03	0,0000	0,0005	0,8049	0,0000	0,0029	

3.3. Emissões de poluentes

Os dados dos gases analisados (CO_2 , CO e NO_x) foram agrupados por dia de levantamento. A Figura 4 apresenta as médias amostrais de acordo com o levantamento.

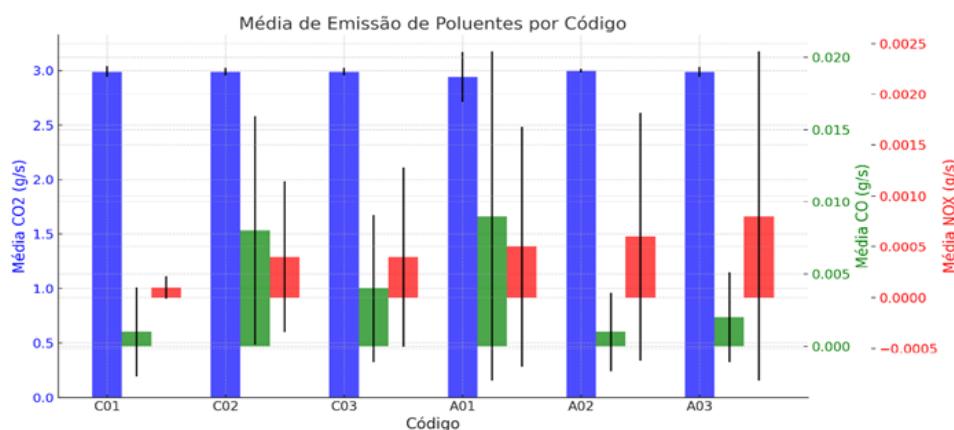


Figura 4. Média de emissão de poluentes por levantamento.

Com relação às emissões de CO_2 , houve pouca variação (1%) nas emissões médias entre os pavimentos de concreto e asfáltico, isto era esperado pois não houve desacelerações e acelerações durante a condução do veículo, pois a velocidade era aproximadamente constante (60km/h) como premissa para realização do levantamento, e neste caso o funcionamento do motor se aproxima da combustão completa. Contudo, uma diferença de apenas 2% a menos na emissão de CO_2 observada no levantamento A01, pode explicar a maior emissão de CO neste trecho em comparação aos demais.

A maior emissão de NO_x ocorreu em um trecho de pavimento asfáltico (A03), contrariando as expectativas, já que esta amostra apresentou a maior média para as emissões de CO_2 . Ou seja, a formação de NO_x pode ser relacionada somente com o decréscimo de CO_2 .

Para avaliar as diferenças nas médias das emissões de gases entre as amostras coletadas, foi realizado outro teste de hipótese (ANOVA) com intervalo de confiança bilateral de

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

99%. Os resultados estão apresentados na Tabela 4. A hipótese nula (H_0) assume que não há diferença nas médias das emissões de gases nos trechos pesquisados.

Tabela 4. Teste ANOVA para os valores de emissões em diferentes pavimentos

	CO ₂		CO		NO _x	
	H ₀	Valor P	H ₀	Valor P	H ₀	Valor P
C01 vs C02	Não Rejeita	0,462	Rejeita	0,000	Rejeita	0,000
C01 vs C03	Não Rejeita	0,310	Rejeita	0,000	Rejeita	0,000
C02 vs C03	Não Rejeita	0,195	Rejeita	0,000	Não Rejeita	0,247
A01 vs A02	Rejeita	0,001	Rejeita	0,000	Não Rejeita	0,251
A01 vs A03	Rejeita	0,002	Rejeita	0,000	Não Rejeita	0,007
A02 vs A03	Não Rejeita	0,007	Rejeita	0,001	Não Rejeita	0,031

Nas emissões de CO, todas as hipóteses nulas foram rejeitadas, indicando diferenças significativas entre todas as médias de emissões de CO. Por outro lado, a hipótese nula para as emissões de CO₂ foi rejeitada para o levantamento A01 em comparação com os seus pares, indicando que há diferença significativa entre as médias. Contudo é importante ressaltar que as médias de CO₂ foram bem próximas, com uma variação de 2%, essa rejeição pode ser explicada pelo baixo desvio-padrão das emissões de CO₂.

Vale destacar que a hipótese nula não foi rejeitada ao comparar os trechos C02 e C03 com relação às emissões de NO_x, mas foi rejeitada em comparação com o trecho C01, provavelmente devido à média de emissões desse poluente ser 75% menor do que as demais. A média de emissões de CO também foi menor para o levantamento no trecho C01 em comparação aos seus pares, 87% menor que o trecho C02, e, 73% menor que o trecho C03.

No intuito de comparar os níveis de emissão obtidos com os padrões regulamentares, foram considerados os valores médios de emissões por quilômetro para todas as amostras coletadas. A Tabela 5 compara essas médias com os limites permitidos pela norma brasileira (PROCONVE L6), bem como com os padrões europeus (EURO VI) e norte-americanos (EPA) para veículos leves fabricados em 2015. Em termos de emissões de CO₂ e CO, não houve diferenças significativas entre os pavimentos de concreto e asfáltico. No entanto, as emissões de NO_x foram aproximadamente quatro vezes maiores em pavimentos asfálticos em comparação aos de concreto.

Nenhuma das amostras analisadas excedeu os limites de CO e NO_x especificados pela norma brasileira (PROCONVE L6). Esse resultado era esperado, já que os levantamentos foram realizados em condições de tráfego menos intensas. No entanto, é importante destacar que a norma brasileira não considera o CO₂ como um poluente e, portanto, não estabelece limites de emissão para ele. Comparativamente, os níveis de emissão de CO₂ excederam os limites definidos pelos padrões europeus e americanos (EURO VI e EPA, respectivamente), ressaltando a influência das condições de tráfego nas emissões de CO₂.

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

Tabela 5. Emissão média por km comparada aos limites normativos

Sample	CO ₂ (g/km)		CO (g/km)		NO _x (g/km)	
	Média	EURO VI ¹ EPA ²	Média	PROCONVE L6	Média	PROCONVE L6
C01	186,26		0,064		0,0037	
C02	177,85		0,473		0,0112	
C03	173,25	<130,00 ¹	0,210	<1,000	0,0055	<0,0800
A01	187,55	<146,00 ²	0,520		0,0327	
A02	175,46		0,056		0,0326	
A03	171,87		0,100		0,0216	

¹ Regulamento (EU) 443/2009. ² EPA 0472/2009.

4. Conclusões

Este estudo avaliou as emissões de poluentes atmosféricos veiculares de um veículo, em uma região metropolitana do semiárido do nordeste brasileiro, em duas superfícies de pavimento diferentes: de concreto de cimento Portland e de concreto asfáltico, utilizando o método de coleta embarcado. Os gases analisados foram CO₂, CO e NO_x.

Os resultados indicaram que os trechos em pavimentos de concreto apresentaram menos 50% nas emissões médias de NO_x em comparação aos pavimentos asfálticos. Além disso, os pavimentos de concreto mostraram menores variações nas emissões de CO₂ e CO. No entanto, as emissões médias de CO₂ e CO foram semelhantes nos dois tipos de pavimento. Em um estudo realizado na Rodovia BR-101/SE, a emissão de NO_x em pavimento de concreto foi 10% menor que no asfáltico, contudo, neste estudo foram utilizados veículos do ciclo Diesel (Nascimento *et al.*, 2013).

A formação do NO_x é fortemente dependente da temperatura de combustão, desse modo em um pavimento asfáltico muito aquecido, o motor pode operar com temperaturas de combustão ligeiramente maiores (Lindhjem, 2004). Portanto, pavimentos de concreto (mais frios) tendem a criar condições menos propícias à formação de NO_x do que pavimentos asfálticos (mais quentes) nas mesmas circunstâncias ambientais. Essa diferença, embora sutil para cada veículo, pode ser relevante em cenários de tráfego mais intenso.

É importante destacar que, ao comparar os níveis de emissão obtidos com os limites estabelecidos pela norma brasileira, nenhum dos levantamentos excedeu esses limites. Este resultado já era esperado, uma vez que a análise foi realizada a uma velocidade constante e não considerou os efeitos do tráfego e outros obstáculos cotidianos típicos de grandes cidades.

De forma geral, esta pesquisa contribui para uma melhor compreensão do impacto dos tipos de pavimento nas emissões de gases veiculares em ambientes urbanos, particularmente no contexto da RMF. Os resultados podem servir como informações valiosas para formuladores de políticas públicas e planejadores urbanos no desenvolvimento de estratégias de transporte sustentável para mitigar a poluição do ar na região.

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

Estudos futuros devem considerar a incorporação de fatores adicionais, como densidade de tráfego, condições das vias, vias urbanas e condições meteorológicas, para aprimorar ainda mais a avaliação das emissões em cenários reais. Recomenda-se também a calibração do modelo de emissões HDM-4 a partir da frota de veículos comercializadas no Brasil, bem como a simulação dessas emissões em um nível de rede.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pela concessão de bolsas e a FUNCAP pelo financiamento da pesquisa.

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

Referências bibliográficas

- » Almeida, L. C. (2018). *Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará]. Repositório Institucional UFC.
- » An, F., Barth, M., Norbeck, F., & Ross, M. (1997). Development of comprehensive modal emissions model operating under hot-stabilized conditions. *Transportation Research Record*, 1587, 52–62. <https://doi.org/10.3141/1587-07>
- » Azevedo, P. O. (2019). *Effects of International Roughness Index (IRI) on vehicle emissions* [Dissertação de mestrado, University of Stuttgart].
- » Cassiano, D. R. (2016). *Avaliação das emissões poluentes de um veículo flex em percurso real urbano e rodoviário no Ceará* [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Ceará].
- » Chatti, K., & Zaaber, I. (2012). *Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs* (NCHRP Report 720). Transportation Research Board. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/22808>
- » Claben, J., Krysmon, S., Dorscheidt, F., Sterlepper, S., & Pischinger, S. (2021). Real driving emission calibration—Review of current validation methods against the background of future emission legislation. *Applied Sciences*, 11(12), 5429. <https://doi.org/10.3390/app11125429>
- » Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. (2009, 24 de setembro). *Estabelece a fase PROCONVE L6* (Resolução CONAMA nº 415/2009). <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=615>
- » Devore, J. L. (2006). *Probabilidade e estatística: Para engenharia e ciências* (J. P. N. da Silva, Trad.). Cengage Learning.
- » EAPA. European Asphalt Pavement Association. (2004). *Environmental impacts and fuel efficiency of road pavements*. https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/fuel_efficiency_executive.pdf
- » Ecil Produtos e Sistemas de Medição e Controle LTDA. (2020). *Manual de uso e manutenção CHEMIST 500* (Rev. 07). <https://ecil.com.br/wp-content/uploads/2020/11/Manual-PtBr-Chemist-500-rev07.pdf>
- » EPA. Environmental Protection Agency. (2010). *Light-duty vehicle greenhouse gas emission standards and corporate average fuel economy standards* (EPA-HQ-OAR-2009-0472). <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2010-05-07/pdf/2010-8159.pdf>
- » ETSU. Energy Technology Support Unit. (1997). *Emissions modelling framework for HDM-4: Working paper for discussion with University of Birmingham and ODA*.
- » Frey, H. C., Unal, A., Roupail, N. M., & Colyar, J. D. (2003). On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(8), 992–1002. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466245>
- » Fontaras, G., Zacharof, N. G., & Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

- emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 97–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.004>
- » IEA – Agência Internacional de Energia. (2023). *Energy and Emissions per Value Added Database*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-and-emissions-per-value-added-database>
 - » IPEA. (2024). *Atlas da violência 2024*. São Paulo: FBSP. <https://www.ipea.gov.br/atlasviolencia/arquivos/artigos/7868-atlas-violencia-2024-v11.pdf>
 - » Kharbach, M., & Chfadi, T. (2017). CO2 emissions in Moroccan road transport sector: Divisia, cointegration, and EKC analyses. *Sustainable Cities and Society*, 35(August), 396–401. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.016>
 - » Lindhjem, C., Chan, L., Pollack, A., & Kite, C. (2004). *Applying humidity and temperature corrections to on and off-road mobile source emissions*. 13th International Emission Inventory Conference. Working for Clean Air in Clearwater. <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei13/mobile/lindhjem.pdf>
 - » Magalhães, G. B., & Zanella, M. E. (2011). Comportamento climático da Região Metropolitana de Fortaleza. *Mercator - Revista de Geografia da UFC*, 10(23), 129–145. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273621468011>
 - » Moura, M. O. (2008). *O clima urbano de Fortaleza sob o nível do campo térmico* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará]. https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/8232/1/2008_dis_momoura.pdf
 - » Nascimento, F. A. C., Oliveira, F. R., Batista, N. A., Reis, M. M., & Amorim, J. C. C. (2013). *Comparativo de emissões de poluentes atmosféricos de tráfego sobre pavimentos flexíveis e rígidos: Aplicação no caso da obra da rodovia BR-101/SE*. Anais do XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Belém/PA.
 - » OMS – Organização Mundial da Saúde. (2023). *World Health Statistics 2023*. Genebra. <https://www.who.int/data/stories/world-health-statistics-2023-a-visual-summary>
 - » OPAS – Organização Pan-Americana da Saúde. (2018). *Não polua o meu futuro! O impacto do ambiente na saúde das crianças*. <https://iris.paho.org/xmlui/handle/123456789/49123>
 - » Salvo Junior, O. de, & Souza, M. T. S. de. (2018). A regulamentação como indutora de tecnologias ambientais para a redução de emissões tóxicas em veículos leves no Brasil. *Cadernos EBAPE.BR*, 16(4), 748–760. <https://doi.org/10.1590/1679-395164314>
 - » SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. (2024). <https://seeg.eco.br/#emissoes>
 - » Shahare, P., Gupta, S., Landge, V. S., & Hokam, V. S. (2017). Effect of road deterioration on vehicle emission. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(5), 904–912. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJCIET/VOLUME_8_ISSUE_5/IJCIET_08_05_099.pdf
 - » SINDIPEÇAS. (2024). *Relatório da frota circulante de 2024*. Sindipeças e Abipeças.
 - » Sumitsawan, P. (2001). *Effect of pavement type on fuel consumption in city driving*. University of Texas at Arlington. <https://rmc-foundation.org/wp-content/uploads/2017/07/UTA-Fuel-Consumption-Emissions-Study-Final-3-10.pdf>
 - » União Europeia. (2009). Regulation (EU) 2009/443 of the European Parliament and of the Council setting emission performance standards for new passenger

Análise da influência do tipo de pavimento...

V. CARDOSO OLIVEIRA, J. A. HOLANDA AZEVEDO Y V. TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO

cars as part of the community's integrated approach to reduce CO2 emissions from light-duty vehicles. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/443-2009>

- » Weiss, M., Bonnel, P., Hummel, R., Manfredi, U., Colombo, R., Lanappe, G., Lijour, P. L., & Sculati, M. (2011). *Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS)*. European Commission, Joint Research Centre.

Victor Cardoso Oliveira / victoroliveira@det.ufc.br

Doutorando em Engenharia de Transportes pelo Programa de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará - DET/UFC, Mestre em Engenharia de Transportes pela Universidade Federal do Ceará, e Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará. Professor Universitário em cursos de Engenharia Civil e tecnologia em Estradas. Trabalha com análise dos impactos da infraestrutura de transportes na emissão de poluentes atmosféricos veiculares.

Julie Anne Holanda Azevedo / julie@det.ufc.br

Doutora em Engenharia de Transportes pela Universidade Federal do Ceará, com ênfase em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes. Mestra em Tecnologia e Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE (2014). Graduada em Tecnologia em Processos Químicos pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE (2011). Técnica em Química pelo IFCE (2012). Desde 2016 é servidora da Universidade Internacional da Lusofonia Afro-brasileira.

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco / veronica@det.ufc.br

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2002), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2004), doutorado (Ph.D.) em Engenharia Civil pela Texas A&M University (2008) e pós-doutorado pela Universidade do Minho, Portugal (2024-2025). Desde 2009, é Professora do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (DET/UFC), atualmente Associada IV, e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN/UFC).