



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

MARIA VAÍRES NUNES SILVA HARTMANN

ANÁLISE DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM RELAÇÃO ÀS
CARACTERÍSTICAS DA VIA E À CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO PAVIMENTO:
ESTUDO DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116

FORTALEZA
2024

MARIA VAÍRES NUNES SILVA HARTMANN

ANÁLISE DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS
DA VIA E À CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO PAVIMENTO: ESTUDO DE UM TRECHO
DA RODOVIA BR-116

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

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

Coorientadora: Profa. Dra. Arielle Elias Arantes.

FORTALEZA
2024

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

- H265a Hartmann, Maria Vaires.
ANÁLISE DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS DA VIA E À
CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO PAVIMENTO: : ESTUDO DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116 /
Maria Vaires Hartmann. – 2024.
77 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.
Coorientação: Prof. Dr. Arielle Elias Arantes.

1. consumo. 2. combustível. 3. smartiri. 4. obd II. 5. scanmaster. I. Título.

CDD 388

MARIA VAÍRES NUNES SILVA HARTMANN

ANÁLISE DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS
DA VIA E À CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO PAVIMENTO: ESTUDO DE UM TRECHO
DA RODOVIA BR-116

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

Aprovada em: 09/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Arielle Elias Arantes (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata (Examinador Externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Viviane Adriano Falcão (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre comigo, me dando força e coragem, especialmente quando sinto que não tenho mais de onde tirar, não só para esta dissertação, mas em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Luiz de Sá e Maria das Mercês, e minha irmã, Maria de Jesus, pela compreensão, apoio e conselhos ao longo do mestrado e da minha vida.

Ao meu esposo, Celso Hartmann, meu alicerce, que esteve sempre ao meu lado, me apoiando e ajudando de todas as formas possíveis. Sua presença constante, incentivo e dedicação foram fundamentais para que eu conseguisse finalizar este mestrado.

Ao meu filho, Henrique, pelos momentos de alegria e distração, junto com nossa Amora, especialmente quando as coisas estavam difíceis, e por me fazer feliz todos os dias com seu amor e atenção.

À minha coorientadora, Profa. Arielle Arantes, pela dedicação, paciência, atenção e todo suporte durante a elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Ernesto Ferreira Nobre Júnior, pela orientação, parceria e paciência. Seus conselhos foram essenciais para me fazer sentir capaz em todas as etapas desse processo.

À minha amiga, Natasha, que esteve sempre me auxiliando durante esses dois anos, ajudando e aconselhando; você foi um presente que o PETRAN me deu.

Ao meu amigo, Anchieta, que desde a graduação se faz presente em diversos momentos da minha vida, inclusive lendo tudo que eu fazia para me dizer se estava bom ou não.

A todos os professores e colegas do Departamento de Engenharia de Transportes, em especial, ao professor Heber, cuja correção rigorosa de tudo era divertida e vista com admiração. Seu vasto conhecimento fizeram com que eu valorizasse cada feedback, reconhecendo o quanto ele tinha a ensinar.

Também agradeço ao professor Bruno Prata, que trouxe valiosas contribuições para a melhoria deste trabalho.

Aos demais participantes da banca examinadora, pelo incentivo e disponibilidade.

“Suba o primeiro degrau com fé, não é necessário que você veja toda a escada, apenas dê o primeiro passo.” (Martin Luther King)

RESUMO

A análise dos custos operacionais dos veículos destaca que cerca de 40% do custo total de operação está vinculado ao consumo de combustível, influenciado pelas características da via, do veículo e do tráfego. A interação entre o gradiente, a curvatura e a irregularidade da superfície de uma rodovia afetam esse consumo. Compreender o comportamento desses fatores permite otimizar o consumo e reduzir os custos operacionais do transporte rodoviário. Este estudo avalia se as características da via e a condição do pavimento influenciam no consumo de combustível nas duas faixas de um trecho experimental de 38 km da rodovia BR-116, entre as cidades de Pacajus e Chorozinho, no estado do Ceará. A metodologia incluiu a análise do comportamento de um veículo de passeio, utilizando o Scanner OBD II para obter dados de velocidade e outros parâmetros necessários para calcular a variável sintética IMAF e o valor de MAF. Dados da condição do pavimento foram obtidos por meio de fotografias captadas durante os levantamentos, do aplicativo SmartIRI e do DNIT. Informações do gradiente e curvatura do trecho foram obtidas do DNIT. Os resultados mostraram que a relação do consumo de combustível com a condição da superfície (IRI) apresentou um coeficiente de correlação praticamente nulo ($r = 0,04$) e, com as características da via (gradiente e curvatura), uma correlação baixa ($r = 0,27$). Assim, a maior correlação foi observada com a variação de velocidade ($r = 0,42$), indicando que a superfície do pavimento e as características da via não influenciam o consumo de combustível como a velocidade.

Palavras-chave: consumo; combustível; smartiri; obd II; scanmaster.

ABSTRACT

The analysis of the operational costs of vehicles highlights that approximately 40% of the total operating cost is linked to fuel consumption, which is influenced by the characteristics of the road, the vehicle, and traffic. The interaction between the gradient, curvature, and surface irregularity of a highway affects this consumption. Understanding the behavior of these factors allows for the optimization of consumption and the reduction of operational costs in road transport. This study evaluates whether the characteristics of the road and the condition of the pavement influence fuel consumption in both lanes of a 38 km experimental stretch of the BR-116 highway, between the cities of Pacajus and Chorozinho in the state of Ceará. The methodology included analyzing the behavior of a passenger vehicle, using the OBD II Scanner to obtain speed data and other parameters necessary to calculate the synthetic variable IMAP and the MAF value. Data on pavement conditions were obtained through photographs captured during surveys, the SmartIRI app, and DNIT. Information on the gradient and curvature of the stretch was obtained from DNIT. The results showed that the relationship between fuel consumption and surface condition (IRI) presented a nearly null correlation coefficient ($r = 0.04$) and a low correlation ($r = 0.27$) with the characteristics of the road (gradient and curvature). Thus, the highest correlation was observed with speed variation ($r = 0.42$), indicating that the pavement surface and road characteristics do not influence fuel consumption as much as speed does.

Keywords: consumption; fuel; smartiri; obd II; scanmaster.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aumento do Custo Operacional do Veículo de acordo com a condição do pavimento.....	22
Figura 2 – Fluxograma das estratégias de manutenção e reabilitação.....	26
Figura 3 – Faixas de variação do IRI dependendo do caso e situação.....	27
Figura 4 – Modelo do quarto de carro.....	28
Figura 5 – Etapas do processo metodológico.....	31
Figura 6 – Mapa de localização do trecho de Ida.....	34
Figura 7 – Mapa de localização do trecho de Volta.....	34
Figura 8 – Aparelho e Suporte utilizados para coleta do IRI.....	35
Figura 9 – Configuração do aplicativo SmartIRI com indicador na posição correta.....	37
Figura 10 – Esquema Metodológico aplicado para a Validação.....	38
Figura 11 – Mapa gerado pelo aplicativo SmartIRI para os trechos Ida e Volta no levantamento 1.....	40
Figura 12 – Mapa gerado pelo aplicativo SmartIRI para os trechos Ida e Volta no levantamento 2.....	40
Figura 13 – Distribuição dos níveis de IRI nos Segmentos de 1 a 4.....	42
Figura 14 – Percepção do Condutor do veículo para o Segmento 1.....	43
Figura 15 – Percepção do Condutor do veículo para o Segmento 2.....	43
Figura 16 – Comparativo de irregularidade obtidas pelo DNIT e <i>SmartIRI</i> em relação à Média Geral.....	44
Figura 17 – Distribuição do gradiente nos quatro Segmentos.....	46
Figura 18 – Distribuição da Curvatura nos quatro Segmentos.....	46
Figura 19 – Consumo de combustível para EV de 80% e 90%.....	48
Figura 20 – Boxplot do consumo de combustível para EV de 80% para os quatro Segmentos.....	48
Figura 21 – Mapa de indicação do consumo médio por quilômetro – Faixa de Ida.....	50
Figura 22 – Mapa de indicação do consumo médio por quilômetro – Faixa de Volta.....	51
Figura 23 – Matriz de Correlação das variáveis para a faixa de Ida.....	52
Figura 24 – Matriz de Correlação das variáveis para a faixa de Volta.....	53
Figura 25 – Matriz de Correlação faixas de Ida e Volta.....	54
Figura 26 – Dados da Regressão do Consumo de Combustível em função das Variáveis.....	55
Figura 27 – Variações de IRI, Velocidade e Consumo para o Segmento 1.....	56

Figura 28 – Variações de IRI, Velocidade e Consumo para o Segmento 2.....	58
Figura 29 – Variações de IRI, Velocidade e Consumo para o Segmento 3.....	59
Figura 30 – Variações de IRI, Velocidade e Consumo para o Segmento 4.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Autores e Contribuições Metodológicas para a Análise do Consumo de Combustível.....	30
Tabela 2 – Resumo de características do veículo utilizado.....	32
Tabela 3 – Segmentação e Distâncias dos Trechos nas Faixas de Ida e Volta.....	33
Tabela 4 – Classificação do pavimento de acordo com o SmartIRI.....	36
Tabela 5 – Valores de IRI por Segmento no levantamento 1.....	39
Tabela 6 – Valores de IRI por Segmento no levantamento 2.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
COV	Custo Operacional Veicular
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IRI	International Roughness Index
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
UFC	Universidade Federal do Ceará
VSA	Valor de Serventia Atual
EV	Eficiência Volumétrica do veículo
OBD	On-Board Diagnostics
MAF	Taxa de massa de ar
IAT	Temperatura do ar de admissão
IMAP	Variável Sintética obtida por meio da Lei dos Gases Ideais
RPM	Rotação por minuto do motor
MAP	Pressão absoluta no coletor de admissão
VDM	Volume do deslocamento do motor
MM	Massa molecular média do ar
IPVA	Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Contextualização.....	15
1.2	Problema de Pesquisa.....	17
1.3	Questões de Pesquisa.....	17
1.4	Objetivos.....	17
1.5	Estrutura do Trabalho.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Custo Operacional do Veículo- COV.....	19
2.2	Consumo de combustível.....	20
2.2.1	<i>Comportamento dos diferentes tipos de veículos</i>	20
2.2.2	<i>Perfil do motorista</i>	21
2.2.3	<i>Características das vias</i>	21
2.2.4	<i>Estimativa do consumo de combustível</i>	23
2.3	Irregularidade Longitudinal.....	24
2.3.1	<i>Escalas e características do IRI</i>	26
2.3.2	<i>Equipamentos utilizados na medição da Irregularidade Longitudinal</i>	27
2.3.3	<i>Utilização do SmartIRI para obtenção da Irregularidade Longitudinal</i>	28
2.3.4	<i>Principais Autores e Contribuições</i>	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	Etapas do processo metodológico.....	31
3.2	Trecho de estudo.....	32
3.3	Equipamentos.....	35
3.4	Coleta de dados.....	37
3.5	Validação.....	38
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	39
4.1	Condição do Pavimento e IRI.....	39
4.2	Características da rodovia dos trechos de ida e volta.....	45
4.3	Consumo de Combustível.....	46
4.4	Relação do Consumo de Combustível com as Condições do Pavimento.....	52
5	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS.....	63

APÊNDICE A - VALORES MÉDIOS ENTRE OS DOIS LEVANTAMENTOS NOS QUATRO SEGMENTOS.....	66
ANEXO A - LEVANTAMENTO DO TRECHO LOCALIZADO NA BR- 116.....	70

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda o escopo desta Dissertação, destacando a importância do transporte rodoviário para o desenvolvimento econômico e como o consumo de combustível e as condições da via afetam diretamente os custos operacionais do setor de transportes. A análise do consumo de combustível foi realizada levando em consideração as condições das vias e os parâmetros veiculares. Além disso, será avaliado como esse parâmetro específico é incorporado em um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP).

1.1 Contextualização

No Brasil, Araújo, Bandeira e Campos (2014) afirmam que mais de 60% do total de bens e mercadorias são transportados por meio do transporte rodoviário. Quando se trata de cargas containerizáveis, essa participação pode atingir até 90% (Wanke, 2010). Assim, tratando-se do principal meio logístico do Brasil, depende diretamente da infraestrutura viária para funcionar de forma eficiente, pois o desenvolvimento econômico do país está vinculado às condições de suas rodovias. Estas, por sua vez, de acordo com o relatório da Confederação Nacional dos Transportes - CNT (2022), estão abaixo do padrão desejado. Em 2022, dos 110.333 quilômetros avaliados, 66,0% foram classificados como regular, ruim ou péssimo. Em 2021, esse percentual era de 61,8%.

Dado o contexto apresentado, é importante destacar que o Brasil utiliza o modo rodoviário para o transporte de cargas em mais de 61% das situações, segundo a CNT (2017). Isso realça a relevância crítica de manter as condições das rodovias no país, independentemente de serem pavimentadas ou não, em um estado que não gere ônus para os recursos públicos e para os usuários. No entanto, o custo operacional é uma preocupação central para motoristas, proprietários de veículos e empresas de transporte, representando uma parte significativa dos gastos associados à manutenção e operação de veículos. Entre os diversos fatores que contribuem para esse custo, o consumo de combustível destaca-se como um dos mais importantes, respondendo por cerca de 40% do total, segundo a pesquisa da CNT (2019).

Outros fatores também são afetados por vias em situação precária, como o tempo de viagem e a gravidade dos acidentes, prejudicando assim a segurança viária. A fim de reduzir tais transtornos, a gerência dos pavimentos, de acordo com Fernandes (2017), busca otimizar o

desempenho das vias, considerando fatores como tráfego, clima, tipo de pavimento, restrições orçamentárias, etc. Ou seja, a gerência dos pavimentos busca melhorar a trafegabilidade dos veículos, dentre outros objetivos.

Condições ideais de trafegabilidade são alcançadas quando há um desempenho apropriado do comportamento estrutural e superficial da via. Do ponto de vista do usuário, as condições superficiais são mais perceptíveis, pois impactam diretamente na sensação de conforto ao circular pela rodovia. No Brasil, o manual do DNIT (2006) apresenta o Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index* – IRI) como um dos principais parâmetros para avaliar o conforto do usuário em relação às condições superficiais do pavimento. O IRI indica o nível de irregularidade na superfície analisada, em que valores excessivos afetam diretamente o conforto ao rolamento. Chatti e Zaabar (2012) relatam que altos níveis de irregularidades podem comprometer o conforto do usuário e é o parâmetro que mais interfere em cada componente do custo operacional.

A irregularidade longitudinal excessiva, além de prejudicar a segurança e o conforto dos motoristas, também reduz a vida útil das rodovias. Coletar informações sobre as condições dos pavimentos é essencial para o SGP e ajuda os administradores a direcionar os recursos para a manutenção e reabilitação (M&R) das rodovias. Nesse contexto, além de monitorar as condições da rodovia, é fundamental considerar também como o desempenho dos veículos, influenciado por essas condições, pode afetar o custo operacional. Segundo Fontes e Figueiredo (2014) e Albuquerque (2022), o dispositivo On-Board Diagnostics II (OBD II) fornece dados operacionais como velocidade instantânea, consumo instantâneo e modo de operação do veículo. As variáveis de operação são obtidas por meio de um protocolo de comunicação padronizado e possibilitam calcular o consumo de combustível.

A estimativa do consumo de combustível é fundamental para os motoristas, proprietários de veículos e empresas de transporte, uma vez que está diretamente relacionada aos custos operacionais. Compreender e prever o consumo de combustível pode permitir a implementação de medidas de economia, como a escolha de rotas mais eficientes e a adoção de práticas de condução adequadas. Compreender e controlar esse aspecto é importante para a eficiência financeira e operacional, influenciando diretamente a viabilidade econômica dos sistemas de transporte. Nesse contexto, a análise dos fatores que afetam o consumo de combustível torna-se essencial para reduzir os custos operacionais e promover uma gestão mais eficaz dos recursos disponíveis.

1.2 Problema de Pesquisa

A compreensão das interações entre as características da via, incluindo geometria, qualidade da superfície do pavimento e seu impacto no consumo de combustível é fundamental para a redução dos custos operacionais de veículos. No entanto, embora a importância desses fatores seja reconhecida, ainda não está claro como essas variáveis específicas influenciam diretamente o consumo de combustível. Portanto, este estudo visa preencher essa lacuna ao investigar as principais características de um trecho viário que afetam o consumo de combustível, com foco nas interações entre variáveis como velocidade, irregularidade da superfície e características geométricas, como curvatura e gradiente.

1.3 Questões de Pesquisa

Diante do exposto o contexto deste trabalho, surgem as seguintes questões de pesquisa:

- a) Quais são as principais características dos diferentes segmentos que afetam o consumo de combustível?
- b) Existe uma relação entre os parâmetros de velocidade, IRI, gradiente e curvatura com o consumo de combustível nos segmentos especificados?
- c) Quais são as estratégias mais eficazes para otimizar o consumo de combustível em diferentes trechos, levando em consideração suas características específicas e os parâmetros considerados?

1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar de que forma as características da via e a irregularidade longitudinal do pavimento influenciam o consumo de combustível.

Como objetivos específicos do trabalho, podem ser destacados:

- a) caracterizar a relação entre as irregularidades da superfície e o consumo de combustível;
- b) verificar de que forma o gradiente e a curvatura de rodovias influenciam no consumo de combustível;

- c) analisar as condições em que a irregularidade longitudinal e as características geométricas da via provocam um aumento no consumo de combustível, identificando os fatores críticos e as circunstâncias que mais influenciam nesse impacto.

1.5 Estrutura do Trabalho

Além deste capítulo introdutório, este trabalho é composto por mais quatro capítulos, que serão detalhados a seguir. O Capítulo 2 abrange as definições encontradas em artigos, teses, dissertações e documentos de agências reguladoras nacionais relacionados ao consumo de combustível no transporte rodoviário, à irregularidade longitudinal de pavimentos rodoviários, aos parâmetros para avaliar o comportamento dos veículos e às influências dessas informações na gerência de pavimentos. O Capítulo 3 aborda os materiais e métodos empregados, descreve os equipamentos utilizados, detalha o tratamento dos dados, fornece uma descrição dos trechos estudados e explora a modelagem empregada no cálculo do consumo. O Capítulo 4 trata da análise e discussão dos resultados obtidos. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como as sugestões para pesquisas futuras. Além disso, são apresentados apêndices e anexos que foram relevantes para a elaboração da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos fatores interferem no aumento do consumo de combustível. Assim, esse capítulo apresenta uma abordagem tratando dos principais elementos que interferem no consumo de combustível, como: as características da via, do veículo e o estilo de direção.

2.1 Custo operacional do veículo - COV

Albuquerque (2022) afirma que, para realizar uma avaliação econômica é necessário calcular os fluxos de custos e benefícios que surgem do projeto. A redução dos custos de transportes é responsável por grande parte dos benefícios alcançados, e em determinadas circunstâncias, o aumento na procura por transporte pode gerar vantagens adicionais. É de suma importância dispor de um mecanismo de previsão dos custos de transporte para diferentes estratégias de investimento a fim de efetuar uma avaliação econômica completa.

O custo operacional do veículo está associado à posse, operação e manutenção do veículo. Isso inclui consumo de combustível, uso de pneus, óleo e lubrificantes, reparos e manutenção, depreciação, seguros e licenças. Para a modelagem do custo operacional do veículo, todos os parâmetros citados anteriormente são utilizados, exceto o custo de seguros e licenças. O custo operacional do veículo é parte dos custos que as agências rodoviárias devem considerar para realizar avaliações de estratégias de investimento (Bennett; Greenwood, 2003).

As despesas relacionadas ao transporte podem ser divididas de diferentes formas. Abaixo, são apresentadas as fases envolvidas no cálculo dos custos do transporte rodoviário, de acordo com Lima (2001). O autor descreve quatro etapas essenciais para a avaliação dos custos:

Etapa 1: Definição dos itens de custos

Para Lima (2001) os elementos que compõem os custos do transporte rodoviário são: depreciação, remuneração do capital, seguro do veículo, IPVA e seguro obrigatório, combustível, pneus, lubrificantes, manutenção e pedágio.

Etapa 2: Classificação dos itens de custos em fixos e variáveis

Na etapa 2, o mesmo autor relata que, os itens de custo devem ser categorizados levando em consideração a distância percorrida como o principal parâmetro, sendo então subdivididos em dois grupos: aqueles que se mantêm fixos e aqueles que são variáveis. Assim, os custos que variam de acordo com a quilometragem serão considerados variáveis, enquanto que os demais serão considerados fixos. O custo com combustível, por se tratar de um custo variável, irá variar de acordo com a distância percorrida e o consumo de combustível do veículo

utilizado.

2.2 Consumo de combustível

O consumo de combustível é influenciado por diversos fatores, incluindo o tipo de combustível utilizado (diesel, gás natural, gasolina, etc.), a eficiência do veículo em termos de consumo, o valor do combustível no mercado e a distância percorrida em km. Espinal et al. (2010) apontam que os principais fatores que influenciam o consumo de energia em veículos de transporte são:

- A eficiência energética dos motores
- A forma de operação (fatores de carga, velocidade, marcha lenta)
- O ambiente operacional (congestionamento, infraestrutura rodoviária)
- A combinação de veículos (pequenos vs. grandes, urbanos vs. rurais)

Assim, a atenção quanto ao comportamento do veículo, a adoção de práticas de condução eficientes, vias em boa qualidade, assim como suas características geométricas (curvatura, gradiente, etc.), são passos importantes para economia de combustível.

2.2.1 Comportamento dos diferentes tipos de veículos

Segundo Felipe (2021), o tipo de veículo influencia significativamente no consumo de combustível devido a sua característica de design, motores e usos específicos. Alguns dos fatores pelos quais os tipos de veículos podem afetar o consumo de combustível, são:

- a) **Motorização:** A escolha do motor e da tecnologia de propulsão é crucial. Motores maiores e menos eficientes consomem mais combustível do que motores menores e mais eficientes. Veículos híbridos e elétricos, por exemplo, são mais eficientes em termos de combustível, uma vez que utilizam tecnologias alternativas de propulsão.
- b) **Aerodinâmica:** A forma e o design do veículo influenciam na resistência do ar, afetando o consumo de combustível. Carros com design aerodinâmico tendem a ser mais eficientes nesse aspecto.
- c) **Pneus e Manutenção:** A escolha de pneus apropriados e a manutenção regular do veículo, incluindo a calibragem adequada dos pneus, podem afetar o consumo

de combustível.

2.2.2 Perfil do motorista

Para Murta (2018) e Felipe (2021), o comportamento do condutor, independente do tipo de veículo, pode ter um impacto significativo na gestão eficiente do consumo de combustível. Dentre as medidas que buscam reduzir esse problema, incluem:

- a) Evitar acelerar ou frear bruscamente;
- b) Calibragem correta nos pneus;
- c) Executar as mudanças de marcha de forma apropriada;
- d) Considerar o impacto do uso do ar condicionado.

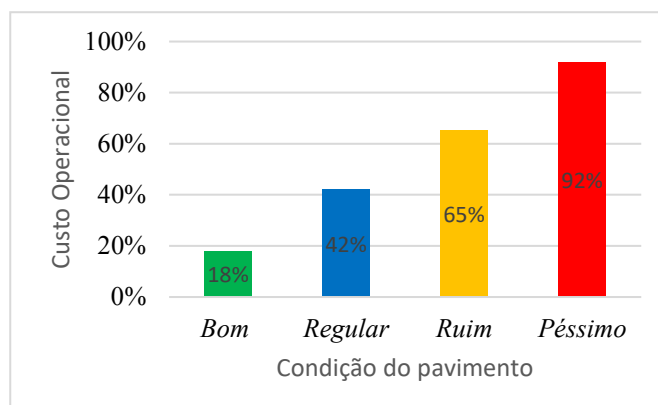
Para reduzir os consumo provocado por esse fator, é necessário que os condutores recebam treinamento e instruções sobre as melhores práticas a serem seguidas, compreendendo o seu papel na redução do consumo de combustível.

2.2.3 Características das vias

A estrutura do pavimento é fundamental para garantir o conforto e a segurança dos usuários. No entanto, após a finalização da construção, podem surgir problemas de ordem funcional e estrutural que comprometem suas funções principais. Esses problemas podem ser causados por diversos fatores, como o impacto contínuo do tráfego e as variações climáticas ao longo do tempo. A deterioração resultante pode afetar significativamente tanto a funcionalidade quanto a integridade estrutural do pavimento, sendo classificados como defeitos funcionais e estruturais.

De acordo com a pesquisa da CNT (2019), há uma relação significativa entre o custo operacional dos veículos e as condições da rodovia, conforme ilustrado na Figura 1. O estudo indica que o custo operacional aumenta em aproximadamente 28,5% ao ano devido às deficiências do pavimento. A figura destaca como os custos operacionais crescem em comparação com pavimentos que estão em boas condições.

Figura 1- Aumento do Custo Operacional do Veículo de acordo com a condição do pavimento



Fonte: Adaptado de Albuquerque (2022).

Arrivabeni (2021) destaca que qualquer redução na frequência ou qualidade dos serviços de manutenção das vias resulta em um aumento nos custos operacionais dos veículos, além de exigir investimentos cada vez maiores para a recuperação das estradas. Consequentemente, o consumo de combustível tende a aumentar mesmo em distâncias curtas, elevando os custos de deslocamento. Esses fatores não só impactam o orçamento com combustível, mas também prejudicam a economia local, causando atrasos no desenvolvimento regional e gerando despesas adicionais com a manutenção e reconstrução de pavimentos deteriorados.

O manual do DNIT (2006) reforça a importância de técnicas adequadas de manutenção para preservar a qualidade do pavimento. Um dos métodos essenciais para avaliar a condição do pavimento e, consequentemente, a qualidade da estrada, é a medição da irregularidade longitudinal com base no Índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index - IRI*). A adoção de práticas de manutenção preventiva e o monitoramento regular do IRI são fundamentais para garantir a durabilidade e o desempenho das rodovias, assegurando a segurança e o conforto dos usuários.

Além da manutenção, é crucial considerar os elementos do projeto geométrico de uma rodovia, que têm impacto direto na segurança ao influenciar a trajetória dos veículos na pista. A geometria da via pode tanto diminuir quanto aumentar a probabilidade de acidentes (García, 2008). Características como raios de curvatura, inclinações, largura das faixas e distâncias de visibilidade são fatores que afetam a taxa de acidentes em rodovias (Lamm et al., 1999). Adicionalmente, o projeto geométrico desempenha um papel significativo no consumo de combustível, pois uma geometria inadequada pode resultar em aumento no consumo devido a

trajetórias mais complexas e a necessidade frequente de desacelerações e acelerações.

2.2.4 Estimativa do consumo de combustível

Para calcular o consumo instantâneo de combustível, Lightner (2005) apresenta os dados necessários, sendo eles: velocidade do veículo e a taxa de massa de ar (MAF). Como nem todos os veículos possuem o sensor MAF, o mesmo autor afirma que é possível aproximar o valor de MAF utilizando outros dados, dentre eles uma variável sintética conhecida como IMAP, a mesma é calculada por meio da Lei dos Gases Ideais. A equação 1 apresentada por Fontes e Figueiredo (2014) considerou os dados mencionados por Lightner e é empregada para encontrar o valor da variável IMAP. O IMAP é uma informação que requer dados de temperatura do ar de admissão - IAT em Kelvin (K), rotação por minuto do motor (rpm) e pressão absoluta no coletor de admissão - MAP em quilopascas (kPa) e é utilizada para calcular a quantidade de ar que foi admitido pelo coletor e, assim, informar a quantidade de combustível que será necessário durante a combustão. Os dados de IAT e MAP são obtidos através do scanner OBD II. Nesse caso, é preciso transformar a unidade do IAT, que é fornecida em graus Celsius (°C), para kelvin (K). Para isso, soma-se a cada valor de IAT um valor de 273,15.

$$IMAP = \frac{RPM \cdot MAP}{\frac{IAT}{2}} \quad (1)$$

Onde:

- IMAP: variável sintética
- RPM: rotação por minuto (rpm)
- MAP: pressão absoluta no coletor de admissão (kPa)
- IAT: temperatura do ar de admissão (K)

Após determinar o valor de IMAP, prossegue com o cálculo do MAF, utilizando a equação 2 também proposta por Fontes e Figueiredo (2014) baseado em Lightner (2005). Para tanto, necessita-se obter o volume do deslocamento do motor (VDM) em litros (também conhecido como cilindradas), bem como a eficiência volumétrica (EV) em percentual. A primeira informação pode ser encontrada na ficha técnica apresentada no manual do veículo e a segunda é recomendado por Lightner o uso de um valor de 80%, inicialmente. Além disso, o autor utiliza a massa molecular média do ar - MM, uma constante com valor de 28,97 gramas por mol, e R, constante universal dos gases com valor de 8,314 joules por kelvin por mol.

$$MAF = \frac{\frac{IMAP}{60} \cdot EV \cdot VDM \cdot MM}{R} \quad (2)$$

Onde:

- MAF: Fluxo de Massa de Ar (galões/h)
- IMAP: variável sintética
- EV: eficiência volumétrica (%)
- VDM: volume do deslocamento do motor (cilindradas)
- MM: massa molecular média do ar (constante igual a 28,97 g/mol)
- R: constante universal dos gases igual a 8,314 J/(mol K)

A equação 3 que determina o consumo instantâneo de combustível, em milhas por galão, é descrita por Lightner (2005) conforme a seguir:

$$MPG = 7,107 \cdot \frac{VSS}{MAF} \quad (3)$$

Onde:

- MPG: consumo instantâneo de combustível (milhas/galão)
- VSS: velocidade do veículo (milhas/h)
- MAF: Fluxo de Massa de Ar (galões/h)

Lightner (2005) explica que, a constante 7,107 é fornecida pela simplificação da equação a seguir, que considera razão estequiométrica de 14,7:1, ou seja 14,7 partes de ar para 1 parte de combustível.

$$MPG = \frac{14,7 \cdot 6,17454 \cdot (VSS \cdot 0,621371)}{\frac{360 \cdot MAF}{100}} \quad (4)$$

Para esse cálculo, como a velocidade, no sistema OBD II, é obtida em quilômetros por hora, é preciso convertê-la para milhas por hora, para isto basta multiplicar cada velocidade por 0,621371.

A média do consumo é obtida realizando a média dos consumos instantâneos calculados em milhas por galão (MPG). Para converter em quilômetros por litro, segundo (Wolfram Alpha, 2014), basta multiplicar o MPG por 0,4251.

2.3 Irregularidade Longitudinal

Conforme destacado pelo DNIT (2006), a irregularidade longitudinal de um pavimento

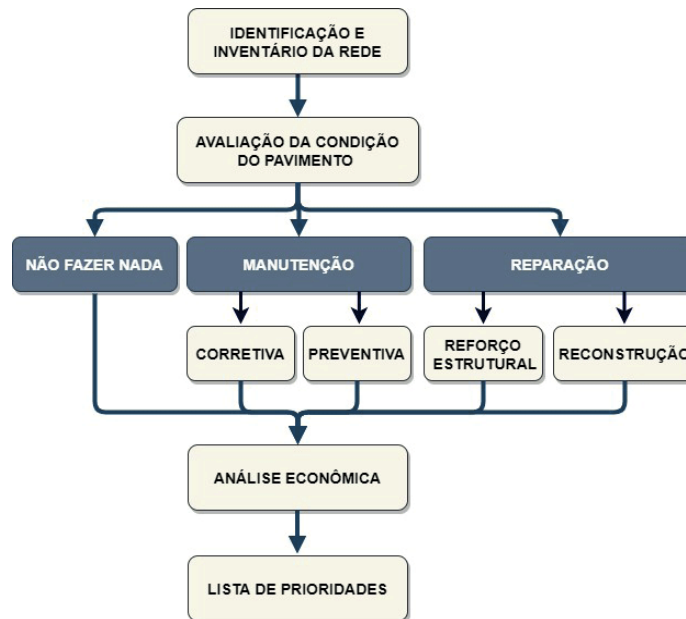
refere-se ao conjunto de desvios na superfície do pavimento em relação a um plano de referência. Esses desvios têm o potencial de afetar negativamente a qualidade do rolamento e a resposta dinâmica das cargas sobre a estrada e os componentes dos veículos.

A medida comumente usada para quantificar a Irregularidade Longitudinal de um pavimento é o Índice de Irregularidade Internacional, ou IRI, conforme proposto pelo Banco Mundial em 1986 (Barella, 2008). Para Sayers e Karamihas (1998), o cálculo matemático do IRI é baseado na soma dos deslocamentos em valor absoluto da massa superior em relação à massa inferior (em milímetros, metros ou polegadas) de um modelo de veículo, dividida pela distância percorrida (em metros, quilômetros ou milhas), quando o veículo está se movendo a uma velocidade constante de 80 km/h. Assim, o IRI é uma medida que se baseia na avaliação da resposta de um veículo às condições da superfície da estrada.

Pinto e Preussler (2010) afirmam que as medições de irregularidade longitudinal têm uma variedade de aplicações, incluindo o seu uso como um parâmetro fundamental na avaliação do estado dos pavimentos, auxiliando no diagnóstico da situação atual e na determinação das medidas necessárias para manutenção ou restauração. Além disso, essas medições são úteis para calcular os custos operacionais de veículos, garantir o controle de qualidade durante a construção, apoiar as decisões relacionadas à gestão de pavimentos, atualizar e aprimorar modelos de previsão de desempenho de pavimentos, e também para estimar a vida útil dos pavimentos. Tais atividades são realizadas pela equipe responsável pela gerência de pavimentos.

A gerência envolve todas as atividades relacionadas à garantia e manutenção de pavimentos em condições adequadas de uso. Seu propósito abrange desde a coleta de dados para o planejamento e orçamentação até a supervisão regular das condições do pavimento em uso (Brasil, 2011). Com o objetivo de otimizar os gastos dentro das limitações orçamentárias, o DNIT estabeleceu procedimentos transparentes que ajudam a reduzir as subjetividades inerentes ao processo, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma das estratégias de manutenção e reabilitação.



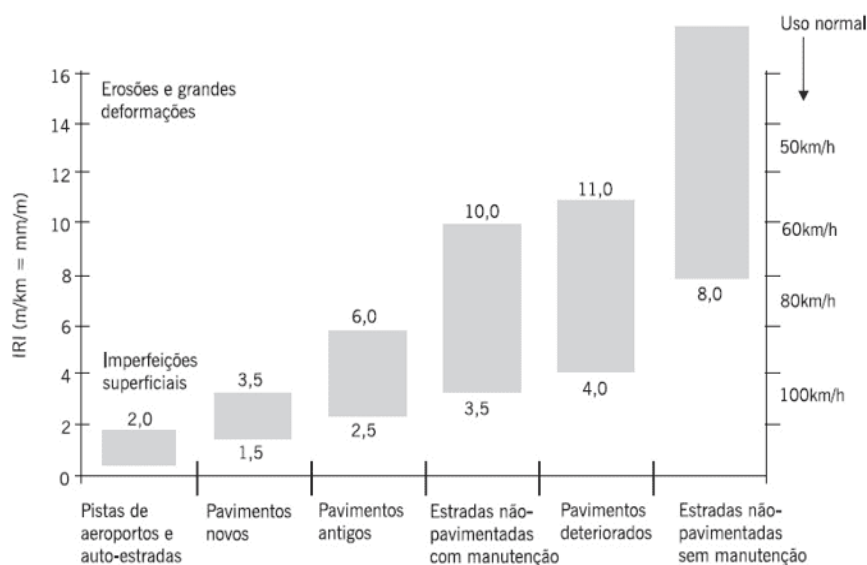
Fonte: Santos (2022).

2.3.1 Escalas e características do IRI

Almeida (2018) assim como Sayers e Karamihas (1998), destacam que o IRI é uma métrica que avalia o estado geral do pavimento, resumindo as características da superfície obtidas através de sistemas de medição de resposta ao impacto ou deslocamento vertical. O IRI é particularmente relevante quando se busca correlacionar o custo operacional de veículos com a qualidade do rolamento, cargas dinâmicas e a condição geral da superfície rodoviária. A Figura 3 apresenta diferentes faixas de IRI que correspondem a distintas categorias de estradas associadas a velocidades de operação específicas.

Assim, o IRI ficou reconhecido como um indicador geral que quantifica a irregularidade da superfície. Segundo Sayers e Karamihas (1998), esse índice está estreitamente ligado à maioria das respostas dos veículos. Especificamente, há uma alta correlação do IRI com três categorias de variáveis de respostas dos veículos: a medida da resposta dos veículos às condições do pavimento, a aceleração vertical experimentada pelos passageiros e a carga aplicada sobre os pneus.

Figura 3 – Faixas de variação do IRI dependendo do caso e situação



Fonte: Sayers e Karamihas (1998).

A escala de medição do IRI varia de acordo com o tipo de estrutura, sendo de 0 a 10 (m/km) para pavimentos asfálticos ou em tratamento superficial, e em estradas não pavimentadas essa variação é de 0 a 24 (m/km). De acordo com as observações de Medina e Motta (2015), rodovias de concreto asfáltico com IRI situando-se entre 1,4 e 2,3 m/km e aquelas de tratamento superficial com valores entre 2,0 e 3,0 m/km geralmente indicam um pavimento de alta qualidade, proporcionando um nível adequado de conforto no rolamento.

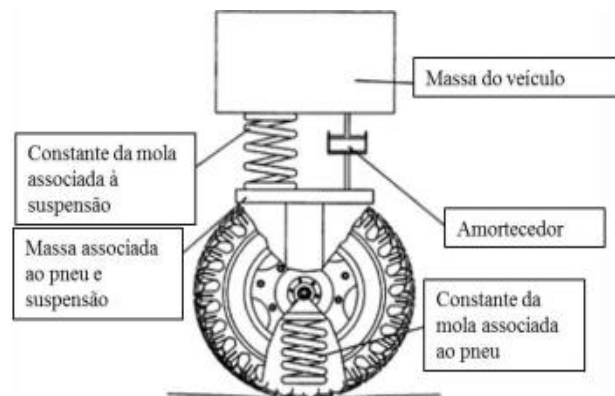
2.3.2 Equipamentos utilizados na medição da Irregularidade Longitudinal

Benevides (2006) afirma que há variações entre os equipamentos medidores de irregularidades em relação a suas características, produtividade e eficiência na coleta de dados. A avaliação da irregularidade pode ser realizada utilizando medidores de perfil, como a régua, régua deslizante, perfilômetro a laser, ou por meio de medidores de tipo resposta, que podem ser mecânicos ou baseados em acelerômetro.

Barella (2008) ressalta que, embora o IRI seja amplamente utilizado no Brasil, ele ainda não é normatizado. As normas brasileiras recomendam como índice de irregularidade o Quociente de Irregularidade (QI), que ainda não foi substituído pelo IRI por ter uma origem bastante similar ao IRI, utilizando o modelo de quarto-de-carro e também devido ao seu uso já ter sido disseminado no país. Os valores de QI são expressos em contagens por quilômetro (cont./km), enquanto o IRI é em metros por quilômetros (m/km).

O quarto-de-carro, apresentado na Figura 4, se move ao longo do perfil longitudinal a uma velocidade de 80 km/h. Através de um modelo matemático, são computadas as deflexões na suspensão do quarto-de-carro, com base nos deslocamentos medidos no perfil e nos parâmetros estruturais do veículo. As deflexões acumuladas na simulação do movimento da suspensão são posteriormente divididas pela distância percorrida, resultando em um índice expresso na unidade de inclinação. Este índice, quando medido em metros por quilômetro (m/km), é denominado IRI (Albuquerque e Oliveira, 2017).

Figura 4 – Modelo do quarto de carro



Fonte: Hirpahuanca (2016).

2.3.3 Utilização do SmartIRI para obtenção da Irregularidade Longitudinal

O grupo de Logística e Redes de Infraestrutura (LRI) da Universidade Federal do Ceará (UFC) desenvolveu o SmartIRI com o intuito de coletar informações sobre o conforto ao dirigir em uma estrada, especificamente medindo o IRI. Para utilizar essa tecnologia, o *smartphone* é fixado no pára-brisa do veículo por meio de um suporte, capturando a aceleração vertical através dos sensores do telefone, como o acelerômetro, além dos dados de GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite). Após a medição, os dados de aceleração vertical, velocidade e localização são enviados para a nuvem, onde são processados para obter os valores finais do IRI (Costa, 2019).

Almeida (2018) desenvolveu o aplicativo chamado SmartIRI, usado inicialmente residente no *smartphone*, destinado à medição da irregularidade longitudinal de pavimentos. Essa ferramenta é integrada a um veículo por meio de um suporte instalado no para-brisa e utiliza os sensores incorporados em *smartphones*, como o acelerômetro e o receptor do Sistema de Posicionamento Global (GPS), para coletar informações relacionadas à aceleração vertical, velocidade e localização. Atualmente, os dados provenientes destes sensores são processados

de maneira a possibilitar a visualização em tempo real do Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) georreferenciado para o usuário.

O mesmo autor relata que os resultados dos testes de medição em campo realizados com o SmartIRI indicaram que os valores calculados do IRI mostraram uma correlação satisfatória quando comparados aos dados obtidos por outras aplicações de medição de irregularidade longitudinal. Por exemplo, entre o perfilômetro a laser e o SmartIRI obteve-se uma correlação com um R^2 de 0,88. Além disso, os valores do IRI medidos pelo SmartIRI também mostraram boa correlação com o método de nível e mira e com a avaliação subjetiva por meio do Valor de Serventia Atual (VSA).

2.3.4 Principais Autores e Contribuições

Para a condução desta pesquisa, foi essencial a análise de trabalhos anteriores que contribuíram para a formulação da metodologia. O estudo de Lightner (2005) apresentou uma abordagem para o cálculo do consumo de combustível com base em parâmetros veiculares, destacando a importância da variável MAF que não foi possível a sua obtenção no momento do levantamento. Assim, Fontes e Figueiredo (2014) ofereceram uma metodologia para obtenção dessa variável, utilizando equações que envolvem parâmetros levantados em campo, o que permitiu calcular o consumo de combustível a partir de dados veiculares. Almeida (2018) fez uma contribuição importante ao auxiliar na obtenção da irregularidade por meio do aplicativo para *smartphone* SmartIRI. Rimpas, Papadakis e Karamihas (2019) contribuíram com a utilização do dispositivo OBD II e do software ScanMaster, ferramentas cruciais para a coleta dos dados veiculares. Por fim, Albuquerque (2022) desenvolveu uma pesquisa semelhante, porém focada em uma comparação com outros modelos, o que ajudou a aprimorar a abordagem utilizada neste trabalho.

Tabela 1— Principais Autores e Contribuições Metodológicas para a Análise do Consumo de Combustível

Autor	Abordagem	Pesquisa
Lightner, 2005	Noção do cálculo do consumo de combustível;	Desenvolveu uma forma de calcular o consumo de combustível a partir de dados veiculares, incluindo o uso do sensor MAF.
Fonte e Figueiredo, 2014	Possibilitou o cálculo do consumo de combustível	Implementaram um computador de bordo automotivo usando um dispositivo iOS para calcular o consumo de combustível em tempo real, com resultados preliminares ajustados para maior precisão, atingindo uma diferença de 1% em relação ao esperado.
Almeida, 2018	Oferece suporte prático para a análise da condição superficial do pavimento na BR-116	Desenvolveu um aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias, auxiliando na coleta de dados sobre pavimentação.
Rimpas, Papadakis e Samarakou, 2019	Uso do OBD-II e fatores predominantes no consumo de combustível	Monitorou operações de veículos via OBD-II, comparando dados com padrões de fabricantes e destacando o comportamento do motorista como fator-chave no consumo de combustível durante uma viagem de 5 km com tráfego variado.
Albuquerque, 2022	Consumo de Combustível	Estudo comparou o consumo de combustível medido pelo scanner OBD-II com modelos ARRB, HDM-4 e NCHRP em rodovias de Goiás e Ceará. HDM-4 foi mais preciso na GO-040, enquanto o NCHRP foi mais preciso nos outros trechos.

Fonte: Autoria própria (2023).

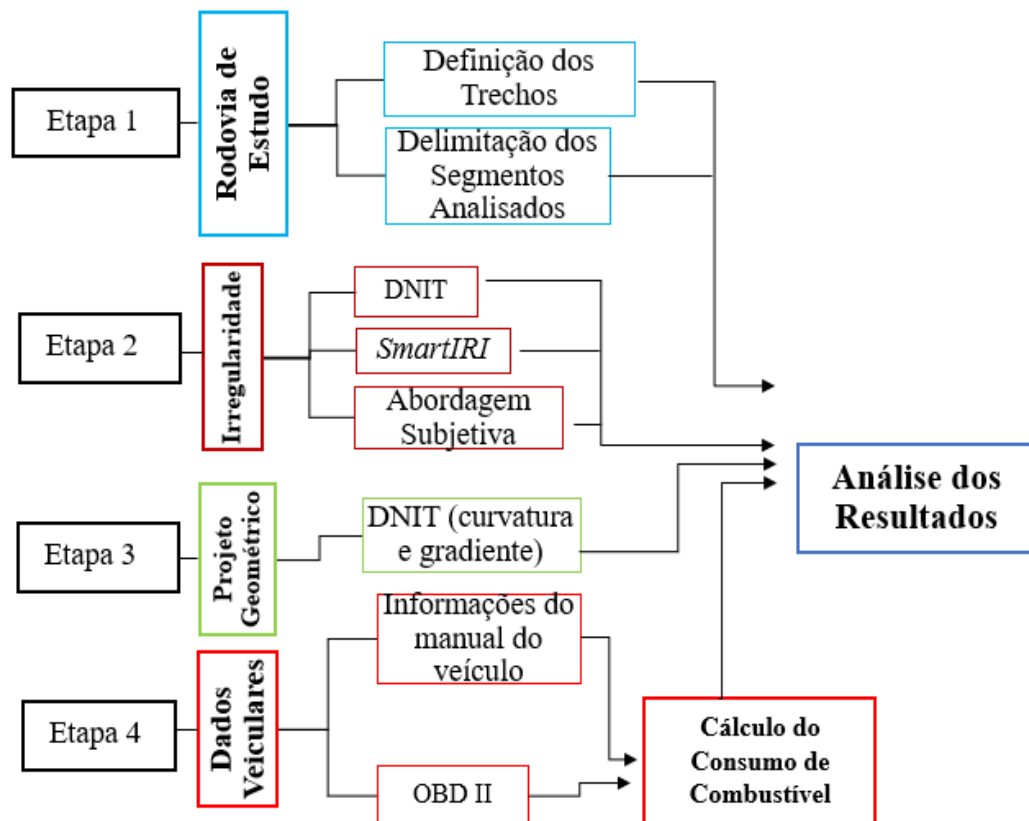
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos para a coleta e processamento dos dados, as etapas para a realização do cálculo do consumo de combustível e os equipamentos utilizados para a coleta dos dados do veículo e da irregularidade longitudinal da rodovia de estudo.

3.1 Etapas do processo metodológico

As etapas realizadas ao longo deste trabalho estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Etapas do processo metodológico



Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 5, é possível observar que a Etapa 1 consistiu em definir o trecho e segmentos a serem avaliados. Na Etapa 2 levantou-se dados da condição da superfície do pavimento por meio da irregularidade longitudinal. Para isso, o IRI foi mensurado usando o aplicativo SmartIRI e, posteriormente, comparado com o IRI obtido pelo DNIT. Ainda na Etapa 2, foi realizada uma análise subjetiva das condições da superfície da via, utilizando como método principal a percepção do condutor ao longo do trajeto em ambas as faixas. Essa

abordagem baseada na experiência direta do motorista permitiu uma segmentação mais precisa dos trechos, considerando a diferença na concentração dos defeitos. A avaliação considerou tanto o conforto do condutor quanto os problemas observados ao longo do percurso (como buracos, trilha de roda e desgaste da superfície), destacando a importância da forma como os defeitos se manifestavam em cada segmento. Na Etapa 3, levantou-se dados de curvatura e gradiente obtidos a partir do projeto geométrico disponibilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Para possibilitar o cálculo do consumo de combustível, a Etapa 4 tratou do levantamento dos dados veiculares que foram obtidos por meio do *scanner OBD II* conectado ao *software* ScanMaster (versão 2.1 ano 2010) e informações mais específicas observadas na ficha técnica disponível no manual do veículo (Fiat Pulse 1.3) e apresentadas na Tabela 1. E, por fim, a análise dos resultados para identificar a variável de maior impacto no consumo de combustível.

Tabela 2— Resumo de características do veículo utilizado

Características	Fiat Pulse 1.3
Ano	2023
Peso Bruto (kg)	1234
Combustível Utilizado	Gasolina
Área Frontal (m ²)	2,80
Tanque (l)	47
Cilindrada Unitária (cm ³)	333
Consumo (rodovia) (km/l)	10,4 a 14,7

Fonte: Autoria própria (2023).

3.2 Trecho de estudo

O estudo foi realizado em um trecho de aproximadamente 38 km da rodovia BR-116, localizado no estado do Ceará, começando no km 56, a partir da capital Fortaleza, e indo até o km 94 em Aruaru, Morada Nova- CE. Trata-se de uma rodovia de pista simples com mão dupla, pavimentada com revestimento asfáltico. Do km 56 ao km 82, foi aplicado argamassa a frio ou areia asfalto a frio (AAF), como também é conhecida. Os 12 km restantes foram executados com concreto asfáltico.

Foram avaliadas as duas faixas de tráfego. Assim, o percurso foi dividido em: faixa de ida, que vai do km 56 ao km 94, obtendo informações sobre a faixa da direita, e a faixa de volta,

que vai do km 94 ao km 56, na cidade de Pacajus, coletando dados da faixa esquerda. Somando os trechos de ida e volta, chega-se a um total de 76 km.

Além disso, por meio da análise subjetiva, observou-se que uma mesma faixa possuía segmentos com características distintas entre si. Por conta disso, optou-se por dividir cada faixa (ida e volta) em dois segmentos diferentes, totalizando quatro segmentos. A faixa de ida informa quanto aos segmentos 1 e 2, com distância de 16 km e 22 km, respectivamente. Por sua vez, a de volta possui os segmentos 3 e 4, com distância de 22 km e 16 km, respectivamente.

Para a análise das características físicas da rodovia de estudo, utilizou-se o projeto geométrico fornecido pelo DNIT como principal fonte de dados. Esse documento fornece as cotas verticais registradas a cada 20 metros, necessárias para o cálculo do gradiente. Além disso, o projeto incluía dados das curvas horizontais, que foram utilizados para determinar a curvatura do trecho.

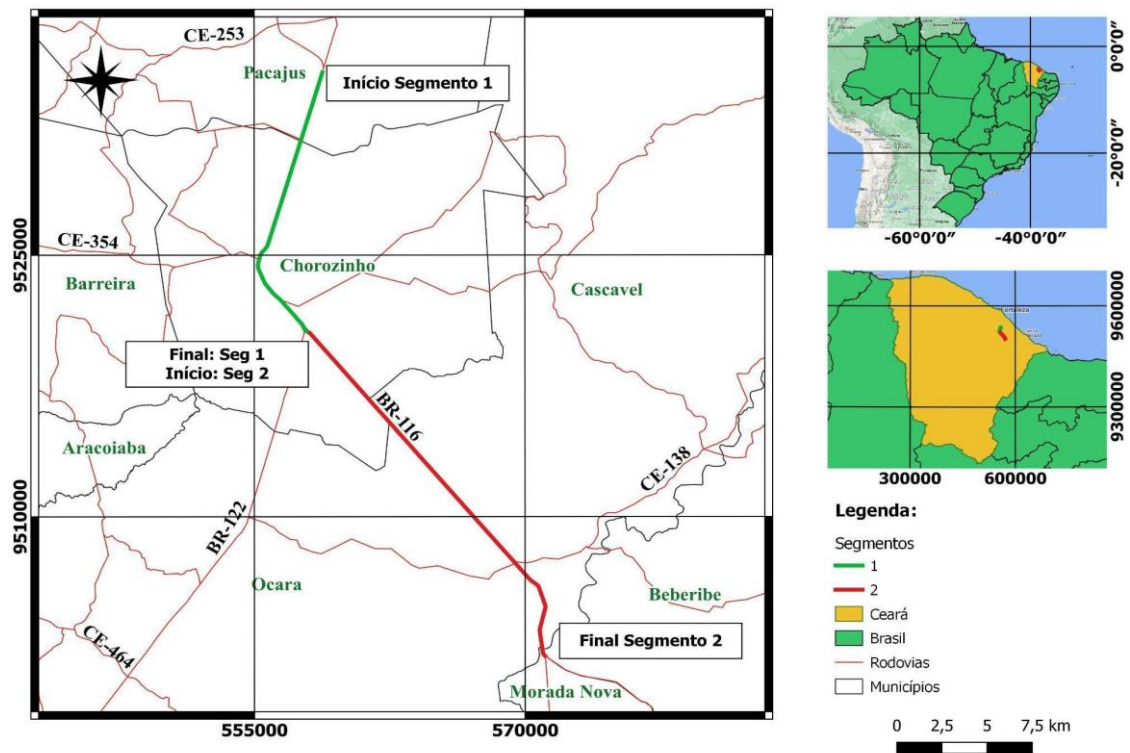
O Segmento 1 inicia na cidade de Pacajus, km 56, indo até Chorozinho, no km 72, onde inicia o Segmento 2 indo até o km 94, como mostra a Figura 6. Por sua vez, o Segmento 3 inicia no km 94 indo até Chorozinho, km 72, e o Segmento 4 inicia no km 72 indo até o km 56, conforme o mapa da Figura 7. As informações detalhadas sobre os segmentos e suas respectivas distâncias podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 3 – Segmentação e Distâncias dos Trechos nas Faixas de Ida e Volta

Faixa	Segmento	Ponto Inicial (km)	Ponto Final (km)	Distância (km)	Localização Inicial	Localização Final
Ida	Segmento 1	56	72	16	Pacajus	Chorozinho
Ida	Segmento 2	72	94	22	Chorozinho	Aruaru
Volta	Segmento 3	94	72	22	Aruaru	Chorozinho
Volta	Segmento 4	72	56	16	Chorozinho	Pacajus

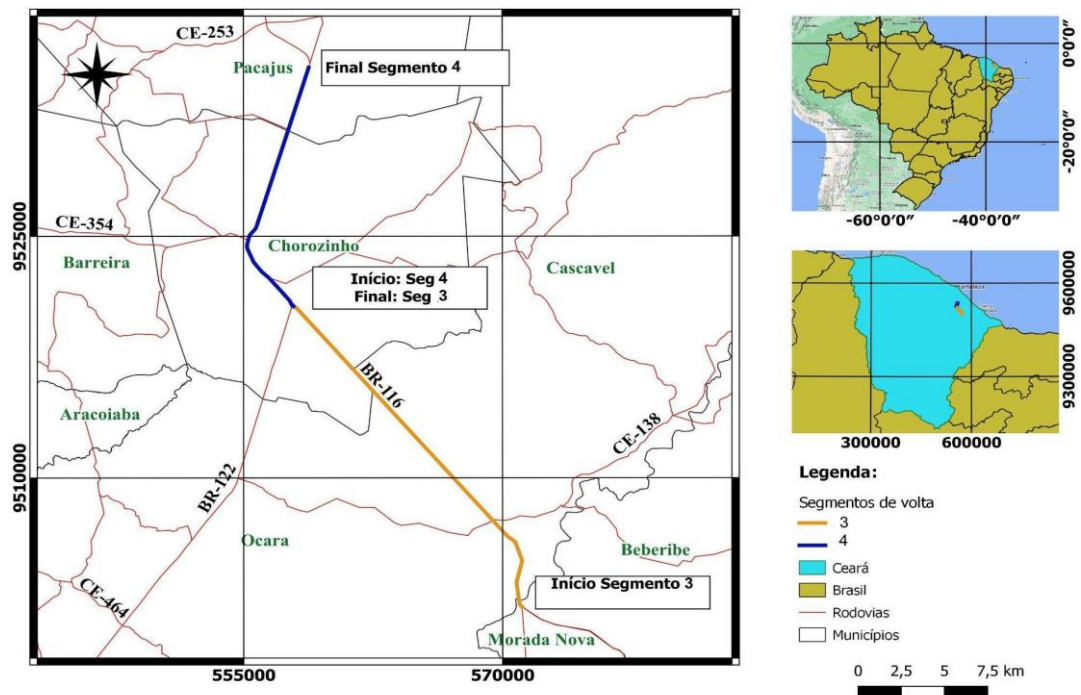
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 6 – Mapa de localização da faixa de Ida



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 7 - Mapa de localização da faixa de Volta



Fonte: Autoria própria (2023).

3.3 Equipamentos

Para a coleta de dados, foi realizada uma padronização a fim de eliminar qualquer interferência relacionada ao perfil do condutor e aos diferentes tipos de veículos. Nesse sentido, um único condutor realizou a coleta de dados nas duas faixas utilizando um veículo de passeio descrito anteriormente. As características do veículo foram utilizadas nas etapas de calibração, incluindo a capacidade do tanque e consumo médio em rodovias, bem como para o cálculo do consumo de combustível, levando em conta o tipo de combustível e a cilindrada. Como o veículo não fornece dados Fluxo de Massa de Ar (MAF – *Mass Flow Rate*), variável essencial para determinar o consumo de combustível, esses dados foram obtidos por meio das equações 1 a 4.



A obtenção do IRI e da distância foi realizada por meio do aplicativo SmartIRI. Durante a coleta, utilizou-se um suporte veicular para *smartphone* fixado no pára-brisa do veículo, conforme Figura 8, estabilizando o celular e evitando possíveis erros causados pela vibração do veículo durante o trajeto. O aplicativo foi instalado em um *smartphone* modelo Android Mi 8 com 8,0 GB de memória e fornece junto com os dados de IRI, um mapa do trecho percorrido com a classificação do IRI em escalas de cor como mostra a Tabela 3.

Figura 8 – Aparelho e Suporte utilizados para coleta do IRI



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 4 – Classificação do pavimento de acordo com o *SmartIRI*

Condições do pavimento	Legenda
Excelente	$0 < \text{IRI} < 2$ 
Bom	$2 < \text{IRI} < 4$ 
Regular	$4 < \text{IRI} < 6$ 
Ruim	$6 < \text{IRI}$ 

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2022).

Inicialmente, o *SmartIRI* foi configurado para informar a irregularidade a cada 20 metros buscando uma melhor representatividade do trecho analisado. No entanto, para facilitar a demonstração dos resultados, optou-se por calcular a média dos valores obtidos no intervalo de 1.000 metros e, assim, calcular o valor do IRI para cada km.

Dados mecânicos foram obtidos com o auxílio do *software ScanMaster ELM* no *notebook*, sendo utilizado para obter informações necessárias para o cálculo do consumo, que são informações do sensor MAF, da velocidade do veículo (km/h), rotações do motor (rpm) e distância percorrida (km). No levantamento, o sensor MAF não foi detectado, sendo então levantados os dados de velocidade, distância percorrida, pressão absoluta no coletor de admissão em KPa (MAP) e a temperatura do ar na admissão (IAT) em Kelvin (K), para que esses dados fossem aplicados nas equações de determinação do consumo do OBD-II por Km.

Com o dispositivo OBD II, conectado via *bluetooth* a um *notebook* com o *software ScanMaster* instalado, foi possível acessar os dados mecânicos fornecidos em tempo real. O *notebook* utilizado no levantamento foi do modelo Lenovo Intel(R) Core(TM) i5-8250U, contando com 12,0 GB de memória. Durante o levantamento, foram registradas aproximadamente 4 leituras por segundo dos parâmetros veiculares.

Para Fontes e Figueiredo (2014), a obtenção das informações disponibilizadas pelo sistema OBD-II não implica em uma conexão direta com um sistema de computador. É requerido o uso de dispositivos de leitura, conhecidos como ELM327, que foram desenvolvidos para atuar como intermediários entre a porta OBD-II e um sistema, empregando uma variedade de protocolos de comunicação amplamente utilizados, tais como Wi-Fi (IEEE 802.11), USB, Bluetooth (IEEE 802.15.1) e outros. Ao finalizar o levantamento no trecho, os dados foram exportados em planilha de Excel para acessar as informações.

3.4 Coleta de dados

Os levantamentos da faixa de ida foram realizados nos dias 04 e 11 de outubro de 2023 às 06:03 e 06:08, na primeira e segunda passagem, respectivamente. Por sua vez, os levantamentos de volta foram realizados nos dias 05 e 12 de outubro às 11:12 e 12: 41, respectivamente.

Para medidas de irregularidade do trecho, é essencial que o aplicativo *SmartIRI* esteja com a calibração adequada, para isso o indicador deve exibir a cor verde (Figura 9). Após a calibração, os levantamentos foram realizados com objetivo de manter uma velocidade constante de 70 km/h, respeitando o limite de velocidade da via que é de 80km/h e dentro do intervalo que apresentou melhores resultados de IRI, conforme Almeida (2018), entre 60 a 80 km/h.

Figura 9 - Configuração do aplicativo SmartIRI com indicador na posição correta



Fonte: Autoria própria (2023).

Para dados veiculares, o processo inicia-se conectando o dispositivo OBD II ao veículo e, em seguida, estabelece-se a conexão via Bluetooth com o *software ScanMaster*. Após a conexão, com o veículo ainda parado, selecionam-se os parâmetros necessários para o cálculo do consumo e inicia-se a coleta de dados. No estudo, optou-se por apresentar as informações nas unidades de medida específicas de cada parâmetro, de acordo com a natureza dos dados obtidos. Essas informações também podem ser visualizadas por meio de gráficos, conforme a preferência do usuário. Ao concluir o percurso, o processo de coleta de dados é encerrado e os arquivos são salvos em planilhas para fins de análise dos resultados.

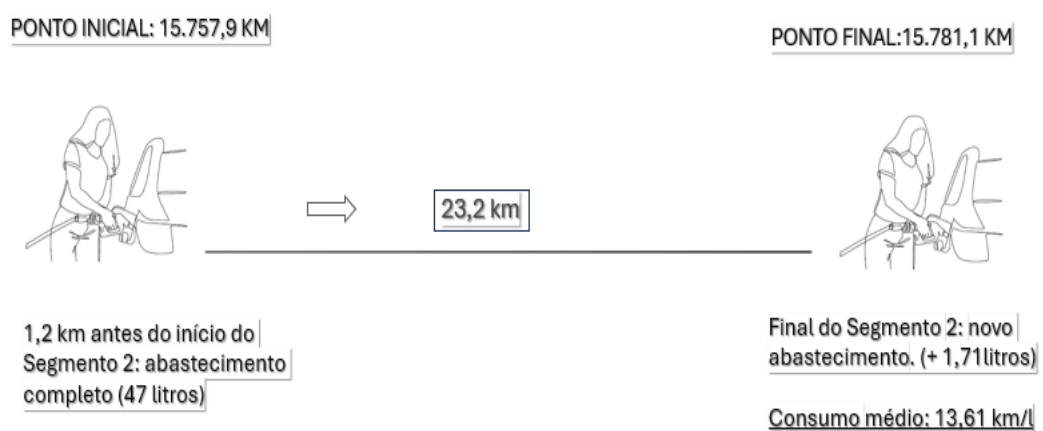
Além disso, para obter dados relacionados às características da via, foi realizada uma análise detalhada do projeto geométrico da rodovia BR-116. Uma planilha foi elaborada

contendo as cotas verticais a cada quilômetro, bem como os dados das curvas horizontais ao longo do trecho. Dessa forma, foi possível determinar o gradiente e a curvatura da rodovia, permitindo a análise de sua relação com o consumo de combustível. De posse dos dados coletados, a média dos dados obtidos nos dois levantamentos foi calculada por quilômetro para cada um dos quatro segmentos, para assim, verificar a relação das variáveis com o consumo de combustível.

3.5 Validação

Para confirmar os resultados, a Figura 10 esquematiza o método empregado para verificar o consumo de combustível em um trecho de 23,2 km localizado na faixa de ida; esse trecho de validação inicia-se 1,2 km antes do início do Segmento 2 indo até o final, totalizando os 23,2 km. A validação envolveu o preenchimento do tanque de combustível de 47 litros no ponto inicial do trecho de validação, sendo que, escolheu-se esse ponto devido a existência de um posto de abastecimento disponível. No momento do primeiro abastecimento, a quilometragem do veículo foi registrada, totalizando 15.757,9 km percorridos. Ao chegar no segundo posto de abastecimento, que coincide com o ponto final do Segmento 2, a nova quilometragem foi registrada informando um total de 23,2 km. Assim, o tanque de combustível foi novamente abastecido para avaliar o consumo de combustível ao longo do percurso. Com esses dados, a distância percorrida foi dividida pela quantidade de combustível necessária para preencher o tanque pela segunda vez, resultando no consumo médio de 13,61 km/l.

Figura 10 - Esquema Metodológico aplicado para a Validação



4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados das condições físicas do pavimento, avaliadas por meio do IRI, bem como suas características geométricas nos trechos analisados. Além disso, a análise subjetiva, baseada na percepção do condutor ao trafegar pelos trechos. Também serão abordados os dados referentes ao consumo de combustível, destacando-se a relação entre o consumo e as condições do pavimento. As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores mínimos e máximos do IRI para cada segmento nos dois levantamentos.

4.1. Condições do Pavimento e IRI

As figuras 11 e 12 apresentam o modelo do mapa gerado pelo aplicativo SmartIRI, que fornece uma visão geral da condição da superfície nos trechos analisados, utilizando as cores e intervalos dos valores de IRI. Os levantamentos foram realizados para as faixas de ida e volta, e os valores de IRI foram identificados para cada quilômetro nos quatro segmentos.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no levantamento 1, que apresentou valores de IRI variando de 2,04 a 3,30 m/km no primeiro segmento e de 2,01 a 3,10 m/km no segundo segmento. Enquanto na faixa de volta, essas variações foram entre 1,32 e 4,38 m/km no Segmento 3, e de 1,47 a 4,08 m/km no Segmento 4. Observa-se que o Segmento 3 apresentou níveis de IRI superior a 4 m/km no km 8 e o Segmento 4 também se comportou assim em seu km 1. Essas informações estão apresentadas na planilha do ANEXO A.

Tabela 5 – Valores de IRI por Segmento no levantamento 1

Segmento	Faixa	Valor Mínimo de IRI (m/km)	Valor Máximo de IRI (m/km)
Segmento 1	Ida	2,04	3,3
Segmento 2	Ida	2,01	3,1
Segmento 3	Volta	1,32	4,38
Segmento 4	Volta	1,47	4,08

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 11 – Mapa gerado pelo aplicativo SmartIRI para as faixas Ida e Volta no levantamento 1



Fonte: *SmartIRI* (2023).

No levantamento 2, os valores de IRI variaram de 1,82 a 3,80 m/km no primeiro segmento e de 1,78 a 4,24 m/km no segundo segmento. Para os Segmentos 3 e 4, o segundo levantamento indicou variações de 1,2 a 5,79 m/km e de 1,45 a 3,68 m/km, respectivamente. O Segmento 2 apresentou níveis de IRI superior a 4 m/km nos quilômetros 25 e 27 do segundo levantamento, conforme ANEXO A. Tais informações estão apresentadas na Tabela 5.

Figura 12 – Mapa gerado pelo aplicativo SmartIRI para as faixas Ida e Volta no levantamento 2



Fonte: *SmartIRI* (2023).

Tabela 6 – Valores de IRI por Segmento no levantamento 2

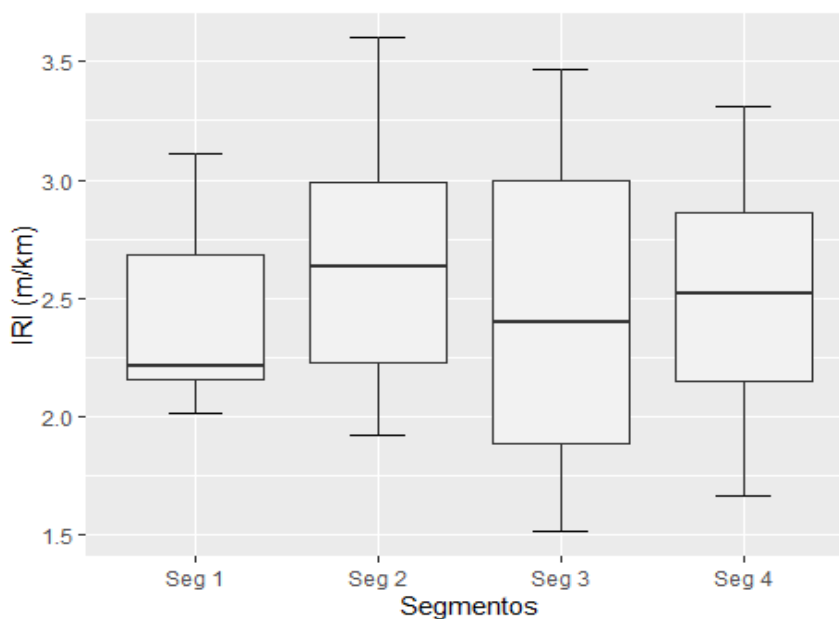
Segmento	Faixa	Valor Mínimo de IRI (m/km)	Valor Máximo de IRI (m/km)
Segmento 1	Ida	1,82	3,80
Segmento 2	Ida	1,78	4,24
Segmento 3	Volta	1,20	5,79
Segmento 4	Volta	1,45	3,68

Fonte: Autoria própria (2024).

Ao analisar a classificação do IRI, observa-se que mais de 80% dos quilômetros estudados foram classificados entre "excelente" e "bom" em praticamente toda a extensão dos 76 km somados nos dois levantamentos, com algumas exceções principalmente nos segmentos 2 e 3.

O *boxplot* fornecido na Figura 13 apresenta a distribuição dos níveis de IRI para os quatro segmentos analisados, considerando a média dos valores de IRI dos dois levantamentos realizados no trecho de ida (segmentos 1 e 2) e volta (segmentos 3 e 4). O Segmento 1 possui uma mediana abaixo de 2,25 m/km, indicando uma condição de superfície excelente, com menor variabilidade nos valores de IRI, que variam entre aproximadamente 1,75 e 2,75 m/km. Os segmentos 2 e 4 apresentam medianas entre 2,5 e 2,75 m/km, classificando-se como bons, embora o Segmento 2 apresente maior variação nos valores de IRI e a pior condição da superfície para a faixa de Ida, variando entre 2,0 e 3,5 m/km, enquanto o Segmento 4 varia entre 1,75 e 3,0 m/km, apresentando condições da superfície mais desfavorável que o Segmento 3. O Segmento 3, com uma mediana acima de 2,25 m/km, também é classificado como bom, porém com variação semelhante ao Segmento 2, apresentando valores de IRI entre aproximadamente 1,75 e 3,5 m/km.

Figura 13 – Distribuição dos níveis de IRI nos Segmentos de 1 a 4



Fonte: Autoria própria (2024).

Na análise subjetiva buscou-se apresentar a visão geral quanto ao conforto ao rolamento e os defeitos observados ao longo dos segmentos. No Segmento 1, observou-se que o trajeto apresenta poucos problemas funcionais, proporcionando boas condições de rolamento, com interferências pontuais como: redutores de velocidade no km 3, 11 e 15, além de pontos de estacionamento de caminhões no km 15. No Segmento 4 foram observadas a presença de trilhas de rodas em frente à fábrica Jandaia, localizada nas proximidades do km 35. No entanto, ambos os segmentos foram classificados como bons na visão do motorista, pois esses defeitos foram bem pontuais, como trilha de roda localizada em frente a fábrica Jandaia. A Figura 14 apresenta a superfície desses dois segmentos, retratando o km 3 do Segmento 1 (superfície em boas condições de rolamento) e o Segmento 4 com o problema mencionado (trilha de roda).

Por sua vez, no Segmento 2 e 3 foram observados pontos com defeitos visivelmente severos, Figura 15, ao longo do trajeto, resultando em maior desconforto durante a viagem. O Segmento 2 foi classificado como ruim, com desagregação visível ao longo do percurso. O Segmento 3 apresentou defeitos semelhantes, passando por serviços de manutenção nos km 9 e 15, o que também contribuiu para uma classificação ruim na perspectiva do motorista.

Figura 14 - Percepção do Condutor do veículo para os segmentos 1 e 4

Faixas de Ida e Volta

km 3 do Segmento 1 e km 35 do Segmento 4



Segmentos 1 e 4:
Sentido de rolamento em
BOAS condições,
apresentando poucos
defeitos ao longo do
trajeto;

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 15 - Percepção do Condutor do veículo para os segmentos 2 e 3

Faixa de Ida

km 27 do Segmento 2



Segmentos 2 e 3:
Sentido de rolamento
classificado como
RUIM;

Faixa de Volta

km 9 e 15 do Segmento 3



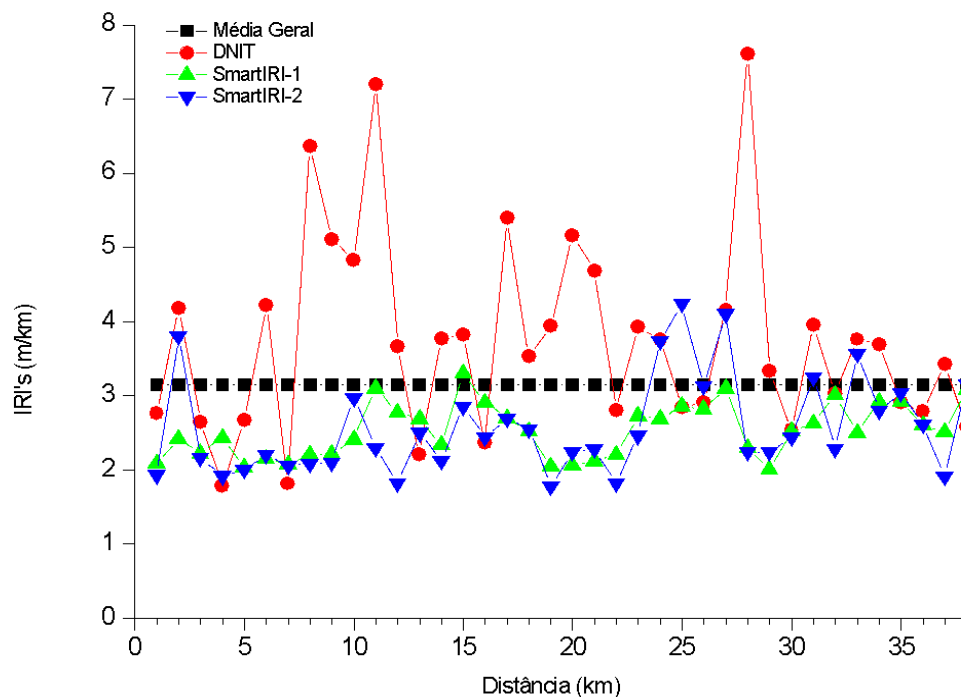
Fonte: Autoria própria (2023).

Comparando os dados do *boxplot* com a análise subjetiva, observa-se algumas discrepâncias e confirmações. A análise subjetiva concluiu que os segmentos 1 e 4 possibilitaram melhor conforto ao rolamento do que os segmentos 2 e 3. No entanto, os dados do *boxplot* indicam que o Segmento 1 possui a melhor condição de superfície, enquanto o Segmento 4, aparece com valores de IRI maiores que o Segmento 3, indicando superfície de menor qualidade. Todavia, ao analisar os limites de variações indicadas nesses dois últimos segmentos, é possível explicar a observação proferida na análise subjetiva. Assim, essa

divergência sugere que, além do IRI, outros fatores perceptíveis pelo condutor, como a distribuição e o tipo dos defeitos, também influenciam na qualidade do rolamento.

Ainda relacionado à avaliação da qualidade funcional da rodovia, realizou-se a comparação do IRI obtidos pelo SmartIRI e os fornecidos pelo DNIT. Os resultados dessa comparação estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Comparativo de irregularidade obtidas pelo DNIT e *SmartIRI* em relação a Média Geral



Fonte: Autoria própria (2024).

Analisando a Figura 16, observa-se uma discrepância entre os índices de IRI medidos pelo DNIT e aqueles obtidos pelo SmartIRI, especialmente nos segmentos entre os km 8 a 11, 16 a 18, e 27 a 29. É importante notar que o levantamento do DNIT foi realizado em julho de 2022, enquanto os levantamentos do SmartIRI ocorreram em outubro de 2023. Essa diferença temporal pode ter contribuído para as discrepâncias observadas, pois as condições da rodovia podem ter mudado durante esse intervalo de tempo devido a fatores como desgaste natural, condições climáticas e intervenções de manutenção.

Nos segmentos entre os km 8 a 11, 16 a 18, e 27 a 29, os dados do DNIT mostram valores de IRI mais elevados do que os levantamentos do SmartIRI, indicando uma pior condição da superfície da rodovia em 2022. Essa diferença pode ser explicada por várias razões. Primeiro, é possível que, entre julho de 2022 e outubro de 2023, tenham sido realizadas

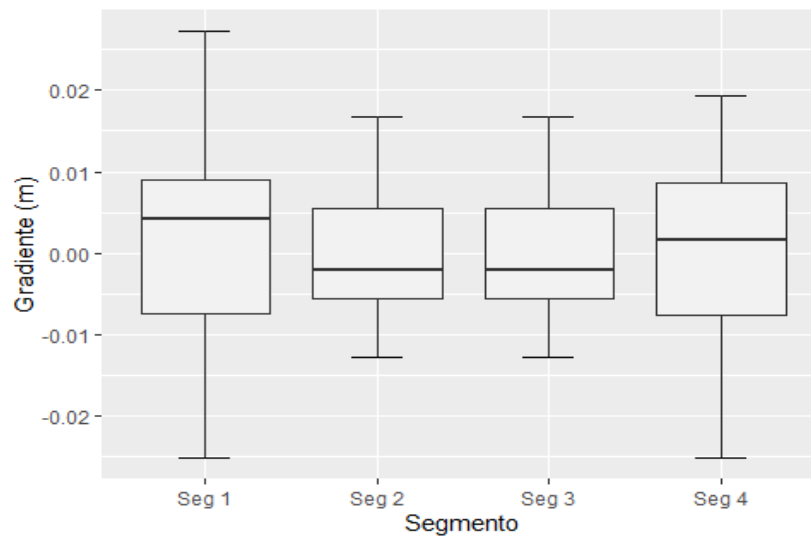
atividades de manutenção e reparos na rodovia, melhorando sua condição e resultando em menores valores de IRI nos levantamentos mais recentes do SmartIRI. Por outro lado, certas áreas da rodovia podem ter experimentado um aumento no desgaste e na degradação nesse intervalo de tempo, mas essas mudanças não foram uniformes ao longo de toda a extensão da rodovia, o que poderia explicar as diferenças nos valores de IRI em segmentos específicos. Além disso, destaca-se as diferenças metodológicas e de precisão entre as medições do DNIT e as levantadas pelo SmartIRI.

4.2. Características da rodovia dos trechos de ida e volta

A análise do projeto geométrico forneceu dados detalhados sobre o gradiente e a curvatura da rodovia. O gradiente foi calculado para cada quilômetro, resultando em uma elevação média de 0,0000564834 m/km. Este valor indica variações sutis na inclinação vertical da rodovia ao longo do trecho. Além disso, o número médio de subidas e descidas por quilômetro foi de 24, refletindo em, embora sutis, frequentes mudanças de elevação, o que pode impactar o consumo de combustível.

A curvatura média foi medida em 7,870738 graus por quilômetro, sugerindo que o trecho possui uma sinuosidade moderada. Esta característica é importante para a análise, uma vez que, conforme apontado por Melo (2018), a curvatura impacta diretamente a velocidade operacional e a dinâmica dos veículos, influenciando também o consumo de combustível. O comportamento dessas variáveis pode ser observado nas Figuras 17 e 18, que mostram a distribuição do gradiente e da curvatura ao longo dos quatro segmentos.

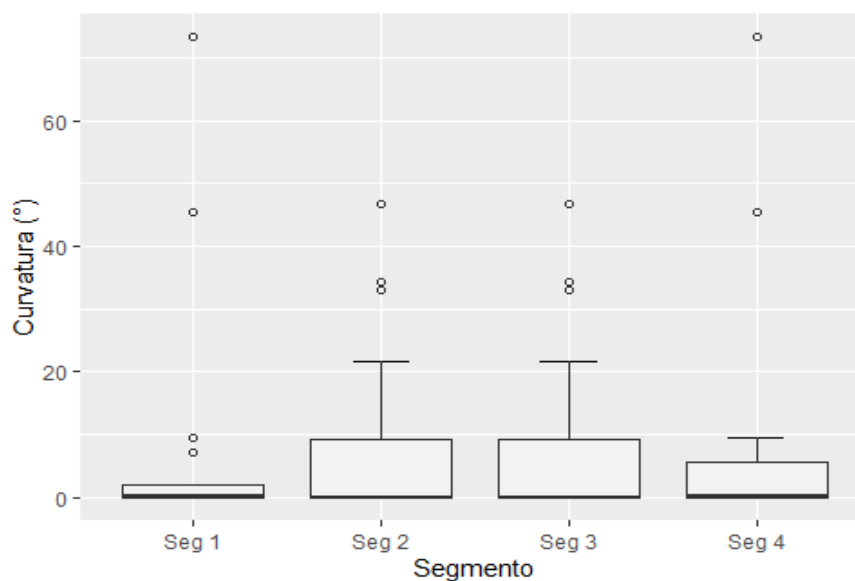
Figura 17 – Distribuição do Gradiente nos quatro Segmentos



Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 17, que apresenta a distribuição do gradiente nos quatro segmentos, observa-se que o Segmento 1 possui uma maior variação de gradiente, com valores que variam aproximadamente, entre -0,025 m e 0,027 m, indicando que o segmento tem uma inclinação mais variável em comparação aos outros segmentos, o que pode impactar o consumo de combustível devido às frequentes mudanças na elevação. Os segmentos 2, 3 e 4, por outro lado, apresentam variações de gradiente mais sutis e concentradas em torno de zero, -0,002, sugerindo um perfil mais plano e com menos alterações de inclinação.

Figura 18 – Distribuição da Curvatura nos quatro Segmentos



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 18, que mostra a distribuição da curvatura, revela que o Segmento 1 também apresenta uma menor curvatura em comparação aos outros segmentos, com cerca de 75% dos valores de curvatura próximos de zero e três valores atípicos baixos, conforme APÊNDICE A. Os segmentos 2 e 3 exibem uma maior variabilidade na curvatura, com valores que chegam a cerca de 60°, indicando uma maior sinuosidade nesses trechos.

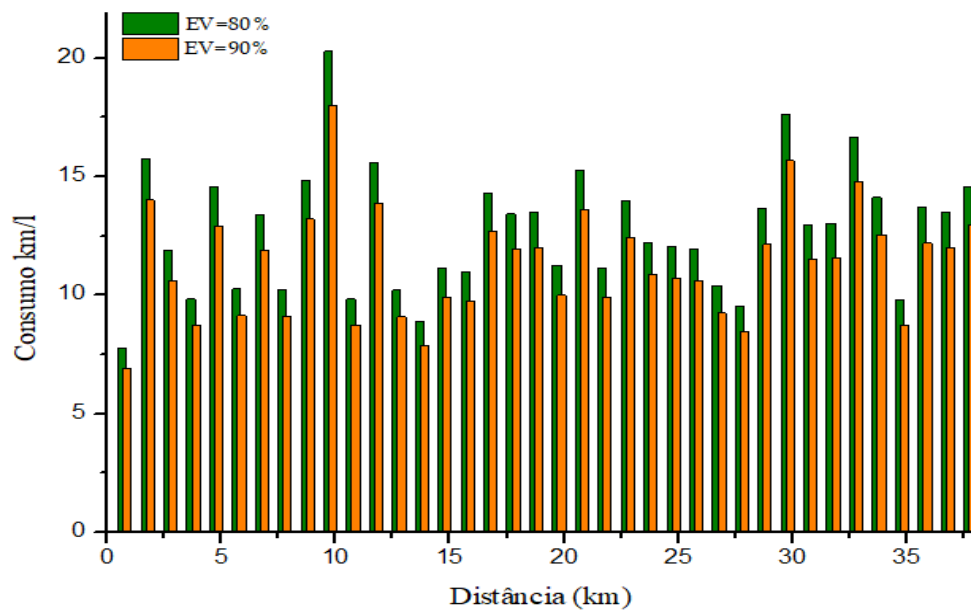
Nota-se que o Segmento 4, apenas sentido oposto ao Segmento 1, apresentou diferença quando se observa a distribuição da curvatura e do gradiente. Isso pode ser atribuído a variações no método de medição ou a condições de tráfego específicas durante o levantamento, que influenciam na precisão dos dados.

4.3 Consumo de Combustível

Os consumos de combustível com Eficiência Volumétrica-EV de 80% e 90% foram calculados para os quatro segmentos da rodovia. Para a elaboração do gráfico, foram considerados os consumos médios realizados nos trechos de Ida e Volta.

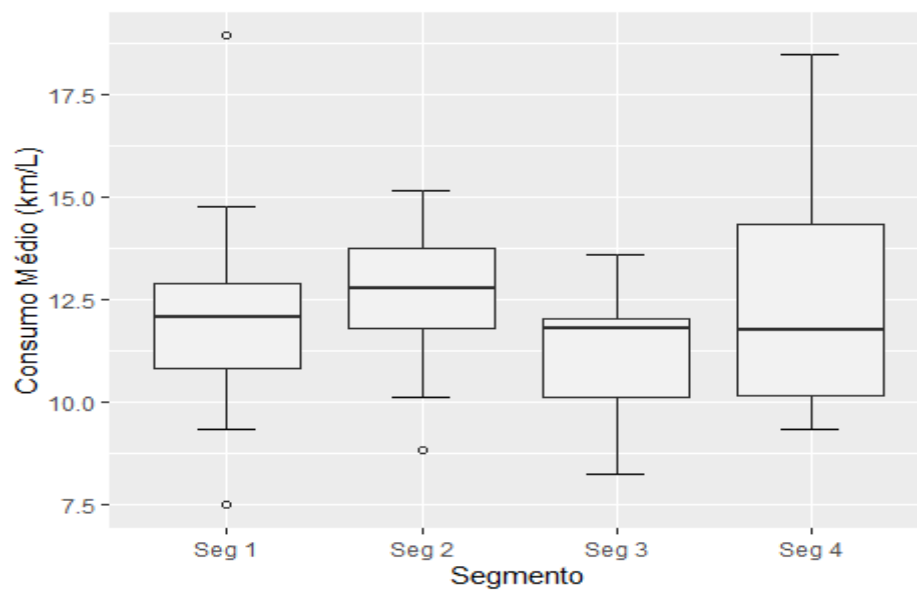
Os resultados dos consumos instantâneos, expressos em km/l, foram calculados conforme as orientações estabelecidas por Fonte e Figueiredo (2014). A análise demonstrou que os melhores consumos foram obtidos quando calculados para EV=80%, conforme pode ser observado na Figura 19. Esse padrão sugere que, sob essas condições, o veículo conseguiu operar de maneira mais eficiente em termos de consumo de combustível. Na validação, o consumo médio resultante foi de 13,61 km/l. Enquanto o consumo médio de combustível para os quatro segmentos da rodovia estão apresentados na Figura 20.

Figura 19 – Consumo de combustível para EV de 80% e 90%



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 20 - Boxplot do consumo de combustível para EV de 80% para os 4 segmentos



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 20, referente aos consumos calculados para EV= 80%, infere que, no Segmento 1, a mediana do consumo de combustível é de aproximadamente 11 km/l. Os valores do primeiro quartil (Q1) e do terceiro quartil (Q3) estão próximos de 10 km/l e 12 km/l, respectivamente, indicando que 50% dos dados de consumo estão dentro desse intervalo. Observa-se um valor atípico acima de 17,5 km/l no Segmento 1, sugerindo uma redução

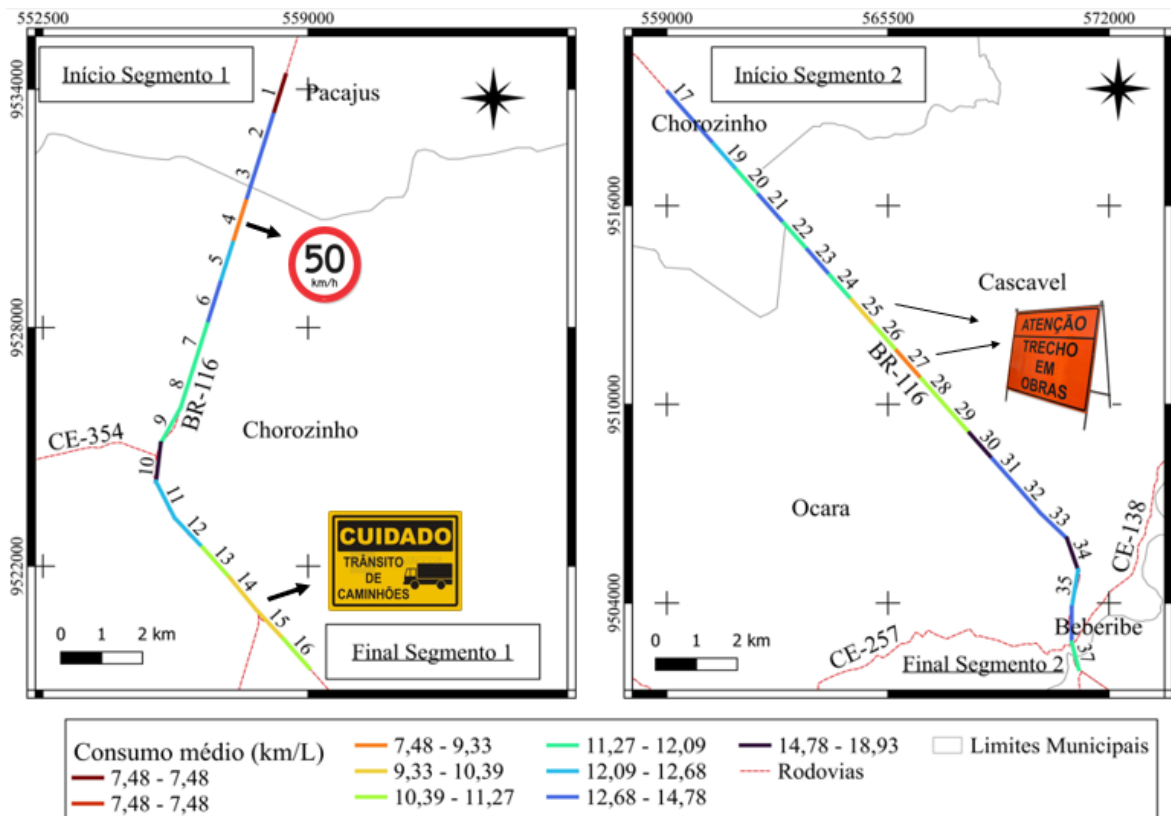
significativa no consumo no km 10 desse segmento.

Para o Segmento 2, a mediana do consumo de combustível é maior que no Segmento 1, situando-se em torno de 12 km/l, indicando que esse segmento apresenta o melhor consumo de combustível dentre os segmentos. Os valores de Q1 e Q3 estão aproximadamente entre 11 km/l e 13 km/l, demonstrando uma menor variabilidade em comparação com o Segmento 1. Não há valores atípicos significativos, indicando uma distribuição de consumo mais consistente nesse segmento.

O Segmento 3 apresenta a mediana mais baixa de consumo, com aproximadamente 9,5 km/l, ou seja o segmento de maior consumo dentre os quatro. O intervalo interquartil é mais amplo, variando de cerca de 8 km/l a 11 km/l, (Q1) e (Q3), respectivamente, o que indica uma maior variabilidade nos dados de consumo. Não foram identificados valores atípicos neste segmento, sugerindo que as variações no consumo são relativamente normais.

Por sua vez, no Segmento 4, a mediana do consumo de combustível é de aproximadamente 11,5 km/l. O intervalo interquartil varia de cerca de 10 km/l (Q1) a 13,5 km/l (Q3), semelhante ao Segmento 2. Observam-se valores atípicos abaixo de 7,5 km/l e acima de 17,5 km/l, indicando consumos pontuais baixo e alto em alguns registros. Para auxiliar na interpretação, as Figuras 21 e 22 apresentam, por meio de um mapa, os consumos médios por quilômetro ao longo das faixas de Ida e Volta, respectivamente.

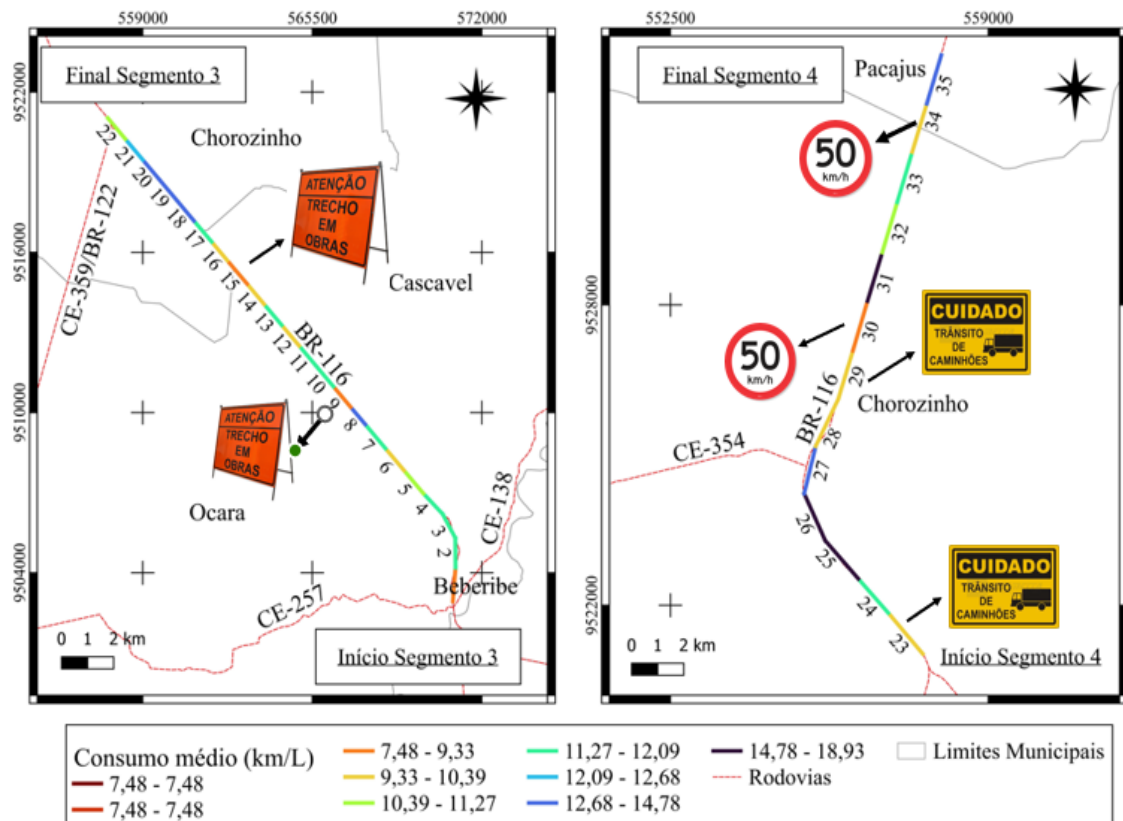
Figura 21- Mapa de indicação do consumo médio por quilômetro – Faixa de Ida



Fonte: Autoria própria (2024).

Ao analisar o mapa da Figura 21 é possível observar que, no Segmento 1, os consumos são mais elevados nos quilômetros onde há a presença de redutores de velocidade, nas proximidades do km 4, localizado em frente a fábrica Jandaia, e pontos de estacionamento de caminhões, km 14 e 15, nas proximidades do posto Cacique, Chorozinho, indicando a influência direta da velocidade no consumo final de combustível. Com relação ao Segmento 2, observou-se que os consumos foram mais elevados em áreas com maior concentração de defeitos, como desgaste severo e buracos, especificamente nos quilômetros 25 e 27. Observa-se que os quilômetros em curvas não influenciaram o consumo de combustível, apresentando altos valores médios em km/l.

Figura 22- Mapa de indicação do consumo médio por quilômetro – Faixa de Volta



Fonte: Autoria própria (2024).

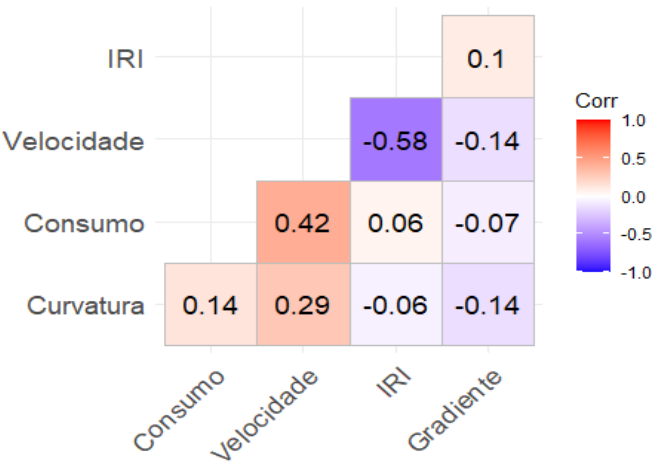
Na Figura 22, que corresponde a faixa de Volta, observam-se algumas características importantes. O Segmento 3, assim como o Segmento 2, também apresentou uma grande quantidade de problemas em sua superfície, inclusive estavam passando por serviço de manutenção. Essas ocorrências estão enfatizadas no km 9 e do km 14 ao 16, onde os maiores consumos de combustível foram registrados.

Quanto ao Segmento 4, destaca-se que nas proximidades do quilômetro 24, trata-se do lado oposto do quilômetro 14 do Segmento 1, onde havia pontos de estacionamento de caminhões. Além disso, entre os quilômetros 28 e 30, há áreas de estacionamento de caminhões que frequentemente resultam em congestionamentos, um cenário menos comum na faixa de Ida. Esses congestionamentos, juntamente com a presença de redutores de velocidade nesse intervalo, contribuem significativamente para o alto consumo de combustível observado nesse segmento, assim como os defeitos, desgaste e buracos, e as obras podem influenciar diretamente nos padrões de consumo do Segmento 3. Assim como na faixa de Ida, a de Volta indica que os quilômetros em curva não influenciam no consumo de combustível.

4.4 Relação do Consumo de Combustível com as Condições do Pavimento

Com os consumos de combustível calculados para cada segmento e de posse das informações das demais variáveis (Irregularidade, Gradiente e Curvatura), apresentadas no APÊNDICE A, elaborou-se as matrizes de correlação apresentadas nas Figura 23, 24 e 25 para as faixas de Ida, Volta e a junção das duas (Ida e Volta), respectivamente. A análise inicial dessas matrizes, utilizando a correlação de Pearson, permite uma compreensão preliminar de como diferentes características da via e condições de condução influenciam o consumo de combustível. Assim, é possível identificar as relações entre o consumo de combustível e variáveis como velocidade, curvatura, gradiente e IRI.

Figura 23 - Matriz de Correlação das variáveis para a faixa de Ida



Fonte: Autoria própria (2024).

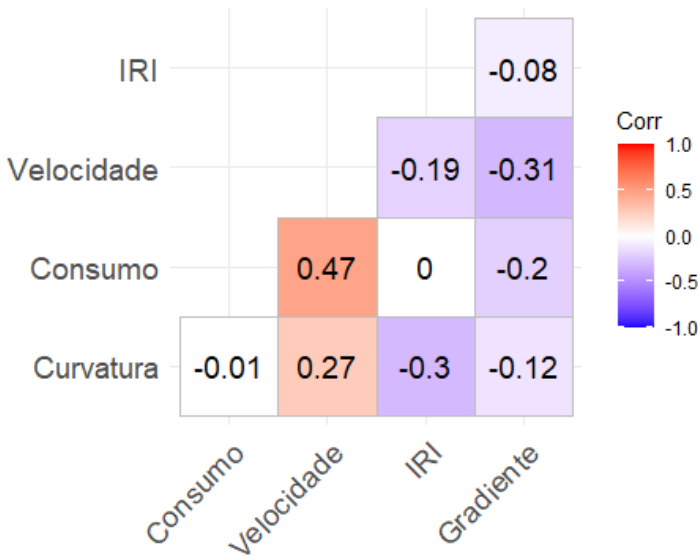
Ao analisar a matriz de correlação da faixa de Ida, observa-se que há uma correlação positiva moderada entre o consumo de combustível e a velocidade (0,42), sugerindo que, à medida que a velocidade aumenta, o consumo de combustível também tende a aumentar. A correlação entre o consumo de combustível e o IRI é muito baixa (0,06), indicando que a irregularidade da rodovia exerce uma influência mínima sobre o consumo de combustível.

Ao verificar a relação entre o consumo de combustível e o gradiente da rodovia observa-se que é, também, muito baixa e negativa (-0,07), sugerindo que esse gradiente tem uma influência baixa e negativa sobre o consumo de combustível. Embora possa parecer contra-intuitivo, essa correlação fraca pode indicar que, para o trecho estudado, a inclinação não é suficientemente variada para causar um impacto significativo no consumo de combustível.

E, por fim, existe uma correlação fraca e positiva entre o consumo de combustível e a

curvatura da rodovia (0,14), sugerindo que rodovias com maior curvatura podem levar a um aumento no consumo de combustível. Este aumento pode ser devido à necessidade de reduzir e aumentar a velocidade ao navegar por curvas, o que exige mais energia do motor e, conseqüentemente, mais combustível.

Figura 24- Matriz de Correlação das variáveis para a faixa de Volta

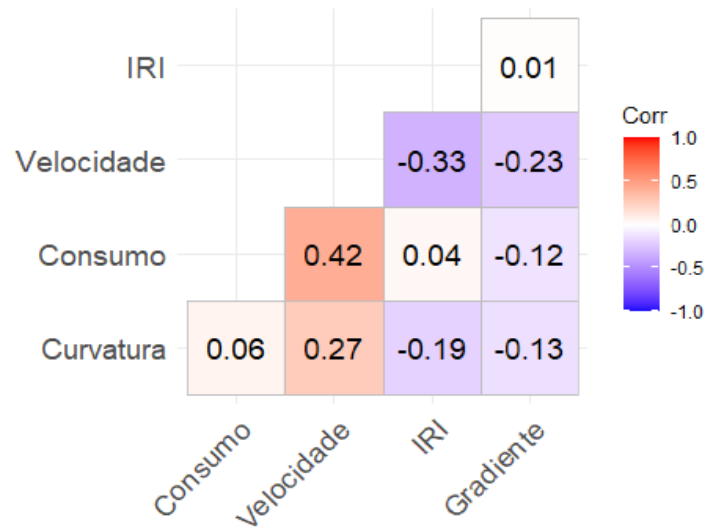


Fonte: Autoria própria (2024).

Da mesma forma prosseguiu-se com a análise da matriz de correlação da faixa de Volta, que indica que há uma correlação positiva moderada entre o consumo de combustível e a velocidade (0,47). A relação entre o consumo de combustível e a curvatura aparece um pouco mais fraca, mas ainda positiva (0,27).

A correlação entre o consumo de combustível e o IRI (0,0) mostra que a irregularidade da rodovia não tem impacto no consumo de combustível para o trecho estudado. Como mais de 80% do trecho foi classificado como bom a excelente, as condições do pavimento não alteraram o comportamento do condutor ao trafegar na via e com isso não houve influência no aumento ou redução do consumo de combustível. A relação entre o consumo de combustível e o gradiente da estrada também aparece negativa, porém um pouco mais significativa, apesar de ainda ser baixa (-0,2).

Figura 25: Matriz de Correlação faixa de Ida e Volta



Fonte: Autoria própria (2024).

Na matriz de correlação unificada para as faixas de Ida e Volta, observa-se que o resultado não diferiu muito das análises individuais dos trechos, observando uma correlação positiva moderada entre o consumo de combustível e a velocidade (0,42). Da mesma forma, a correlação entre o consumo de combustível e a curvatura (0,27) permanece fraca e positiva. A relação entre o consumo de combustível e o IRI (0,04) continua a ser muito baixa. E, finalmente, a correlação entre o consumo de combustível e o gradiente da estrada (-0,12) é baixa e negativa.

De forma geral, as faixas apresentam poucas curvas, inclinação pouco acentuada e boas condições de trafegabilidade. Essas características fazem com que o comportamento do condutor e a velocidade não sejam alterados, resultando em uma baixa influência no consumo de combustível. Ainda assim, buscando compreender e confirmar os resultados obtidos nas matrizes de correlação, realizou-se também uma análise por meio de regressão, Figura 26, que apresentou diferenças em relação à correlação inicial, que não haviam indicado uma relação relevante entre o IRI e o consumo de combustível. A regressão, realizada com base nas médias dos 4 segmentos nos dois levantamentos, demonstrou que, além da velocidade, o IRI também exerce influência no consumo de combustível, revelando informações que não haviam sido capturadas pela análise anterior.

Figura 26: Dados da Regressão do Consumo de Combustível em função das demais variáveis

Teste no Modelo 2

Hipótese nula: os parâmetros de regressão para as variáveis valem zero.
GradienteGrm, CurvaturaTotalA, Segmento
Estatística de teste: $F(3, 68) = 0,16849$, p-valor 0,91729
A exclusão de variáveis melhorou 3 de 3 critérios de informação.

Modelo 3: MQO, usando as observações 1-74
Variável dependente: Consumokml

	coeficiente	erro padrão	razão-t	p-valor
const	2,80524	2,31659	1,211	0,2299
Velocidadekmh	0,110436	0,0253409	4,358	4,34e-05 ***
IRImkm	0,837713	0,462991	1,809	0,0746 *

Média var. dependente	12,05351	D.P. var. dependente	2,098464
Soma resid. quadrados	253,2256	E.P. da regressão	1,888533
R-quadrado	0,212262	R-quadrado ajustado	0,190072
F(2, 71)	9,565740	P-valor(F)	0,000210
Log da verossimilhança	-150,5194	Critério de Akaike	307,0389
Critério de Schwarz	313,9510	Critério Hannan-Quinn	309,7962

Teste de White para a heteroscedasticidade -
Hipótese nula: sem heteroscedasticidade
Estatística de teste: LM = 7,63164
com p-valor = $P(\text{Qui-quadrado}(5) > 7,63164) = 0,17774$

Teste da normalidade dos resíduos -
Hipótese nula: o erro tem distribuição Normal
Estatística de teste: Qui-quadrado(2) = 4,76473
com p-valor = 0,092332

Fonte:

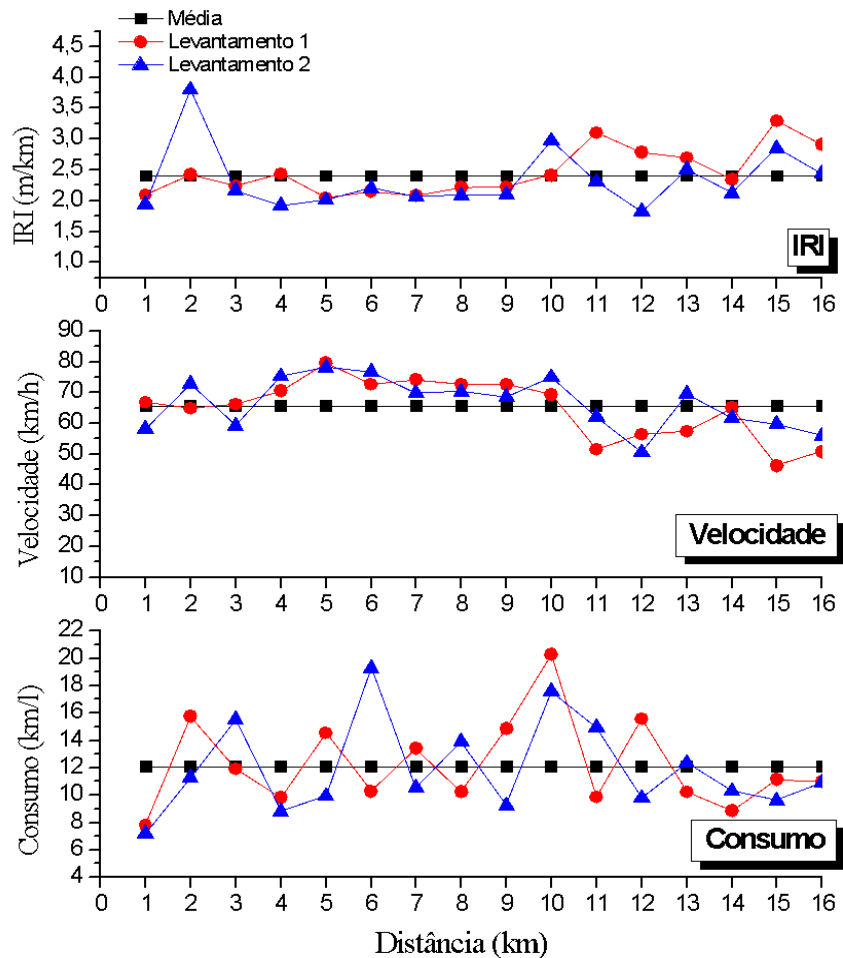
Autoria própria (2024).

A análise de regressão indicou que, embora as variáveis gradiente e curvatura não tivessem relevância estatística, o IRI e a velocidade mostraram-se influentes no consumo de combustível. A velocidade apresentou um coeficiente de 0,110436 (p-valor < 0,001), sugerindo que a cada 1 km/h de aumento, o consumo cresce em média 0,11 km/l. O IRI, com coeficiente de 0,837713 e p-valor de 0,0746, também teve impacto, indicando que irregularidades na via aumentam o consumo. O modelo final explicou 21,26% da variação no consumo, com ajustes feitos pelos critérios de Akaike e Schwarz após a exclusão das variáveis gradiente e curvatura.

Testes adicionais confirmaram a adequação do modelo, com o teste de White descartando heteroscedasticidade (p-valor de 0,17774) e o teste de normalidade dos resíduos mostrando que os erros seguem uma distribuição aproximadamente normal (p-valor de 0,09232).

Adicionalmente, com o intuito de proporcionar uma visualização quanto ao comportamento dos dados entre os dois levantamentos, as Figuras 27, 28, 29 e 30 demonstram as variações das variáveis velocidade, IRI e consumo de combustível em relação às suas médias gerais para cada um dos quatro segmentos.

Figura 27 – Variações de IRI, Velocidade e Consumo para o Segmento 1



Fonte: Autoria própria (2024).

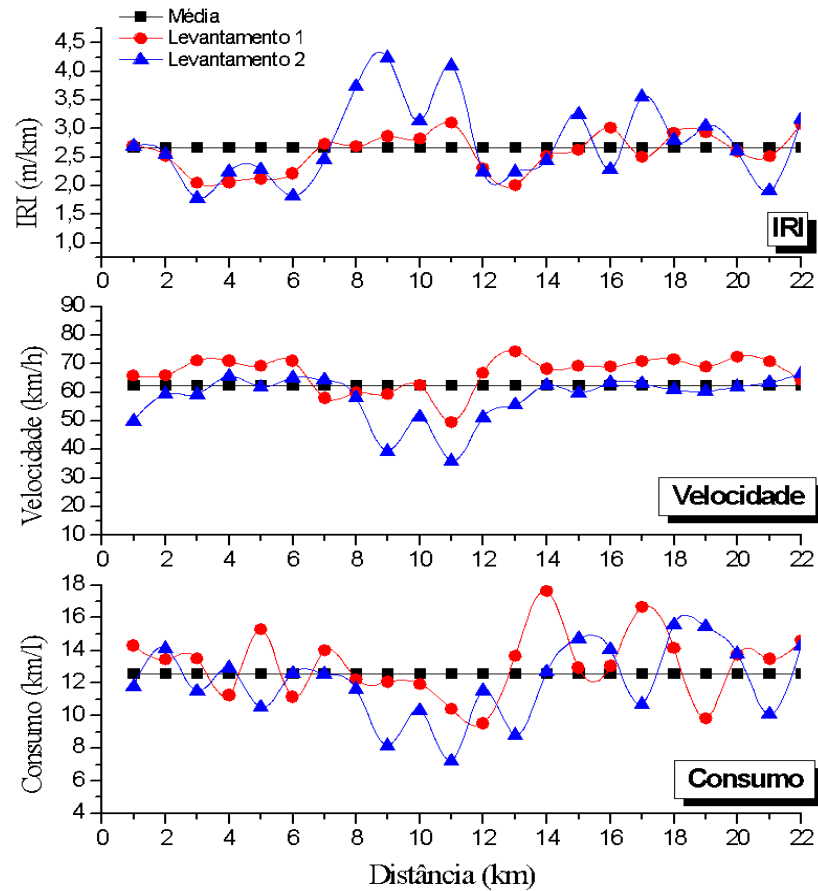
Na análise da Figura 27, observa-se que os menores consumos de combustível foram obtidos ao trafegar com uma velocidade dentro do intervalo de 70 a 80 km/h, como evidenciado nos quilômetros 6 (levantamento 2) e 10 (levantamento 1). A queda do consumo no quilômetro 6, ao comparar os dois levantamentos, não apresenta uma relação clara com os valores de IRI e de velocidade. Nesse ponto específico, não houve variação da irregularidade e apenas cerca 5 km/h da velocidade, podendo então estar relacionada a outra variável.

Por sua vez, no quilômetro 10, verifica-se uma melhor relação entre as variáveis IRI e

consumo de combustível, pois do levantamento 1 para o 2, houve uma piora no consumo e na qualidade da superfície da rodovia, enquanto a velocidade ficou dentro do intervalo de 65 a 70 km/h. No levantamento 1, mesmo com um melhor IRI, observa-se uma menor velocidade, que pode estar relacionada às condições de tráfego da via no dia do levantamento. Logo, observa-se que, do levantamento 1 para o 2, houve um aumento no consumo de combustível aliado a uma piora da qualidade da superfície. Reforçando essa relação, o levantamento 2 apresenta o pior índice da variável IRI no quilômetro 2, informando que com a piora na condição da superfície resultou em um aumento do consumo de combustível.

Os piores consumos de combustível foram detectados nos quilômetro de baixa velocidade, como pode ser observado no quilômetro 12. Segundo Thomaz (2020) essa ocorrência é esperada, pois o autor explica que velocidades muito baixas afetam a eficiência de operação do motor, assim como para velocidades acima de 80 km/h, o consumo é afetado pelo aumento da resistência aerodinâmica. Nos demais pontos, os valores de consumo parecem variar aleatoriamente em diferentes níveis de irregularidade da rodovia e velocidades dentro do intervalo ideal, 70 a 80 km/h, indicando que outros fatores podem estar influenciando o consumo de combustível além do IRI e da velocidade.

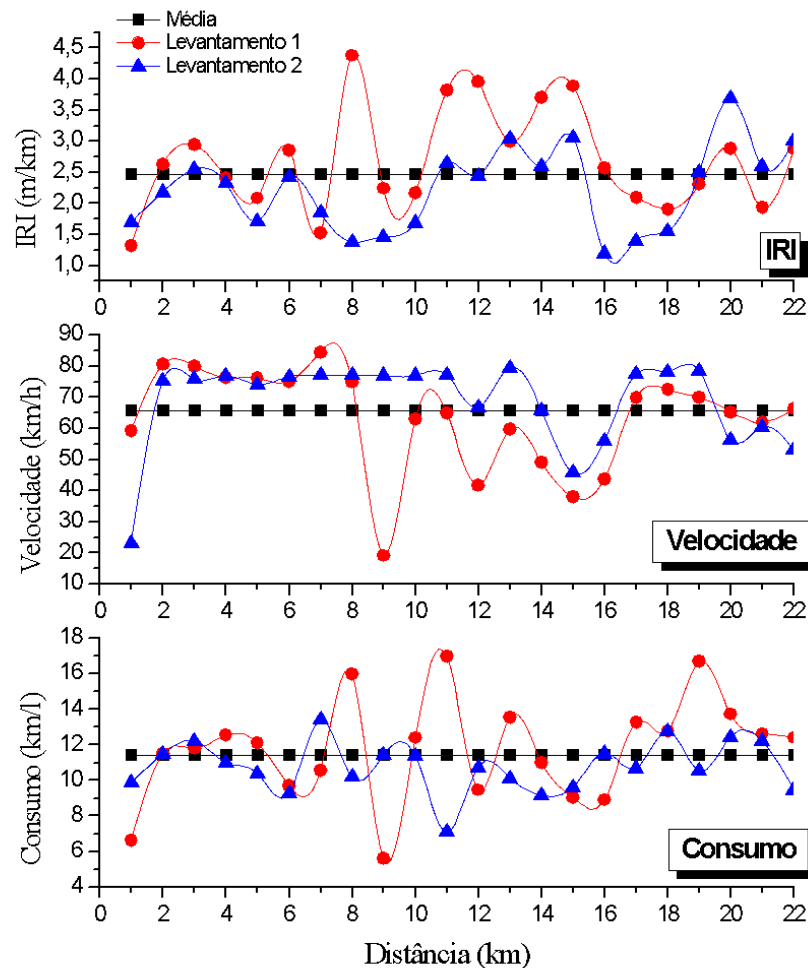
Figura 28: Variações de IRI, Velocidade e Consumo para o Segmento 2



Fonte: Autoria própria (2024).

Quanto ao comportamento da Figura 28, as relações entre as variáveis ficam visivelmente mais claras, especialmente quando se observa a interação delas entre os quilômetros 7 e 12. Nesses pontos, é perceptível que conforme o IRI aumenta há uma redução da velocidade e o aumento do consumo de combustível, comportamento dentro do esperado para o estudo. Nos quilômetros anteriores e posteriores a esses, observa-se uma estabilidade na velocidade entre os levantamentos, enquanto o consumo de combustível e o IRI continuam a exibir variações que se relacionam, conforme evidenciado nos quilômetros 4,13,16 e 17.

Figura 29: Variações de IRI, Velocidade e Consumo para o Segmento 3

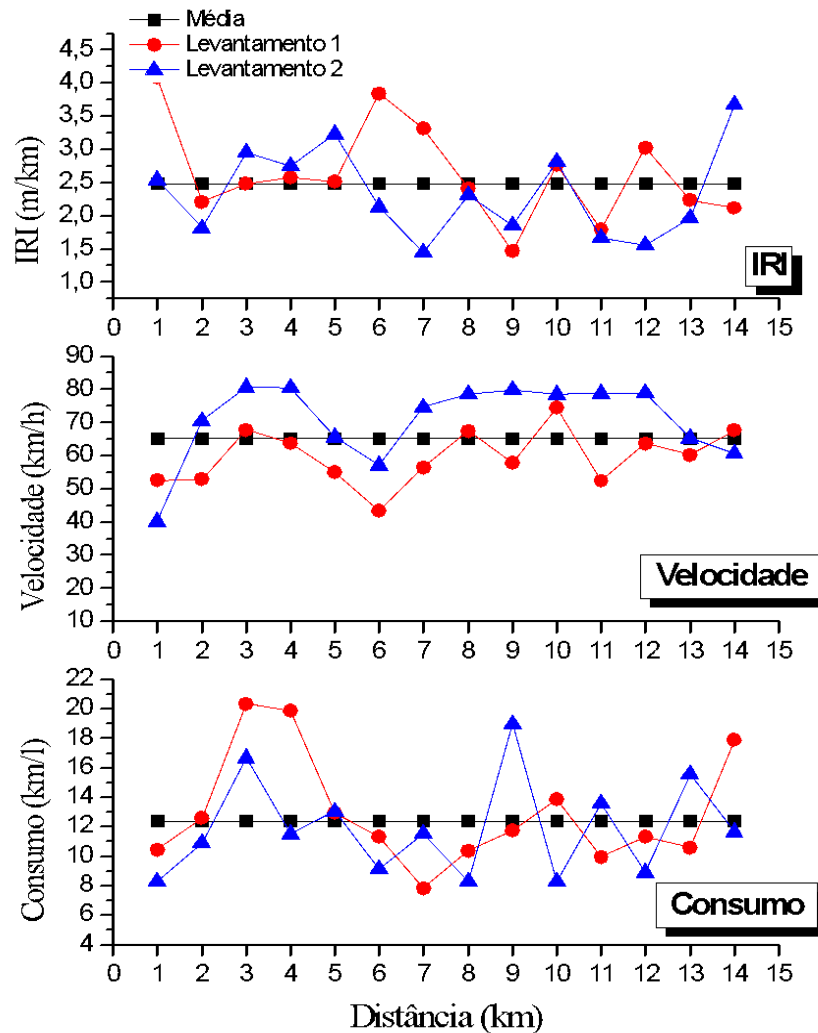


Fonte: Autoria própria (2024).

Para a Figura 29, destaca-se que, entre os dois levantamentos, o Segmento 3 passou por serviço de manutenção como operação tapa buraco e, em alguns km, recapeamento. Essa informação pode ser observada ao analisar o comportamento do IRI. Observa-se uma piora no quilômetro 7 e nos dois últimos, indicando os pontos onde os serviços de manutenção ainda não haviam sido realizados até o levantamento 2. Conforme esperado, a realização da manutenção da via resultou em uma melhoria na trafegabilidade do trecho entre os quilômetros 2 e 11, permitindo manter uma velocidade dentro do intervalo de 70 a 80 km/h.

É importante destacar também o quilômetro 9 durante o levantamento 1, que registrou o menor consumo de combustível (5 km/l) do Segmento 1. Nota-se que esse fato está correlacionado a uma velocidade muito baixa (20 km/h) nesse mesmo ponto, o que afeta a eficiência de operação do motor e resulta em um consumo mais elevado de combustível. Evidenciando uma relação entre velocidade e consumo de combustível.

Figura 30: Variações de IRI, Velocidade e Consumo para o Segmento 4



Fonte: Autoria própria (2024)

Por fim, com base na Figura 30, constata-se um comportamento semelhante ao apresentado para o Segmento 1, indicando que não há uma correlação clara entre as variáveis de consumo de combustível, IRI e velocidade ao longo do Segmento 4. A variação do consumo de combustível pode estar relacionada a outros fatores, tais como redutores de velocidade, tráfego, projeto geométrico da rodovia, entre outros.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar como as características da via e a irregularidade longitudinal do pavimento influenciam o consumo de combustível. A análise foi conduzida em um trecho experimental da BR-116, onde foram investigadas as influências das irregularidades da superfície, gradiente e curvatura no consumo de combustível.

Ao verificar a relação entre as irregularidades da superfície e o consumo de combustível, concluiu-se que, embora as irregularidades tenham um impacto no consumo, como foi observado na análise de regressão, esse efeito foi menor do que o da velocidade dos veículos. A velocidade mostrou-se o fator mais relevante para o aumento do consumo de combustível, sendo o principal elemento a ser gerenciado para otimizar o desempenho veicular.

Quanto a influência do gradiente e da curvatura no consumo de combustível, as análises de correlação e regressão indicaram que essas variáveis não apresentaram relevância significativa para o consumo nos segmentos avaliados. Ainda assim, em alguns trechos, as variações de inclinação e curvatura contribuíram para um consumo mais elevado, sugerindo que, em condições específicas, esses fatores podem influenciar a eficiência dos veículos.

A irregularidade da superfície apresentou influência sobre o consumo de combustível em pontos com variações excessivas, onde as irregularidades exigiam maiores acelerações por parte do motorista para manter a velocidade constante. Isso resultou em um aumento no consumo, especialmente nos segmentos mais deteriorados. Em contrapartida, o gradiente e a curvatura, para o trecho analisado, não mostraram uma influência significativa. No entanto, essa conclusão deve ser considerada específica para o cenário estudado, uma vez que, em trechos com maior inclinação e curvatura, observou-se um aumento no consumo, sugerindo que essas características podem ter um impacto mais acentuado em condições mais extremas.

As principais contribuições desta pesquisa incluem a comprovação de que, embora o gradiente e a curvatura não tenham tido impacto estatístico relevante, a velocidade e a irregularidade superficial são fatores que influenciam o consumo de combustível, sendo que a velocidade se destaca de forma mais relevante. Assim, como estratégias para otimizar o consumo de combustível em diferentes segmentos incluem a gestão da velocidade do tráfego. Organizar os pontos de estacionamento para caminhões nos Segmentos 1 e 4, onde foram identificados como os principais fatores que influenciam a variação da velocidade, juntamente com os redutores de velocidade, contribuirá para a redução do custo com combustível nesses segmentos. Além disso, manter a qualidade da conservação nos Segmentos 2 e 3, onde defeitos na superfície e serviços de manutenção foram os principais intervenientes da variação da

velocidade, evitará estratégias de manutenção prolongadas e interferências no tráfego, auxiliando na redução do consumo de combustível nesses segmentos e contribuindo para uma operação mais eficiente dos veículos.

Destaca-se que, devido à ausência do sensor MAF, o cálculo do consumo foi realizado utilizando outros métodos e expressões. Além disso, houve uma dificuldade em manter a velocidade constante, o que pode ocasionar alteração no consumo médio final.

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar estudos em regiões com maiores curvaturas e gradientes, a fim de verificar de forma mais aprofundada o impacto dessas variáveis no consumo de combustível. Investigar essas áreas pode proporcionar uma melhor compreensão de como a sinuosidade e a inclinação da estrada influenciam o consumo de combustível e a eficiência dos veículos, especialmente em condições onde a curvatura e o gradiente são fatores mais predominantes.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, F. S.; OLIVEIRA, R. F. S. de. **Avaliação de perfil longitudinal de pavimento de concreto de cimento Portland com perfilômetro inercial a laser**. Transportes, v. 25, n. 1, p. 82–92, 2017. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1138>. Acesso em: 25 set. 2023.
- ALBUQUERQUE, V. A. M de. **Estudo do consumo de combustível através da comparação dos modelos mecanísticos-empíricos com scanner OBD II**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- ALMEIDA, L. C. **Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- ALMEIDA, R de. D. **Sistema de análise de consumo de combustível de veículos automotores**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Formiga, 2017.
- ARAÚJO, M. P. S.; BANDEIRA, R. A. M.; CAMPOS, V. B. G. **Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise comparativa entre autônomos e empresas**. Journal of Transport Literature, Manaus, v. 8, n. 4, pp. 187-226, abr. 2014.
- ARRIVABENI, B. S. **Análise técnica, econômica e socioambiental da manutenção de estradas não pavimentadas utilizando o digital twin**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.
- BARELLA, R. M. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BENEVIDES, S. A. S. **Modelos de Desempenho de Pavimentos Asfálticos para um Sistema de Gestão de Rodovias Estaduais do Ceará**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- BENNETT, C. R.; GREENWOOD, I. D. **Modeling Road User and Environmental Effects in HDM-4**. Birmingham: World Road Association (PIARC), 2003. v. 7.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, **Manual de gerência de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011. (IPR. Publ. 745).
- CARVALHO, D. C. de; ASSUNÇÃO, L. T. de; JÚNIOR, N. F. C. R. **Análise do desempenho funcional dos serviços de levantamento de irregularidade longitudinal – IRI – na rodovia BR 060/GO**. In: 32º ANPET: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 32., 2018, Gramado, RS. Anais[...]. Gramado: ANPET, 2018.
- CHATTI, K.; ZAABAR, I. **Estimando os efeitos da condição do pavimento nos custos operacionais do veículo**. Washington DC: Relatório NCHRP 720, 2012.
- CNT (Brasil). **Relatório Gerencial: Pesquisa CNT de Rodovias 2017**. 21 ed. Brasília, 2017.

CNT (Brasil). **Relatório Gerencial: Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. 22 ed. Brasília, 2019.

CNT (Brasil). **Relatório Gerencial: Pesquisa CNT de Rodovias 2022**. 25 ed. Brasília, 2022.

COSTA, E. M. C. **Avaliação da irregularidade longitudinal em pavimento flexível por meio do uso de aplicativo para smartphone**. In: 33º ANPET: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 33., 2019, Balneário Camboriú, SC. Anais[...]. Balneário Camboriú: ANPET, 2019.

DANCEY, Christine; REIDY, John. **Estatística sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre: Artmed, 2006.

DNIT. Diretoria Executiva, **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006. (IPR 720)

DNIT. Diretoria Executiva. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011. (IPR 745)

ESPINAL, A.; FLÓREZ, J.; LÓPEZ, J. **Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos**. Revista P+L, Caldas, v. 5, n. 1, p. 95-104, jan.-jul. 2010.

FELIPE, L. **Fatores que aumentam o consumo de combustível da frota**, 2021. Disponível em: <https://www.prologapp.com/blog/consumo-de-combustivel-da-frota/>. Acesso em: 22 out. 2023.

FERNANDES JR., J. L.; BARBOSA, R. E. **Estimativa das cargas dinâmicas dos veículos rodoviários que atuam sobre os pavimentos e pontes**. Transportes, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, nov. 2000. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/187>. Acesso em: 15 set. 2023.

FERNANDES, F. M. L. **Software de gerenciamento de pavimentos aplicado a vias urbanas de cidades de pequeno a médio porte**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

FONTES, V. G.; FIGUEIREDO, J. A. O de. **Econodrive: computador de bordo automotivo em plataforma móvel IOS**. Passo Fundo: IFSUL, 2014.

GARCÍA, D. S. P. **Método para análise da consistência geométrica de rodovias brasileiras de pista simples**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

HIRPAHUANCA, D. L. **Determinación y Comparación de la Regularidad Superficial del Pavimento de la Carretera Cusco-Urcos, Usando Teléfonos Inteligentes y el Rugosímetro de MERLIN**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidad Andina del Cusco, 2016.

LAMM, R.; PSARIANOS, B.; MAILAENDER, T. **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1999.

LIGHTNER, B. D. **AVR-Based Fuel Consumption Gauge**. *Circuit Cellar*, East Hartford, v. 1, n. 183, p. 59-67, out. 2005.

LIMA, M. **O Custeio do Transporte Rodoviário**. São Paulo, 2001. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/o-custeio-do-transporte-rodoviario/>. Acesso em: 21 out. 2023.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. [S.l.]: Interciência, 2015, 640 p.

MELO, R. P. de. **Análise dinâmica de veículos articulados com carga líquida**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2018.

MURTA, B. J. **Impacto do estilo de condução no consumo de combustível e nas emissões veiculares**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

NASCIMENTO, R. A.; ALBUQUERQUE, F. S. **Modelos de previsão de irregularidade longitudinal após manutenção de rodovias**. In: 33º ANPET: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 33., 2019, Balneário Camboriú, SC. Anais[...]. Balneário Camboriú: ANPET, 2019.

PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. **Pavimentação rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis**. 2 ed. Rio de Janeiro/RJ: Copiarte, 2010.

SANTOS, T.S. **Uso da lógica fuzzy para determinação de importâncias das categorias de avaliação de desempenho de rodovias concedidas**: Scientific Figure on ResearchGate, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Fluxograma-de-um-sistema-de-gerencia-de-pavimentos_fig1_361634480. Acesso em: 19 out. 2023.

SAYERS, M. W.; KARAMILHAS, S. M. **The Little Book of Profiling**. Basis information about measuring and interpreting road profiles. Ann Arbor: The Regents of the University of Michigan, 1998.

THOMAZ, F. **Estudo numérico do gerenciamento térmico de um motor de combustão interna com foco na maximização do desempenho veicular**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

WANKE, P. **Logística e transporte de cargas no Brasil: produtividade e eficiência no Século XXI**. São Paulo: Atlas, 2010.

WOLFRAM, A. **1 mpg in km/l**. [S.l.], 2023. Disponível em <http://www.wolframalpha.com/input/?i=1+mpg+in+km%2Fl>. Acesso em: 15 out. 2023.

APÊNDICE A – VALORES MÉDIOS ENTRE OS DOIS LEVANTAMENTOS NOS QUATRO SEGMENTOS

Tabela 4: Valores médios por quilômetro no Segmento 1

Km	Consumo (km/l)	Velocidade (km/h)	IRI (m/km)	Gradiente Gr (m)	Curvatura Total (°)
1	7,48	62,46	2,01	0,0273	0,0708
2	13,52	68,83	3,11	0,0058	0,1419
3	13,72	62,74	2,20	-0,0252	0,0956
4	9,33	72,89	2,18	0,0096	0,0000
5	12,24	78,83	2,03	-0,0079	0,0614
6	14,78	74,68	2,18	0,0140	0,0367
7	11,98	72,00	2,07	-0,0184	0,0000
8	12,09	71,48	2,15	-0,0124	73,3383
9	12,05	70,60	2,16	0,0024	45,5092
10	18,93	72,09	2,69	0,0006	9,4208
11	12,38	56,76	2,70	0,0077	7,2961
12	12,68	53,44	2,30	0,0194	0,1139
13	11,27	63,43	2,60	0,0088	0,0828
14	9,58	63,35	2,23	-0,0045	0,1142
15	10,39	52,91	3,08	-0,0073	0,0733
16	10,95	53,37	2,68	0,0070	0,0000
Valores Médios	12,09	65,62	2,40	0,0017	8,5222

Tabela 5: Valores médios por quilômetro no Segmento 2

Km	Consumo (km/l)	Velocidade (km/h)	IRI (m/km)	Gradiente Gr (m)	Curvatura Total (°)
17	13,04	57,82	2,70	-0,0059	0,0000
18	13,78	62,70	2,54	0,0092	0,0000
19	12,49	65,19	1,92	-0,0031	0,1236
20	12,09	68,26	2,15	0,0034	0,0000
21	12,89	65,57	2,20	0,0003	0,0103
22	11,87	68,06	2,02	-0,0078	0,0000
23	13,27	61,13	2,60	-0,0029	0,0200
24	11,92	59,00	3,22	-0,0107	0,0275
25	10,12	49,42	3,55	0,0061	0,0000
26	11,12	56,92	2,98	0,0076	0,0544
27	8,81	42,76	3,60	-0,0014	0,0000
28	10,52	58,98	2,27	-0,0013	0,0542
29	11,24	64,95	2,13	-0,0128	0,0000
30	15,15	65,29	2,48	0,0076	0,0250
31	13,83	64,42	2,94	-0,0050	0,0000
32	13,54	66,21	2,65	-0,0108	12,2500
33	13,67	66,98	3,03	-0,0042	34,3514
34	14,84	66,18	2,86	0,0110	33,1011
35	12,63	64,56	2,99	-0,0050	21,7553
36	13,77	67,22	2,61	0,0020	0,0000
37	11,77	67,05	2,21	-0,0070	46,7806
38	14,44	65,40	3,12	0,0167	14,1797
Valores Médios	12,58	62,46	2,67	-0,0006	7,3970

Tabela 6: Valores médios por quilômetro no Segmento 3

Km	Consumo (km/l)	Velocidade (km/h)	IRI (m/km)	Gradiente Gr (m)	Curvatura Total (°)
1	8,24	41,22	1,51	0,0167	14,1797
2	11,50	77,94	2,40	-0,0070	46,7806
3	12,01	77,93	2,74	0,0020	0,0000
4	11,78	76,65	2,37	-0,0050	21,7553
5	11,24	75,12	1,90	0,0110	33,1011
6	9,49	75,78	2,64	-0,0042	34,3514
7	11,98	80,76	1,69	-0,0108	12,2500
8	13,09	75,97	2,88	-0,0050	0,0000
9	8,51	48,05	1,85	0,0076	0,0250
10	11,88	70,03	1,93	-0,0128	0,0000
11	12,03	71,02	3,23	-0,0013	0,0542
12	10,10	54,21	3,20	-0,0014	0,0000
13	11,82	69,57	3,02	0,0076	0,0544
14	10,09	57,40	3,15	0,0061	0,0000
15	9,32	41,93	3,47	-0,0107	0,0275
16	10,21	49,85	1,88	-0,0029	0,0200
17	11,97	73,63	1,75	-0,0078	0,0000
18	12,75	75,32	1,73	0,0003	0,0103
19	13,61	74,25	2,40	0,0034	0,0000
20	13,09	60,73	3,29	-0,0031	0,1236
21	12,42	61,17	2,27	0,0092	0,0000
22	10,93	59,65	2,94	-0,0059	0,0000
Valores Médios	11,42	65,80	2,50	-0,0006	7,3970

Tabela 7: Valores médios por quilômetro no Segmento 4

Km	Consumo (km/l)	Velocidade (km/h)	IRI (m/km)	Gradiente Gr (m)	Curvatura Total (°)
23	9,36	46,37	3,31	0,0070	0,0000
24	11,74	61,73	2,01	-0,0073	0,0733
25	18,49	74,26	2,72	-0,0045	0,1142
26	15,70	72,07	2,66	0,0088	0,0828
27	13,00	60,32	2,88	0,0194	0,1139
28	10,24	50,27	2,99	0,0077	7,2961
29	9,69	65,57	2,38	0,0006	9,4208
30	9,33	72,98	2,36	0,0024	45,5092
31	15,37	68,83	1,66	-0,0124	73,3383
32	11,08	76,47	2,79	-0,0184	0,0000
33	11,77	65,62	1,73	0,0140	0,0367
34	10,11	71,26	2,29	-0,0079	0,0614
35	13,08	62,82	2,10	0,0096	0,0000
36	14,77	64,19	2,90	-0,0252	0,0956
Valores Médios	12,41	65,19	2,48	-0,0004	9,7244

ANEXO A – LEVANTAMENTO DO TRECHO LOCALIZADO NA BR-116

Tabela 8: Dados obtidos no Levantamento 1 para o Segmento 1

km	12-0	13-0	CLASSIF.	LAT.	LONG.	IRI (m/km)	15-0	11-0
	0C - RPM Motor	0D - Velocidad del Vehículo					0F - Temperatura Entrada de Aire	0B - Presión Absoluta del Múltiple de Entrada
1	1671,531	66,72	BOM	-4,2125	-38,4733	2,09	35,003367	85,87205387
2	1566,148	64,81	BOM	-4,2215	-38,4760	2,42	35,79238754	53,7266436
3	1368,979	66,20	BOM	-4,2321	-38,4792	2,23	36,06707317	60,70426829
4	2232,994	70,60	BOM	-4,2412	-38,4820	2,43	34,84732824	73,7519084
5	1663,478	79,61	BOM	-4,2507	-38,4849	2,04	35	64,3526971
6	1516,509	72,63	BOM	-4,2598	-38,4877	2,15	35,16460905	80,35390947
7	1616,963	74,15	BOM	-4,2692	-38,4906	2,08	35,15789474	61,98785425
8	1587,387	72,65	BOM	-4,2787	-38,4935	2,21	34,38610039	83,04633205
9	1639,442	72,58	BOM	-4,2883	-38,4964	2,22	34,77220077	57,11969112
10	1589,728	69,30	BOM	-4,2963	-38,5008	2,41	34,64728682	45,28682171
11	1403,817	51,58	REGULAR	-4,3051	-38,5018	3,10	34,85422741	68,70553936
12	1398,904	56,33	BOM	-4,3133	-38,4977	2,78	34,75077882	49,93457944
13	1492,978	57,36	BOM	-4,3201	-38,4915	2,69	34,39873418	71,00632911
14	1465,058	65,01	BOM	-4,3269	-38,4855	2,34	34,12043796	85,98905109
15	1530,551	46,16	REGULAR	-4,3342	-38,4797	3,30	34,37837838	56,30540541
16	1409,024	50,77	BOM	-4,3408	-38,4737	2,91	34,62130178	60,73076923

Tabela 9: Dados obtidos no Levantamento 1 para o Segmento 2

km	12-0	13-0	CLASSIF.	LAT.	LONG.	IRI (m/km)	15-0	11-0
----	------	------	----------	------	-------	------------	------	------

	0C - RPM Motor	0D - Velocidad del Vehículo					0F - Temperatura Entrada de Aire	0B - Presión Absoluta del Múltiple de Entrada
17	1369,23	49,43217666	BOM	-4,3475	-38,4679	2,705419029	34,76538462	61,33461538
18	1358,497	59,43870968	BOM	-4,3545	-38,4619	2,517025433	34,92509363	64,82022472
19	1408,681	59,26837061	EXCELENTE	-4,3617	-38,45586	2,053118933	35	69,02734375
20	1411,549	65,07843137	BOM	-4,3689	-38,4496	2,064504726	34,88636364	79,09469697
21	1545,352	61,89206349	BOM	-4,3756	-38,4438	2,124550159	34,96	61,196
22	1458,628	65,0730897	EXCELENTE	-4,3833	-38,4372	2,217028941	34,82962963	81,38148148
23	1454,137	64,44771242	BOM	-4,3906	-38,4309	2,734350814	34,24767802	55,02167183
24	1428,48	57,72615385	BOM	-4,3975	-38,4250	2,687186274	34,22483221	63,12080537
25	1447,248	40,44533333	BOM	-4,404	-38,4192	2,865134083	34,01038062	65,90657439
26	1503,413	51,63036304	BOM	-4,4114	-38,4131	2,822411892	34,13605442	69,11564626
27	1359,063	33,81318681	REGULAR	-4,4182	-38,4072	3,111976514	33,73684211	60,80994152
28	1439,835	51,02492212	BOM	-4,4258	-38,400	2,294231457	33,71830986	83,68661972
29	1552,725	56,21602787	BOM	-4,4334	-38,3941	2,011900716	34,15209125	69,06844106
30	1362,952	62,15172414	BOM	-4,4406	-38,3879	2,521476592	34,49822064	51,51245552
31	1347,214	59,79288026	BOM	-4,4477	-38,3818	2,635330247	34,11583012	70,68725869
32	1369,21	63,23624595	REGULAR	-4,4546	-38,3759	3,011190987	34	68,53992395
33	1456,633	63	BOM	-4,4624	-38,3692	2,4948706	34,4964539	56,59574468
34	1336,672	60,81639344	BOM	-4,4694	-38,3621	2,92274758	34,07407407	65,91851852
35	1349,205	60,28846154	BOM	-4,4780	-38,3591	2,933374292	34,03921569	84,54117647
36	1349,94	62,04983389	BOM	-4,4882	-38,360	2,604337648	33,96527778	66,53819444
37	1494,133	63,36177474	EXCELENTE	-4,4978	-38,3608	2,513178303	33,81343284	66,45895522
38	1376,199	66,02749141	BOM	-4,5051	-38,3589	3,081438096	34,12765957	59,08510638

Tabela 10: Dados obtidos no Levantamento 2 para o Segmento 1

km	12-0	13-0	CLASSIF.	LAT.	LONG.	IRI (m/km)	15-0	11-0
	0C - RPM Motor	0D - Velocidad del Vehículo					0F - Temperatura Entrada de Aire	0B - Presión Absoluta del Múltiple de Entrada
1	1671,531	58,19665	EXCELENTE	-4,2089	-38,472	1,92581	34,8954	90,66527
2	1593,57	72,84838	BOM	-4,2181	-38,475	3,80418	35,23827	75,85199
3	1377,458	59,27778	BOM	-4,2267	-38,478	2,16642	35,61806	51,90972
4	1959,946	75,18992	EXCELENTE	-4,2358	-38,48	1,92176	35,2093	81,36434
5	1702,704	78,0625	BOM	-4,2446	-38,483	2,01327	34	85,92083
6	1521,758	76,74167	BOM	-4,2534	-38,486	2,2061	34,725	48,8375
7	1624,563	69,8622	BOM	-4,2621	-38,488	2,061	34,29921	75,98819
8	1572,652	70,30037	BOM	-4,2712	-38,491	2,09616	34,58608	59,89377
9	1663,438	68,60956	BOM	-4,2799	-38,494	2,0983	33,84064	83,13546
10	1590,307	74,88583	BOM	-4,2887	-38,497	2,97166	34,27559	49,92913
11	1400,305	61,94576	BOM	-4,2967	-38,501	2,29481	34,13559	55,2678
12	1395,37	50,55525	EXCELENTE	-4,3056	-38,502	1,82617	34,19337	69,05801
13	1494,259	69,49421	BOM	-4,3136	-38,498	2,50028	34	70,26641
14	1474,178	61,68841	BOM	-4,3203	-38,491	2,11921	34,21739	75,89855
15	1530,551	59,66327	BOM	-4,3272	-38,485	2,8539	33,82993	75,38435
16	1434,771	55,95925	BOM	-4,3345	-38,48	2,44209	34,18495	66,70846

Tabela 11: Dados obtidos no Levantamento 2 para o Segmento 2

Km	12-0	13-0	CLASSIF.	LAT.	LONG.	IRI (m/km)	15-0	11-0
	0C - RPM Motor	0D - Velocidad del Vehículo					0F - Temperatura Entrada de Aire	0B - Presión Absoluta del Múltiple de Entrada
17	1371,087	49,86517	BOM	-4,341	-38,474	2,69223	34,88764	59,2191
18	1358,497	59,43871	BOM	-4,348	-38,468	2,55228	34,93548	57,94194
19	1411,446	59,29373	EXCELENTE	-4,3549	-38,462	1,78108	34,967	69,15512
20	1417,626	65,57692	BOM	-4,3619	-38,456	2,23897	34,8951	67,1049
21	1553,823	61,82653	BOM	-4,3688	-38,45	2,28399	34,55782	71,29252
22	1440,407	65,13333	EXCELENTE	-4,3758	-38,444	1,8242	34,52593	65,21111
23	1453,159	64,27076	BOM	-4,3825	-38,438	2,46321	34,70397	65,67509
24	1435,406	58,15493	BOM	-4,3897	-38,432	3,74029	34,66197	67,05352
25	1443,526	39,45786	REGULAR	-4,3966	-38,426	4,24364	34,47836	62,01595
26	1478,223	51,26257	BOM	-4,4037	-38,42	3,12923	34,86592	60,02235
27	1358,66	36,0083	REGULAR	-4,4106	-38,414	4,08509	35,15975	58,11826
28	1449,762	51,1437	BOM	-4,4174	-38,408	2,24019	35,29326	59,11144
29	1555,99	55,64746	BOM	-4,4244	-38,402	2,24397	35,62712	77,26441
30	1364,539	62,42804	BOM	-4,4314	-38,396	2,44268	36,1107	67,37638
31	1347,98	59,68562	BOM	-4,4382	-38,39	3,25556	36,71906	56,37458
32	1371,145	63,43599	BOM	-4,4451	-38,384	2,27876	36,9654	61,84775
33	1456,621	63,06711	REGULAR	-4,4522	-38,378	3,55788	36,3557	75,57383
34	1335,773	60,88814	BOM	-4,4592	-38,372	2,80058	36,49831	54,84407
35	1349,295	60,23179	BOM	-4,466	-38,366	3,04112	36,80464	54,74834
36	1350,641	61,98221	BOM	-4,473	-38,361	2,61599	36,64057	62,76868
37	1505,339	63,31022	EXCELENTE	-4,4818	-38,359	1,91399	36,18248	79,70073
38	1372,636	66,57955	BOM	-4,4909	-38,362	2,63928	36,10606	60,9053

Tabela 12: Dados obtidos no Levantamento 1 para o Segmento 3

km	12-0	13-0	CLASSIF.	LAT.	LONG.	IRI (m/km)	15-0	11-0
	0C - RPM Motor	0D - Velocidad del Vehículo					0F - Temperatura Entrada de Aire	0B - Presión Absoluta del Múltiple de Entrada
1	1951,43	59,2924	EXCELENTE	-4,4967	-38,361	1,3196	50,8638	90,2558
2	1829,99	80,6169	BOM	-4,4853	-38,36	2,62693	50,2339	75,0576
3	1737,91	80,034	BOM	-4,4753	-38,36	2,93943	49,2792	76,4528
4	1754,02	76,3529	BOM	-4,4671	-38,365	2,40529	48,8745	67,7255
5	1551,9	76,0962	BOM	-4,4602	-38,371	2,0852	47,9077	78,9692
6	1738,42	75	BOM	-4,4523	-38,378	2,8553	47,2327	86,4145
7	1724,69	84,416	EXCELENTE	-4,445	-38,384	1,52569	46,2479	89,8445
8	1525,17	74,786	REGULAR	-4,4378	-38,39	4,37683	46,4669	59,4708
9	1129,9	19,0922	BOM	-4,4309	-38,396	2,24097	47,2055	58,4287
10	1374,84	63,0538	BOM	-4,424	-38,402	2,16777	47,9615	72,0423
11	1310,09	64,938	BOM	-4,417	-38,408	3,81626	47,9635	56,8978
12	1340,05	41,6699	REGULAR	-4,4102	-38,414	3,95733	48	63,9831
13	1357,88	59,6305	BOM	-4,4032	-38,42	2,99516	48	63,1525
14	1380,06	49,043	BOM	-4,3961	-38,426	3,70631	47,8387	62,9382
15	1320,49	38,0445	BOM	-4,3892	-38,432	3,88515	47,9555	62,1604
16	1421,96	43,6557	BOM	-4,3823	-38,438	2,56972	48	67,1392
17	1434,66	69,8421	BOM	-4,375	-38,444	2,09259	48,0752	71,5414
18	1503,72	72,4134	EXCELENTE	-4,3679	-38,451	1,90505	48	73,5787
19	1424,59	69,996	BOM	-4,361	-38,456	2,30484	47,9595	57,332
20	1386,8	65,2132	BOM	-4,3541	-38,462	2,87827	47,9612	66,7442
21	1364,49	61,8986	EXCELENTE	-4,3472	-38,468	1,93701	47,0874	69,8427
22	1418,52	66,3	BOM	-4,3402	-38,474	2,87567	46,9593	73,1889

Tabela 13: Dados obtidos no Levantamento 1 para o Segmento 4

km	12-0	13-0	CLASSIF.	LAT.	LONG.	IRI (m/km)	15-0	11-0
	0C - RPM Motor	0D - Velocidad del Vehículo					0F - Temperatura Entrada de Aire	0B - Presión Absoluta del Múltiple de Entrada
23	1449,51	52,6427	REGULAR	-4,3331	-38,48	4,07853	46,48991354	67,40634006
24	1333,64	52,9344	BOM	-4,3263	-38,486	2,20861	46,25	61,121875
25	1375,84	67,8023	BOM	-4,3195	-38,492	2,47748	46,68821293	47,04942966
26	1355,95	63,7036	BOM	-4,3127	-38,498	2,57376	47	45,87857143
27	1340,47	55,0394	BOM	-4,3042	-38,502	2,51516	46,6030303	61,49090909
28	1313,85	43,4289	BOM	-4,2956	-38,5	3,8449	46,19035533	56,5177665
29	1738,75	56,5137	BOM	-4,2871	-38,496	3,31162	45,72948328	80,18844985
30	1653,91	67,3903	BOM	-4,2784	-38,493	2,41321	45,11152416	75,81040892
31	1479,02	57,9148	EXCELENTE	-4,2694	-38,491	1,46644	45,36065574	64,32131148
32	1606,08	74,4756	BOM	-4,2606	-38,488	2,76247	45,04444444	64,49333333
33	1477,87	52,4406	EXCELENTE	-4,2515	-38,485	1,79616	44,75524476	68,7972028
34	1663,36	63,6405	BOM	-4,2425	-38,482	3,02353	44,25619835	65,14049587
35	1500,68	60,2814	BOM	-4,2337	-38,48	2,23804	44,78354978	73,16017316
36	1471,41	67,7269	BOM	-4,225	-38,477	2,11658	45,27777778	49,71296296

Tabela 14: Dados obtidos no Levantamento 2 para o Segmento 3

	12-0	13-0	CLASSIF.	LAT.	LONG.	IRI (m/km)	15-0	11-0
	0C - RPM Motor	0D - Velocidad del Vehículo					0F - Temperatura Entrada de Aire	0B - Presión Absoluta del Múltiple de Entrada
1	1230,87	23,14285714	EXCELENTE	-4,4974	-38,361	1,70007	46,84543326	71,60187354
2	1678,51	75,26556017	BOM	-4,4878	-38,361	2,17856	47,48962656	83,74688797
3	1620,23	75,82644628	BOM	-4,479	-38,359	2,54296	46,96694215	86,47107438
4	1583,59	76,95454545	BOM	-4,4702	-38,362	2,33188	46,4214876	65,48760331
5	1515,2	74,14396887	EXCELENTE	-4,4636	-38,368	1,71004	46,30350195	79,10116732
6	1703,04	76,56870229	BOM	-4,456	-38,375	2,42573	45,61450382	86,38931298
7	1745,71	77,10820896	EXCELENTE	-4,4482	-38,382	1,85772	44,92910448	90,89552239
8	1725	77,16165414	EXCELENTE	-4,4401	-38,388	1,37506	44,88345865	65,80827068
9	1780,88	77,01459854	EXCELENTE	-4,432	-38,395	1,46558	44,09489051	85,79927007
10	1724,83	77	EXCELENTE	-4,4236	-38,403	1,68707	43,99652778	77,28819444
11	1719,55	77,10355987	BOM	-4,4154	-38,41	2,64006	43,64401294	64,76699029
12	1928,27	66,74285714	BOM	-4,4078	-38,416	2,44203	42,83571429	73,28214286
13	1744,77	79,51162791	BOM	-4,4054	-38,418	3,03913	43,48837209	57,24418605
14	1622,3	65,75751073	BOM	-4,3938	-38,428	2,59997	42,88841202	77,07939914
15	1484,95	45,81323877	BOM	-4,3868	-38,434	3,06008	42,59810875	67,96926714
16	1425,1	56,04682274	EXCELENTE	-4,3797	-38,44	1,1959	43	77,20735786
17	1716,87	77,41463415	EXCELENTE	-4,3725	-38,447	1,39801	43,71544715	73,67073171
18	1736,49	78,23481781	EXCELENTE	-4,3652	-38,453	1,55348	44	79,01619433
19	1736,84	78,5	BOM	-4,3583	-38,459	2,49886	44	65,08536585
20	1615,7	56,24260355	BOM	-4,3514	-38,465	3,6955	43,47633136	64,96449704
21	1463,39	60,44599303	BOM	-4,3444	-38,471	2,60228	43,27874564	62,83275261
22	1401,82	53,00519481	BOM	-4,3373	-38,477	3,01366	43,38701299	59,33766234

Tabela 15: Dados obtidos no Levantamento 2 para o Segmento 4

	12-0	13-0	CLASSIF.	LAT.	LONG.	IRI (m/km)	15-0	11-0
	0C - RPM Motor	0D - Velocidad del Vehículo					0F - Temperatura Entrada de Aire	0B - Presión Absoluta del Múltiple de Entrada
23	1416,48	40,09443099	BOM	-4,3305	-38,483	2,54014	43,75786925	65,76997579
24	1614,76	70,5254902	EXCELENTE	-4,323	-38,489	1,81751	43,76470588	77,09803922
25	1759,99	80,71544715	BOM	-4,3158	-38,496	2,9574	44,74390244	53,08130081
26	1764,17	80,43568465	BOM	-4,3076	-38,501	2,75414	44,73443983	76,39419087
27	1552,14	65,59214502	BOM	-4,2985	-38,502	3,235	44,06042296	62,34138973
28	1544,32	57,11619718	BOM	-4,2908	-38,497	2,13387	43,79225352	77,77816901
29	1882,96	74,62195122	EXCELENTE	-4,2817	-38,494	1,45047	42,79674797	65,87398374
30	1976,39	78,56302521	BOM	-4,2728	-38,492	2,31571	43,04201681	92,17226891
31	1753,69	79,74683544	EXCELENTE	-4,2639	-38,489	1,85728	43,33755274	45,99578059
32	1955,19	78,45991561	BOM	-4,2551	-38,486	2,80972	43,09704641	92,90295359
33	1785,26	78,7991453	EXCELENTE	-4,2462	-38,484	1,66849	43,11538462	62,26923077
34	1892,16	78,88185654	EXCELENTE	-4,2372	-38,481	1,55664	42,57805907	89,62025316
35	1488,78	65,35273973	EXCELENTE	-4,2284	-38,478	1,96606	43,06849315	54,0890411
36	1503,81	60,64896755	BOM	-4,2196	-38,475	3,67932	43,14749263	66,38053097