



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Letícia Barcellos de Moraes

**CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> NO**  
**TRANSPORTE RODOVIÁRIO: DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE**  
**INTERNACIONAL AO MERCADO DE CARBONO**

Santa Maria, RS

2023

Letícia Barcellos de Moraes

**CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> NO  
TRANSPORTE RODOVIÁRIO: DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE  
INTERNACIONAL AO MERCADO DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – Campus Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS

2023

Letícia Barcellos de Moraes

**CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> NO  
TRANSPORTE RODOVIÁRIO: DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE  
INTERNACIONAL AO MERCADO DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – Campus Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Civil**.

Aprovado em 20 de dezembro de 2023:

---

Luciano Pivoto Specht, Prof. Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

---

Sílvia Lisbôa Schuster, Prof. Dr. (UFSM)

---

Victória Nunes Ramos, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS

2023

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e avós, que desde cedo me ensinaram a valorizar o estudo e me proporcionaram apoio financeiro no decorrer dessa trajetória, mesmo sem terem tido as mesmas oportunidades que eu, além de terem suportado a saudade ao me verem sair de casa tão jovem em busca dos meus sonhos.

À minha irmã, minha companheira de apartamento durante a maior parte da graduação e dona das melhores jantas, que, além de ter sido minha inspiração para ingressar na UFSM e para batalhar pelo que acredito, sempre compreendeu as luzes acesas e as louças não lavadas nos períodos pré-prova.

Ao meu namorado, que, muito além do suporte emocional e da companhia para pedir pizzas, foi um verdadeiro parceiro, sempre disposto a me acompanhar durante as idas ao hospital, nas tantas vezes em que fiquei doente, e a me auxiliar com o que fosse necessário nos momentos difíceis e apertos ao longo dos semestres.

Às amigas que deixei em minha cidade natal, que, mesmo à distância e com todas as nossas diferenças, sempre me incentivaram, torceram e vibraram todas as minhas vitórias junto comigo.

Aos que, muito mais do que colegas de curso, tornaram-se importantes amigos fora do ambiente acadêmico, facilitando a jornada não só com os auxílios nos estudos, mas também com as caronas, os mates durante as aulas e os tradicionais churrascos que rendiam boas risadas responsáveis por aliviar a tensão.

Ao PET e ao LAMOT, grupos em que pude trabalhar com os três pilares da universidade – ensino, pesquisa e extensão –, ampliando meus conhecimentos para além dos limites do arco.

À Prefeitura Municipal de Santa Maria, à PROSUL e à Ecoplan Engenharia, pelas oportunidades de estágio que fizeram eu me apaixonar pela área de infraestrutura de transportes, mostrando que a Engenharia Civil não se resume ao clichê de casas e prédios.

À REPOS, que me guiou pelo caminho da Engenharia Popular e me fez entender que meu papel como Engenheira Civil deve ir além do lucro e do grande comércio.

A todos os companheiros do DCE, que me ensinaram a importância de lutar pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

Ao meu orientador Luciano, que, mesmo com as minhas ausências ao longo do semestre, sempre foi compreensivo durante a realização deste trabalho.

*“[...] toda ciência seria supérflua se a forma de manifestação e a essência das coisas coincidissem imediatamente”.*

*(Karl Marx, O Capital)*

## RESUMO

# CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO: DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE INTERNACIONAL AO MERCADO DE CARBONO

AUTOR: Letícia Barcellos de Moraes

ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

A importância da infraestrutura viária transcende os aspectos econômicos, afetando também questões sociais e ambientais. No contexto ambiental, a irregularidade longitudinal de pavimentos emerge como um fator crítico, afetando não apenas a eficiência do transporte, mas também o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Além disso, tendo em vista a popularização do mercado de carbono, faz-se necessário compreender como melhorias no transporte rodoviário podem contribuir para as estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas. Este estudo explorou os modelos de conversão do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) em consumo de combustível, emissão de CO<sub>2</sub> e créditos de carbono. A metodologia deste trabalho consistiu em uma revisão da literatura existente, descritiva e exploratória. As conclusões destacaram a necessidade urgente de estratégias eficazes para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub>, considerando a contínua dependência de combustíveis fósseis no setor rodoviário e a crescente preocupação com os GEE. A análise de modelos como HDM-3, HDM-4 e NIMPAC revelou uma diversidade de abordagens e variações no consumo de combustível associado à irregularidade. Além disso, destaca-se a oportunidade estratégica de influenciar ações climáticas globais e promover soluções sustentáveis com a presidência do Brasil no G20 em 2024. Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se uma análise específica sobre a aplicabilidade de modelos de cálculo na malha rodoviária brasileira e o desenvolvimento de uma equação integrada para correlacionar IRI, consumo de combustível, emissão de CO<sub>2</sub> e créditos de carbono.

**Palavras-chave:** IRI. Consumo de combustível. Emissões de CO<sub>2</sub>. Mercado de carbono.

## **ABSTRACT**

### **FUEL CONSUMPTION AND CO<sub>2</sub> EMISSIONS IN ROAD TRANSPORT: FROM THE INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX TO THE CARBON MARKET**

**AUTHOR:** Letícia Barcellos de Moraes

**ADVISOR:** Luciano Pivoto Specht

The importance of road infrastructure transcends economic aspects, also affecting social and environmental issues. In the environmental context, longitudinal pavement irregularity emerges as a critical factor, impacting not only transportation efficiency, but also increasing greenhouse gas emissions (GHG). Furthermore, considering the popularization of the carbon market, it is necessary to understand how improvements in road transportation can contribute to global strategies for mitigating climate change. This study explored models for converting the International Roughness Index (IRI) into fuel consumption, CO<sub>2</sub> emissions and carbon credits. The methodology of this work consisted of a descriptive and exploratory literature review. The conclusions highlighted the urgent need for effective strategies to mitigate CO<sub>2</sub> emissions, considering the ongoing dependence on fossil fuels in the road sector and the growing concern about greenhouse gases. The analysis of models such as HDM-3, HDM-4 and NIMPAC revealed a variety of approaches and variations in fuel consumption associated with irregularity. Furthermore, there is a strategic opportunity to influence global climate actions and promote sustainable solutions with Brazil's presidency in the G20 in 2024. As suggestions for future research, a specific analysis of the applicability of calculation models to the Brazilian road network and the development of an integrated equation to correlate IRI, fuel consumption, CO<sub>2</sub> emissions and carbon credits are recommended.

**Keywords:** IRI. Fuel consumption. CO<sub>2</sub> emissions. Carbon market.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O fenômeno do efeito estufa. ....	21
Figura 2 – Mudanças na temperatura da superfície global entre 1850 e 2020. ....	22
Figura 3 – Emissões de GEE por setor necessárias para alcançar emissões líquidas zero de CO <sub>2</sub> e comparação com os valores registrados em 2019. ....	23
Figura 4 – Atribuição das mudanças físicas do clima em decorrência da influência humana. ....	24
Figura 5 – Matriz energética mundial em 2020. ....	25
Figura 6 – Participação no consumo final de petróleo por setor em 2019. ....	27
Figura 7 – Participação no consumo final de carvão por setor em 2019. ....	28
Figura 8 – Participação no consumo final de gás natural por setor em 2019. ....	28
Figura 9 – Emissões globais de CO <sub>2</sub> por setor de 2019 a 2022. ....	30
Figura 10 – Consumo final energético e do setor de transportes no Brasil. ....	31
Figura 11 – Matriz energética brasileira em 2022. ....	31
Figura 12 – Atividade do transporte de passageiros brasileiro por modo. ....	33
Figura 13 – Atividade do transporte de cargas brasileiro por modo. ....	33
Figura 14 – Participação de cada modal na matriz de transportes de diferentes países. ....	34
Figura 15 – Fontes das emissões de CO <sub>2</sub> no Brasil em 2016. ....	35
Figura 16 – Emissões globais de CO <sub>2</sub> provenientes da combustão de energia e de processos industriais e sua variação anual entre 1900 e 2022. ....	36
Figura 17 – Fatores condicionantes do consumo de combustível relacionados ao PVI. ....	41
Figura 18 – Diferença estrutural entre pavimentos rígidos e flexíveis. ....	42
Figura 19 – Viagraph. ....	47
Figura 20 – Unidade de gravação do Via-Log. ....	47
Figura 21 – Rugosímetro BPR. ....	48
Figura 22 – Evolução das técnicas de medição de irregularidade longitudinal. ....	49
Figura 23 – Desenho esquemático do perfilômetro CHLOE. ....	49
Figura 24 – Desenho esquemático de um RTRRMS. ....	50
Figura 25 – Esquema de funcionamento de um perfilômetro inercial. ....	51
Figura 26 – Esquema de funcionamento do APL francês. ....	52
Figura 27 – Medidor PPS-2000. ....	52
Figura 28 – Faixas de variação do IRI em diferentes situações. ....	54
Figura 29 – Funcionamento do modelo quarto-de-carro. ....	55

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação do estado geral e do pavimento das rodovias brasileiras em 2022..	35
Quadro 2 – Relação entre IRI e ICS.....	54
Quadro 3 – Resultados encontrados por diferentes autores quanto à influência do IRI no acréscimo do consumo de combustível. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de produtos petrolíferos refinados em 2021.....	29
Tabela 2 – Produção primária de energia no Brasil em 2022.....	32
Tabela 3 – Consumo de produtos petrolíferos refinados em 2021.....	32
Tabela 4 – GWP e conversão para carbono equivalente de diferentes GEE.....	38
Tabela 5 – Valores para o coeficiente “m” de acordo com a classificação climática. ....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
ANOVA	Análise da Variância
APL	Analisador de Perfil Longitudinal
ATV	Veículo Todo-o-Terreno
BPR	<i>Bureau of Public Roads</i>
CA	Concreto Asfáltico
CCP	Concreto de Cimento Portland
CH <sub>4</sub>	Metano
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EIA	<i>U.S. Energy Information Administration</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GJ	Gigajoule
GMR	<i>General Motors Research</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
h	Hora
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
HDM-3	<i>Highway Design and Maintenance Standards Model</i>
HDM-4	<i>Highway Development and Management Tool</i>
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás.
ICS	Índice da Condição da Superfície
IEA	Agência Internacional de Energia
in	Polegadas
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRI	Índice de Irregularidade Internacional
K <sub>ge</sub>	Fator Ambiental
K <sub>gp</sub>	Fator de Calibração para Progressão de Irregularidade

km	Quilômetro
m	Metro
Mb/d	Milhões de Barris por Dia
MC	Monte Carlo
MERLIN	<i>Machine for Evaluating Roughness Using Low-Cost Instrumentation</i>
mi	Milhas
mm	Milimetro
MME	Ministério de Minas e Energia
mph	Milhas por Hora
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
NAASRA	<i>National Association of Australian State Road Authorities</i>
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NIMPAC	<i>NAASRA Improved Model for Project Assessment and Costing</i>
ODS	Metas de Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PPS	<i>Pavement Profile Scanner</i>
PVI	Interação Pavimento-Veículo
R\$	Real Brasileiro
QAV	Querosene de Aviação
RTRRMS	Medidores de Irregularidade Rodoviária do Tipo Resposta
SI	<i>Wisconsin Serviceability Index</i>
SUV	Vículo Utilitário Esportivo
TRL	<i>Transport Research Laboratory</i>
US\$	Dólar Americano

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	PROBLEMÁTICA.....	16
1.2	OBJETIVOS .....	16
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>OS DESAFIOS DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) .....</b>	<b>21</b>
3.1	ENTENDENDO OS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS: ALÉM DA ENERGIA.....	25
3.2	A DEPENDÊNCIA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS NO MODAL RODOVIÁRIO...	29
3.3	MERCADO DE CARBONO E A COMPENSAÇÃO DE EMISSÕES.....	36
<b>4</b>	<b>FATORES CONDICIONANTES DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL .....</b>	<b>40</b>
4.1	FATORES RELACIONADOS À INTERAÇÃO PAVIMENTO-VEÍCULO .....	41
<b>5</b>	<b>IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS .....</b>	<b>45</b>
5.1	UM BREVE HISTÓRICO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL .....	46
5.2	ÍNDICE DE IRREGULARIDADE INTERNACIONAL (IRI).....	53
<b>6</b>	<b>MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DO IRI.....</b>	<b>57</b>
6.1	HDM-3 .....	57
6.2	HDM-4 .....	60
6.3	NIMPAC .....	63
6.4	ESTUDOS RELACIONADOS À RUGOSIDADE DO PAVIMENTO .....	64
<b>7</b>	<b>INFLUÊNCIA DO IRI NA EMISSÃO DE GÁS CARBÔNICO .....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>IMPACTO FINANCEIRO.....</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>78</b>
9.1	CONCLUSÕES .....	78
9.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	79

## 1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura viária desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico das nações (Barella, 2008; Cervero, 2009). A malha viária em um país é responsável pela conectividade regional e global, exercendo influência direta sobre sua economia, bem como para a qualidade de vida de seus cidadãos (Calatayud *et al.*, 2016; Nguyen *et al.*, 2023; Sreelekha; Krishnamurthy; Anjaneyulu, 2016; Zakharova; Yashin; Ziankova, 2022). Países desenvolvidos, como os Estados Unidos e a China, líderes em termos de extensão e densidade de malhas rodoviárias pavimentadas, são exemplos paradigmáticos dessa relação (CIA, 2023). Essas nações investiram maciçamente em sistemas de transporte terrestre eficientes, de modo que suas rodovias, estradas e vias expressas não apenas facilitam a mobilidade de pessoas e mercadorias e contribuem para a eficiência logística, mas também promovem o desenvolvimento industrial, o comércio e a acessibilidade a serviços essenciais. Sendo assim, uma infraestrutura viária bem desenvolvida é um catalisador para a atração de investimentos, fomentando a produtividade e impulsionando a competitividade global (Cervero, 2009; Nguyen *et al.*, 2023).

No entanto, as questões associadas à infraestrutura rodoviária transcendem os aspectos mercadológicos, estendendo-se para as esferas sociais e ambientais (Menezes; Ruwanpura, 2018). Problemas socioeconômicos, como o acesso a áreas remotas, o desenvolvimento de comunidades e o custo do transporte, também são afetados pela qualidade das vias (Bopoto; Geddes; Pinard, 2019; Castro; Sandoval; Odamtten, 2022). A construção e manutenção de rodovias frequentemente implicam em deslocamentos de comunidades locais, gerando desafios relacionados ao reassentamento e à preservação de povos tradicionais (Sharma, 2010). Além disso, a infraestrutura rodoviária pode influenciar a distribuição socioeconômica, favorecendo ou prejudicando determinados segmentos da sociedade (Benevenuto; Caulfield, 2022). No contexto ambiental, a expansão das rodovias pode resultar em desmatamento, perda de habitats naturais e aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para os desafios associados às mudanças climáticas (Damania *et al.*, 2018; Dulal; Brodnig; Onoriose, 2011; Karlson; Mörtberg, 2015). Portanto, uma abordagem holística na gestão da infraestrutura rodoviária é essencial (Bopoto; Geddes; Pinard, 2019).

Isto posto, as Metas de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU desempenham um papel crucial na redução das emissões de GEE provenientes do setor de transportes. Diversas ODS têm relevância direta nesse contexto, destacando-se aquelas relacionadas à indústria, inovação e infraestrutura, cidades e comunidades sustentáveis, consumo e produção responsáveis e à ação contra a mudança global do clima. A ODS 9, que aborda a construção de

infraestrutura resiliente, promoção da industrialização inclusiva e fomento à inovação, é fundamental para impulsionar avanços tecnológicos que possam tornar os meios de transporte mais eficientes e sustentáveis. Já a ODS 11, que visa tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis, contribui para o planejamento urbano voltado à redução da dependência de transportes individuais movidos a combustíveis fósseis. Enquanto a ODS 12, sobre consumo e produção responsável, direciona esforços para práticas mais sustentáveis em toda a cadeia de suprimentos, incluindo a fabricação e utilização de veículos mais eficientes. Além disso, a ODS 13, centrada na ação climática, reforça a importância de medidas específicas para enfrentar as mudanças climáticas, incluindo a redução das emissões provenientes do setor de transportes. A integração dessas metas no desenvolvimento global é essencial para promover um futuro mais sustentável.

Nesse cenário, a irregularidade longitudinal de pavimentos é um fator crítico que afeta não apenas a eficiência do transporte, mas também questões socioeconômicas e ambientais (Oliveira; Branco, 2020). A irregularidade longitudinal, ou seja, as imperfeições ao longo de estradas e rodovias, pode levar a impactos significativos no consumo de combustível dos veículos que as percorrem (Levesque *et al.*, 2023). Adicionalmente, o aumento do consumo de combustível está diretamente ligado à emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, um dos principais GEE contribuintes para o aquecimento global (IEA, 2022; IPCC, 2021). É nesse cenário que emerge o conceito de crédito de carbono, uma vez que a manutenção de rodovias com menor irregularidade longitudinal e, conseqüentemente, menor consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>, pode ser considerada uma ação de mitigação das mudanças climáticas (Levesque *et al.*, 2023; Oliveira; Branco, 2020; Wang *et al.*, 2020, 2012).

Diante disso e tendo em vista a crescente conscientização sobre a necessidade de reduzir as emissões de GEE provenientes do setor de transportes, há a necessidade de compreender o impacto da irregularidade longitudinal de pavimentos no consumo de combustível e, conseqüentemente, nas emissões de CO<sub>2</sub> (Levesque *et al.*, 2023). Tal compreensão possibilita a identificação de oportunidades para a geração de créditos de carbono no setor de transportes, destacando a importância de estratégias e investimentos consistentes em infraestrutura viária. Essas ações não apenas impulsionam o progresso socioeconômico, mas também desempenham um papel essencial na formulação de políticas e práticas sustentáveis, alinhando-se aos compromissos estabelecidos no Acordo de Paris.

Este trabalho propõe, portanto, uma investigação dos modelos de conversão da irregularidade longitudinal de pavimentos em diferentes elementos, nomeadamente consumo de combustível, emissão de CO<sub>2</sub> e créditos de carbono. Inicialmente, a pesquisa se concentra

em como o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) pode afetar o consumo de combustível de veículos. Em uma segunda etapa, examina-se como o consumo de combustível pode ser utilizado para calcular as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao transporte rodoviário. Por fim, explora-se a interconexão entre a irregularidade longitudinal de pavimentos e os impactos financeiros, tanto para empresas de transporte e logística quanto para países, considerando as despesas relacionadas às emissões de GEE.

A compreensão desses elementos é essencial para avaliar como as melhorias na qualidade do pavimento podem gerar créditos de carbono e quais os potenciais benefícios para empresas e países comprometidos com a mitigação das mudanças climáticas. Como consequência, este trabalho contribuirá para a compreensão dos desafios associados à irregularidade longitudinal de pavimentos não apenas como uma questão técnica, mas como um componente vital na busca por um equilíbrio entre desenvolvimento econômico, inclusão social e sustentabilidade ambiental.

## 1.1 PROBLEMÁTICA

Como já visto, a importância da infraestrutura viária vai muito além dos aspectos econômicos, afetando também questões sociais e ambientais. No contexto do impacto ambiental, a irregularidade longitudinal de pavimentos emerge como um problema importante, afetando não apenas a eficiência do transporte, mas também o aumento das emissões de GEE. Isso porque a qualidade do pavimento influencia diretamente o consumo de combustível dos veículos, o que por sua vez contribui para as emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, tendo em vista a popularização do mercado de carbono, faz-se necessário compreender como melhorias em diferentes setores, incluindo o transporte rodoviário, podem contribuir para a redução das emissões de GEE e promover práticas mais sustentáveis. Surge então a seguinte questão:

É possível quantificar o impacto financeiro decorrente da emissão de CO<sub>2</sub>, considerando como variável o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI)?

## 1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo geral integrar o conhecimento sobre pavimentação rodoviária à dinâmica do mercado de carbono.

Em complemento ao objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

a) Apresentar modelos disponíveis na literatura de conversão do IRI em consumo de combustível;

- b) Apurar estudos que abordam os impactos da irregularidade longitudinal de pavimentos no consumo de combustível de diferentes veículos;
- c) Investigar como o consumo de combustível pode ser utilizado para calcular as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao transporte rodoviário;
- d) Discutir como a redução do IRI pode gerar créditos de carbono e os impactos financeiros do IRI para empresas de transporte e logística e para países.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em uma revisão da literatura existente, descritiva e exploratória, visando identificar os modelos de cálculo propostos por diferentes autores quanto às três conversões objeto deste trabalho: IRI em consumo de combustível, consumo de combustível em emissão de CO<sub>2</sub>, e emissão de CO<sub>2</sub> em crédito de carbono. Nesse tipo de abordagem, o objetivo principal é examinar e compreender o estado atual do conhecimento sobre um determinado tema, conceito ou fenômeno, a fim de descrever e explorar os principais aspectos, teorias, modelos e descobertas relacionadas ao assunto em questão.

A pesquisa bibliográfica, conforme delineado por Gil (2002), compreende etapas como determinar objetivos, elaborar um plano de trabalho, identificar e localizar fontes, ler o material, fazer apontamentos, confeccionar fichas e redigir o trabalho. Para mais, Fonseca (2002) destaca que esse tipo de pesquisa permite ao pesquisador compreender estudos anteriores relacionados ao tema, buscando referências teóricas para coletar informações prévias sobre o problema em análise.

Na revisão bibliográfica descritiva, o foco está na apresentação e síntese das informações obtidas a partir de uma variedade de fontes, como artigos científicos, livros, teses, relatórios e documentos oficiais. Esse processo envolve a organização e a análise crítica do material encontrado, identificando padrões, lacunas no conhecimento e tendências na pesquisa.

Por outro lado, a revisão bibliográfica exploratória busca ampliar o entendimento sobre o tema, investigando diferentes perspectivas, abordagens e debates presentes na literatura. Essa fase envolve a busca ativa por novas ideias, conceitos e conexões entre os diferentes estudos e autores, permitindo uma compreensão mais ampla e aprofundada do assunto em análise.

Durante a condução da revisão bibliográfica, são adotados métodos e técnicas para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos. Isso inclui a definição de critérios de inclusão e exclusão de estudos, a utilização de ferramentas de busca bibliográfica, a análise sistemática dos dados e a elaboração de sínteses e conclusões claras e objetivas.

Em resumo, uma metodologia de revisão bibliográfica descritiva e exploratória é um processo que visa fornecer uma visão abrangente e detalhada sobre um determinado tema, contribuindo para o avanço do conhecimento e para o embasamento teórico de trabalhos posteriores.

Sendo assim, a revisão bibliográfica deste trabalho foi conduzida por meio de pesquisa em livros, artigos, revistas e sites especializados. Além disso, o Portal de Periódicos da CAPES foi utilizado para acessar a maioria das bases de dados consultadas: ScienceDirect, Scopus, SciELO, Taylor & Francis e SAGE Journals. O intuito era localizar publicações que

abordassem os temas objeto deste estudo, como efeito estufa, combustíveis fósseis, emissões de CO<sub>2</sub>, mercado de carbono, irregularidade longitudinal de pavimentos e consumo de combustível.

Cabe destacar que o tema abordado neste trabalho surge como um assunto emergente, impulsionado pela crescente preocupação global com as mudanças climáticas e a ampla adoção de estratégias para mitigar seus impactos. A popularização dos créditos de carbono, como mecanismo de incentivo à redução das emissões de GEE, tem destacado a importância de compreender e quantificar as relações entre variáveis ambientais e diferentes setores, como o de transportes.

Isto posto, a estrutura deste trabalho segue uma organização lógica e progressiva, dividida em seções que permitem ao leitor compreender, pouco a pouco, os aspectos relacionados à problemática em pauta. Em outras palavras, a estruturação proposta possibilita acompanhar, de maneira clara e ordenada, a evolução do raciocínio e dos argumentos apresentados ao longo do trabalho.

Na seção 3, são explorados os problemas e desafios relacionados à emissão de GEE, iniciando com uma compreensão do uso e dos impactos dos combustíveis fósseis, além de analisar a dependência desses combustíveis no modal rodoviário. Finalizando essa seção, são abordados ainda conceitos relacionados ao mercado de carbono, como o funcionamento dos créditos de carbono e os acordos internacionais voltados à compensação de emissões.

Já a seção 4 trata dos diferentes fatores condicionantes do consumo de combustível, com foco na interação entre pavimento e veículo. Adicionalmente, são discutidos os três principais condicionantes relacionados à essa interação: deflexão estrutural, textura da superfície e Índice de Irregularidade Internacional (IRI), com o objetivo de preparar o terreno para a discussão sobre a irregularidade longitudinal de pavimentos que ocorre na seção subsequente.

Dentro desse contexto, a seção 5 apresenta um breve histórico das técnicas de medição da irregularidade longitudinal de pavimentos e o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) é finalmente conceituado, fornecendo ao leitor o contexto necessário para entender os assuntos finais deste trabalho.

Atendendo aos objetivos propostos, os modelos de consumo de combustível em função do IRI são explicados na seção 6. Cabe destacar que, para a escolha dos modelos de consumo de combustível apresentados – HDM-3, HDM-4 e NIMPAC –, foram considerados os modelos de conversão mais indicados nas teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso explorados no decorrer deste estudo.

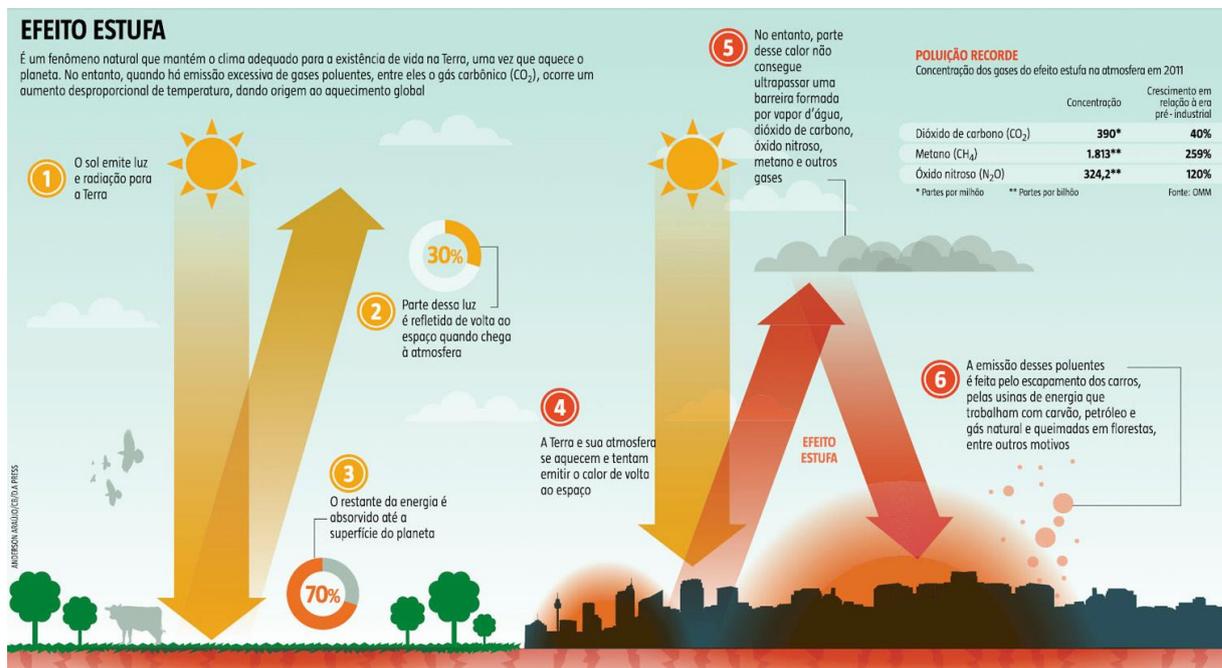
A conversão de consumo de combustível em emissão de gás carbônico é explorada na seção 7, seguida por uma análise, na seção 8, do impacto financeiro do IRI para empresas e países em função das despesas relacionadas às emissões de GEE.

Finalmente, as considerações finais são apresentadas na seção 9, com uma breve retomada dos assuntos discutidos no decorrer de todo o trabalho, seguida pelas conclusões adicionais e sugestões para trabalhos futuros. Essa seção busca encerrar o trabalho de forma coerente, bem como abrir portas para novas investigações.

### 3 OS DESAFIOS DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

A emissão de gases de efeito estufa (GEE) é um desafio global que tem implicações significativas no contexto das mudanças climáticas e no esforço para mitigar seus impactos (Furkan; Hasan; Uddin, 2023; Kumar; Subramanian, 2017; Rogelj *et al.*, 2016). Face a isso, em primeiro lugar, é importante destacar que os GEE, incluindo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ocorrem naturalmente e são necessários à atmosfera terrestre, ao absorver a radiação solar e, assim, manter o planeta aquecido, tornando-o adequado à existência humana (Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015; Matondo; Peter; Msibi, 2004). No entanto, o aumento das concentrações desses gases, especialmente devido à atividade humana, tem elevado a temperatura média da atmosfera terrestre a taxas cada vez mais altas, levando ao agravamento do efeito estufa natural e a uma série de desafios ambientais, econômicos e sociais (D’Almeida, 2015; Furkan; Hasan; Uddin, 2023). Isto posto, a Figura 1 ilustra o processo do efeito estufa, bem como a concentração dos GEE na atmosfera em 2011.

Figura 1 – O fenômeno do efeito estufa.

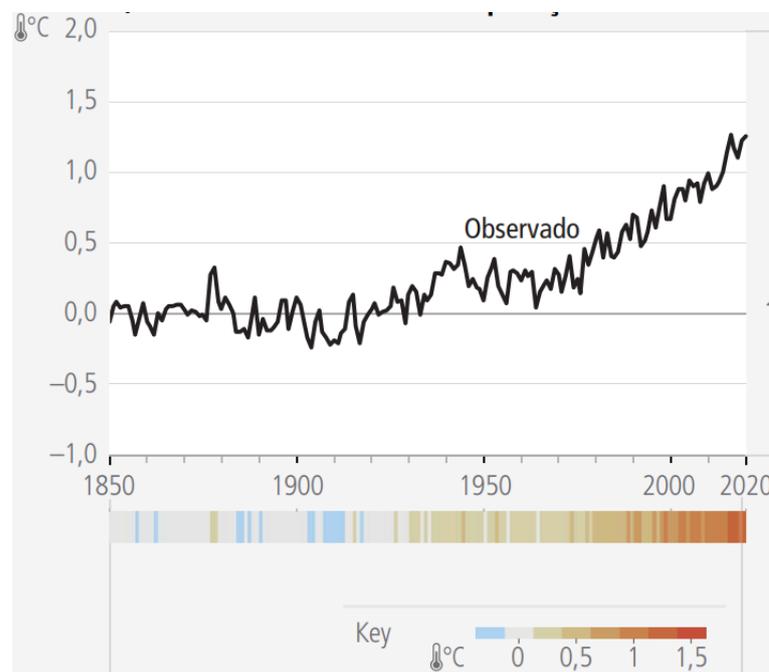


Fonte: Aquecimento (2016).

Svante Arrhenius (1859-1927) foi pioneiro ao antecipar, em 1896, que a queima de combustíveis fósseis poderia contribuir para a amplificação do efeito estufa. Além disso, ele constatou que a temperatura média da superfície terrestre é de aproximadamente 15 °C, ao estabelecer uma conexão entre a capacidade de absorção infravermelha com as concentrações

atmosféricas de CO<sub>2</sub> e de vapor d'água (Arrhenius, 1896). Entretanto, após essas descobertas, o assunto foi negligenciado por décadas, com a crença de que as influências humanas eram irrelevantes comparadas a forças naturais. Foi quando, na década de 1980, a temperatura global começou a aumentar. Inicialmente, acreditava-se na chegada de uma nova era glacial, mas a teoria do aquecimento global passou a ser validada e, em 1998, foi reconhecido que o clima estava mais quente do que em qualquer outro período desde 1880 (Dalpisol, 2023). O aumento da temperatura da superfície global nos últimos 70 anos pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Mudanças na temperatura da superfície global entre 1850 e 2020.



Fonte: IPCC (2023).

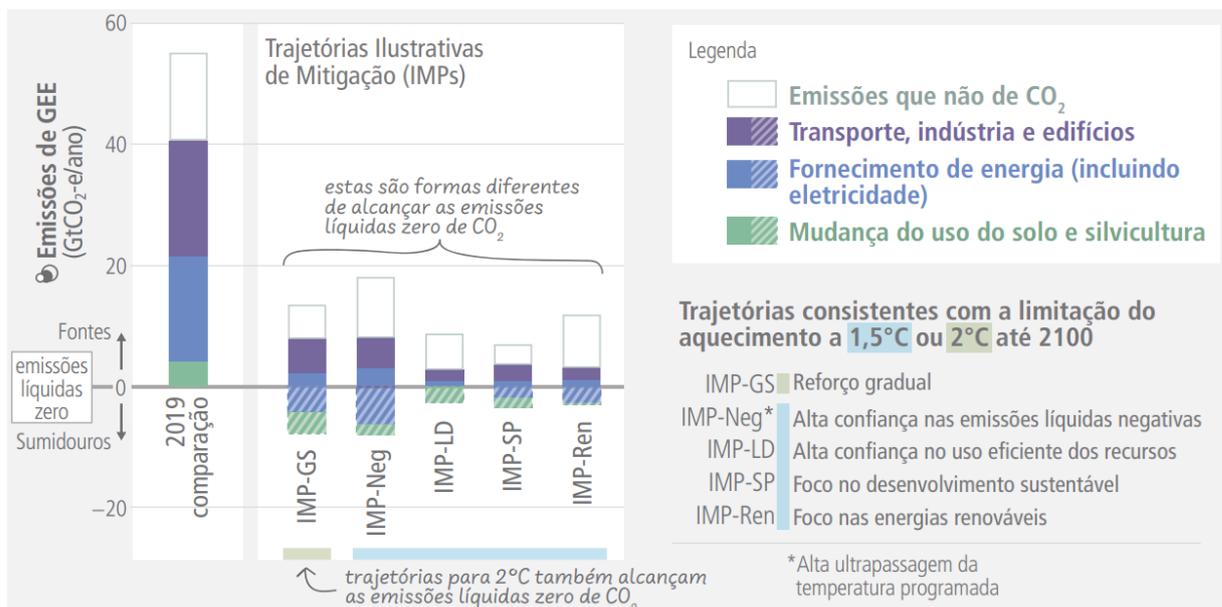
É esse o contexto que dá origem ao Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Segundo informações publicadas no antigo portal online do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, o IPCC, fundado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (ONU Meio Ambiente) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), tem como propósito fornecer avaliações científicas periódicas sobre a mudança do clima, suas implicações, riscos futuros e opções de adaptação e mitigação para formuladores de políticas. Com 195 países membros, incluindo o Brasil, o painel avalia o estado do conhecimento climático, identificando consensos científicos e lacunas para orientar pesquisas adicionais. Além disso, seus relatórios contribuem para negociações internacionais sobre mudanças

climáticas. Os Relatórios de Avaliação incluem contribuições de três Grupos de Trabalho, com um Relatório de Síntese integrando todas as informações, enquanto os Relatórios Especiais abordam questões específicas e os Relatórios de Metodologia oferecem orientações para inventários de GEE. Face a isso, o papel antropogênico na emissão de GEE foi descrito nos últimos resultados publicados IPCC, em 2021, de modo que

Os aumentos observados nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE) distribuídos homogeneamente na atmosfera desde cerca de 1750 foram causados inequivocamente por atividades humanas (...) chegando a médias anuais de 410 ppm para dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 1.866 ppb para metano (CH<sub>4</sub>), e 332 ppb para óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) em 2019 (IPCC, 2021).

Nesse sentido, as emissões de GEE têm origens diversas, mas em grande parte estão relacionadas à queima de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, que são amplamente utilizados nos setores de energia, indústria e transporte (Getoff, 2006; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015; Kumar; Subramanian, 2017). Como prova, segundo o último relatório publicado pelo IPCC (2023), em 2019, cerca de 79% das emissões globais de GEE originaram-se dos setores de energia, indústria, transporte e edificações, enquanto 22% foram provenientes da agricultura, silvicultura e outros usos da terra. Dessa forma, a Figura 3 ilustra diferentes cenários que resultariam em emissões líquidas zero de CO<sub>2</sub>, em comparação aos índices registrados por cada setor em 2019.

Figura 3 – Emissões de GEE por setor necessárias para alcançar emissões líquidas zero de CO<sub>2</sub> e comparação com os valores registrados em 2019.



Fonte: IPCC (2023).

A nível nacional, um estudo apontou o Brasil como um dos três maiores emissores de GEE entre 2012 e 2021 provenientes do uso do solo (Friedlingstein *et al.*, 2022). Além disso, em 2013, quase metade das emissões do Brasil foram decorrentes do setor de transportes (D’Almeida, 2015). Como consequência, o aquecimento global resultante das emissões de GEE tem desencadeado uma série de impactos ambientais, incluindo o derretimento das calotas de gelo, o aumento da precipitação e do nível do mar, a acidificação dos oceanos, a poluição do ar, a degradação da qualidade da água e o favorecimento de eventos climáticos extremos, que colocam em risco os ecossistemas, a biodiversidade, a segurança alimentar e a estabilidade econômica (IPCC, 2021). A Figura 4 ilustra algumas das consequências climáticas causadas pela ação antropogênica.

Figura 4 – Atribuição das mudanças físicas do clima em decorrência da influência humana.



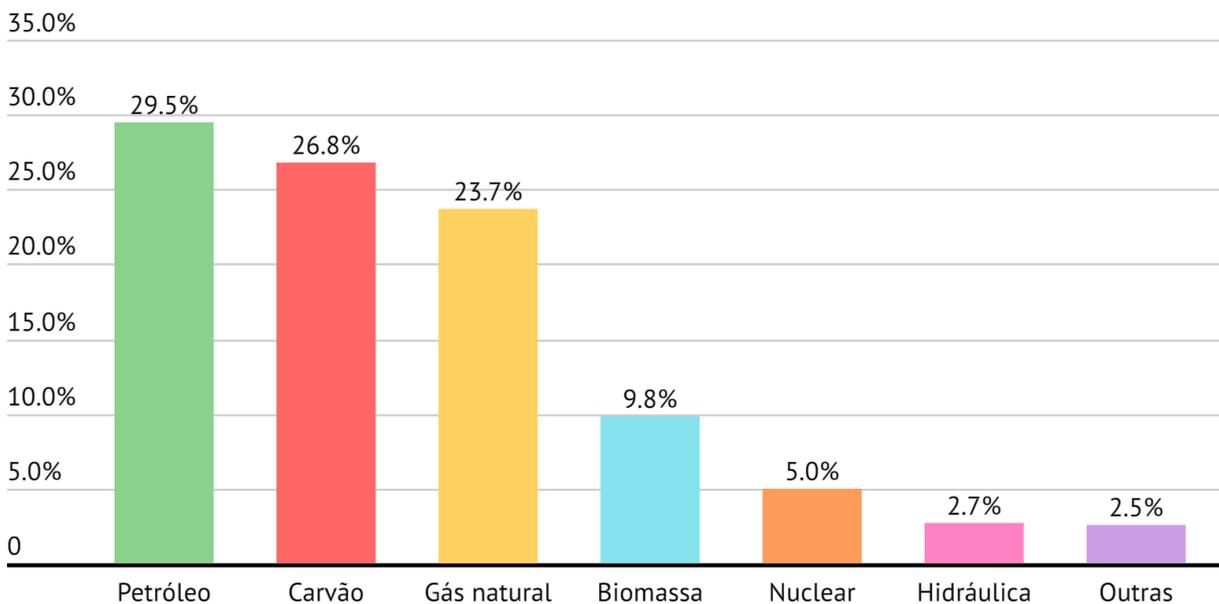
Fonte: IPCC (2023).

Ante o exposto, a mitigação das emissões de GEE é essencial para enfrentar esses desafios (Friedlingstein *et al.*, 2022; Getoff, 2006; Rogelj *et al.*, 2016). Segundo o IPCC (2021), a menos que ocorram reduções significativas de CO<sub>2</sub> e outros GEE nas próximas décadas, a temperatura média global continuará a aumentar, de modo que os limites de aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C serão ultrapassados ainda no século XXI. Apesar disso, a transição para fontes de energia limpa e práticas sustentáveis é um processo complexo, envolvendo tecnologia, política, economia, educação e mudanças de comportamento (Furkan; Hasan; Uddin, 2023; Htun, 2023). Sendo assim, a coordenação global é necessária para estabelecer metas ambiciosas de redução de emissões e incentivar a adoção de práticas de baixo carbono (Rogelj *et al.*, 2016). Isso porque a questão dos GEE representa um desafio multidimensional, que exige a cooperação de governos, setores industriais, organizações não governamentais e a sociedade em geral (Friedlingstein *et al.*, 2022; Htun, 2023).

### 3.1 ENTENDENDO OS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS: ALÉM DA ENERGIA

A energia consumida diariamente provém de uma diversidade de fontes reunidas sob o termo matriz energética (EPE, 2022). Nesse cenário, as fontes de energia primária podem ser classificadas em dois grandes grupos: fontes de energia renováveis e fontes de energia não renováveis (D’Almeida, 2015). Os combustíveis fósseis representam fontes de energia não renováveis, uma vez que sua utilização não permite a reposição dos recursos explorados (Popp, 2017). Além disso, eles demoram milhões de anos para se formar e sua exploração acarreta prejuízos para o meio ambiente (D’Almeida, 2015; Oliveira; Junger, 2020). Nesse sentido, exemplos de fontes de energia não renováveis incluem carvão, petróleo, gás natural e energia nuclear (Popp, 2017). Essa categoria de fontes energéticas limitadas é contrastada com as fontes renováveis, como energia hidráulica, eólica, solar e geotérmica, que fazem uso de recursos naturalmente abundantes sem causar danos significativos ao meio ambiente (D’Almeida, 2015; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015). Isto posto, a Figura 5 exibe a matriz energética mundial, com as principais fontes de energia utilizadas no ano de 2020.

Figura 5 – Matriz energética mundial em 2020.



Fonte: Elaboração própria com dados de IEA (2022).

Explorando brevemente a história, nos primórdios da humanidade, o homem dependia da energia de seus próprios músculos, do atrelamento de animais, do vento e das águas dos rios para realizar suas atividades (D’Almeida, 2015; Popp, 2017). Com o passar dos tempos e o desenvolvimento econômico global, os combustíveis fósseis, tais como o petróleo, o carvão e o gás natural, passaram a ser utilizados para a produção de energia, especialmente a partir do

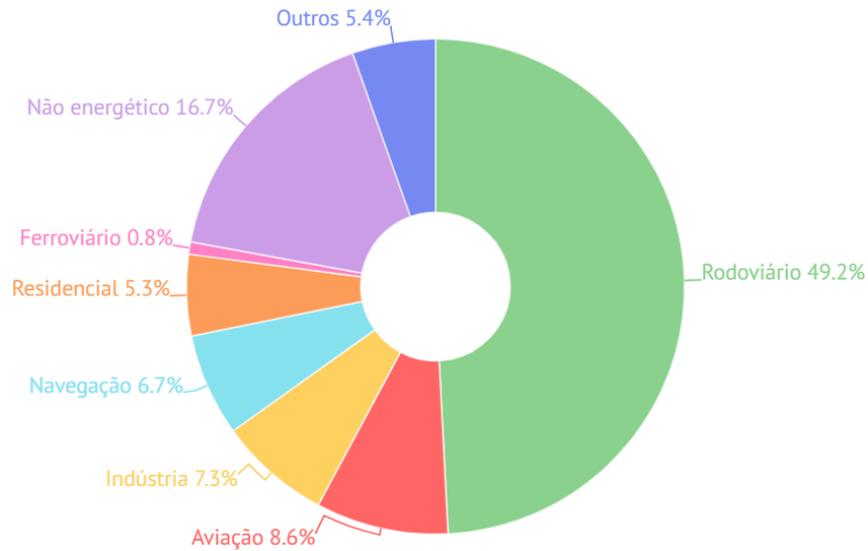
século XIX, com o advento da Revolução Industrial (Oliveira; Junger, 2020; Wang *et al.*, 2023). Desta forma, embora a geração de energia tenha passado por uma evolução significativa ao longo da história, sendo uma necessidade essencial para o desenvolvimento das sociedades e a urbanização, atualmente, parece haver uma dependência mundial do uso de recursos não renováveis, como os combustíveis fósseis (D’Almeida, 2015; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015; Popp, 2017; Speight, 2020). Fato esse evidente na Figura 5, que indica que cerca de 80% das fontes de energia em 2020 eram provenientes de combustíveis fósseis, com o petróleo liderando a matriz energética mundial (IEA, 2022).

Quanto às aplicações, os combustíveis fósseis são amplamente utilizados para gerar energia, sustentar processos industriais e alimentar veículos (Getoff, 2006; Oliveira; Junger, 2020). Para mais, embora possuam origem semelhante, sendo formados ao longo de milhões de anos a partir de matéria orgânica, eles variam em composição, funções e características (Brown; Protano; Ulgiati, 2011; Speight, 2020).

O petróleo, por exemplo, é uma substância oleosa, resultado da decomposição de restos de animais e vegetais ao longo da orla marinha, onde são cobertos por camadas de sedimentos, responsáveis por inibir sua oxidação e permitir que a matéria orgânica seja transformada por meio de reações químicas, bacteriológicas e da ação do calor (Popp, 2017). Tendo em vista que os microorganismos decompostos ficam confinados sob alta pressão nas camadas mais profundas do planeta, a extração do petróleo ocorre por meio de plataformas de perfuração, em alto mar ou em áreas terrestres (Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015). Quando extraído, o petróleo bruto é composto por uma variedade de compostos orgânicos, que precisam passar por um processo de refino para finalmente serem transformados em diferentes produtos (Almeida, 2020).

Destaca-se, ainda, que o petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos que, desde 1960, lidera a matriz energética mundial, sendo uma importante fonte de combustível para o transporte, incluindo gasolina e diesel (D’Almeida, 2015; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015; Oliveira; Junger, 2020; Speight, 2020). Por conta disso e devido à sua distribuição não homogênea pelo globo, o petróleo é considerado um recurso valioso, sendo objeto de intensos debates políticos e, inclusive, conflitos armados (Reis, 2019). As principais aplicações do petróleo podem ser observadas na Figura 6, com destaque para a predominância do setor rodoviário, que representa quase metade do consumo final desse combustível.

Figura 6 – Participação no consumo final de petróleo por setor em 2019.



Fonte: Elaboração própria com dados de IEA (2022).

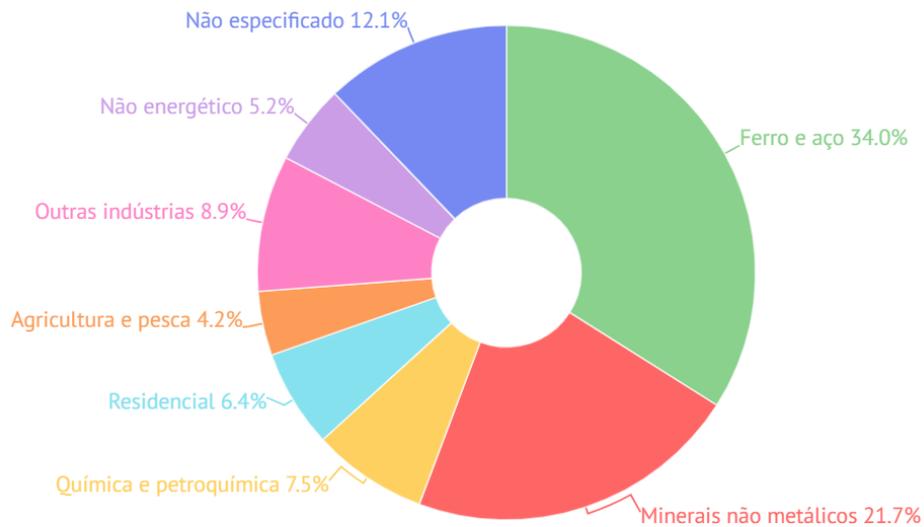
Por outro lado, o carvão tem origem em regiões pantanosas, através da ação de bactérias, fungos e micro-organismos que transformam matéria vegetal em compostos formadores da turfa, que, submetida a pressões e temperaturas elevadas, diminui de volume e sofre carbonificação (Popp, 2017). Sendo assim, o carvão é uma rocha sedimentar rica em carbono, com diferentes graus de pureza, variando de linhito (baixa pureza) a antracito (alta pureza), e é frequentemente utilizado na geração de energia elétrica (Brown; Protano; Ulgiati, 2011; D’Almeida, 2015; Speight, 2020).

O carvão se destaca por sua ampla disponibilidade em relação aos demais combustíveis fósseis (Reis, 2019). Por conta disso, em muitos países em desenvolvimento que possuem limitações quanto às fontes disponíveis, o carvão desempenha um papel crucial no fornecimento de energia. Para mais, extraído predominantemente de minas, seu consumo experimentou um aumento significativo desde o início do século XX, mas a partir de 1996, observou-se uma queda em sua utilização (Filho *et al.*, 2019). Com uso em grande escala em diferentes indústrias, as principais aplicações do carvão são ilustradas na Figura 7 na página subsequente.

Já o gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves que tem origem similar ao petróleo, uma vez que é formado a partir da decomposição de matéria orgânica, além de poder ser encontrado misturado com o petróleo – gás associado – ou sozinho em reservatórios – gás não associado (Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015). Ele é um combustível fóssil gasoso composto principalmente por metano, que tem se tornado cada vez mais importante, por representar uma fonte de energia considerada mais limpa e versátil, usada tanto no transporte quanto na geração de eletricidade (D’Almeida, 2015; Speight, 2020). Semelhante ao petróleo, o gás natural é

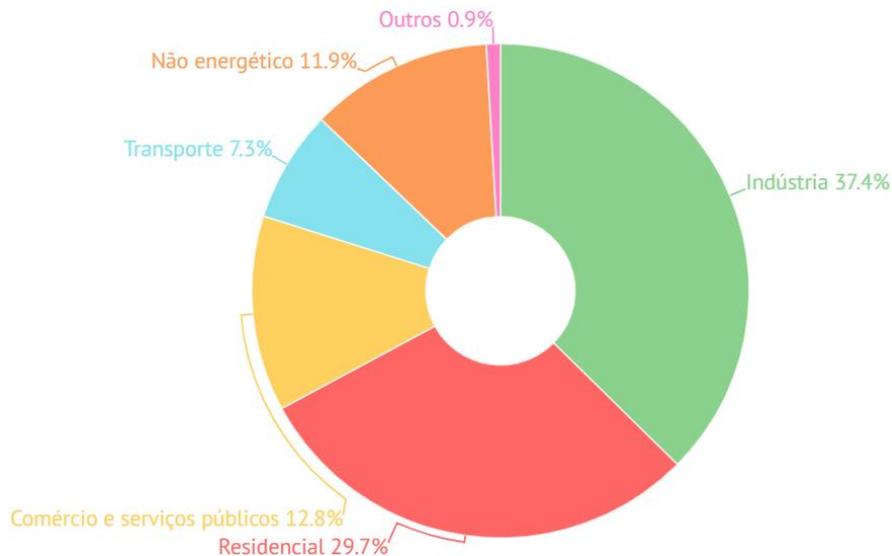
extraído por meio de perfuração, porém suas reservas são mais uniformemente distribuídas globalmente, de modo que, nos países desenvolvidos, seu consumo já superou o do carvão (Dalpisol, 2023; Filho *et al.*, 2019; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015). Finalmente, a Figura 8 demonstra as diferentes aplicações do gás natural.

Figura 7 – Participação no consumo final de carvão por setor em 2019.



Fonte: Elaboração própria com dados de IEA (2022).

Figura 8 – Participação no consumo final de gás natural por setor em 2019.



Fonte: Elaboração própria com dados de IEA (2022).

Dito isso, a extração e queima de combustíveis fósseis têm consequências ambientais significativas (Getoff, 2006; Oliveira; Junger, 2020). As atividades de mineração, perfuração e transporte exigem muita energia e causam danos aos recursos hídricos, ao solo e ao relevo das

áreas impactadas (Brown; Protano; Ulgiati, 2011; Popp, 2017). Além disso, a queima de combustíveis fósseis libera GEE na atmosfera, contribuindo para o aumento do efeito estufa e as mudanças climáticas (Getoff, 2006; Oliveira; Junger, 2020).

No passado, os combustíveis fósseis eram abundantemente disponíveis, provenientes de fontes facilmente acessíveis e transportáveis. Contudo, há indícios de que essa oferta está se esgotando e que sua reposição demandará séculos (Almeida, 2020). Por conta disso, a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e acelerar a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis é cada vez mais evidente (Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015; Rogelj *et al.*, 2016). Isso envolve a investigação e implementação de políticas que promovam a redução das emissões de GEE, o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono e a conscientização sobre os impactos ambientais e climáticos associados ao uso contínuo de combustíveis fósseis (Getoff, 2006; Htun, 2023).

### 3.2 A DEPENDÊNCIA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS NO MODAL RODOVIÁRIO

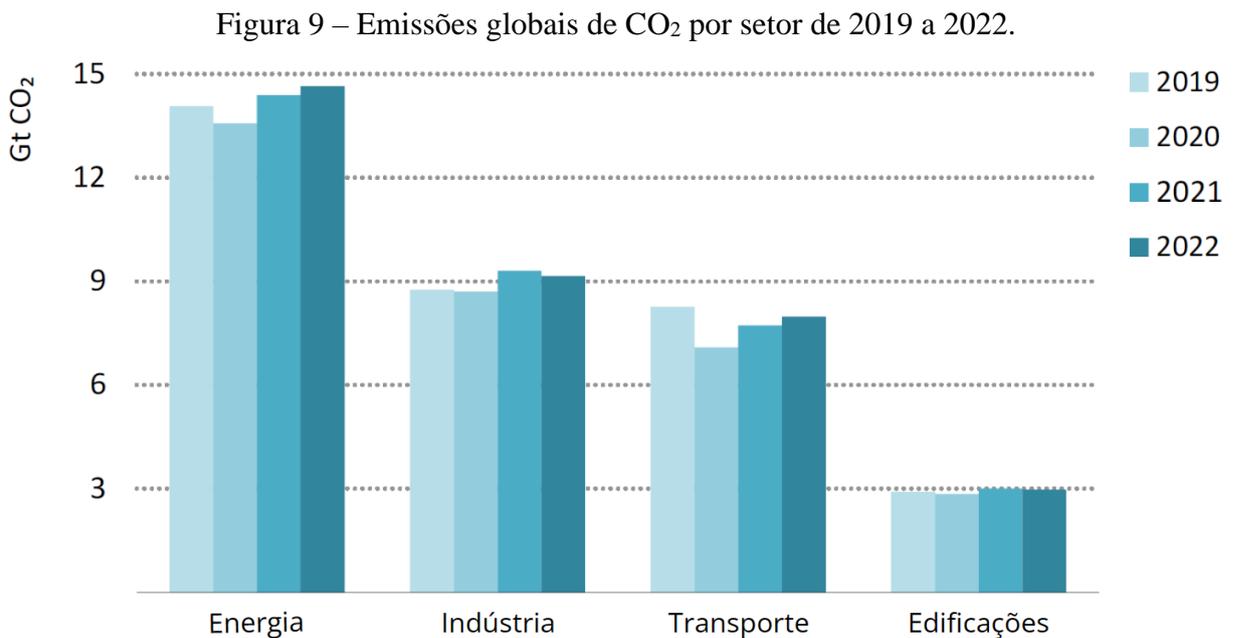
O cenário global contemporâneo é marcado pelo aumento contínuo do consumo de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural (D’Almeida, 2015; Getoff, 2006; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015; Oliveira; Junger, 2020; Popp, 2017; Speight, 2020; Wang *et al.*, 2023). Conforme disposto na Tabela 1, em 2021, o consumo mundial de petróleo atingiu cerca de 97,3 milhões de barris por dia (Mb/d), impulsionado principalmente pelo setor de transportes, com o consumo de gasolina e óleo combustível liderando o levantamento. Além disso o Brasil foi o sétimo maior consumidor, atrás apenas de países como Estados Unidos, China, Índia, Rússia, Japão e Arábia Saudita (EIA, 2021).

Tabela 1 – Consumo de produtos petrolíferos refinados em 2021.

<b>Consumo</b>	<b>Mundo (Mb/d)</b>	<b>EUA (Mb/d)</b>	<b>China (Mb/d)</b>	<b>Brasil (Mb/d)</b>
Gasolina de motor	25,064	8,816	3,150	0,966
Combustível de aviação	4,902	1,370	0,800	0,075
Querosene	0,633	0,006	0,033	0,000
Óleo combustível destilado	27,278	3,972	3,000	0,982
Óleo combustível residual	6,244	0,314	0,685	0,133
Gases liquefeitos de petróleo	10,549	1,375	2,259	0,245
Outros líquidos petrolíferos	22,614	4,037	5,339	0,486
<b>Total</b>	<b>97,264</b>	<b>19,890</b>	<b>15,266</b>	<b>2,887</b>

Fonte: Elaboração própria com dados de EIA (2021).

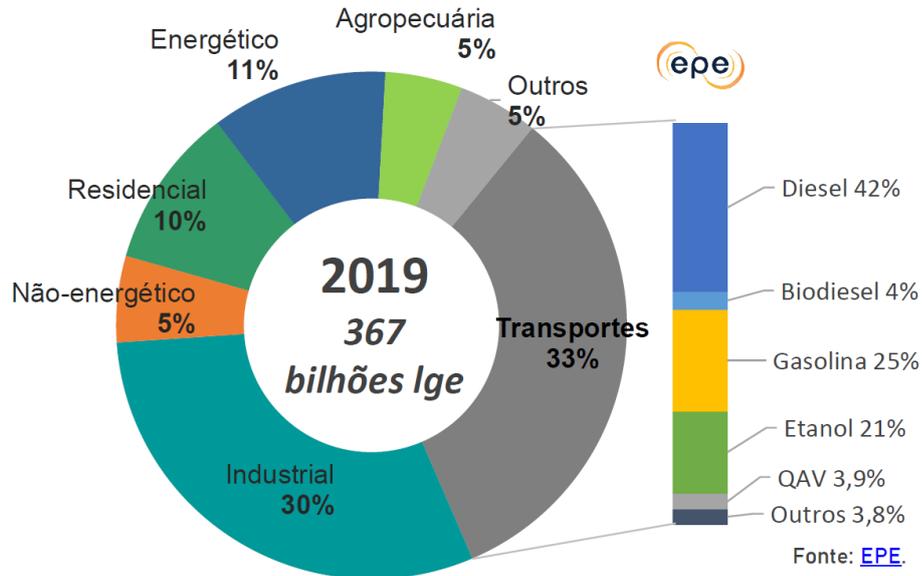
Dados da Agência Internacional de Energia – em inglês, *International Energy Agency* (IEA) –, indicam que, nos últimos anos, o setor de transportes tem figurado como o terceiro maior responsável pelas emissões de CO<sub>2</sub> no mundo, com aproximadamente 8 GtCO<sub>2</sub> registradas em 2022, conforme exemplificado na Figura 9. Nesse contexto, o setor de transportes é uma das principais fontes globais de emissões de CO<sub>2</sub>, o principal contribuinte para o aquecimento global (IEA, 2023; IPCC, 2021).



Fonte: Adaptado de IEA (2023).

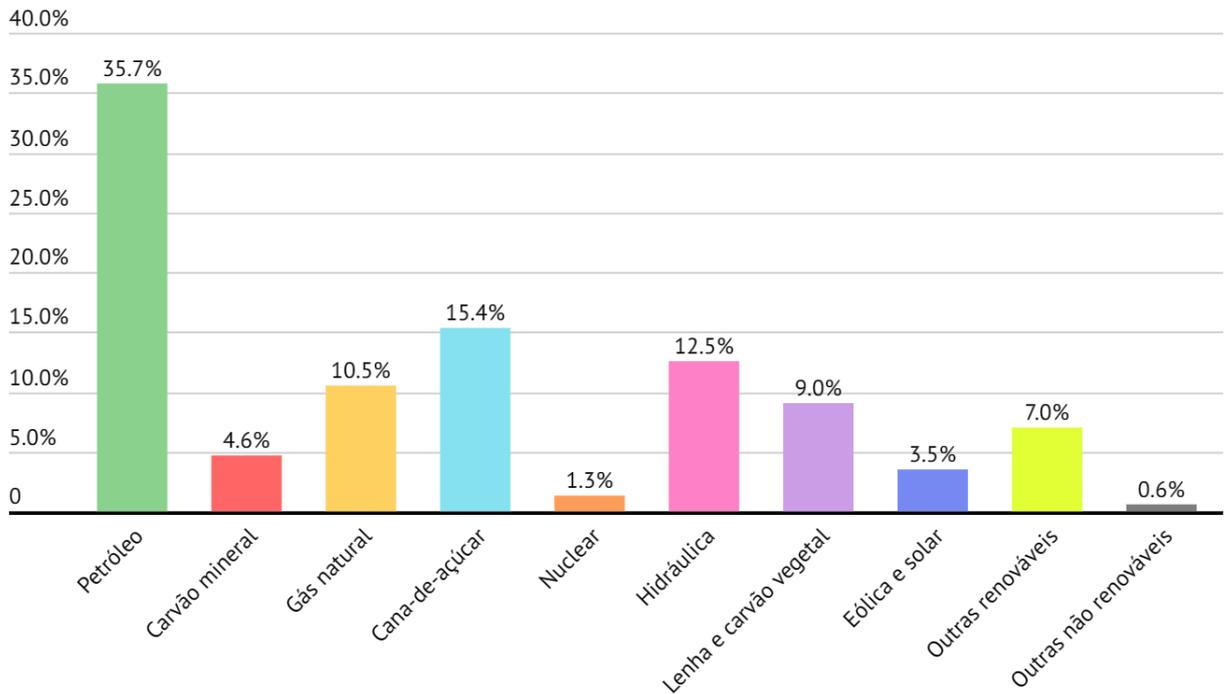
O Brasil, alinhado a essa tendência, também depende substancialmente de combustíveis fósseis para atender às demandas de seu sistema de transporte, ainda que seja um importante produtor de biocombustíveis, como o etanol fabricado a partir da cana-de-açúcar (D’Almeida, 2015; Grassi; Pereira, 2019). Isso fica claro ao observar que, embora com uma notável redução no período de 2000 a 2019, cerca de 71% do setor de transportes brasileiro ainda depende de combustíveis fósseis como principal fonte energética, considerando o uso de diesel, gasolina e querosene de aviação (QAV), contra 21% de etanol e 4% de biodiesel, como explicitado na Figura 10 (EPE, 2023b). Essa dualidade no perfil energético brasileiro, ilustrado na Figura 11, reflete a complexidade do desafio de transição para fontes mais sustentáveis.

Figura 10 – Consumo final energético e do setor de transportes no Brasil.



Fonte: EPE (2023b).

Figura 11 – Matriz energética brasileira em 2022.



Fonte: Elaboração própria com dados da EPE (2023a).

Para mais, resultados do Balanço Energético Nacional, publicado em 2023 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) – empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME) –, revelam que a produção total de energia primária no Brasil, em 2022, foi de aproximadamente 354 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, sendo 59,5%

provenientes de fontes não renováveis, com o petróleo e o gás natural liderando a produção. Ainda, o setor de transportes foi o maior responsável pelo consumo de energia no país, representando 33% das 271 milhões de toneladas equivalentes de petróleo consumidas, sendo que 30,9% do consumo foram destinados somente ao transporte rodoviário. Essas informações estão dispostas na Tabela 2 e na Tabela 3 logo abaixo.

Tabela 2 – Produção primária de energia no Brasil em 2022.

Fontes	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Não renovável	139.997	153.920	165.795	172.540	179.478	178.417	192.643	203.062	203.838	211.079
Petróleo	104.762	116.705	126.127	130.373	135.907	134.067	144.303	152.635	150.386	156.398
Gás natural	27.969	31.661	34.871	37.610	39.810	40.560	44.398	46.299	48.462	49.971
Carvão	3.298	3.059	2.459	2.636	1.931	1.930	2.162	2.085	2.640	2.311
Outras	3.968	2.495	2.338	1.921	1.830	1.860	1.780	2.043	2.350	2.399
Renovável	118.900	119.613	121.330	123.322	124.699	131.178	135.029	139.476	134.464	143.469
Hidráulica	33.625	32.116	30.938	32.758	31.898	33.452	34.217	34.089	31.202	36.732
Lenha	24.788	25.223	25.075	23.502	24.864	26.250	26.411	26.457	27.407	27.283
Cana-de-açúcar	49.306	49.273	50.400	50.658	49.725	50.895	52.861	55.597	49.425	47.740
Eólica	566	1.050	1.860	2.880	3.644	4.169	4.815	4.906	6.217	7.020
Solar	476	539	605	667	785	1.060	1.385	1.791	2.371	3.591
Outras	10.139	11.412	12.453	12.857	13.784	15.353	15.339	16.635	17.842	21.102
<b>Total</b>	<b>258.896</b>	<b>273.532</b>	<b>287.126</b>	<b>295.862</b>	<b>304.177</b>	<b>309.595</b>	<b>327.672</b>	<b>342.538</b>	<b>338.302</b>	<b>354.548</b>

Fonte: Elaboração própria com dados da EPE (2023a).

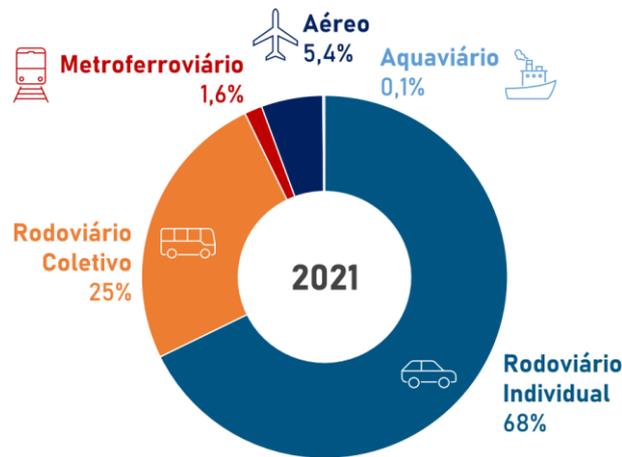
Tabela 3 – Consumo de produtos petrolíferos refinados em 2021.

Consumo	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Não-energético	16.329	16.009	15.110	14.771	15.048	14.130	14.253	12.563	13.785	15.942
Energético	242.837	248.694	245.110	240.013	243.782	243.338	244.789	241.222	250.014	255.375
Energia	25.079	26.540	26.919	25.419	24.983	27.660	27.718	26.317	24.863	23.496
Residencial	24.125	25.256	25.438	25.393	26.001	27.063	27.354	28.298	28.577	28.963
Comercial	8.135	8.714	8.681	8.480	8.564	8.630	8.996	8.061	8.659	9.330
Público	3.872	3.997	4.048	4.032	4.035	4.204	4.268	3.976	3.968	4.128
Agropecuário	10.614	11.174	11.452	11.244	12.292	12.348	12.631	13.012	13.143	13.082
Transportes	83.022	86.027	84.203	81.987	82.890	82.189	84.685	79.375	85.187	89.426
Rodoviário	76.880	79.798	78.095	76.325	77.109	76.158	78.946	75.086	80.291	83.940
Ferroviário	1.178	1.172	1.143	1.120	1.204	1.317	1.219	1.225	1.213	1.224
Aéreo	3.667	3.709	3.658	3.347	3.335	3.424	3.348	1.924	2.552	3.161
Hidroviário	1.298	1.348	1.307	1.194	1.242	1.289	1.172	1.140	1.130	1.101
Industrial	87.990	86.986	84.369	83.457	85.018	81.243	79.137	82.182	85.618	86.949
<b>Total</b>	<b>259.166</b>	<b>264.703</b>	<b>260.221</b>	<b>254.784</b>	<b>258.830</b>	<b>257.468</b>	<b>259.042</b>	<b>253.785</b>	<b>263.799</b>	<b>271.317</b>

Fonte: Elaboração própria com dados da EPE (2023a).

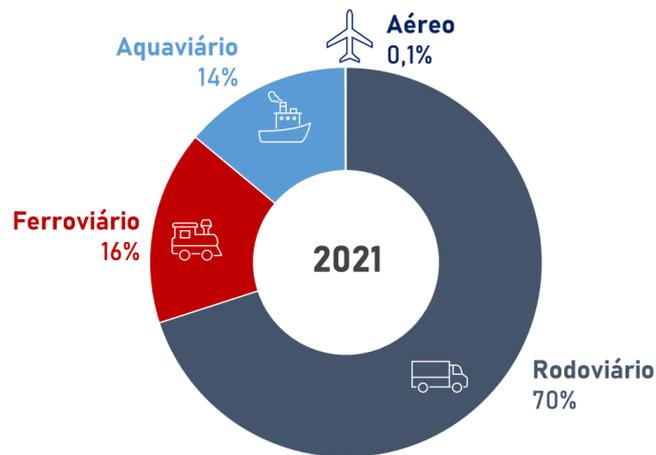
Face a isso, os Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032, também publicados pela EPE, em 2023, revelam que tanto o deslocamento de passageiros quanto o transporte de carga no Brasil dependem significativamente do modal rodoviário, movimentando cerca de 93% e 70%, respectivamente, do total, conforme Figura 12 e Figura 13 apresentadas na sequência (EPE, 2023b).

Figura 12 – Atividade do transporte de passageiros brasileiro por modo.



Fonte: EPE (2023b).

Figura 13 – Atividade do transporte de cargas brasileiro por modo.

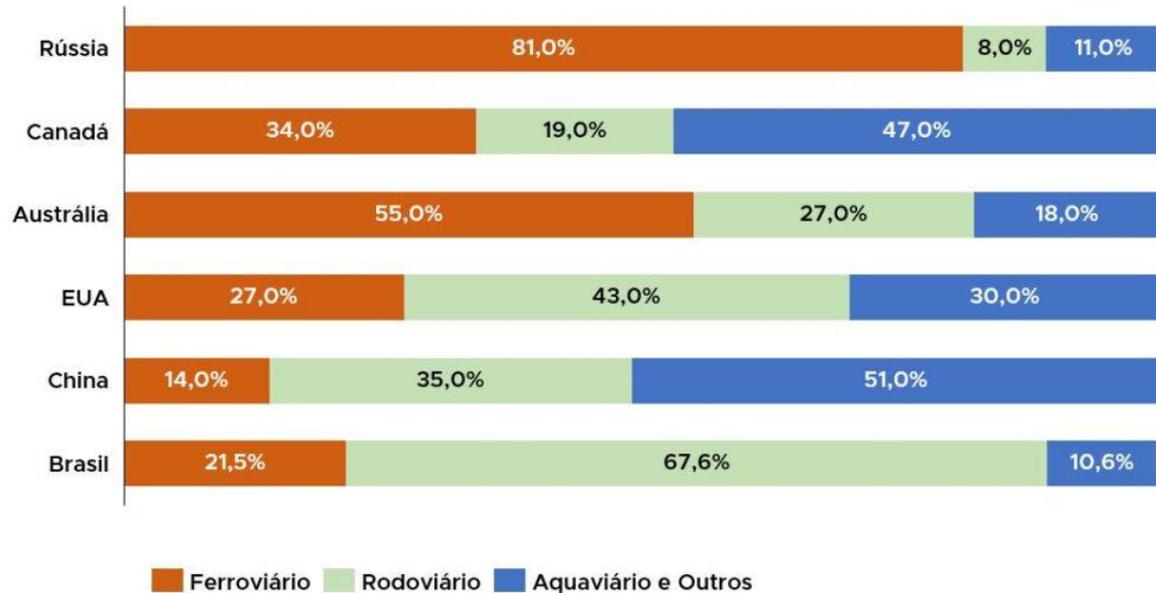


Fonte: EPE (2023b).

Uma explicação para isso é que, apesar de existirem alternativas como o transporte aéreo, marítimo e ferroviário, o transporte rodoviário ainda é a opção mais atrativa, dada sua cobertura e velocidade em comparação aos outros modais (Jacinto *et al.*, 2022). Essa situação contrasta com outros países de extensão continental, onde o modal rodoviário desempenha um papel menos predominante, como é o caso da Rússia, Canadá, Austrália, Estados Unidos e

China, em que o modal ferroviário assume maior relevância em comparação ao Brasil, como mostra a Figura 14 (ANTF, 2022).

Figura 14 – Participação de cada modal na matriz de transportes de diferentes países.



Fonte: ANTF (2022).

Apesar dessa dependência, um estudo publicado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), em 2023, indicou que a malha rodoviária brasileira, com aproximadamente 1,7 milhões de quilômetros, tem somente 213 mil quilômetros pavimentados, representando cerca de 12,4%. Além disso, o mesmo estudo apontou que 66,0% das rodovias pesquisadas apresentam algum tipo de deficiência no estado geral e 55,5% enfrentam problemas relacionados ao pavimento, conforme disposto no Quadro 1 na página seguinte. Sob essa ótica, a dependência do transporte rodoviário tem implicações diretas na economia, tendo em vista que as más condições das rodovias impactam negativamente o desenvolvimento de regiões, gerando custos adicionais com reabilitações e manutenções de pavimentos (Gunathilaka; Amarasingha, 2020).

Nesse cenário, diante da significativa dependência do transporte rodoviário, que, por sua vez, faz uso substancial de combustíveis fósseis, fica claro que o setor figura como um dos principais emissores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no cenário nacional (D’Almeida, 2015; EPE, 2023b). Em termos quantitativos, conforme demonstrado na Figura 15, aproximadamente 22,9% do total de emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil, em 2016, foram provenientes do setor de

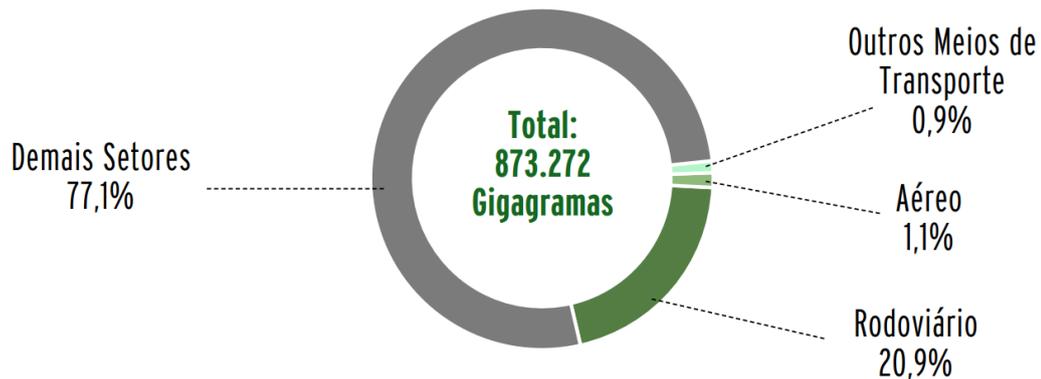
transportes, sendo que 91,3% desse montante é especificamente associado ao transporte rodoviário (CNT, 2023).

Quadro 1 – Classificação do estado geral e do pavimento das rodovias brasileiras em 2022.

Classificação	Estado Geral		Pavimento	
	Km	%	Km	%
Ótimo	9.421	8,5	32.857	29,8
Bom	28.149	25,5	16.165	14,7
Regular	44.910	40,7	34.358	31,1
Ruim	20.696	18,8	20.569	18,6
Péssimo	7.157	6,5	6.384	5,8
<b>Total</b>	<b>110.333</b>	<b>100</b>	<b>110.333</b>	<b>100</b>

Fonte: Elaboração própria com dados de CNT (2023).

Figura 15 – Fontes das emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil em 2016.



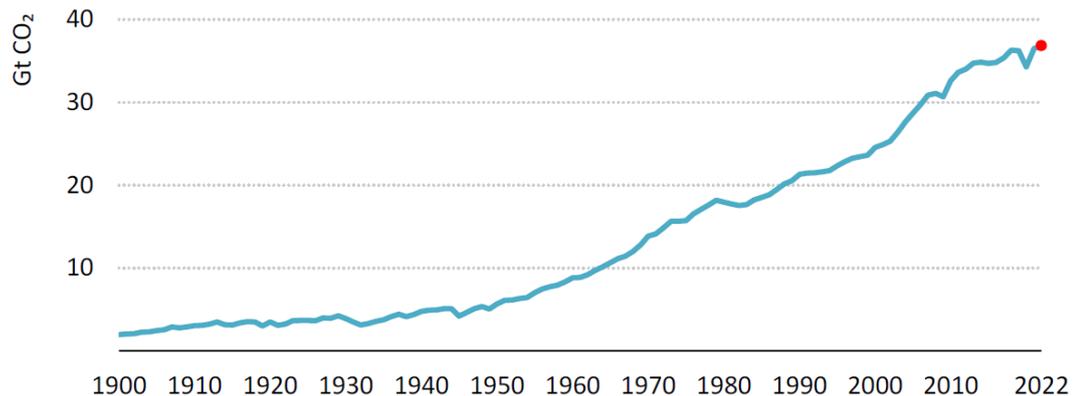
Fonte: CNT (2023).

Portanto, o consumo de combustíveis fósseis no modal rodoviário contribui significativamente para as emissões de GEE (IEA, 2023). O crescimento econômico e o aumento constante da frota de veículos estão diretamente associados ao aumento do consumo de combustíveis fósseis nesse setor, intensificando os desafios ambientais (Hasan *et al.*, 2023). Adicionalmente, a demanda contínua por combustíveis derivados do petróleo, principalmente no transporte rodoviário, não apenas levanta preocupações quanto às emissões GEE e às mudanças climáticas, mas também está intrinsecamente vinculada à segurança energética (Nouni *et al.*, 2021).

### 3.3 MERCADO DE CARBONO E A COMPENSAÇÃO DE EMISSÕES

Como já visto, a atividade humana é intrinsecamente dependente dos combustíveis fósseis (Brown; Protano; Ulgiati, 2011; D’Almeida, 2015; Popp, 2017). No entanto, muitas dessas atividades estão associadas à emissão de GEE, reconhecidos como contribuintes significativos para o aquecimento global e eventos climáticos extremos (IPCC, 2021; Kumar; Subramanian, 2017). Segundo a Agência Internacional de Energia, em 2022, o mundo atingiu um recorde de 36,8 bilhões de toneladas de emissões, como mostra a Figura 16 na página seguinte (IEA, 2023). Além disso, entre 2011 e 2020, o acúmulo de GEE na atmosfera causou um aumento de cerca de 1,09 °C na temperatura média do planeta em comparação com os tempos pré-industriais, de 1850 a 1900, com projeções apontando a possibilidade de alcançar 1,5 °C entre 2030 e 2052, caso as emissões não sejam reduzidas (IPCC, 2021).

Figura 16 – Emissões globais de CO<sub>2</sub> provenientes da combustão de energia e de processos industriais e sua variação anual entre 1900 e 2022.



Fonte: (IEA, 2023).

Essas emissões resultam de uma série de atividades industriais, uso de combustíveis fósseis, como o emprego de gasolina e diesel no transporte e a queima de carvão para geração de energia elétrica, além da criação de animais para pecuária e dos desmatamentos e queimadas (Friedlingstein *et al.*, 2022; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015; Speight, 2020). Nesse sentido, a redução das fontes de emissões de GEE é crucial (Anjos; Feijoo; Sankaranarayanan, 2022). Para atingir essa meta, como parte da resposta global, os créditos de carbono emergiram como uma ferramenta política de incentivo à redução de emissões de GEE (Gupta; Rakshit, 2023; Lin; Huang, 2022). Através dele, empresas e países que conseguem reduzir suas emissões podem vender a permissão excedente como créditos de carbono (Anjos; Feijoo; Sankaranarayanan, 2022; D’Almeida, 2015; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015).

É nesse contexto que surge um marco importante na evolução do mercado de carbono, o Protocolo de Kyoto, assinado em 1997 na Conferência das Partes – em inglês, *Conference of the Parties* (COP), conferência internacional que trata sobre as mudanças climáticas – e implementado em 2005 (UNFCCC, 2008). Ele tinha como objetivo reduzir em 5% as emissões de GEE registradas em 1990 até 2010, sendo ratificado por 141 países desenvolvidos, responsáveis por 62% das emissões de GEE da época (D’Almeida, 2015; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015). Para tanto, o protocolo introduziu três mecanismos para auxiliar os países a cumprirem suas metas de redução de emissões, a saber: o Comércio Internacional de Emissões, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e a Implementação Conjunta (UNFCCC, 2008). Apesar do progresso, ele não incluía países em desenvolvimento, não havendo assistência técnica e financeira para países mais pobres, e, em 2012, o período de compromisso com o protocolo terminou (Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015).

Diante disso, substituindo o antigo Protocolo de Kyoto, outro importante marco na redução de emissões é o Acordo de Paris, que foi discutido na COP-21 em dezembro de 2015 e entrou em vigor em novembro de 2016 (UNFCCC, 2016). Através dele, os países participantes se comprometem a reduzir suas emissões com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global a 2 °C acima dos níveis pré-industriais (Anjos; Feijoo; Sankaranarayanan, 2022; Rogelj *et al.*, 2016). Como meta mais ambiciosa, o acordo também propõe esforços para limitar esse aumento a 1,5 °C, além de determinar que os países desenvolvidos devem dar suporte financeiro e tecnológico aos países em desenvolvimento na redução das emissões (UNFCCC, 2016).

Como mencionado anteriormente, os créditos de carbono são uma ferramenta destinada a combater as mudanças climáticas e alcançar metas de redução de emissões (Lin; Huang, 2022). Em termos gerais, um crédito de carbono equivale a uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou seu equivalente em outros GEE que deixaram de ser emitidos (D’Almeida, 2015; Kollmuss; Zink; Polycarp, 2008).

Cabe destacar, aqui, o conceito de carbono equivalente. Ele se refere à medida utilizada para expressar a contribuição de diferentes GEE para o aquecimento global em relação ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que é considerado a referência padrão. Como diferentes gases têm diferentes potenciais de aquecimento global, o carbono equivalente permite comparar e agregar as emissões de gases como metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e outros em termos de seu impacto climático total, expressando-os como a quantidade de CO<sub>2</sub> que teria o mesmo efeito de aquecimento ao longo de um determinado período de tempo, geralmente 100 anos (IPCC, 2018, 2023). É importante destacar, no entanto, que uma tonelada de CO<sub>2</sub> equivale a apenas 0,2727

toneladas de carbono equivalente. Isso ocorre porque o cálculo considera apenas a massa do átomo de carbono na molécula de CO<sub>2</sub> (Amachains, 2023). A Tabela 4 exemplifica o Potencial de Aquecimento Global – em inglês, *Global Warming Potential* (GWP) – e a conversão para carbono equivalente de alguns dos principais GEE.

Tabela 4 – GWP e conversão para carbono equivalente de diferentes GEE.

GEE	Tempo de Vida (anos)	GWP (100 Anos)	Carbono Equivalente
CO <sub>2</sub>	-	1	0,273
CH <sub>4</sub>	12,4	28	7,64
N <sub>2</sub> O	121	265	72,3

Fonte: Elaboração própria com dados de IPCC (2018) e Amachains (2023).

À vista disso, o valor de um crédito de carbono depende do mercado em que é negociado: regulado ou voluntário (Blaufelder *et al.*, 2022). No mercado regulado, regimes regionais, nacionais e internacionais estabelecem metas obrigatórias para empresas emissoras (Kollmuss; Zink; Polycarp, 2008). Para tanto, países e empresas estão explorando a criação e a expansão de sistemas de precificação de carbono, como o sistema chamado *cap and trade*, em que há um limite para as emissões, podendo as empresas que emitem menos do que o limite vender seus créditos de carbono às que excedem, conforme definido pela instância reguladora. (Blaufelder *et al.*, 2022; Hinrichs; Kleinbach; Reis, 2015). Outra opção que visa reduzir as emissões de GEE são os impostos sobre carbono, em que impostos são cobrados com base na quantidade emitida (Anjos; Feijoo; Sankaranarayanan, 2022).

Já no mercado voluntário, o crédito de carbono é negociado por indivíduos, empresas e instituições que desejam reduzir, evitar, compensar, neutralizar ou remover suas emissões, sem obrigações legais (Blaufelder *et al.*, 2022; Kollmuss; Zink; Polycarp, 2008). Nesse mercado, a maioria dos créditos é fornecida por países em desenvolvimento (Gupta; Rakshit, 2023). Além disso, o valor do crédito depende da atividade e da região em que são originados (Blaufelder *et al.*, 2022). O objetivo do mercado voluntário é, então, que indivíduos, empresas e instituições possam vender e comprar créditos de carbono para atender às suas próprias metas, permitindo, por exemplo, que setores não regulamentados e países que não aderiram aos acordos internacionais compensem suas emissões (Kollmuss; Zink; Polycarp, 2008).

Isto posto, conforme descrito por D’Almeida (2015), em 2007, o Brasil foi palco do primeiro leilão mundial de créditos de carbono, realizado pela Bolsa de Mercadorias & Futuros. Nele, a prefeitura de São Paulo colocou à venda 800.000 créditos referentes à destruição e neutralização de 808.450 toneladas de gás metano no Aterro Sanitário Bandeirantes, que foram

adquiridos pelo banco holandês Fortis Bank NV/SA, por 16,20 euros cada. Com isso, a prefeitura arrecadou R\$ 34 milhões, destinados a melhorias da qualidade de vida da população que vivia no entorno do aterro.

Mais recentemente, visando atender os acordos internacionais, 77% das 80 principais empresas atuantes no Brasil já estabeleceram metas de redução de emissões (Blaufelder *et al.*, 2022). Ainda, segundo um estudo do Banco Mundial, em 2012, o mercado de carbono movimentou 61 bilhões de euros, com a comercialização de 10,7 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, tendo a União Europeia como o principal mercado (D’Almeida, 2015). Já em 2022, a China era considerada o maior mercado de carbono do mundo (Lin; Huang, 2022).

Finalmente, embora seja uma ferramenta eficaz na busca pela redução das emissões de GEE, o mercado de carbono não está isento de problemas e desafios (Gupta; Rakshit, 2023). Ele ainda é recente e imaturo, com preços baixos e excesso de oferta, o que não incentiva as empresas a reduzirem suas emissões, além da cobertura ser limitada, principalmente no que se refere à indústria da energia elétrica (Lin; Huang, 2022). Para mais, o valor dos créditos de carbono pode variar significativamente devido a flutuações no mercado ou a depender das jurisdições, criando incerteza para investidores e participantes (Anjos; Feijoo; Sankaranarayanan, 2022; Gupta; Rakshit, 2023). Apesar disso, o mercado continua a desempenhar um papel importante na transição para práticas de baixo carbono, representando um componente central no combate às mudanças climáticas (Lin; Huang, 2022).

#### 4 FATORES CONDICIONANTES DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

O consumo de combustível no âmbito do transporte rodoviário é influenciado por uma variedade de fatores (Qu *et al.*, 2021). Veículos que operam em rodovias, estradas e vias urbanas consomem quantidades substanciais de combustível para atender às necessidades de mobilidade de pessoas e bens (Boggio-Marzet *et al.*, 2022; IEA, 2021; Tsavachidis; Petit, 2022). Nesse contexto, a eficiência dos veículos é uma peça central (Albool *et al.*, 2023). Veículos mais eficientes consomem menos combustível, sendo os avanços na tecnologia dos motores contribuintes significativos para essa eficiência (Golbasi; Kina, 2022; He *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). A carga e peso dos veículos também desempenham um papel crucial, com veículos sobrecarregados consumindo mais combustível devido ao esforço adicional necessário para mover cargas mais pesadas (Mane; Djordjevic; Ghosh, 2021; Pobedinsky, 2022; Yu; Li; Li, 2016).

O comportamento do motorista é outro elemento determinante no consumo de combustível (Boggio-Marzet *et al.*, 2022; He *et al.*, 2021). Práticas de condução agressivas, como acelerações bruscas e frenagens, contribuem para um maior consumo (Albool *et al.*, 2023; Golbasi; Kina, 2022; Mane; Djordjevic; Ghosh, 2021; Qu *et al.*, 2021; Yu; Li; Li, 2016). Enquanto estratégias de direção econômica, como manter velocidades constantes e evitar marcha lenta prolongada, demonstram potencial para significativa economia de combustível (Zhang *et al.*, 2022). Além disso, o estado deficiente da embreagem, a utilização de combustíveis de baixa qualidade, a presença de pneus desgastados e o funcionamento constante do sistema de ar condicionado também constituem fatores que podem impactar o consumo de combustível (Dalpisol, 2023).

A qualidade da infraestrutura de transporte, incluindo o congestionamento de tráfego, a condição e a geometria das rodovias também influenciam diretamente o consumo (Albool *et al.*, 2023; Boggio-Marzet *et al.*, 2022; Golbasi; Kina, 2022; He *et al.*, 2021; Yao *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Ainda, o consumo de combustível é impactado por elementos como o tipo de superfície da rodovia, a rugosidade e as estratégias de manutenção (Jain *et al.*, 2022). Isso porque investimentos em manutenção e reabilitação de pavimentos podem reduzir a resistência ao rolamento que leva ao consumo excessivo de combustível (Wang *et al.*, 2012). Adicionalmente, rodovias bem conservadas e um sistema de transporte público eficaz podem reduzir a necessidade de viagens individuais e, conseqüentemente, o consumo de combustível (Al-Ghandoor *et al.*, 2013).

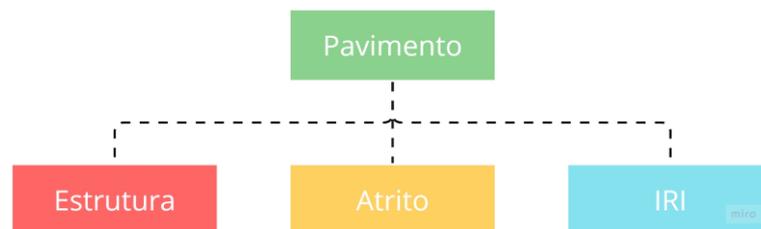
Políticas governamentais desempenham, portanto, um papel crucial na promoção de um futuro mais sustentável em termos de consumo de combustível, incluindo incentivos fiscais,

subsídios para veículos alternativos, políticas de transporte público e investimentos em infraestrutura que visem aliviar os congestionamentos (Al-Ghandoor *et al.*, 2013; Wangsa; Vanany; Siswanto, 2023). A pesquisa contínua e o desenvolvimento de veículos mais eficientes, incluindo veículos elétricos e híbridos, também representam uma estratégia-chave para reduzir o consumo de combustível (IEA, 2023; Zhang *et al.*, 2021). Além disso, programas de educação e treinamento para motoristas podem promover práticas de condução mais econômicas (Karrouchi *et al.*, 2023; Singh; Kathuria, 2021). Assim, embora o consumo de combustível no transporte rodoviário seja uma preocupação significativa, também se apresenta como uma área de oportunidade para implementar mudanças positivas em direção a um futuro mais eficiente e sustentável (Hasan *et al.*, 2023; Mane; Djordjevic; Ghosh, 2021; Nouni *et al.*, 2021; Tsavachidis; Petit, 2022).

#### 4.1 FATORES RELACIONADOS À INTERAÇÃO PAVIMENTO-VEÍCULO

Em se tratando especificamente das características do pavimento, a dinâmica conhecida como Interação Pavimento-Veículo – em inglês, *Pavement-Vehicle Interaction (PVI)* – desempenha um papel crucial no consumo de combustível e nas emissões de CO<sub>2</sub>, sendo influenciada por três elementos principais: a deflexão estrutural, a textura da superfície e o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) (Jiao; Bienvenu, 2016; Mohanraj; Merritt, 2023). Ou seja, vias com condições superficiais inadequadas ou propriedades estruturais abaixo do ideal fazem os veículos consumirem mais combustível do que o necessário para se mover. Além disso, os efeitos do PVI constituem a maior parte do impacto ambiental durante a fase de uso dos pavimentos (Xu *et al.*, 2019).

Figura 17 – Fatores condicionantes do consumo de combustível relacionados ao PVI.



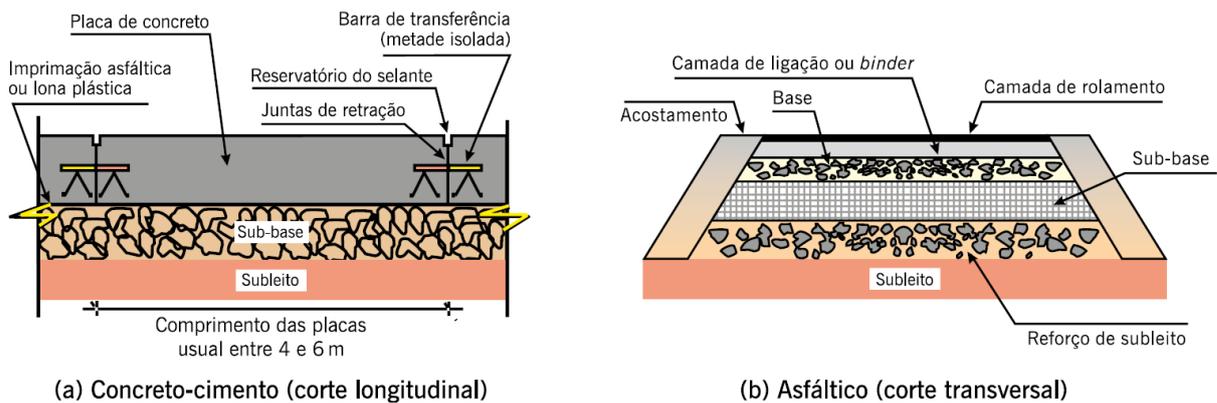
Fonte: Elaboração própria (2023).

Nesse cenário, Mohanraj e Merrit (2022) indicam que o aumento no consumo de combustível está associado a fatores de resistência ao rolamento. A explicação é que, ao contrário do consumo instantâneo de combustível, que representa a quantidade consumida em

um dado momento no tempo, o consumo adicional de combustível está associado ao trajeto percorrido pelo veículo entre dois pontos, sendo o incremento influenciado, portanto, pela resistência ao rolamento. Os autores ainda destacam que as condições de rugosidade, macrotextura e resposta estrutural estão sujeitas a variações ao longo da vida útil do pavimento, o que implica que o consumo de combustível acrescido por esses fatores não é estático ao longo do tempo.

Tratando sobre cada um desses três elementos individualmente, a escolha do tipo de pavimento, seja rígido ou flexível, pode afetar o consumo de combustível em até 20%, dependendo da distância percorrida (Dalpisol, 2023). Face a isso, pavimentos rígidos, construídos com cimento Portland, concreto ou outros materiais de elevada rigidez, são ideais para áreas com tráfego intenso e apresentam resistência e durabilidade superiores, demandando pouca manutenção. Já os pavimentos flexíveis, que possuem uma camada superficial de concreto asfáltico, geralmente assentada sobre uma camada de base granular e/ou sub-base, podendo também contar com uma camada inferior constituída de solo denominada reforço de subleito, distribuem as cargas provenientes do tráfego de maneira mais uniforme e demandam menos tempo e custo para construção e manutenção. A diferença estrutural desses dois tipos de pavimentos pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 – Diferença estrutural entre pavimentos rígidos e flexíveis.



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Isto posto, no caso de pavimentos flexíveis, a deflexão do pavimento possui dois impactos principais. Em primeiro lugar, a deflexão gera uma alteração na geometria da superfície do pavimento, induzindo uma curvatura que contribui para o aumento do consumo de combustível. Além disso, a energia se dissipa na estrutura do pavimento devido às propriedades viscoelásticas dos materiais asfálticos (Xu *et al.*, 2019).

Desta forma, pavimentos rígidos apresentam menor consumo de combustível em comparação com pavimentos flexíveis. Os resultados de Jiao e Bienvenu (2016) registraram reduções de 2,25% a 93 km/h e 2,22% a 112 km/h no consumo de combustível em pavimentos rígidos em comparação com pavimentos flexíveis. Além disso, observa-se que um acréscimo de 0,1 mm na deflexão do pavimento a 25 °C resultaria em um aumento no consumo de combustível de 1,53% a 93 km/h e 1,46% a 112 km/h.

Ainda no que se refere ao tipo de pavimento, um estudo realizado por Heidari *et al.* (2020) sugere que os pavimentos de cimento Portland apresentam uma redução de 55% no consumo de energia e de 12% nos impactos ambientais em comparação com os pavimentos asfálticos. Os autores destacam ainda que a opção por pavimentos de concreto em detrimento dos pavimentos asfálticos, ao longo da última década no Irã, acarretará um aumento de aproximadamente 35% nos custos ao longo do ciclo de vida. No entanto, essa escolha resultará em uma redução de cerca de 2.000.000 de toneladas nas emissões de carbono e uma diminuição de 700.000 GJ no consumo anual de energia.

Como descrito no estudo realizado por Dalpisol (2023), a textura do pavimento exerce uma influência fundamental no consumo de combustível dos veículos que trafegam sobre as rodovias. Essa característica, que diz respeito à abrasividade da superfície da pista, desempenha um papel crucial na eficiência do atrito entre os pneus dos veículos e a estrada. Uma textura adequada pode contribuir para a redução do consumo, otimizando a eficiência energética dos veículos e promovendo práticas mais sustentáveis no setor rodoviário. Além de impactar o consumo de combustível, a textura é reconhecida como um fator de segurança, uma vez que sua qualidade influencia diretamente na capacidade dos veículos de manter uma aderência estável à pista. Dessa forma, a compreensão e otimização da textura do pavimento não apenas contribuem para a redução do consumo de combustível, mas também desempenham um papel crucial na segurança e desempenho geral do tráfego rodoviário.

Finalmente, baixos valores de IRI reduzem a resistência ao rolamento, o que resulta em menor consumo de combustível pelos veículos que circulam sobre o pavimento. Em contrapartida, um pavimento com um IRI elevado pode causar fadiga e desconforto aos ocupantes dos veículos, além de acelerar o desgaste dos pneus e outros componentes do veículo. Portanto, realizar medições periódicas do IRI e planejar a manutenção do pavimento são passos essenciais para assegurar que as vias estejam em condições adequadas para uso, não apenas visando a eficiência do tráfego, mas também o conforto dos usuários e a preservação dos veículos.

Dentre os fatores associados ao pavimento que influenciam o consumo de combustível, o IRI destaca-se como o mais crucial e, portanto, será o foco desta discussão. Isso ocorre porque o atrito, por exemplo, é um elemento que não pode ser drasticamente alterado, tendo em vista que desempenha um papel essencial na prevenção de acidentes, ao influenciar a aderência dos veículos à pista (Dalpisol, 2023). Já no que diz respeito à resposta estrutural, relacionada à rigidez, realizar mudanças significativas implicaria alterar a composição ou o material do pavimento, como a adoção de pavimentos de concreto, revelando-se, portanto, uma opção onerosa. Diante dessa realidade, o IRI pode ser uma alternativa de controle do consumo de combustível quando o assunto é pavimentação rodoviária, sem incorrer em custos excessivos, tanto em termos de segurança quanto econômicos.

A influência do IRI no consumo de combustível será melhor detalhada nas seções subsequentes deste trabalho.

## 5 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS

O pavimento é a estrutura acima da superfície final de terraplenagem, composta de várias camadas de espessuras distintas, que tem como objetivo suportar o tráfego de veículos, proporcionando conforto, segurança e economia aos usuários (Bernucci *et al.*, 2022). Isto posto, embora a construção e manutenção da malha rodoviária represente um investimento nacional significativo, que demanda recursos financeiros consideráveis, seu desenvolvimento é um fator determinante para o crescimento econômico e social de qualquer nação, tendo em vista que gera competitividade internacional (Barella, 2008). Nesse sentido, entre os diversos fatores que afetam a qualidade do pavimento, está a irregularidade longitudinal, entendida como “o conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência” (DNIT, 2006).

Segundo o DNIT (2006), a irregularidade longitudinal costuma ser causada pela deformação permanente das camadas inferiores dos pavimentos, desenvolvendo-se progressivamente com a ação do tráfego e podendo ser intensificada devido ao trincamento. As irregularidades longitudinais podem ser, por exemplo, ondulações, afundamentos, rachaduras, buracos e desgastes que afetam superfície do pavimento (Bernucci *et al.*, 2022; Pantha; Yatabe; Bhandary, 2010; Zeng; Gül; Mei, 2022). Elas são causadas por uma variedade de fatores, incluindo o desgaste do pavimento, problemas no processo construtivo, a ação do tráfego e até mesmo questões ambientais, como clima e temperatura, não podendo ser tratadas como um efeito isolado (Albuquerque, 2007; Bisconsini, 2016; DNIT, 2006; Hettiarachchi *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a irregularidade longitudinal de pavimentos tem diversas consequências (Bernucci *et al.*, 2022). As irregularidades interferem na qualidade de rolamento, causam desconforto e podem afetar a segurança (Barella, 2008; Bisconsini, 2016; DNIT, 2006; Zeng; Gül; Mei, 2022). Estradas mais suaves diminuem a probabilidade de acidentes causados por condições de pavimento precárias (Golov *et al.*, 2022; Hettiarachchi *et al.*, 2023). Isso porque condições ruins do pavimento podem levar a manobras evasivas e à perda de controle do veículo, aumentando o risco de acidentes para os ocupantes (Li; Liu; Ding, 2013; Sarwar; Anastasopoulos, 2017). Além disso, as irregularidades afetam a rapidez do rolamento, uma vez que diminuem a velocidade de deslocamento (Barella, 2008). Como consequência, há efeitos sobre o custo operacional não só das vias, como também dos veículos que trafegam sobre elas, resultando, por exemplo, em desgaste dos pneus e maiores consumos de lubrificantes e de combustível (Bisconsini, 2016; DNIT, 2006).

Para mais, a irregularidade longitudinal interfere no efeito dinâmico das cargas dos veículos em movimento (Bernucci *et al.*, 2022). Essa interferência acelera a degradação do

pavimento, reduzindo sua funcionalidade (DNIT, 2006). Em outras palavras, à medida que a irregularidade longitudinal aumenta, a suspensão dos veículos é mais solicitada, amplificando as cargas dinâmicas dos veículos em movimento sobre a superfície do pavimento, o que resulta em fadiga do material e reduz sua vida útil (Bernucci *et al.*, 2022). Outros impactos incluem problemas quanto à drenagem superficial, uma vez que a formação de poças d'água afeta a segurança e o desempenho da rodovia (DNIT, 2006).

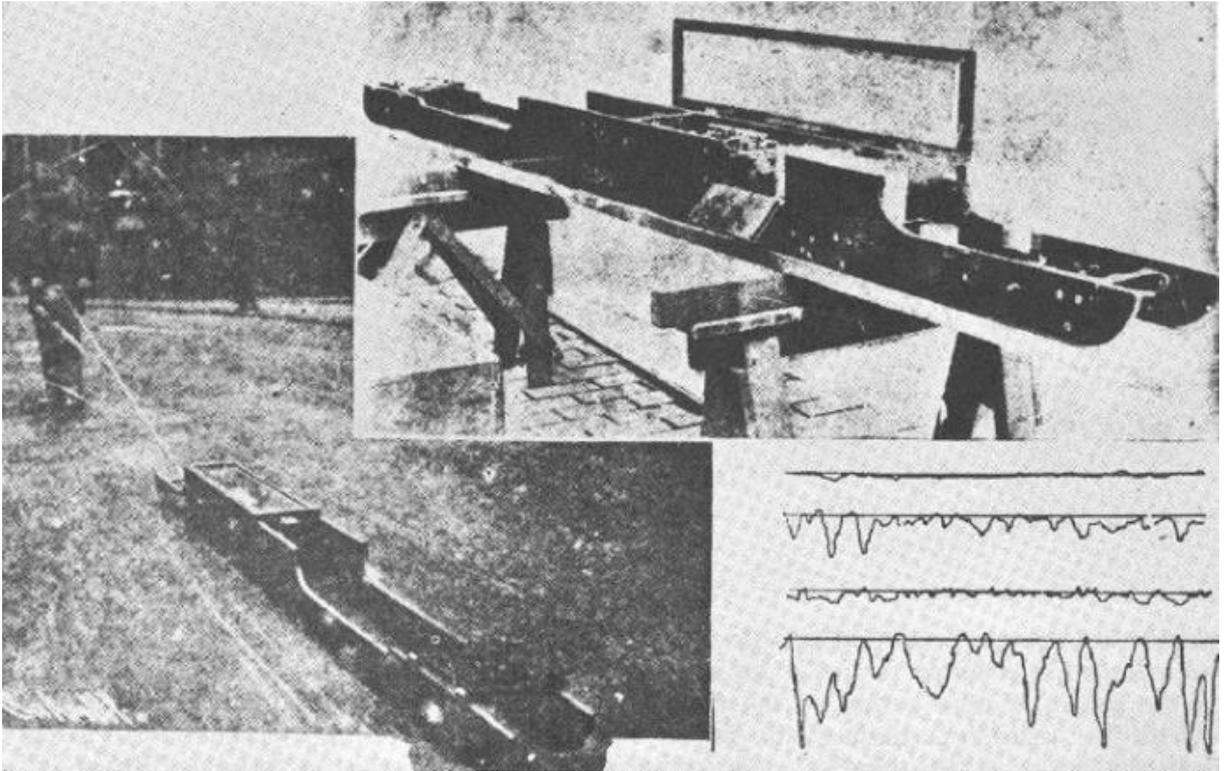
Fica claro, então, que a irregularidade longitudinal prejudica a funcionalidade do pavimento (Barella, 2008). Por conta disso, é essencial ser considerada no gerenciamento da malha viária, sendo empregada por órgãos rodoviários para avaliar a qualidade da construção, monitorar o desempenho do pavimento e identificar as melhores oportunidades de manutenção, reabilitação e reparos (Bernucci *et al.*, 2022; Bisconsini, 2016; Zeng; Gül; Mei, 2022). Ainda, o controle das irregularidades é crucial para reduzir os custos operacionais dos veículos e prolongar a vida útil do pavimento (Barella, 2008).

## 5.1 UM BREVE HISTÓRICO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

A avaliação da irregularidade longitudinal pode ser realizada por meio de diversas técnicas (Bisconsini, 2016). Face a isso, o DNIT (2006) classifica os equipamentos de medição da irregularidade longitudinal em quatro grandes grupos: sistemas de medidas diretas do perfil, sistemas de medidas indiretas do perfil, sistemas baseados na reação do veículo (sistemas medidores tipo-resposta) e sistemas de medida com sonda sem contato. Alguns dos métodos incluem levantamentos tradicionais com réguas, perfilógrafos, perfilômetros de nível ou avançados com laser e sistemas do tipo resposta (Hettiarachchi *et al.*, 2023; Zeng; Gül; Mei, 2022). Não obstante, mesmo com a diversidade de métodos existentes, até o momento, não foi desenvolvida uma técnica que consiga combinar precisão, alta produtividade e baixo custo (Bisconsini, 2016).

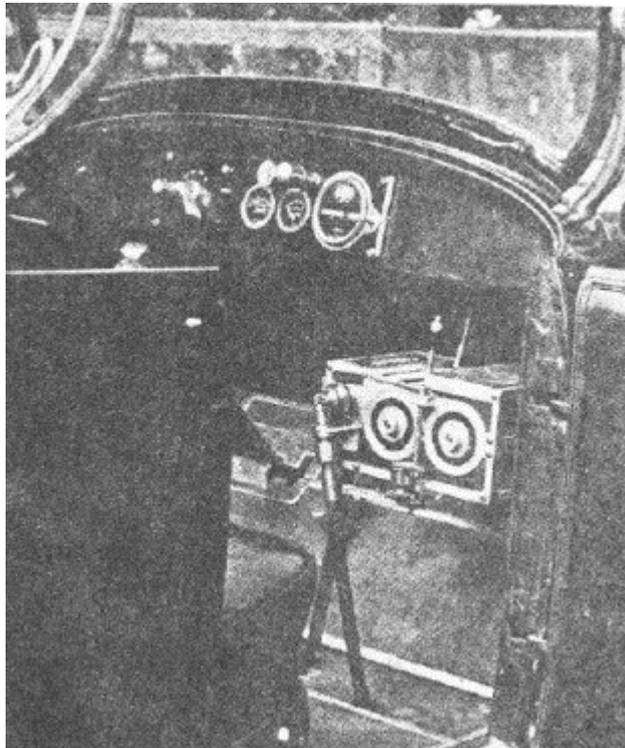
A dissertação de mestrado de Bisconsini (2016) tratou sobre a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos. Em seu trabalho, o autor evidencia que, por volta de 1900, surgiu o Viagraph (Figura 19), dispositivo pioneiro na mensuração da irregularidade longitudinal, que funcionava por meio de uma régua de madeira arrastada sobre o pavimento. Já nos anos 1920, foi desenvolvido o Via-Log (Figura 20), que media as irregularidades através do deslocamento da suspensão de um veículo.

Figura 19 – Viagraph.



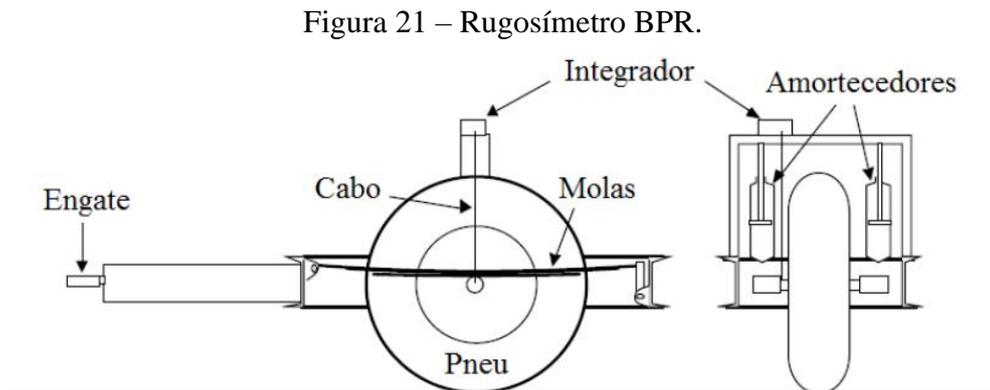
Fonte: Hveem (1960 apud Bisconsini, 2016).

Figura 20 – Unidade de gravação do Via-Log.



Fonte: Hveem (1960 apud Bisconsini, 2016).

Embora representassem avanços significativos na avaliação da irregularidade longitudinal, esses dispositivos enfrentavam desafios relacionados à padronização, o que comprometia sua replicabilidade. Foi assim que, em 1941, o rugosímetro *Bureau of Public Roads* (BPR) surgiu como um mecanismo reprodutível, utilizando-se de um trailer de uma roda com dimensões, propriedades de massa, pneus e suspensões padronizadas, conforme modelo representado na Figura 21 (Bisconsini, 2016).

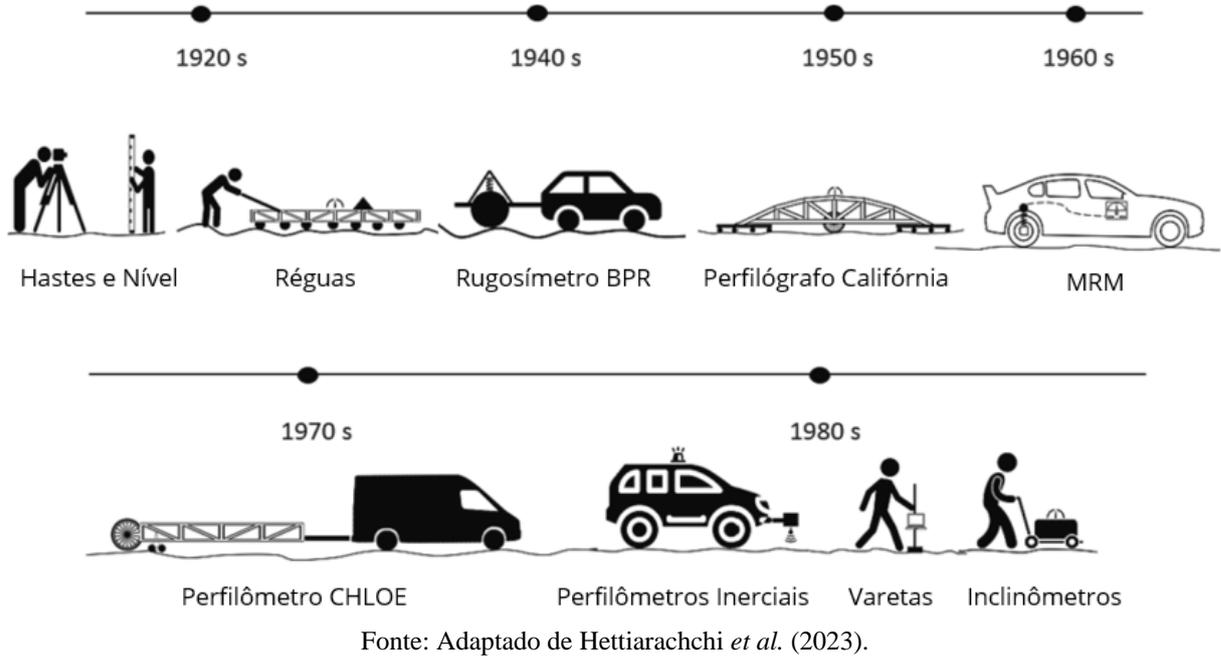


Fonte: Gillespie (1992 apud Bisconsini, 2016).

Ainda no que se refere a esse histórico, Hettiarachchi *et al.* (2023) conduziram uma revisão bibliográfica sobre a medição de irregularidades longitudinais, destacando a evolução dos dispositivos ao longo do tempo, desde réguas simples até perfilômetros inerciais de alta velocidade com sensores a laser. Um breve histórico das técnicas de medição identificadas pelos autores pode ser observado na Figura 22 na página seguinte.

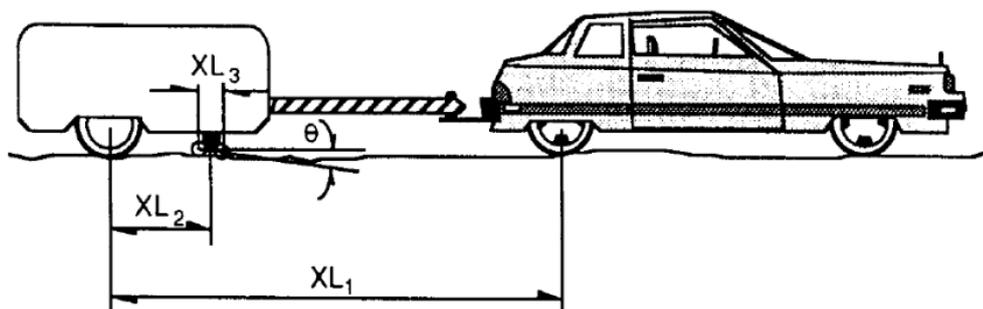
Em seus estudos, semelhante ao indicado por Bisconsini (2016), os autores relatam que, no final da década de 1950, as agências rodoviárias estaduais dos Estados Unidos utilizavam réguas para monitorar a suavidade dos pavimentos. Eram equipamentos relativamente simples, compostos por uma barra de alumínio reta apoiada sobre rodas em ambas as extremidades, que possibilitavam uma mensuração rápida e contínua em um amostrador.

Figura 22 – Evolução das técnicas de medição de irregularidade longitudinal.



Mais adiante, na década de 1960, outro dispositivo empregado na medição da irregularidade longitudinal foi o perfilômetro CHLOE (Figura 23), formado por um reboque que possuía boa reprodutibilidade, mas apresentava baixa velocidade e possuía restrições quanto aos comprimentos de onda medidos, não sendo mais utilizado nos dias de hoje (Bisconsini, 2016).

Figura 23 – Desenho esquemático do perfilômetro CHLOE.

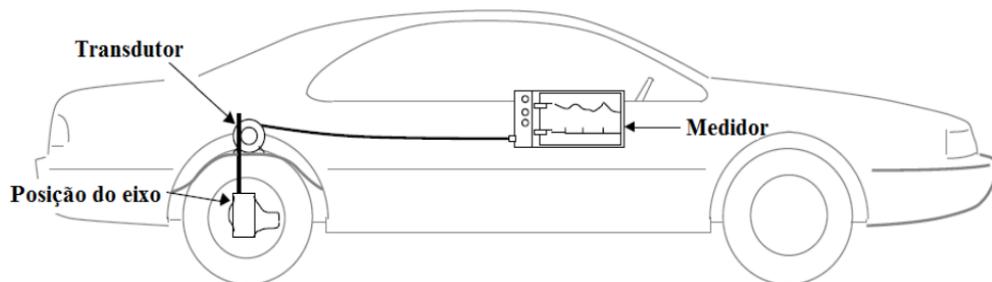


Fonte: Haas et al. (1994 apud Bisconsini, 2016).

Os Sistemas Medidores de Irregularidade Rodoviária do Tipo Resposta – em inglês, *Response-Type Road Roughness Measurement Systems* (RTRRMS) –, como o *Mays Road Meter*, o *PCA Road Meter* e o *Bump Integrator*, surgiram nos anos 1960. Esses sistemas (Figura 24) calculavam a irregularidade com base no deslocamento do eixo de um veículo em relação à carroceria, somando os desvios em um sentido quando o eixo se afastava ou se aproximava

da carroceria. Embora amplamente utilizados na década de 1970 devido à sua simplicidade e baixo custo, esses sistemas apresentavam limitações decorrentes das variações na dinâmica dos veículos. Isso porque fatores como adição de combustível, passageiros, ajuste de pressão dos pneus e balanceamento afetavam a calibração do equipamento, gerando erros aleatórios durante a mensuração (Bisconsini, 2016).

Figura 24 – Desenho esquemático de um RTRRMS.



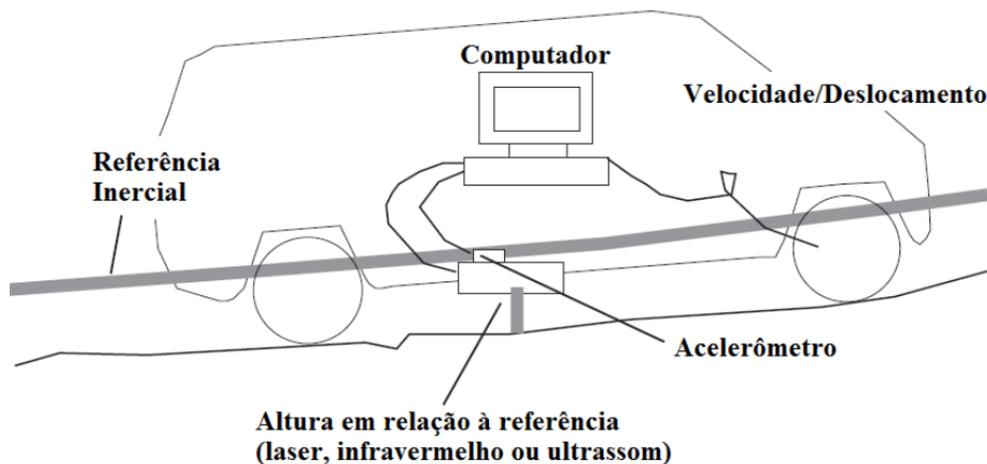
Fonte: Gillespie (1992 apud Bisconsini, 2016).

Para superar essas limitações, a evolução tecnológica na medição da irregularidade longitudinal de pavimentos continuou com o desenvolvimento dos perfilógrafos, produzidos desde 1960, com dados registrados mecanicamente em uma folha gráfica, e automatizados em meados da década de 1980, quando foram equipados com sensores e computadores responsáveis por registrar os dados eletronicamente. Esses dispositivos representaram uma melhoria em relação aos sistemas anteriores, por funcionar através de um sistema de referência rolante e um registrador, que fornecia traços de perfil ao longo das estradas (Hettiarachchi *et al.*, 2023). Pode-se dizer que os perfilógrafos são uma evolução do Viagraph, resultado da incorporação de rodas no dispositivo e da alteração do comprimento da régua. Esses dispositivos, embora eficazes em termos de baixo custo e alta reprodutibilidade, ainda tinham suas limitações, como a baixa velocidade operacional e a incapacidade de medir a irregularidade em comprimentos de onda harmônicos com seu vão (Bisconsini, 2016).

Nesse contexto, também em 1960, Bisconsini (2016) descreve que foi desenvolvido o perfilômetro inercial (Figura 25), posteriormente conhecido como GMR (*General Motors Research*), que utilizava uma roda apalpadora apoiada por uma haste inclinada. Os perfilômetros inerciais surgiram como instrumentos avançados, empregando acelerômetros e sensores sem contato para registrar o perfil longitudinal do pavimento. Isto posto, há dois tipos de perfilômetros inerciais atualmente em uso: perfilômetros do tipo *highspeed* e perfilômetros do tipo *lightweight*. Os perfilômetros inerciais do tipo *highspeed*, ou seja, de alta velocidade,

são populares entre as agências de rodovias nos Estados Unidos, por proporcionarem medições com elevada precisão. Eles também podem coletar dados adicionais como vídeo da via, imagens abaixo da superfície do pavimento, inclinação transversal e presença de trincas. Paralelamente, os perfilômetros tipo *lightweight* são mais compactos e adequados para pavimentos de concreto fresco, operando em velocidades moderadas. Uma evolução adicional desse equipamento ocorreu com a montagem de perfilômetros inerciais em veículos todo-o-terreno – em inglês, *all-terrain vehicles* (ATVs) (Hettiarachchi *et al.*, 2023).

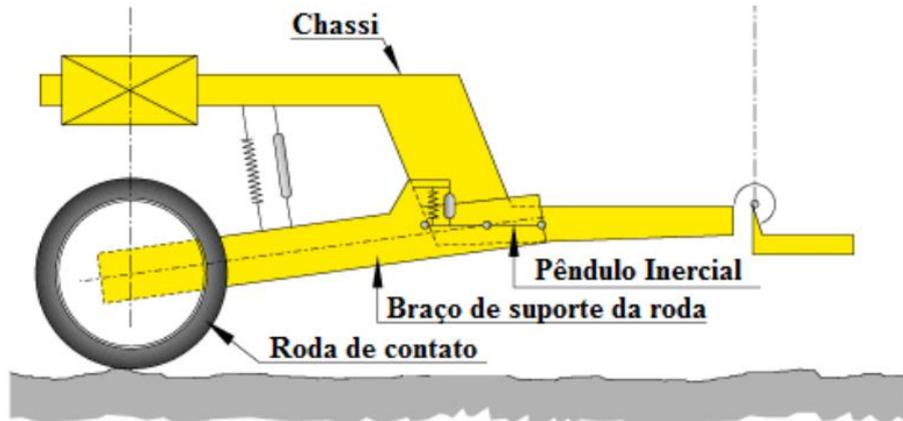
Figura 25 – Esquema de funcionamento de um perfilômetro inercial.



Fonte: Sayers e Karamihas (1998 apud Bisconsini, 2016).

A busca por medidas de irregularidade comparáveis e reprodutíveis, com uma escala de irregularidade padrão estável ao longo do tempo, seguiu impulsionando o desenvolvimento de novos métodos. Na década de 1970, o Analisador de Perfil Longitudinal – em inglês, *Longitudinal Profile Analyser* (APL) – ganhou destaque por operar em diferentes tipos de superfícies e condições ambientais. Este dispositivo (Figura 26) funciona numa faixa de frequência de vibrações de 0,5 a 40 Hz e mede a irregularidade em velocidades específicas. O índice APL é designado de acordo com a velocidade de coleta: APL 25 a 21,6 km/h e APL 72 a 72 km/h. A obtenção dos índices requer segmentos com comprimentos específicos, sendo múltiplos inteiros de 25 m para o APL 25 e de 200 m para o APL 72 (Bisconsini, 2016).

Figura 26 – Esquema de funcionamento do APL francês.



Fonte: *Service Technique de l'Aviation Civile* (apud Bisconsini, 2016).

Continuando, o início do século XXI trouxe consigo avanços notáveis, como o surgimento do *Pavement Profile Scanner* (PPS-200) em 2002. Este dispositivo, representado na Figura 27, utiliza um único sensor para medir simultaneamente o perfil transversal e longitudinal dos pavimentos, empregando um feixe laser em conjunto com um espelho para escanear milhares de pontos por segundo. Outros equipamentos, como o *Machine for Evaluating Roughness Using Low-Cost Instrumentation* (MERLIN), apresentam abordagens inovadoras, utilizando pontas de prova para avaliar e registrar graficamente a superfície do pavimento (Bisconsini, 2016).

Figura 27 – Medidor PPS-2000.



Fonte: *Phoenix Scientific Inc* (2004 apud Bisconsini, 2016).

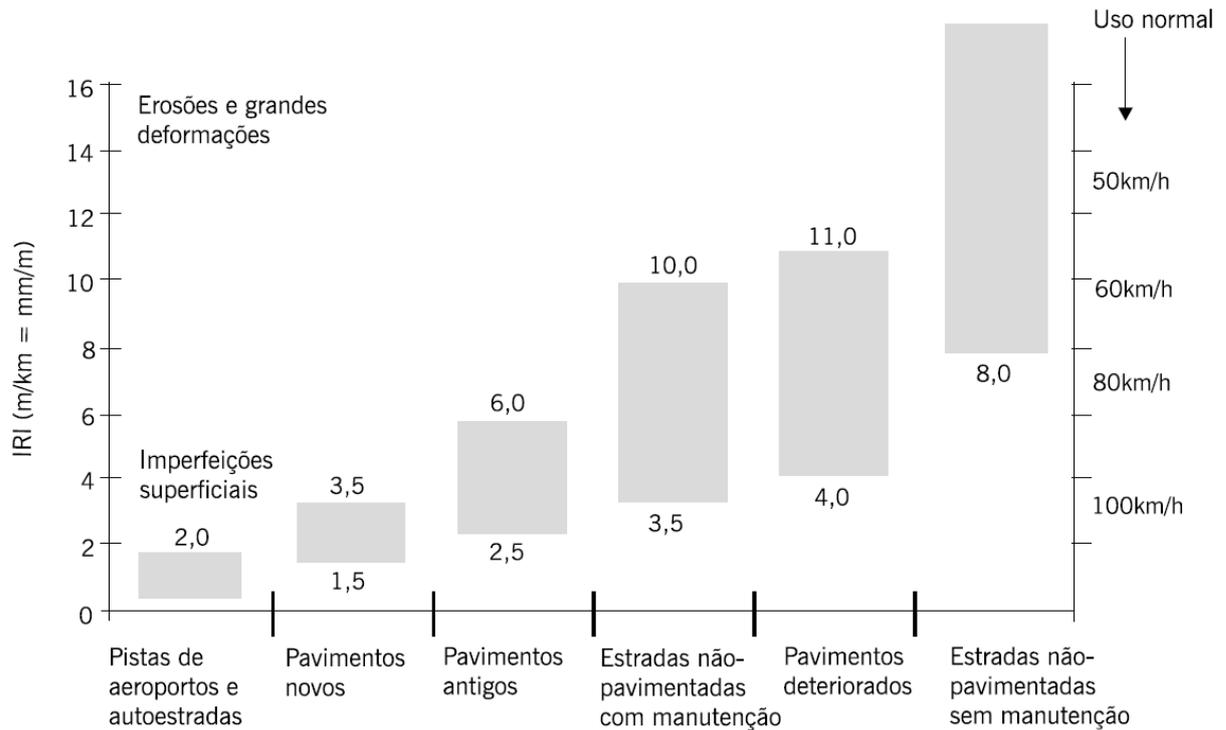
Com o advento das tecnologias de digitalização de imagens, sensores e maior capacidade de processamento de computadores, novas abordagens de detecção e avaliação de pavimentos, como o uso de eletrocardiogramas e smartphones, estão sendo exploradas (Hettiarachchi *et al.*, 2023). Isso porque, embora diversos sistemas sejam atualmente empregados, muitos deles demandam altos custos de aquisição e operação, além de exigirem habilidade dos operadores. E, dentre as alternativas mais acessíveis, como avaliações subjetivas e modelos de previsão, existem desafios, como a demora no processo e potenciais falhas nas medições ou condições dos modelos. Sendo assim, a escolha da técnica mais apropriada para medir a irregularidade deve considerar a finalidade dos resultados, o tempo disponível e os recursos financeiros da agência responsável pela administração rodoviária (Bisconsini, 2016).

## 5.2 ÍNDICE DE IRREGULARIDADE INTERNACIONAL (IRI)

O Índice de Irregularidade Internacional – em inglês, *International Roughness Index* (IRI) – é uma métrica amplamente aceita e utilizada para quantificar a irregularidade longitudinal de pavimentos asfálticos (Bernucci *et al.*, 2022; Bisconsini, 2016; DNIT, 2006; Hettiarachchi *et al.*, 2023; Zeng; Gül; Mei, 2022). De forma resumida, o IRI é um número que representa a condição de rolamento de determinado trecho de pavimento (Barella, 2008). Ele é, portanto, um indicador, geralmente expresso em metros por quilômetro (m/km), que quantifica os desvios verticais da superfície do pavimento em relação a um plano de referência (Bernucci *et al.*, 2022; Zeng; Gül; Mei, 2022).

Esses desvios são calculados através das flechas medidas nas regiões de trilhas de roda (Barella, 2008; DNIT, 2006). Na Figura 28, apresentada na página seguinte, são delineadas as faixas de variação IRI em diferentes cenários e condições do pavimento, conforme estabelecido no trabalho de Sayers e Karamihas (1998 apud Bernucci *et al.*, 2022). Além disso, como disposto no Quadro 2, as faixas IRI podem ser correlacionadas com o Índice da Condição da Superfície (ICS), sendo interpretadas com diferentes conceitos que fornecem uma escala representativa da qualidade da pavimentação.

Figura 28 – Faixas de variação do IRI em diferentes situações.



Fonte: Sayers e Karamihas (1998 apud Bernucci *et al.*, 2022).

Quadro 2 – Relação entre IRI e ICS.

Índice de Irregularidade Internacional (IRI)	Índice da Condição da Superfície (ICS)	Conceito
$0 \leq \text{IRI} \leq 2,5$	5	Ótimo
$2,5 < \text{IRI} \leq 3,5$	4	Bom
$3,5 < \text{IRI} \leq 4,5$	3	Regular
$4,5 < \text{IRI} \leq 6,0$	2	Ruim
$\text{IRI} > 6,0$	1	Péssimo

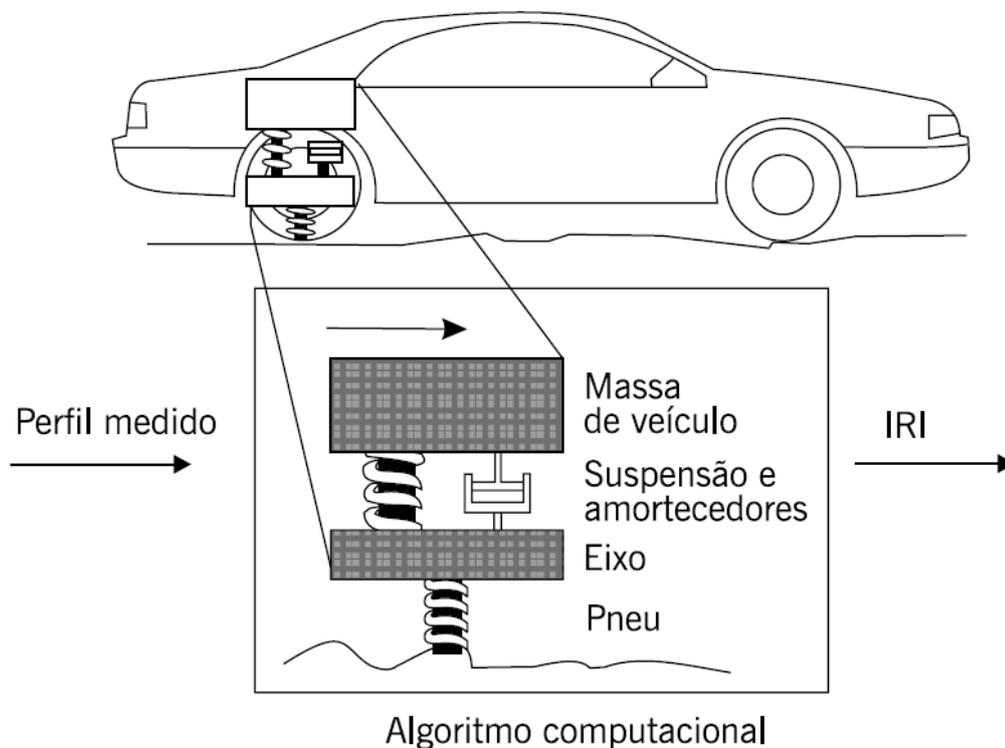
Fonte: Elaboração própria com dados de DNIT (2021).

A norma DNIT 442/2023 – PRO, que trata sobre os procedimentos necessários ao levantamento do perfil longitudinal de pavimentos mediante o uso de perfilômetros inerciais, descreve que o IRI é um índice obtido a partir do modelo matemático denominado quarto-de-carro, que, em termos mais simples, simula o movimento vertical da suspensão de um único pneu de um carro em resposta às irregularidades do pavimento, a uma velocidade de 80 km/h. O modelo, representado na Figura 29, é composto por uma mola vertical que representa o pneu, uma mola de suspensão, um amortecedor, a massa do eixo suportada pelo pneu e a massa da carroceria do veículo suportada pela suspensão para esse pneu (Hettiarachchi *et al.*, 2023). O movimento vertical pode ser ocasionado por fatores como tamanho do agregado, fissuras,

trincas, rachaduras, buracos e vedações (Zeng; Gül; Mei, 2022). Assim, o IRI é calculado dividindo-se a soma do movimento vertical da suspensão pela distância percorrida na simulação (Hettiarachchi *et al.*, 2023).

Isto posto, o IRI desempenha um papel fundamental na priorização de intervenções (Golov *et al.*, 2022; Pantha; Yatabe; Bhandary, 2010; Zeng; Gül; Mei, 2022). Pavimentos com baixos índices de irregularidade requerem manutenção menos frequente, o que implica em redução de custos para as agências de transporte (Hettiarachchi *et al.*, 2023). Além disso, o IRI também pode ser empregado na obtenção do custo operacional dos veículos, da carga dinâmica das rodas, dos limites de segurança em curvas e frenagens e do estado geral da superfície (Bisconsini, 2016). Desta forma, o IRI funciona como um indicador crítico para a gestão rodoviária, ao auxiliar os departamentos de transportes, na figura de entidades governamentais, na tomada de decisões quanto à necessidade de ações preventivas ou preservativas voltadas aos pavimentos, como reparo, reabilitação ou manutenção (Zeng; Gül; Mei, 2022).

Figura 29 – Funcionamento do modelo quarto-de-carro.



Fonte: Gillespie *et al.* (1980 apud Bernucci *et al.*, 2022).

Para mais, o IRI é compatível com a maioria dos equipamentos e sistemas de medição atualmente disponíveis, estando em conformidade com outras métricas empregadas na

avaliação da rugosidade de pavimentos (Bisconsini, 2016; Hettiarachchi *et al.*, 2023). Sendo assim, o IRI possui alta reprodutibilidade, além de sua escala ser transferível para outros sistemas de medição (DNIT, 2006; Zeng; Gül; Mei, 2022). Destaca-se, no entanto, que os limites aceitáveis de IRI variam entre as diversas agências rodoviárias ao redor do mundo (Hettiarachchi *et al.*, 2023).

## 6 MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DO IRI

A mensuração do acréscimo do consumo de combustível em função do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) desempenha um importante papel na otimização da gestão de infraestruturas rodoviárias, especialmente considerando os desafios contemporâneos de eficiência energética e sustentabilidade. Nesse contexto, diversos modelos foram desenvolvidos para converter dados de IRI em estimativas de consumo de combustível, proporcionando *insights* valiosos para a tomada de decisões em termos de manutenção e planejamento viário. Nesta análise, serão discutidos alguns desses modelos notáveis, explorando suas abordagens e contribuições para a compreensão do impacto do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) no consumo de combustível.

### 6.1 HDM-3

Na década de 1960, surgiu a necessidade de qualificar empiricamente a manutenção rodoviária em países da África, Ásia, Caribe e América Latina. Para tanto, foram criados modelos que buscavam simular os custos totais envolvidos no decorrer da vida útil dos pavimentos (Vale, 2008). Esse é o cenário que deu origem às primeiras versões do HDM (HCM e HDM-2), modelos de regressão baseados em dados coletados em estudos e locais específicos. Com o tempo, vislumbrou-se a necessidade de modelos mais complexos, baseados em dados de campo abrangentes, resultando no desenvolvimento do HDM-3 (Soncim, 2011).

À vista disso, conforme descrito na tese de doutorado de Bueno (2019), o *Highway Design and Maintenance Standards Model* (HDM-3), ou modelo de Paterson (1987), é uma ferramenta, elaborada pelo Banco Mundial – em inglês, *World Bank* –, utilizada na manutenção e reabilitação de rodovias, especialmente nos setores de planejamento e programação de investimentos. Ele é um sistema computacional que simula situações físicas e econômicas ao longo de um período de análise, considerando diversas alternativas e cenários, com o objetivo de encontrar opções que minimizem os custos totais envolvidos no transporte ou que maximizem o valor presente líquido do sistema rodoviário (Soncim, 2011; Watanatada *et al.*, 1987).

O modelo combina métodos empíricos e mecanicistas, utilizando dados coletados em rodovias com diferentes estruturas e volumes de tráfego (Nakahara, 2005). Adicionalmente, o HDM-3 incorpora as relações previstas nos modelos anteriores em conjuntos interativos de custos relativos à construção, manutenção e uso de estradas. Isso possibilita estimativas comparativas de custos e avaliações econômicas para diferentes opções de construção e

manutenção de rodovias, tanto em projetos específicos quanto em toda uma rede rodoviária (Watanatada *et al.*, 1987).

No que se refere às equações que fazem parte do modelo, Bueno (2019) indica que o início da degradação foi definido por Paterson (1987) no momento em que ela se torna visível no pavimento, sendo as equações apresentadas por Watanatada *et al.* (1987) incorporadas para prever a progressão anual da irregularidade, considerando diferentes fatores de deterioração. Dentre esses fatores, o fator ambiental ( $K_{ge}$ ) foi calibrado com base em indicadores climáticos, e o fator de calibração para progressão de irregularidade ( $K_{gp}$ ) deve ser ajustado conforme o pavimento analisado, com base no indicador “m” que reflete as classes climáticas consideradas pelo modelo.

As Equações (1) a (8) apresentadas na sequência exibem as relações incorporadas na terceira versão do programa HDM, isto é, o HDM-3. Além disso, a Tabela 5 indica os valores recomendados para o coeficiente “m” segundo a classificação climática.

$$AQI_b = 13K_{gp}[134 \exp(0,023 * K_{ge} * AGE) * (SNCK + 1)^{-5} * N + 0,114(DP_b - DP_a) + 0,0066 * \Delta TR_a + 0,42 * \Delta PT_d] + K_{ge} * 0,023 * QI_a \quad (1)$$

$$SNCK = \text{máx}(1,5; SNC - \Delta SNK) \quad (2)$$

$$\Delta SNCK = 0,0000758[TR'_a * h + ETR * h'] \quad (3)$$

$$TR'_a = \text{mín}(63; TR_a) \quad (4)$$

$$ETR = \text{máx}[\text{mín}(TR_a - trx; 40); 0] \quad (5)$$

$$TRX = 0,62 * TTRA + 0,39 * TTRW \quad (6)$$

$$QI_b = \text{mín}(150; QI_a + \Delta QI_d) \quad (7)$$

$$K_{ge} = m/0,023 \quad (8)$$

Onde:

$\Delta PT_d$  – alteração na área percentual total de painéis durante o ano em análise;

- $\Delta QI_b$  – incremento total na irregularidade durante o ano em análise (contagens/km);
- $\Delta TR_d$  – alteração no percentual de área trincada ao longo do ano em análise;
- AGE – idade do pavimento desde a última reabilitação, reconstrução ou nova construção (anos);
- $DP_a$  – desvio padrão do afundamento em trilha de roda no início do ano em análise (mm);
- $DP_b$  – desvio padrão do afundamento em trilha de roda no final do ano em análise (mm);
- ETR – excesso de trincamento além da quantia existente na camada antiga na época do último recapeamento, selagem ou reconstrução;
- h – espessura da mais recente camada de revestimento (mm);
- h' – espessura total do(s) revestimento(s) antigo(s) (mm);
- $K_{gp}$  – fator de calibração para progressão da irregularidade;
- $K_{ge}$  – fator de calibração devido ao fator ambiental;
- m – coeficiente relacionado à classificação climática;
- N – número anual de repetições do eixo padrão, calculado pelo método da AASHTO;
- $QI_a$  – irregularidade no início do ano em análise (contagens/km);
- $QI_b$  – irregularidade no final do ano em análise (contagens/km);
- SNC – número estrutural corrigido;
- SNCK – número estrutural corrigido pelo efeito do trincamento no início do ano em análise;
- $TR_a$  – percentual de área trincada no início do ano em análise;
- TTRA – percentual de área trincada antes do último recapeamento ou selagem de trincas;
- TTRW – percentual de área com trincamento largo antes do último recapeamento ou selagem de trincas;
- TRX – percentual de área trincada na superfície do pavimento antigo, se houver;

Tabela 5 – Valores para o coeficiente “m” de acordo com a classificação climática.

<b>Classificação Climática</b>	<b>Tropical</b>	<b>Subtropical</b>	<b>Temperatura de Congelamento</b>
Árido	0,005	0,010	0,025
Semiárido	0,010	0,016	0,035
Subúmido	0,023	0,030	0,050
Úmido	0,030	0,040	Acima de 0,07

Fonte: Elaboração própria com dados de Watanatada *et al.* (1987)

Diante de tudo isso, o modelo HDM-3 pode ser interpretado como uma importante referência na avaliação técnica e econômica de investimentos rodoviários, destacando-se por sua capacidade de analisar estratégias e padrões de atuação em projetos de infraestrutura (Kerali, 2001). O modelo é, portanto, uma ferramenta valiosa, tendo em vista que automatiza cálculos extensos e fornece um amplo conjunto de dados empíricos sobre padrões de construção, manutenção, tráfego, deterioração de estradas e custos operacionais de veículos (Watanatada *et al.*, 1987).

Destaca-se, ainda, que o modelo inclui dados de pavimentos brasileiros, provenientes de um estudo de custos rodoviários realizado entre 1977 a 1982, devido, entre outros motivos, à diversidade de valores de irregularidade, áreas de trincamento, desgaste e medidas de afundamento em trilha de roda encontrados no país (Bueno, 2019; Watanatada *et al.*, 1987).

## 6.2 HDM-4

Conforme delineado por Bueno (2019), com o objetivo de expandir o escopo do HDM-3 e oferecer uma abordagem mais acessível à gestão rodoviária, um estudo internacional conduzido por diversos pesquisadores culminou no desenvolvimento do *Highway Development and Management Tool* (HDM-4). Assim como o HDM-3, o HDM-4 é uma ferramenta computacional utilizada na avaliação de aspectos técnicos e econômicos relacionados a investimentos em rodovias (Scherer, 2022).

Desenvolvido pelo Banco Mundial, esse programa permite organizar bancos de dados, importar e armazenar informações sobre redes viárias, tipos de veículos e obras rodoviárias, de modo que sua aplicação abrange desde a conservação e reabilitação de pavimentos até o planejamento estratégico, a programação de intervenções e a avaliação econômica de planos e políticas de intervenção (Alvarez, 2018; Stannard *et al.*, 2006). Sendo assim, o modelo ampliou consideravelmente seu alcance para além das avaliações tradicionais de projetos, visando proporcionar um sistema mais robusto para a análise de alternativas de gestão rodoviária e investimento. Para tanto, com ênfase na aplicação do conhecimento existente, foi utilizada a mesma base de dados de campo adotada na previsão de irregularidade do HDM-3 (Kerali, 2001)

O conceito de análise do ciclo de vida do pavimento pelo HDM-4 considera que a taxa de deterioração é diretamente afetada pelos padrões de manutenção, como reparos na superfície para corrigir defeitos, preservando a integridade estrutural do pavimento. Isso permite que a rodovia suporte os carregamentos do tráfego ao longo do tempo (Kerali, 2001).

Jung *et al.* (2002) destacam que uma desvantagem do HDM-4 é a dificuldade de comparar os custos em diferentes alternativas para pavimentos de alta qualidade, devido à sua

ênfase nos países em desenvolvimento. Ainda, o manual que orienta a utilização desse programa abrange sete volumes, elaborados por diferentes autores envolvidos no processo (Bueno, 2019).

O modelo de previsão da irregularidade longitudinal no HDM-4 é composto por vários componentes que contribuem para a evolução do IRI. Morosiuk *et al.* (2004) explicam que o modelo do HDM-4 inclui componentes estruturais, trincamento, afundamento em trilha de roda, presença de painelas e fator ambiental. Cada componente contribui para o aumento total da irregularidade anual. A calibração desses fatores é crucial para ajustar o modelo aos dados reais do pavimento. Um exemplo disso é que o fator de calibração para progressão da irregularidade ( $K_{gp}$ ) deve ser ajustado para obter curvas de irregularidade próximas aos dados históricos do pavimento. Além disso, o limite superior da irregularidade e a possibilidade de avaliar camadas não usuais de materiais asfálticos também são considerados no processo (Bueno, 2019; Dalpisol, 2023). A seguir, as Equações (9) a (19) representam o modelo de consumo de combustível segundo o HDM-4.

$$IRI_m = 0,5 * (IRI_a + IRI_b) \quad (9)$$

$$IRI_b = \text{mín}[(IRI_a + \Delta RI); a_0] \quad (10)$$

$$\Delta RI = K_{gp}(\Delta RI_S + \Delta RI_{TR} + \Delta RI_{ATR} + \Delta RI_P) + \Delta RI_E \quad (11)$$

$$\Delta RI_S = K_{gs} * 134 * \exp(K_{gm} * m * AGE) * (1 + SNCK_b)^{-S} * N \quad (12)$$

$$SNCK_b = \text{máx}[(SNC_a - dSNCK); 1,5] \quad (13)$$

$$dSNCK = K_{snck} * 7,58 \times 10^{-5} * \{\text{mín}(63; TR_a) * h + \text{máx}[\text{mín}[(TR_a - TRX); 40]; 0] * h'\} \quad (14)$$

$$\Delta RI_{TR} = K_{gc} * 0,0066 * \Delta TR \quad (15)$$

$$\Delta RI_{ATR} = K_{gr} * 0,088 * \Delta DP \quad (16)$$

$$\Delta RI_P = K_{gp} * 0,00019 * (2 - FM) * (NPT_{bu}^{1,5} - NPT_a^{1,5}) \quad (17)$$

$$NPT_{bu} = NPT_b * \left[ 1 - \frac{P_{pt}}{100} * \left( 1 - \frac{F_{pt}}{365} \right) \right] \quad (18)$$

$$\Delta RI_E = K_{gm} * m * RI_a \quad (19)$$

Onde:

$IRI_a$  – irregularidade no início do ano em análise (m/km);

$a_0$  – irregularidade máxima fornecida pelo usuário (m/km);

$\Delta RI$  – incremento total na irregularidade no ano em análise (m/km);

$K_{gp}$  – fator de calibração;

$\Delta RI_s$  – incremento na irregularidade devido ao componente estrutural (m/km);

$K_{gp}$  – fator de calibração para o componente estrutural da irregularidade;

$K_{gm}$  – fator de calibração para o coeficiente ambiental;

$M$  – coeficiente ambiental;

$AGE$  – idade do pavimento em anos;

$N$  – número anual de repetições do eixo padrão pelo método da AASHTO;

$SNCK_b$  – número estrutural corrigido devido ao trincamento ao final do ano em análise;

$SNC_a$  – número estrutural corrigido no início do ano em análise;

$dSNCK$  – redução do número estrutural corrigido devido ao trincamento;

$K_{snck}$  – fator de calibração para o SNC;

$TR_a$  – percentual de área trincada no início do ano em análise;

$TRX$  – percentual de área trincada na superfície do pavimento antigo;

$H$  – espessura da mais recente camada de revestimento (mm);

$h'$  – espessura total dos revestimentos antigos (mm);

$\Delta RI_{TR}$  – incremento na irregularidade devido ao trincamento (m/km);

$K_{gc}$  – fator de calibração para o componente de trincamento da irregularidade;

$\Delta TR$  – aumento percentual na área com presença de trincamento durante o ano em análise;

$\Delta RI_{ATR}$  – incremento na irregularidade devido ao afundamento em trilha de roda (m/km);

$K_{gr}$  – fator de calibração para o componente de afundamento em trilha de roda da irregularidade;

$\Delta DP$  – aumento no desvio padrão do afundamento em trilha de roda durante o ano em análise (mm);

- $\Delta RI_P$  – incremento na irregularidade devido à presença de panelas (m/km);
- $K_{gp}$  – fator de calibração para o componente de panelas da irregularidade;
- FM – índice de liberdade de manobras (variando de 0 a 1);
- $NPT_a$  – unidades de panelas por km no início do ano em análise (un/km);
- $NPT_{bu}$  – unidades de panelas por km no final do ano em análise percebidas pelo usuário (un/km);
- $NPT_b$  – unidades de panelas por km no final do ano em análise (un/km);
- $P_{pt}$  – percentual de panelas tapadas com remendos;
- $F_{pt}$  – frequência de execução de remendos em panelas (dias);
- $\Delta RI_E$  – incremento na irregularidade devido às condições ambientais (m/km);
- $RI_a$  – irregularidade no começo do ano em análise (m/km).

### 6.3 NIMPAC

O NIMPAC (*NAASRA Improved Model for Project Assessment and Costing*) é um modelo fruto de uma colaboração entre o Departamento de Estradas Principais da Austrália Ocidental e o antigo *Bureau of Roads* da *Commonwealth* (Comunidade Britânica de Nações). Desenvolvido entre 1968 e 1973, o NIMPAC produz um conjunto de custos para os usuários de uma rodovia em cada seção da estrada, que incluem despesas de manutenção de rotina e diversos componentes associados a projetos de melhoria, como recuperação de superfície, aquisição de terras e duplicações. Para mais, o programa, que resultou de uma combinação de estudos domésticos e internacionais, fornece estimativas bastante compatíveis com as condições rurais da Austrália (Both, 1982).

Dentre os custos para os usuários da estrada, destacam-se o tempo de viagem e os custos operacionais do veículo, além do modelo estimar os custos associados a acidentes (Dalpsiol, 2023). Apesar disso, sua aplicação é frequentemente criticada devido às dificuldades em mensurar alguns dos custos integrantes do modelo em termos monetários, como o conforto físico dos usuários da estrada, o aumento do turismo, a segurança, o aumento do potencial de produção e os impactos na poluição do ar e sonora, que não possuem um valor definido no mercado (Thoresen, 1989).

Isto posto, o NIMPAC adota uma abordagem empírica para calcular o consumo de combustível. Isso porque o modelo obtém suas variáveis através de experimentos realizados em laboratório ou em condições reais de condução. E, embora leve em consideração diversas variáveis, o modelo não se fundamenta diretamente em princípios físicos do motor ou do veículo, distinguindo-se assim de um modelo mecanicista. Face a isso, a partir de dados

experimentais obtidos de diversos veículos operando em diferentes condições de direção, as equações são ajustadas por meio de métodos estatísticos, incluindo a análise de regressão múltipla. Sendo assim, o modelo apresenta um conjunto de equações que estabelecem relações entre o consumo de combustível, a velocidade do veículo, a aceleração e outros fatores, como a inclinação da estrada e o peso do veículo. A Equação (20) relacionada ao consumo de combustível está disposta na sequência (Dalpisol, 2023).

$$\frac{\text{Consumo de Combustível}}{\text{Combustível}} = \frac{\text{Combustível}}{\text{Velocidade}} * \left[ 1 + \frac{\text{Eficiência do Motor}}{\text{do Motor}} + \frac{\text{Curvatura de Pista}}{\text{de Pista}} + \text{IRI} + \frac{\text{Congest. e Tráfego}}{\text{e Tráfego}} \right] \quad (20)$$

#### 6.4 ESTUDOS RELACIONADOS À RUGOSIDADE DO PAVIMENTO

As informações descritas a seguir foram identificadas nos estudos realizados por McLen e Foley (1998), Bennett e Greenwood (2001), Jiao (2015) e Dalpisol (2023).

Pioneiros na correlação entre irregularidades do pavimento e consumo de combustível, as pesquisas de Velinsky e White (1979) abordaram o impacto da rugosidade da estrada na energia dissipada pelos veículos em condições de campo, utilizando a aceleração do eixo do veículo. Para tanto, os autores desenvolveram um modelo mecanicista de rugosidade de pavimento com base em dados de campo, capaz de prever as perdas de energia do veículo tanto no pneu quanto no sistema de suspensão. A análise detalhada revelou que as perdas de rotação do veículo aumentaram com a crescente rugosidade da estrada, devido à dissipação de energia no pneu e no sistema de suspensão.

Já na década de 1980, conduzido pelo Departamento de Transporte de Wisconsin, o estudo de Ross (1982) mediu diretamente o consumo de combustível para carros viajando a 88 km/h em cinco trechos de estrada com diferentes níveis de rugosidade. A rugosidade foi relatada em termos do *Wisconsin Serviceability Index* (SI), convertido para IRI com base em dados anteriores. Como resultado, a mudança no consumo de combustível por unidade de IRI foi de 0,4%.

Bester (1984) conduziu experimentos de campo em oito superfícies de pavimento diferentes, incluindo dois de asfaltos, um de concreto, quatro com tratamentos superficiais e uma via não pavimentada. Foram realizados testes de *coast-down* com carro de passeio e caminhão para medir as resistências ao rolamento dos veículos. Os experimentos revelaram que estradas mais suaves apresentaram menor resistência ao rolamento, uma vez que tanto o pavimento asfáltico quanto o de concreto exibiram menor resistência ao rolamento em comparação com o tratamento superficial e o pavimento não pavimentado.

Lu (1985) simulou as respostas da resistência ao rolamento de um modelo quarto-de-carro com funções de densidade espectral e investigou a influência da rugosidade da estrada na resistência ao rolamento do carro. Os resultados mostraram que a resistência ao rolamento aumentou significativamente com o aumento da rugosidade da estrada, de modo que pavimentos em más condições superficiais podem aumentar a resistência ao rolamento do veículo em cerca de 40%.

Watanatada *et al.* (1987) desenvolveram uma relação empírica entre resistência ao rolamento e rugosidade, abrangendo estradas pavimentadas e de cascalho, para o modelo mecanicista de consumo de combustível empregado no modelo de custos de usuário HDM-3 do Banco Mundial.

O estudo de Young (1988) relata os resultados de quatro experimentos conduzidos pelo *Transport Research Laboratory* (TRL) do Reino Unido para estimar o efeito da rugosidade da superfície da estrada no consumo de combustível. Os experimentos incluíram testes de *coast-down* e um modelo mecanicista para estimar o consumo de combustível para um caminhão. O primeiro experimento foi realizado na pista de teste do TRL, com níveis de rugosidade controlados por elementos de rugosidade artificiais. Já os experimentos subsequentes utilizaram medições diretas de consumo de combustível em carros, empregando três métodos experimentais distintos. Face a isso, os resultados indicam aumentos percentuais consideravelmente mais altos no consumo de combustível por incremento no IRI em comparação com outros estudos, sugerindo a possibilidade de conversões incorretas entre as estatísticas de rugosidade usadas anteriormente.

No começo da década de 1990, Laganier e Lucas (1990) fornecem uma visão geral da pesquisa francesa na área. Os autores avaliaram o efeito da rugosidade no consumo de combustível com três estudos: estudos de laboratório, estudos em pista de teste e estudos em estrada aberta. A rugosidade do pavimento foi simulada com um banco de vibração no estudo de laboratório. Os resultados mostraram que a rugosidade é um fator importante para o consumo de combustível do veículo. As principais conclusões indicam que, para as faixas de rugosidade esperadas em estradas pavimentadas na França, o consumo de combustível de carros variaria cerca de 6% ao longo da faixa de rugosidade.

Descornet (1990) apresenta os resultados de uma pesquisa belga que relaciona a resistência ao rolamento do pneu a várias medidas do perfil da estrada. A medida de rugosidade do perfil da estrada foi expressa em um coeficiente de uniformidade e, posteriormente, convertida para IRI. O estudo também examinou os componentes de frequência do perfil da

superfície da estrada, concluindo que o efeito da rugosidade na resistência ao rolamento está principalmente associado à rugosidade de comprimento de onda curto, inferior a 10 m.

Sandberg (1990) relata os resultados de pesquisa sueca relacionando o consumo de combustível à macrotextura, megatextura e rugosidade de curto comprimento de onda, inferior a 5 m. O estudo incluiu medições diretas de consumo de combustível em 20 superfícies de diferentes pavimentos, incluindo mistura asfáltica, *chip seals* e vias não pavimentadas. Três velocidades foram estudadas: 50 km/h, 60 km/h e 70 km/h. Isto posto, os resultados mostraram que a rugosidade do pavimento pode afetar o consumo de combustível do veículo em até 12% para a condição de superfície testada. Embora não seja possível relacionar a unidade de rugosidade de Sandberg ao IRI, a descrição dos tipos de superfície corresponde a uma faixa de IRI de cerca de 6, resultando em uma mudança de aproximadamente 1,7% no consumo de combustível por unidade de IRI.

Du Plessis, et al. (1990) expandiram o trabalho de Bester (1994) para uma faixa mais ampla de rugosidade, incluindo superfícies de cascalho e terra, com a profundidade da macrotextura incluída como variável adicional. Eles investigaram o efeito da condição da superfície do pavimento no consumo de combustível na África do Sul com três classes de veículos: carro de passeio, caminhão de médio porte e ônibus. Para tanto, foram realizados testes de *coast-down* para medir a resistência ao rolamento em seções variadas da estrada. Os resultados mostraram que a diminuição da rugosidade do pavimento pode levar à redução da resistência ao rolamento do veículo, com um impacto de até 7% para um carro de passeio a 100 km/h.

Delanne (1994) investigou o efeito da rugosidade do pavimento no consumo de combustível de veículos leves com experimentos de campo. Em seu estudo, dez seções diferentes de estradas foram testadas na França, sendo as resistências ao rolamento dos veículos medidas com teste de bancada hidráulica. Os resultados mostraram que o aumento da suavidade do pavimento pode aumentar significativamente o consumo de combustível do veículo em até 6%.

Cenek (1996) mediu a resistência ao rolamento do veículo ao viajar em seções selecionadas de estradas a 20 km/h e 75 km/h. Os resultados mostraram que um aumento no nível de rugosidade de 1,4 para 2,3 m/km pode levar a um aumento na resistência ao rolamento do veículo em 55%.

O modelo de BTCE (1997) se destaca por abordar o impacto das irregularidades do pavimento em diferentes tipos de veículos, considerando a diversidade da frota rodoviária e, conseqüentemente, de resultados. A metodologia do estudo abordou um hipotético trecho

rodoviário de 1 km, indicando variações no consumo de combustível em função do IRI de 0,9% para carros e caminhões articulados e de 1,4% para caminhões rígidos. Essa análise auxilia na compreensão abrangente dos efeitos do IRI nas condições operacionais específicas de cada tipo de veículo.

Cenek e Jamieson (1999) investigaram os efeitos da irregularidade utilizando um caminhão médio equipado com acelerômetros no chassi e na suspensão. Os veículos foram conduzidos em diferentes velocidades em locais com diversas irregularidades, e as acelerações foram registradas. Observa-se que as acelerações do chassi aumentam com o aumento da irregularidade, possibilitando a calibração dos efeitos da irregularidade no modelo de consumo do HDM. Também é notável que em irregularidades mais baixas, as acelerações não têm um impacto significativo. Isso pode ser utilizado para confirmar o nível de irregularidade abaixo do qual não há impacto no consumo de peças.

Com o começo do novo milênio, experimentos controlados com veículos instrumentados passaram a ser populares para estabelecer a magnitude desses efeitos. Nesse sentido, Sime *et al.* (2000) descrevem um estudo excepcionalmente preciso em que quatro caminhões autônomos, operando em uma pista de teste antes e depois de uma reabilitação do pavimento, tiveram seu consumo de combustível monitorado a cada 0,5 segundos durante um período de oito semanas, imediatamente antes e sete semanas após a reabilitação. Como o peso bruto do veículo, a velocidade e os perfis aerodinâmicos eram fixos e os veículos estavam muito bem mantidos, quaisquer alterações no consumo de combustível eram devidas a mudanças na irregularidade do pavimento. Uma alteração média de 4,5% foi observada, apesar do aumento médio na velocidade do vento de 5,6 para 7,9 km/h.

No estudo de Thoresen (2004), o foco foi avaliar o consumo de combustível em veículos pesados, incluindo caminhões com eixo rígido, caminhões articulados e caminhões bitrens, em condições de rodovias com diferentes Índices de Irregularidade Longitudinal (IRI) e velocidades constantes. Utilizando o modelo HDM-4 adaptado aos padrões australianos, o estudo revelou que, para uma faixa de IRI de 1,9 a 3,2, houve um aumento no consumo de combustível de 4,5% para caminhões rígidos, 5,5% para caminhões articulados e 7% para caminhões bitrens. Em faixas de IRI mais elevadas (3,2 a 3,9), os aumentos foram ainda mais expressivos, atingindo 27,3%, 27,8% e 51,2%, respectivamente. O autor também investigou a relação entre IRI e consumo de combustível em velocidades variáveis, observando uma complexa interação em que o aumento do consumo de combustível devido ao IRI é compensado pela redução da velocidade do veículo. Assim, concluiu que, para velocidades variáveis, o impacto do IRI no consumo de combustível é indeterminado. Finalmente, o estudo destacou

que veículos maiores e mais pesados podem apresentar aumentos exponenciais no consumo de combustível diante do IRI, especialmente em faixas mais elevadas desse índice.

O ano de 2006 também foi palco de diversas pesquisas. Amos (2006) coletou dados de combustível em um circuito interestadual de 22 milhas com um caminhão basculante a 60 mph. Os dados foram coletados antes e depois do recapeamento da rodovia, resultando em valores de IRI de 130 in/mi e 60 in/mi<sup>1</sup>, respectivamente. Os resultados dos dados de combustível mostraram que uma economia de combustível de 2,46% foi encontrada para o caminhão basculante antes e depois do recapeamento da estrada.

Soliman (2006) simulou o movimento do veículo em duas seções de rodovia com um modelo de carro de um quarto. O objetivo era encontrar o efeito da rugosidade do pavimento na resistência ao rolamento do veículo. Comparando as estradas mais rugosas e mais suaves, foi encontrada uma diferença de 38,7% na resistência ao rolamento. Além disso, os resultados também mostraram que o efeito da rugosidade aumentou com o aumento da velocidade simulada do veículo.

Heffernan (2006) mediu o consumo de combustível de um caminhão no ciclo de teste de pavimento do *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) ao longo de um período de dois anos. A espessura do pavimento da pista de teste era superior a 20 polegadas e a faixa de rugosidade variava de 65 in/mi a 75 in/mi. Os resultados mostraram que um aumento de 10 in/mi no nível de rugosidade pode aumentar a eficiência do combustível do veículo em 0,5 milha por galão.

Mais recentemente, o estudo conduzido por Ko *et al.* (2010) na Universidade de Saitama, na Coreia do Sul, avaliou o consumo de combustível em diferentes rodovias com distintos Índices de Irregularidade Longitudinal (IRI). Selecionando dois trechos de estradas, Nampo (IRI = 3,56) e Skum (IRI = 3,59), cada um com 3 km de extensão, o estudo abordou ambos os sentidos dessas vias. Ainda, foram utilizados dois modelos de veículos, um carro de passageiros médio e um carro de passageiros grande, ambos automáticos e movidos a gasolina. Isto posto, foram conduzidos testes em quatro faixas de velocidade (40 km/h, 60 km/h, 80 km/h e 100 km/h) conforme os parâmetros estipulados pelo HDM-4. O consumo de combustível foi medido por componentes eletrônicos acoplados aos injetores de combustível, e os resultados indicaram um aumento gradual no consumo à medida que o IRI cresce, com um acréscimo

---

<sup>1</sup> A unidade de medida “in/mi” é uma abreviação para “polegadas por milha” em inglês, que se traduz como “*inches per mile*”. Esta unidade, assim como “m/km”, é comumente utilizada para descrever a irregularidade longitudinal de rodovias. Ela representa a quantidade de desníveis ou saliências na superfície da pista em polegadas (aproximadamente 0,0254 metros) ao longo de uma distância de uma milha (aproximadamente 1.609 quilômetros). Dessa forma, quanto maior o valor em polegadas por milha, maior é a irregularidade longitudinal da rodovia.

expressivo de até 7% no consumo, representando 0,21% para cada unidade de IRI variada. No entanto, a proximidade dos valores de IRI nos segmentos de rodovias limitou a abrangência da equação, aplicando-se especificamente ao contexto estudado.

Finalmente, Zaabar e Chatti (2010) realizaram uma investigação de campo em cinco seções diferentes de rodovias com cinco classes de veículos: carro de passeio, SUV, van de passageiros, caminhão leve e caminhão pesado articulado. Os testes foram realizados em condições ambientais de inverno e verão. Três velocidades de veículos foram envolvidas: 35 mph, 45 mph e 55 mph. A faixa de IRI das seções de estrada variava de 0,8 m/km a 6 m/km para todos os tipos de pavimento. Primeiramente, o efeito da rugosidade foi considerado estatisticamente significativo a partir da análise do teste de covariância. Em seguida, os dados de combustível foram usados para calibrar o modelo de consumo de combustível HDM-4. A partir do modelo bem-calibrado (alegado), foi realizada uma análise de sensibilidade. Os resultados mostraram que o efeito da rugosidade pode aumentar o consumo de combustível em 1,60 para carros de passeio, 1,35 para SUV, 1,75 para van, 1,15 para caminhão leve e 1,70 para caminhão pesado.

Em complemento aos estudos já identificados por McLen e Foley (1998), Bennett e Greenwood (2001), Jiao (2015) e Dalpisol (2023), foi realizada uma busca por novas referências, visando enriquecer e atualizar o panorama de conhecimento sobre o assunto em questão. A incorporação de estudos mais atuais é fundamental para assegurar que a análise e discussão se baseiem nas descobertas e avanços mais recentes em termos de perspectivas, metodologias e descobertas que possam ter surgido desde os estudos anteriores, promovendo assim uma compreensão mais abrangente e contemporânea do tema.

Os estudos de El Khoury *et al.* (2014) tiveram como objetivo avaliar o impacto da rugosidade do pavimento no consumo de combustível. Para tanto, duas seções de estrada com geometria semelhante foram testadas, diferindo apenas na rugosidade do pavimento. Foram realizados doze testes com um veículo de médio porte, seis em cada seção. A rugosidade foi avaliada indiretamente pela aceleração vertical do veículo. A comparação do consumo de combustível nas duas seções revelou uma economia de cerca de 13% em favor do pavimento mais liso. Testes adicionais com um SUV de grande porte corroboraram esses resultados, reforçando a correlação entre consumo de combustível e aceleração vertical devido à rugosidade do pavimento.

Ghosh *et al.* (2019) elaboraram uma estrutura integrada que avaliou os efeitos da degradação da rugosidade do pavimento no consumo estimado de energia em rodovias e vias de acesso restrito. Considerando variáveis como tipos de veículos, crescimento do tráfego e

padrões de congestionamento, o estudo utilizou três módulos interdependentes. O estudo de caso analisou a variação no Poder Específico do Veículo (VSP) ao longo de 20 anos, revelando aumentos de 2,9% no consumo de energia para caminhões de unidade única e 8,7% para carros de passageiros. Embora as mudanças incrementais devido à rugosidade do pavimento sejam relativamente pequenas, elas se tornam críticas em rodovias de alto volume, podendo ultrapassar 10% em pavimentos mal mantidos com extrema rugosidade. Curvas de degradação não lineares do IRI também podem intensificar essas diferenças. Além disso, o estudo destacou que o congestionamento aumenta as estimativas de consumo de energia, embora o crescimento (5,23%) seja menor que o aumento na milhagem de veículos viajando em velocidades reduzidas (13,6%), devido a correlações negativas e não lineares entre consumo de energia e velocidade. Assim, o estudo validou a influência significativa do IRI e do congestionamento nas estimativas de consumo de energia, alertando que desconsiderar esses fatores pode levar a subestimações de até 2,5% no VSP e cerca de 6% no consumo de energia.

No estudo de Botshekan *et al.*, (2019), foi investigada a influência da rugosidade do pavimento no consumo de combustível do veículo, considerando fatores como métricas de rugosidade da estrada, propriedades dinâmicas do veículo e velocidade. Utilizando o método de Sobol, uma técnica baseada em Análise da Variância (ANOVA) para análise de sensibilidade global, a simulação de Monte Carlo (MC) foi empregada para gerar realizações dos parâmetros de entrada e estimar o consumo de energia por meio de um modelo mecânico de rugosidade. Os resultados revelaram que as métricas de rugosidade, especialmente o Índice Internacional de Rugosidade (IRI) e o número de rugosidades, foram responsáveis por 88-93% das variações totais na dissipação de energia, destacando-se como os fatores mais influentes no consumo excessivo de combustível.

Ainda nesse cenário, Levesque *et al.* (2023) realizaram um estudo de caso na rodovia que liga as cidades de Montreal e Quebec City, no Canadá. Em seus trabalhos, os autores demonstraram que a rugosidade rodoviária representou, em média, 1,1% do consumo total de combustível, com um pico de 1,9% em janeiro. Fica evidente, então, a influência sazonal nos resultados.

Na sequência, o Quadro 3 exibe um resumo dos estudos identificados na literatura. Destaca-se que a coluna “%” descreve a porcentagem de mudança no consumo de combustível por unidade de IRI.

Quadro 3 – Resultados encontrados por diferentes autores quanto à influência do IRI no acréscimo do consumo de combustível.

Autor(es)	Ano	Método	IRI	Veículo	%
<b>Velinsky e White</b>	1979	-	-	-	-
<b>Ross</b>	1982	Medição direta de combustível em diversas superfícies	0,5 – 3,7	Carro	0,4
<b>Bester</b>	1984	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	1,4 – 5,5	Carro	0,5
<b>Lu</b>	1985	-	-	-	-
<b>Watanatada et al.</b>	1987	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	2 – 14	Carro	0,5
<b>Young</b>	1988	Medição direta de combustível (rugosidade artificial)	1.3 – 4.0	Caminhão	4,1
		Medição direta de combustível (veículos lado a lado)	3.3 – 5.6	Carro	3,1
			2.3 – 4.4	Carro	3,6
<b>Laganier e Lucas</b>	1990	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	1 – 6**	Carro	1,2
<b>Descornet</b>	1990	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	0,8 – 7,7	Carro	0,8
<b>Sandberg</b>	1990	Medição direta de combustível em diversas superfícies	1 – 6**	Carro	1,7
<b>Du Plessius et al.</b>	1990	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	1,2 – 1,5	Carro	0,7
				Caminhão	1,1
<b>Delanne</b>	1994	Medição direta de combustível em diversas superfícies	Rugosidade de curto comprimento de onda de 0,7 a 2,8 metros***	Carro	Até 6%
<b>Cenek</b>	1996	-	-	-	-
<b>BTCE</b>	1997	Hipotético trecho rodoviário de 1 km	1,2 – 5,8	Carro	0,9
				Caminhão Rígido	1,4
				Caminhão Articulado	0,9
<b>Cenek e Jamieson</b>	1999	Public Good Science Find – Contribuição para Determinação do IRI	1,7 – 5,3	Caminhão	0,8
<b>Sime e Ashmore</b>	2000	-	3,1 – 3,7	Caminhão	0,45
<b>Thoresen</b>	2004	HDM-4 Calibrado Para Condições da Austrália	1,9 – 3,2 3,2 – 3,9	Caminhão Rígido	4,5 a 27,3
				Caminhão Articulado	5,5 a 27,8
				Caminhão Bitrem	7 a 51,2
<b>Amos</b>	2006	-	-	Caminhão basculante	2,46%
<b>Soliman</b>	2006	-	-	-	-
<b>Heffernan</b>	2006	-	-	-	-
<b>Ko et al.</b>	2010	Medições de direta de combustível em diversas superfícies	3,56 – 3,59	Carro	0,21
<b>Zaabar e Chatti</b>	2010	HDM-4 Calibrado Para Condições do EUA	1 – 5	Carro (Médio)	0,9
				Carro (SUV)	0,4
				Caminhão Articulado	0,6
<b>El Khoury et al.</b>	2014	-	-	-	-
<b>Ghosh et al.</b>	2019	-	-	-	-
<b>Botshekan et al.</b>	2019	-	-	-	-
<b>Levesque et al.</b>	2023	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de McLen e Foley (1998), Bennett e Greenwood (2001), Jiao (2015) e Dalpisol (2023).

Como é possível observar no Quadro 3, o aumento do consumo de combustível em função do Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) é geralmente mais significativo em caminhões em comparação com carros devido a diversas razões intrínsecas às características

desses veículos. Em primeiro lugar, caminhões, devido ao seu peso e capacidade de carga substanciais, são mais sensíveis a imperfeições na superfície da estrada, o que resulta em uma resistência adicional ao rolamento. Sendo assim, a influência do IRI nas condições de rodagem afeta diretamente a eficiência do transporte de carga, exigindo maior esforço dos motores dos caminhões para superar as irregularidades da pista. Além disso, a área de contato dos pneus de caminhões com a estrada é maior do que a dos carros, o que amplifica a influência da rugosidade do pavimento no consumo de combustível.

## 7 INFLUÊNCIA DO IRI NA EMISSÃO DE GÁS CARBÔNICO

A relação entre as condições do pavimento e a emissão de GEE tem sido tema de estudo na literatura (Levesque *et al.*, 2023; Mohanraj; Merritt, 2023). Estudos como o de Oliveira e Branco (2020) demonstraram que pavimentos irregulares estão associados a uma maior emissão de GEE. Isso ocorre porque veículos em superfícies irregulares experimentam uma maior resistência ao rolamento, de modo que demandam mais energia no deslocamento e, conseqüentemente, maior consumo de combustível (Jain *et al.*, 2022; Levesque *et al.*, 2023). Sendo assim, o aumento no consumo de combustível não apenas gera custos adicionais para os operadores de frota e motoristas individuais, mas também resulta em maiores emissões de poluentes atmosféricos, contribuindo para o aquecimento global e a poluição do ar. À vista disso, há uma correlação entre a irregularidade longitudinal com maiores emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e com os impactos ambientais (Oliveira; Branco, 2020).

Formuladores de políticas estão buscando maneiras de reduzir as emissões de GEE no setor de transportes, e um dos fatores que podem contribuir para isso é a escolha do tipo e das características do pavimento (Levesque *et al.*, 2023).

McLen e Foley (1998), Bennett e Greenwood (2001), Jiao (2015) e Dalpisol (2023) conduziram uma análise abrangente sobre a relação entre o IRI e o consumo de combustível, revelando uma correlação positiva entre a irregularidade do pavimento e o aumento no consumo. Além disso, identificaram que a eficiência do combustível diminui à medida que o IRI aumenta, resultando em emissões mais elevadas de CO<sub>2</sub>. Essa constatação é consistente com estudos anteriores, como o de Levesque *et al.* (2023), que explorou a influência do IRI nas emissões de GEE, evidenciando uma relação direta entre a irregularidade do pavimento e o impacto ambiental do transporte rodoviário.

A compreensão dessa relação é fortalecida pela análise de equações de conversão que vinculam o consumo de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub>. Modelos desenvolvidos por Qu *et al.* (2021) oferecem uma estrutura quantitativa para entender como o IRI afeta o consumo específico de combustível, impactando assim as emissões de CO<sub>2</sub>. A equação fundamental pode ser expressa conforme a Equação (21) subsequente.

$$FCR = \left[ \frac{100}{D \times Wc \times 1000} \right] \times (0,273 \times EF_{CO_2}) / FC \quad (21)$$

Onde:

FCR – Taxa de conversão de consumo de combustível em emissão de CO<sub>2</sub>;

$W_c$  – Proporção em massa de carbono na gasolina;

$D$  – Densidade da gasolina (g/L);

0,273 – Coeficiente que representa a razão entre a massa de carbono e o  $CO_2$ ;

$EF_{CO_2}$  – Fator de emissão de  $CO_2$  baseado na distância (g/km);

$FC$  – Consumo de combustível.

Essa formulação matemática reflete a interação entre a qualidade do pavimento, o desempenho do veículo e as emissões associadas. Conseqüentemente, abordagens para a manutenção rodoviária que visam reduzir o IRI têm implicações ambientais positivas, contribuindo para estratégias mais sustentáveis no contexto do transporte.

## 8 IMPACTO FINANCEIRO

Como descrito nos itens anteriores, o mercado de carbono tem se destacado como uma ferramenta crucial na busca por soluções para as mudanças climáticas, visando a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesse contexto, o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) emerge como um fator relevante, influenciando diretamente o consumo de combustível e, por conseguinte, as emissões de CO<sub>2</sub>. Como última análise deste trabalho, a presente seção explora o impacto financeiro no mercado de carbono para países e empresas, considerando a relação entre o IRI e as emissões de carbono.

Recapitulando um pouco do que já foi visto, o IRI, que reflete as irregularidades ao longo das rodovias, desempenha um papel crítico no consumo de combustível. Ainda, estudos indicam que um pavimento irregular pode aumentar significativamente o consumo de combustível de veículos, contribuindo para emissões mais elevadas de CO<sub>2</sub>. Sendo assim, com a crescente conscientização sobre a necessidade de reduzir as emissões de GEE, a relação entre IRI e consumo de combustível torna-se um fator central nas estratégias de mitigação.

No mercado de carbono, a prática comum é a equivalência de uma tonelada de emissões a um crédito de carbono. Empresas e países têm buscado maneiras de reduzir suas emissões para adquirir ou gerar esses créditos, contribuindo assim para suas metas de sustentabilidade e compensando as emissões excedentes. Nesse cenário, a quantificação do impacto financeiro associado ao IRI implica entender como a melhoria nas condições das estradas pode resultar em reduções mensuráveis nas emissões de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, em ganhos financeiros no mercado de carbono.

O preço médio de um crédito de carbono no mercado internacional está na faixa de 10 a 40 dólares por tonelada de carbono equivalente. Segundo o Observatório de Bioeconomia da Fundação Getúlio Vargas (FGV), o preço médio no mundo é de US\$ 37. Esse valor, porém, está sujeito a flutuações, e projeções indicam uma tendência de aumento à medida que os esforços de descarbonização se intensificam globalmente. Isso ocorre porque o valor do crédito de carbono é influenciado por fatores como demanda, regulamentações, e a oferta de créditos disponíveis.

Tendo em vista que a expectativa é de que os preços dos créditos de carbono continuem a subir, devido à crescente pressão para alcançar metas ambiciosas de redução de emissões, a redução do Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) em pavimentos rodoviários ganha ainda mais destaque e relevância econômica. A melhoria nas condições das estradas não apenas contribui para a redução direta de emissões de CO<sub>2</sub>, mas também posiciona as entidades

envolvidas, sejam empresas ou países, em uma posição estratégica para capitalizar as mudanças nos preços dos créditos de carbono.

É crucial reconhecer que, diante das mudanças climáticas e da crescente ênfase na sustentabilidade, os preços dos créditos de carbono não são apenas indicadores econômicos, mas também instrumentos que refletem o valor atribuído à redução das emissões de GEE. Portanto, as entidades que investem na otimização do IRI não estão apenas contribuindo para a mitigação ambiental, mas também se posicionando para maximizar retornos econômicos à medida que os mercados de carbono continuam a se desenvolver. Assim, a redução do IRI não é apenas uma estratégia ambientalmente consciente, mas também uma medida financeiramente perspicaz em um contexto de crescente valorização das ações sustentáveis.

Considerando a relação entre IRI e consumo de combustível, a melhoria nas condições das rodovias pode levar a uma redução significativa nas emissões de CO<sub>2</sub>. Para empresas e países que buscam atingir suas metas de redução de emissões, investir em infraestrutura rodoviária pode ser uma estratégia eficaz. A redução nas emissões resultante da diminuição do IRI pode traduzir-se em uma quantidade correspondente de créditos de carbono, gerando ganhos financeiros no mercado.

A perda de recursos de créditos de carbono pode ter implicações substanciais nos investimentos destinados à reabilitação, manutenção e implementação de novas rodovias por parte dos órgãos rodoviários. Dessa forma, os créditos de carbono representam uma valiosa fonte de financiamento para projetos sustentáveis, contribuindo para a redução das emissões de GEE. No entanto, quando órgãos rodoviários enfrentam elevados Índices de Irregularidade Internacional (IRI) em suas malhas viárias, podem se ver impedidos de obter esses créditos. Essa situação cria um ciclo prejudicial, em que a falta de financiamento compromete a capacidade de recuperar pavimentos deteriorados, resultando em IRI elevado. Como consequência, a incapacidade de melhorar as condições das rodovias impede a obtenção de créditos de carbono, alimentando um ciclo contínuo.

Essa dinâmica representa um desafio significativo, uma vez que a qualidade do pavimento está intrinsecamente ligada à eficiência energética dos veículos e, conseqüentemente, às emissões de carbono. A falta de investimento em reabilitação e manutenção rodoviária não apenas perpetua a degradação das rodovias, mas também limita a capacidade de implementar novas rodovias com padrões mais sustentáveis. Além disso, projetos que inicialmente aparentam ser mais onerosos, podem tornar-se mais atrativos com a possibilidade de venda de créditos de carbono.

A nível nacional, o Brasil é um exemplo de país com potencial para adentrar no mercado de carbono, tendo em vista que, como já mencionado, cerca de 55% das rodovias pavimentadas enfrentam problemas relacionados ao pavimento. Ou seja, com dados tão preocupantes no que se refere a qualidade da malha viária, há um enorme potencial em reduzir os índices de irregularidade e, assim gerar créditos de carbono para o país.

Para reverter esse cenário, é essencial implementar estratégias que incentivem a recuperação de pavimentos, reduzam o IRI, as emissões de CO<sub>2</sub> e, por conseguinte, permitam a obtenção de créditos de carbono. Isso pode envolver a aplicação de tecnologias inovadoras de reabilitação de pavimentos, a adoção de práticas de construção mais sustentáveis e o desenvolvimento de políticas que reconheçam e recompensem os esforços dos órgãos rodoviários na redução das emissões. Ao quebrar esse ciclo, é possível promover a sustentabilidade no setor rodoviário e garantir que os benefícios ambientais se traduzam em recursos financeiros para investimentos contínuos na infraestrutura viária.

Ante o exposto, é essencial também uma discussão sobre os custos envolvidos no ciclo de vida dos pavimentos, visando orientar os tomadores de decisão na escolha de tecnologias que garantam eficiência e sustentabilidade. Ao considerar o ciclo de vida do pavimento, os gestores podem optar por soluções com custos iniciais mais elevados, mas que oferecem vantagens significativas a longo prazo. Isso porque, como já discutido, soluções que mantêm níveis aceitáveis de irregularidade por períodos prolongados podem resultar em menor necessidade de manutenção ao longo da vida útil do pavimento. Consequentemente, essa abordagem não apenas reduz os custos associados à manutenção, mas também diminui o consumo de combustível dos veículos que trafegam sobre essas vias, resultando em emissões de GEE mais baixas. Portanto, ao incorporar a análise dos custos do ciclo de vida, os decisores podem tomar medidas que promovem não apenas a economia de recursos financeiros, mas também a sustentabilidade ambiental ao longo do tempo.

O impacto financeiro no mercado de carbono em função do IRI destaca a importância de considerar as condições das estradas como parte integrante das estratégias de sustentabilidade. À medida que o valor dos créditos de carbono continua a evoluir, investir na melhoria do pavimento não apenas contribui para a eficiência do transporte, mas também oferece oportunidades econômicas no contexto das metas ambientais globais. O mercado de carbono, ao reconhecer a relação entre infraestrutura viária e emissões, incentiva práticas que promovem a sustentabilidade e a mitigação das mudanças climáticas.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs uma investigação dos modelos de conversão do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) em consumo de combustível, emissão de CO<sub>2</sub> e créditos de carbono, mediante revisão da literatura existente. Isto posto, as principais conclusões e as sugestões para trabalhos futuros são descritas a seguir.

### 9.1 CONCLUSÕES

Em primeiro lugar, este estudo abordou os desafios associados aos gases de efeito estufa (GEE), com um foco específico na relação entre combustíveis fósseis, modal rodoviário e as implicações no mercado de carbono. Foi possível identificar que a dependência contínua de combustíveis fósseis no setor rodoviário e a crescente preocupação com as emissões de GEE destacam a necessidade urgente de estratégias eficazes para mitigação e compensação. Para mais, foram explorados os fatores condicionantes do consumo de combustível, com ênfase na interação complexa entre pavimento e veículo. Nesse sentido, constatou-se que a irregularidade longitudinal dos pavimentos é um elemento crítico, que pode representar uma contribuição significativa para as estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, foram examinados modelos relevantes de consumo de combustível, como HDM-3, HDM-4, NIMPAC, e outros estudos, revelando a diversidade de abordagens para compreender e quantificar essas relações. Com isso, foram obtidos resultados da influência da irregularidade no consumo de combustível que variaram desde 0,21% até 51,2% por unidade de IRI, a depender da região, veículo, tipo de pavimento e métodos empregados. Observou-se, também, um maior acréscimo no consumo de combustível experimentado por veículos de grande porte, como caminhões, em comparação a veículos de passeio.

Face a isso, a irregularidade longitudinal vai além de um indicador do estado do pavimento. Embora a qualidade da malha viária inegavelmente desempenhe um papel fundamental na otimização da mobilidade e logística, seus impactos ambientais não podem ser subestimados. A relação direta entre a irregularidade das vias, o consumo de combustível e as emissões de dióxido de carbono destaca-se como um elo intrínseco entre a infraestrutura viária e as preocupações ambientais. Nesse contexto, reduzir a irregularidade do pavimento não é apenas uma estratégia para melhorar a eficiência do transporte, mas, igualmente, uma medida crucial para mitigar as emissões de GEE, contribuindo para a busca de práticas sustentáveis. Portanto, a gestão da irregularidade longitudinal deve ser abordada com uma perspectiva holística, reconhecendo além de seu impacto na eficiência logística, seu papel vital na promoção de práticas ambientalmente responsáveis e na construção de um futuro mais sustentável.

Em última análise, com a presidência do Brasil no G20 em 2024, sob a liderança do atual presidente Luiz Inácio Lula da Silva, o país assumirá uma posição de destaque no contexto internacional. Isso porque o G20 desempenha um papel fundamental na discussão e mitigação das mudanças climáticas, dada sua representatividade global e influência econômica. Como um fórum que reúne as principais economias mundiais, o G20 é essencial para a cooperação internacional em questões climáticas. As decisões e compromissos do G20 têm o poder de influenciar as ações climáticas em escala global, moldando políticas nacionais e fomentando a colaboração entre os países para abordar as mudanças climáticas de forma coordenada. O G20 desempenha, portanto, um papel estratégico ao promover ações concretas e políticas coordenadas para mitigar os impactos adversos das mudanças climáticas, reconhecendo a responsabilidade compartilhada das principais economias na busca por soluções sustentáveis.

## 9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuras pesquisas, recomenda-se uma análise aprofundada para identificar quais modelos de cálculo são mais adequados à realidade da malha rodoviária brasileira, levando em consideração as particularidades e características únicas desse contexto. Além disso, seria valioso desenvolver uma equação integrada que correlacione todos os temas abordados neste estudo, como o Índice Internacional de Rugosidade (IRI), consumo de combustível, emissão de CO<sub>2</sub> e créditos de carbono. Essa equação integrada poderia oferecer uma visão mais abrangente e holística das relações entre esses elementos, proporcionando *insights* valiosos para estratégias de gestão sustentável da infraestrutura viária.

Adicionalmente, sugere-se a aquisição de dados de IRI das rodovias sob posse de diferentes órgãos rodoviários estaduais e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Isso permitiria calcular o impacto financeiro para esses órgãos, revelando quanto estão perdendo em créditos de carbono que poderiam ser direcionados para investimentos cruciais, como a recuperação da malha viária ou a implementação de novas rodovias. Essas sugestões visam aprimorar a compreensão e a eficácia das políticas de infraestrutura viária, promovendo simultaneamente a sustentabilidade e o uso eficiente dos recursos disponíveis.

## REFERÊNCIAS

ALBOOL, Ibrahim; ASHQAR, Huthaifa I; ELHENAWY, Mohammed; HUSSAIN, Qinaat; ALHAJYASEEN, Wael; RAKHA, Hesham; STOHY, Ahmed. *Fuel consumption at signalized intersections: Investigating the impact of different signal indication settings. Case Studies on Transport Policy*, v. 13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101022>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

ALBUQUERQUE, Fernando Silva. **Sistema de gerência de pavimento para departamentos de estradas do nordeste brasileiro**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.022>. Acesso em: 15 de nov. de 2023.

AL-GHANDOOR, Ahmed; JABER, Jamal; AL-HINTI, Ismael; ABDALLAT, Yousef. *Statistical assessment and analyses of the determinants of transportation sector gasoline demand in Jordan. Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 50, p. 129-138, 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/17735>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.

ALMEIDA, Natalia Maria Diniz Pereira. **Utilização de Ceiba Speciosa para Sorção de Combustíveis Fósseis**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido Campus de Pau dos Ferros, Pau dos Ferros, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8112>. Acesso em: 28 de nov. 2023.

ALVAREZ, Luisa Fernanda Arango. **Análise de benefícios econômicos do emprego do transporte não motorizado (ciclovias) por meio do modelo HDM-4-estudo de caso para o município de São Paulo**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2022.tde-21112022-100511>. Acesso em: 15 de nov. de 2023.

ANJOS, Miguel F.; FEIJOO, Felipe; SANKARANARAYANAN, Sriram. *A multinational carbon-credit market integrating distinct national carbon allowance strategies. Applied Energy*, v. 319, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119181>. Acesso em: 22 de nov. de 2023.

ANTF - Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. **Informações Gerais**. 2022. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 01 de dez. de 2023.

AQUECIMENTO Global: Como as mudanças climáticas irão afetar sua vida. **Viva mais verde**, 2016. Disponível em: <https://vivamaisverde.com.br/2016/09/aquecimento-global/>. Acesso em: 05 de dez. de 2023.

ARRHENIUS, Svante. XXXI. *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 41, p. 237-276, 1896. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>. Acesso em: 01 de dez. de 2023.

BARELLA, Rodrigo Maluf. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2007.tde-31032008-172407>. Acesso em: 15 de nov. 2023.

BENEVENUTO, Rodolfo; CAULFIELD, Brian. *Examining the socioeconomic outcomes of transport interventions in the Global South*. **Transport Policy**, v. 119, p. 56-66, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.02.013>. Acesso em: 28 de nov. 2023.

BENNETT, Christopher R.; GREENWOOD Ian D. *Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4, Volume Seven. The Highway Development and Management Series, International Study of Highway Development and Management (ISOHDM)*. Paris: World Roads Association (PIARC), 2001. Disponível em: [http://moodle.stoa.usp.br/file.php/1780/01-01-11\\_rue\\_book\\_final.pdf](http://moodle.stoa.usp.br/file.php/1780/01-01-11_rue_book_final.pdf). Acesso em: 13 de dez. de 2023.

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022. 750 p. ISBN: 978-85-69658-02-3.

BESTER, Christo J. *The effect of pavement type and condition on the fuel consumption of vehicles*. **Transportation Research Record 1000**, 1984.

BISCONSINI, Danilo Rinaldi. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones**. 2016. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2016.tde-18072016-104745>. Acesso em: 16 de nov. 2023.

BLAUFELDER, Christopher; CEOTTO, Henrique; SAWAYA, Alexandre; TAYAR, Gustavo; DORE, Fabricio; FRANK, Marcus; DJANIAN, Mikael; KANSY, Thomas. **Mercado voluntário de carbono tem potencial gigantesco no Brasil**. *McKinsey & Company*, 2022. Disponível em: [https://www.mckinsey.com/br/our-insights/all-insights/mercado-voluntario-de-carbono-tem-potencial-gigantesco-no-brasil#/.](https://www.mckinsey.com/br/our-insights/all-insights/mercado-voluntario-de-carbono-tem-potencial-gigantesco-no-brasil#/) Acesso em: 28 de nov. 2023.

BOGGIO-MARZET, Alessandra; MONZON, Andres; RODRIGUEZ-ALLOZA, Ana M.; WANG, Yang. *Combined influence of traffic conditions, driving behavior, and type of road on fuel consumption. Real driving data from Madrid Area*. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 16, n. 4, p. 301-313, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1871128>. Acesso em: 21 de nov. 2023.

BOPOTO, Charles; GEDDES, Robert; PINARD, Michael. *Framework for Monitoring of Road Agency Performance in Rural Road Asset Management*. **Transportation Research Record**, v. 2673, p. 843-854, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0361198119854088>. Acesso em: 27 de nov. 2023.

BOTH, G. J. *The traffic speed estimation procedure currently used in the NAASRA Road Planning Model (NIMPAC)*. **Workshop on Rural Traffic Simulation, Vermont South**, p. 119-132, 1983.

BOTSHEKAN, Meshkat; TOOTKABONI, Mazdak P.; LOUHGHALAM, Arghavan. *Global Sensitivity of Roughness-Induced Fuel Consumption to Road Surface Parameters and Car Dynamic Characteristics*. **Transportation Research Record**, v. 2673, 2 ed., p. 183-193, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0361198118821318>. Acesso em: 13 de dez. de 2023.

BUENO, Lucas Dotto. **Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/19395>. Acesso em: 13 de dez. de 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/painel-intergovernamental-sobre-mudanca-do-clima-ipcc>. Acesso em: 20 de nov. de 2023.

BROWN, Mark T.; PROTANO, Gaetano; ULGIATI, Sergio. *Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas*. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 3, p. 879-887, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.11.006>. Acesso em: 27 de nov. 2023.

CALATAYUD, Agustina; PALACIN, Roberto; MANGAN, John; JACKSON, Elisabeth; RUIZ-RUA, Aurora. *Understanding connectivity to international markets: a systematic review*. **Transport Reviews**, v. 36, p. 713-736, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1157836>. Acesso em: 27 de nov. 2023.

CARBONO equivalente: como e para que medir e contabilizar? **Amachains**, 2023. Disponível em: <https://amachains.com/carbono/carbono-equivalente-como-e-para-que-medir-e-contabilizar/#navbar-offcanvas>. Acesso em: 20 de dez. de 2023.

CASTRO, André Bueno Rezendede; SANDOVAL, Abby Daniela Ortega; ODAMTTEN, Genevieve. *Up around the bend? How transport poverty can lead to social exclusion in a low-income community in Lagos, Nigeria*. **Journal of Transport Geography**, v. 102, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103388>. Acesso em: 27 de nov. 2023.

CERVERO, Robert. *Transport Infrastructure and Global Competitiveness: Balancing Mobility and Livability*. **Annals of the American Academy of Political and Social Science**, v. 626, n. 1, p. 210-225, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103388>. Acesso em: 27 de nov. 2023.

CIA – Central Intelligence Agency. *Country Comparisons. Roadways*. **The World Factbook**. Disponível em: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/roadways/country-comparison/>. Acesso em: 13 de dez. 2023.

CIA – Central Intelligence Agency. *Explore All Countries. China*. **The World Factbook**. Disponível em: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/china/#transportation>. Acesso em: 13 de dez. 2023.

CIA – Central Intelligence Agency. *Explore All Countries. United States. The World Factbook*. Disponível em: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/united-states/#transportation>. Acesso em: 13 de dez. 2023.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Boletins**. Boletim Unificado - Novembro 2023. 2023. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/boletins>. Acesso em: 02 de dez. de 2023.

D'ALMEIDA, Albino Lopes. **Indústria do Petróleo no Brasil e no Mundo: Formação, Desenvolvimento e Ambiência Atual**. 1. ed. Blucher, 2015.

DALPISOL, Micael. **Identificação e avaliação de modelos de previsão de consumo de combustível para diferentes condições rodoviárias**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/28713>. Acesso em: 15 de nov. de 2023.

DAMANIA, Richard; RUSS, Jason; WHEELER, David; BARRA, Alvaro Federico. *The Road to Growth: Measuring the Tradeoffs between Economic Growth and Ecological Destruction. World Development*, v. 101, p. 351-376, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.06.001>. Acesso em: 28 de nov. 2023.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **442/2023 – PRO: Pavimentação – Levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial – Procedimento**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Brasília: DNIT, 2023.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Índice da Condição da Superfície - ICS**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/ndicedaCondiçãodaSuperfície.pdf>. Acesso em: 28 de nov. 2023.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2006.

DULAL, Hari Bansha; BRODNIG, Gernot; ONORIOSE, Charity G. *Climate change mitigation in the transport sector through urban planning: A review. Habitat International*, v. 35, p. 494-500, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.02.001>. Acesso em: 28 de nov. 2023.

EIA - U.S. Energy Information Administration. **International**. Disponível em: <http://www.eia.gov/international/data/world>. Acesso em: 19 de nov. de 2023.

EL KHOURY, John; AKLE, Barbar; KATICHA, Samer; GHADDAR, Ahmad; DAOU, Makram. *A microscale evaluation of pavement roughness effects for asset management, International Journal of Pavement Engineering*, v. 15, 4 ed., p. 323-333, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.792930>. Acesso em: 13 de dez. de 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2023**. 2023a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 20 de nov. de 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Demanda Energética do Setor de Transportes**. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. 2023b. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Transportes\\_PDE%202032.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Transportes_PDE%202032.pdf). Acesso em: 01 de dez. de 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 05 de dez. de 2023.

FILHO, José Eustáquio Ribeiro Vieira *et al.* **Diagnóstico e Desafios da Agricultura Brasileira**. 2019. Rio de Janeiro: IPEA, 2019.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre *et al.* *Global Carbon Budget 2022*. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 11, p. 4811-4900, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>. Acesso em: 22 de out. de 2023.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.

FURKAN, Hamed Bin; HASAN, Kazi Md Rakibul; UDDIN, Md Jamal. *Greenhouse gas emission, GDP, tertiary education, and rule of law: A comparative study between high-income and lower-middle income countries*. **Heliyon**, v. 9, n. 6, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16265>. Acesso em: 22 de out. de 2023.

GETOFF, Nikola. *Control of greenhouse gases emission by radiation-induced formation of useful products. Utilization of CO<sub>2</sub>*. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 75, n. 4, p. 514-523, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2005.09.014>. Acesso em: 22 de out. de 2023.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLBASI, Onur; KINA, Elif. *Haul truck fuel consumption modeling under random operating conditions: A case study*. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 102, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103135>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

GOLOV, Egor; EVTYUKOV, Stanislav; PROTSUTO, Marina; EVTYUKOV, Sergey; SOROKINA, Elena. *Influence of the road surface roughness (according to the International Roughness Index) on road safety*. **Transportation Research Procedia**, v. 63, p. 999-1006, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.099>. Acesso em: 22 de nov. de 2023.

GHOSH, Laura E.; LU, Liqun; OZER, Hasan; OUYANG, Yanfeng; AL-QADI, Imad L. *Effects of Pavement Surface Roughness and Congestion on Expected Freeway Traffic Energy Consumption*. **Transportation Research Record**, v. 2503 1 ed., p. 10-19, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2503-02>. Acesso em: 13 de dez. de 2023.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A.G. *Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels*. **Industrial Crops and Products**, v. 129, p. 201-205, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.006>. Acesso em: 20 de nov. de 2023.

GUNATHILAKA, Sarala; AMARASINGHA, Niranga. *Using social and economic factors for ranking pavement maintenance and rehabilitation projects.* **Asian Transport Studies**, v. 6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2020.100026>. Acesso em: 01 de dez. 2023.

GUPTA, Hitesh; RAKSHIT, Dibakar. *Assessing the demand for carbon credits from the most polluting and hard-to-abate sectors in India.* **Journal of Cleaner Production**, v. 425, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138825>. Acesso em: 13 de out. 2023.

HASAN, Muhammad Mahmood; HAQUE, Md.Ehsanul; ZAHIN, Mohammad Tosif Nur; ISLAM, M. M.; HABIB, Mohammad Ahsan; HASANUZZAMAN, M. *A comparative analysis of energy consumption and GHG emission by the private vehicles of different fuel types in Dhaka, Bangladesh.* **Energy Nexus**, v. 11, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100222>. Acesso em: 20 de nov. 2023.

HE, Yongming; KANG, Jia; PEI, Yulong; RAN, Bin; SONG, Yuting. *Research on influencing factors of fuel consumption on superhighway based on DEMATEL-ISM model.* **Energy Policy**, v. 158, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112545>. Acesso em: 21 de nov. 2023.

HEIDARI, Mohammad Reza; HERAI, Gholamreza; ESMAEELI, Asghar Nezhadpour. *Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial flexibilities.* **Journal of Cleaner Production**, v. 254, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120046>. Acesso em: 30 de nov. 2023.

HETTIARACHCHI, Chamod; YUAN, Jie; AMIRKHANIAN, Serji; XIAO, Feipeng. *Measurement of pavement unevenness and evaluation through the IRI parameter – An overview.* **Measurement**, v. 206, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112284>. Acesso em: 15 de nov. 2023.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e Meio Ambiente**. 5. ed. Cengage, 2015.

HTUN, Nay. *Holistic and integrated systemic policies and practices for decarbonization.* **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 42, n. 4, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ep.14102>. Acesso em: 03 de nov. de 2023.

IEA - International Energy Agency. **CO<sub>2</sub> Emissions in 2022**. 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>. Acesso em: 13 de dez. de 2023.

IEA - International Energy Agency. **Energy Statistics Data Browser**. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>. Acesso em: 05 de dez. de 2023.

IEA - International Energy Agency. **Key World Energy Statistics 2021**. 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>. Acesso em: 05 de dez. de 2023.

IFOOD. **Crédito de carbono:** como funciona esse mercado. Disponível em: <https://institucional.ifood.com.br/noticias/credito-de-carbono/#:~:text=O%20pre%C3%A7o%20mundial%20do%20cr%C3%A9dito,monitora%20a%20precifica%C3%A7%C3%A3o%20do%20carbono..> Acesso em: 08 de dez. de 2023.

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.* 2018. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf). Acesso em: 20 de dez. de 2023.

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change. Sumário para Formuladores de Políticas.* Mudança do Clima 2021: A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC\\_mudanca2.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf). Acesso em: 22 de out. de 2023.

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change. Sumário para Formuladores de Políticas.* Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy\\_of\\_IPCC\\_Longer\\_Report\\_2023\\_Portugues.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf). Acesso em: 05 de dez. de 2023.

JACINTO, Bárbara Costa; GONÇALVES, Gabriela; MACHADO, Karennyne Soares; ASSIS, Luciana Procópio; DIAS, Luisa Amália Costa. **Inovação e logística:** o compartilhamento de frota para o segmento de transporte rodoviário de cargas Luth Transportes. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão do Negócio) - Fundação Dom Cabral. Instituto de Transporte e Logística, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/580>. Acesso em: 01 de dez. de 2023.

JAIN, Bhavesh; TIWARI, Devesh; PARIDA, Manoranjan; ANBANANDAM, Ramesh. *Assessment of vehicular fuel consumption and interaction with pavement characteristics using HDM-4 on Indian urban road network: A case of Pune city. Case Studies in Construction Materials*, v. 17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01362>. Acesso em: 05 de nov. de 2023.

JIAO, Xin, *Effect of pavement-vehicle interaction on highway fuel consumption and emission.* 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Florida International University, Miami, 2015. Disponível em: <https://digitalcommons.fiu.edu/dissertations/AAI10165986>. Acesso em: 29 de nov. de 2023.

JIAO, Xin; BIENVENU, Michael. *The influence of pavement-vehicle interaction on highway fuel consumption by field measurement. Transport*, v. 31, n. 2, p. 202-210, 2016. Disponível em: <https://doi-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.3846/16484142.2016.1193048>. Acesso em: 30 de nov. de 2023.

JUNG, Jong-Suk; KALOUSH, Kamil. E; WAY, George B. *Life Cycle Cost Analysis: Conventional Versus Asphalt-Rubber Pavements*. **Rubber Pavements Association**, Arizona State University. Tempe (EUA), 2002.

KARLSON, Mårten; MÖRTBERG, Ulla. *A spatial ecological assessment of fragmentation and disturbance effects of the Swedish road network*. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 53-65, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.009>. Acesso em: 28 de nov. de 2023.

KARROUCHI, Mohammed; NASRI, Ismail; RHIAT, Mohammed; ATMANE, Ilias; HIRECH, Kamal; MESSAOUDI, Abdelhafid; MELHAOUI, Mustapha; KASSMI, Kamal. *Driving behavior assessment: A practical study and technique for detecting a driver's condition and driving style*. **Transportation Engineering**, v. 14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100217>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.

KERALI, H. R. *The role of HDM-4 in Road Management*. **First Road Transportation Technology Transfer Conference in Africa**. Tanzania, p. 320-333. 2001.

KOLLMUSS, Anja; ZINK, Helge; POLYCARP, Clifford. *Making Sense of the Voluntary Carbon Market: A Comparison of Carbon Offset Standards*. 2008.

KUMAR, Ashok; SUBRAMANIAN, K. A. *Control of greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) of a biodiesel (B100) fueled automotive diesel engine using increased compression ratio*. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 95-105, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.015>. Acesso em: 22 de nov. de 2023.

LEVESQUE, William; SAMSON, Nicolas; BÉGIN-DROLET, André; LÉPINE, Julien. *Pavement-effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach*. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 120, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.

LI, Yingfeng; LIU, Chunxiao; DING, Liang. *Impact of pavement conditions on crash severity*. **Accident Analysis and Prevention**, v. 59, p. 399-406, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.06.028>. Acesso em: 05 de nov. de 2023.

LIN, Bogiang; HUANG, Chenchen. *Analysis of emission reduction effects of carbon trading: Market mechanism or government intervention?* **Sustainable Production and Consumption**, v. 33, p. 28-37, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.016>. Acesso em: 13 de out. de 2023.

MANE, Ajinkya; DJORDJEVIC, Boban; GHOSH, Bidisha. *A data-driven framework for incentivising fuel-efficient driving behaviour in heavy-duty vehicles*. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 95, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102845>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

MATONDO, Jonathan I.; PETER, Graciana; MSIBI, Kenneth M. *Evaluation of the impact of climate change on hydrology and water resources in Swaziland: Part I*. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 29, n. 15-18, p. 1181-1191, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.09.033>. Acesso em: 22 de out. de 2023.

McLEAN, John; FOLEY, Graham. *Road surface characteristics and condition: effects on road users*. **ARRB Transport Research**, Research Report n. 314, Vermont South: 1998.

MENEZES, Deborah C.; RUWANPURA, Kanchana N. *Roads and development environment and energy?* **Progress in Development Studies**, v. 18, n. 1, p. 52-65, 2018. Disponível em: <https://doi-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1177/1464993417739173>. Acesso em: 27 de nov. de 2023.

MOHANRAJ, Kiran; MERRITT, David K. *Use of Pavement–Vehicle Interaction-Related Models to Estimate Excess Fuel Consumption of Pavement Alternatives During the Design Stage*. **Transportation Research Record**, v. 2677, p. 104-112, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/03611981221113567>. Acesso em: 27 de nov. de 2023.

MOROSIUK, G; RILEY, M. J; ODOKI, Jennaro. *Modelling Road Deterioration and Works Effects (Highway Development and Management - HDM-4)*. 297 p. *Highway Development and Management Series*, versão 2.0, v. 6. Birmingham (Reino Unido), 2004.

NAKAHARA, Suyen Matsumura. **Estudo do Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Via Urbana sujeita a Tráfego Comercial Pesado**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/7655>. Acesso em: 29 de out. de 2023.

NGUYEN, Thi Cuc; MIATTO, Alessio; FISHMAN, Tomer; KIM, Junbeum. *The stock-service productivity of the European road transport infrastructure*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 193, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106961>. Acesso em: 27 de nov. de 2023.

NOUNI, M. R.; JHA, Prakash; SARKHEL, Rudranath; BANERJEE, Chandan; TRIPATHI, Arun K.; MANNA, Joydev. *Alternative fuels for decarbonisation of road transport sector in India: Options, present status, opportunities, and challenges*. **Fuel**, v. 305, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121583>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

OLIVEIRA, Victor Cardoso; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo. **Avaliação da relação entre a condição de superfície de pavimentos e o padrão de emissão de poluentes atmosféricos**. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56439>. Acesso em: 07 de dez. de 2023.

OLIVEIRA, Rafael Cajano de; JUNGER, Alex Paubel. *Utilização de combustíveis fósseis no Brasil e suas consequências ambientais*. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/7537/6641>. Acesso em: 22 de out. de 2023.

ONU Brasil. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 28 de nov. de 2023

PANTHA, Bhoj Raj; YATABE, Ryuichi.; BHANDARY, Netra Prakash. *GIS-based highway maintenance prioritization model: an integrated approach for highway maintenance in Nepal mountains*. **Journal of Transport Geography**, v. 18, n. 3, p. 426–433, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.06.016>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

PATERSON, William D. O. *Road Deterioration and Maintenance Effects - Models for Planning and Management*. 472 p. World Bank. Washington (EUA), 1987.

POBEDINSKY, Andrey. *Assessment of the influence of air temperature and cargo weight on fuel consumption and emissions of harmful substances with vehicle exhaust gases*. *Transportation Research Procedia*, v. 63, p. 2687-2694, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.310>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

POPP, Jose Henrique. *Geologia Geral*. 7. ed. LTC, 2017.

QU, Liang; WANG, Weiwei; LI, Mengliang; XU, Xiaohong; SHI, Zongbo; MAO, Hongjun; JIN, Taosheng. *Dependence of pollutant emission factors and fuel consumption on driving conditions and gasoline vehicle types*. *Atmospheric Pollution Research*, v. 12, n. 2, p. 137-146, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.10.016>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

REIS, Julia Araujo dos. **Impactos dos subsídios aos combustíveis fósseis: impostos sobre carbono e desdobramentos no Brasil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal Rural de São Paulo, Osasco, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/51879>. Acesso em: 22 de out. 2023.

ROGELJ, Joeri; ELZEN, Michel den; HÖHNE, Niklas; FRANSEN, Taryn; FEKETE, Hanna; WINKLER, Harald; SCHAEFFER, Roberto; SHA, Fu; RIAHI, Keywan; MEINSHAUSEN, Malte. *Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C*. *Nature*, v. 534, p. 631-639, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature18307>. Acesso em: 22 de out. de 2023.

ROSS, Frederic R. *Effect of pavement roughness on vehicle fuel consumption*. *Transportation Research Record*, v. 846, 1982.

SARWAR, Md Tawfiq; ANASTASOPOULOS, Panagiotis Ch. *The effect of long term non-invasive pavement deterioration on accident injury-severity rates: A seemingly unrelated and multivariate equations approach*. *Analytic Methods in Accident Research*, v. 13, p. 1-15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.amar.2016.10.003>. Acesso em: 05 de nov. de 2023.

SCHERER, Renan Gustavo. **Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/15839>. Acesso em: 13 de dez. de 2023.

SHARMA, R. N. *Changing Facets of Involuntary Displacement and Resettlement in India*. *Social Change*, v. 40, n. 4, p. 503-524, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/004908571004000406>. Acesso em: 27 de nov. de 2023.

SINGH, Harpreet; KATHURIA, Ankit. *Profiling drivers to assess safe and eco-driving behavior – A systematic review of naturalistic driving studies*. *Accident Analysis and Prevention*, v. 161, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106349>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.

SONCIM, Sérgio Pacífico. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia**. 2011.

Tese (Doutorado em Infraestrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2011.tde-26072011-101938>. Acesso em: 05 de dez. de 2023.

SPEIGHT, James G. *Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance*. 2. ed. McGraw Hill, 2020.

SREELEKHA, M. G.; KRISHNAMURTHY, K.; ANJANEYULU, M. V. L. R. *Assessment of Topological Pattern of Urban Road Transport System of Calicut City*. *Transportation Research Procedia*, v. 17, p. 253-262, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.089>. Acesso em: 27 de nov. de 2023.

STANNARD, E. E.; WIGHTMAN, D. C.; DAKIN, J. M. *Volume Three: Software User Guide. Highway Development & Management Series, International Study of Highway Development and Management Tools*, Birmingham. 2016.

THORESEN, Thorolf. *Updating economic parameter values for use in NIMPAC and related road planning and evaluation models: unit values as at 31 December 1988*. *Australian Road Research Board*, Vermont South, 1989.

TSAVACHIDIS, Maria; PETIT, Yoann Le. *Re-shaping urban mobility – Key to Europe’s green transition*. *Journal of Urban Mobility*, v. 2, p. 100014, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100014>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.

UNFCCC. *Kyoto Protocol Reference Manual*. 2008. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/34558>. Acesso em: 04 de nov. de 2023.

UNFCCC. *The Paris Agreement*. 2016. Disponível em: [https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg\\_no=XXVII-7-](https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-). Acesso em: 22 de out. de 2023.

VALE, André Felipe. **Método de uso de simuladores de tráfego linear móvel de pista para a determinação de comportamento e previsão do desempenho de pavimentos asfálticos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2008.tde-30052008-173927>. Acesso em: 20 de dez. de 2023.

WANG, Qiang; GUO, Jiale; LI, Rongrong; JIANG, Xue-ting. *Exploring the role of nuclear energy in the energy transition: A comparative perspective of the effects of coal, oil, natural gas, renewable energy, and nuclear power on economic growth and carbon emissions*. *Environmental Research*, v. 221, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115290>. Acesso em: 22 de out. de 2023.

WANG, Ting; LEE, In-Sung; KENDALL, Alissa; HARVEY, John; LEE, Eul-Bum; KIM, Changmo. *Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance*. *Journal of Cleaner Production*, v. 33, p. 86-96, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>. Acesso em: 22 de out. de 2023.

WANG, Hao; AL-SAAD, Israa; LU, Pan; JASIM, Abbas. *Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle*

assessment. *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 14, n. 1, p. 25-34, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1519086>. Acesso em: 05 de nov. de 2023.

WANGSA, Ivan Darma; VANANY, Iwan; SISWANTO, Nurhadi. *The optimal tax incentive and subsidy to promote electric trucks in Indonesia: Insight for government and industry. Case Studies on Transport Policy*, v. 11, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.100966>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.

WATANATADA, Thawat; HARRAL, Clell; PATERSON, William D. O; DHARESHWAR, Ashok M; BHANDARI, Anil; TSUNOKAWA, Koji. *The Highway Design and Maintenance Standards Model - Volume 1: Description of the HDM-III Model*. 290 p. Washington (EUA), 1987.

XU, Xin; AKBARIAN, Mehdi; GREGORY, Jeremy; KIRCHAIN, Randolph. *Role of the use phase and pavement-vehicle interaction in comparative pavement life cycle assessment as a function of context. Journal of Cleaner Production*, v. 230, p. 1156-1164, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.009>. Acesso em: 30 de nov. de 2023.

YAO, Zhihong; WANG, Yi; LIU, Bo; ZHAO, Bin; JIANG, Yangsheng. *Fuel consumption and transportation emissions evaluation of mixed traffic flow with connected automated vehicles and human-driven vehicles on expressway. Energy*, v. 230, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120766>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

YU, Qian; LI, Tiezhu; LI, Hu. *Improving urban bus emission and fuel consumption modeling by incorporating passenger load factor for real world driving. Applied Energy*, v. 161, p. 101-111, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.096>. Acesso em: 21 de nov. de 2023.

ZAKHAROVA, Svetlana; YASHIN, Sergey; ZIANKOVA, Larysa. *Creating a safe transportation system as a strategic goal to improve the quality of life. Transportation Research Procedia*, v. 63, p. 2370-2377, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.272>. Acesso em: 27 de nov. de 2023.

ZENG, Jiangyu.; GÜL, Mustafa; MEI, Qiepei. *A computer vision-based method to identify the international roughness index of highway pavements. Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, v. 1, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2022.100004>. Acesso em: 16 de nov. de 2023.

ZHANG, Yan; YUAN, Xiayi; DUAN, Lian; XU, Yanghui; LAN, Fengchong. *Environmental temperature effects on the energy flow of plug-in hybrid electric vehicles. Journal of Power Sources*, v. 506, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230231>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.

ZHANG, Changjian; GONG, Jian; HE, Jie; BAI, Chunguang; YAN, Xintong; WANG, Chenwei; YE, Yuntao; WANG, Haifeng. *Modeling the unobserved heterogeneity effects of the factors influencing the fuel consumption of heavy-duty diesel trucks under real road conditions: A preliminary investigation in China. Energy Reports*, v. 8, p. 9586–9597, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.121>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.