

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
SANTA LUZIA

Amanda Ramos de Figueiredo

**APLICAÇÃO DE REGRESSÃO LOGÍSTICA EM MANUTENÇÃO DE VIAS
DE ROLAMENTO URBANAS**

Santa Luzia
2025

Amanda Ramos de Figueiredo

**APLICAÇÃO DE REGRESSÃO LOGÍSTICA EM MANUTENÇÃO DE VIAS
DE ROLAMENTO URBANAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal
de Educação Ciência e Tecnologia de Minas
Gerais-Campus Santa Luzia, como requisito
parcial para a obtenção do título de Bacharel.
Orientador: Marcos Vinícius Vieira Pereira

Santa Luzia

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F475a Figueiredo, Amanda Ramos de.

Aplicação de regressão logística em manutenção de vias de rolamento urbanas/ Amanda Ramos de Figueiredo. – 2025.

63 p. : il..

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Minas Gerais, Santa Luzia.

Orientador: Marcos Vinícius Vieira Pereira.

1. Pavimentos - trincas. 2. Estradas – Manutenção e reparação - Gestão. I.Pereira, Marcos Vinícius Vieira, orient. II. Instituto Federal de Minas Gerais - Santa Luzia, MG. IV. Título.

CDU: 625.765

Elaborada pela Biblioteca do IFMG campus Santa Luzia



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Santa Luzia
Diretoria de Ensino, Pesquisa e Extensão
Docência Eixo Tecnologias- TEC 2 (Tecnologias, Estruturas)
Rua Érico Veríssimo, 317 - Bairro Londrina - CEP 33115-390 - Santa Luzia - MG
3136343910 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dez dias do mês de março de dois mil e vinte e cinco, às 20h, se reuniram, em sessão pública, os membros da banca composta pelo(a) Prof.(a) Marcos Vinicius Vieira Pereira (orientador), Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Santa Luzia, Hudson Cleiton Reis Pereira (avaliador interno/externo), Janaína Aguiar Park (avaliador interno/externo), para avaliar o Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil intitulado **APLICAÇÃO DE REGRESSÃO LOGÍSTICA EM MANUTENÇÃO DE VIAS DE ROLAMENTO URBANAS**, apresentado pelo(a) discente **Amanda Ramos de Figueiredo**. A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do(a) candidato(a). Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo(a) discente, tendo sido **aprovada com 80 pontos**. Observação e Apreciações serão enviados à discente por meio das versões corrigidas pelos membros da banca via e-mail. Nada mais havendo a tratar a defesa foi encerrada e eu, Marcos Vinicius Vieira Pereira lavrei a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada por todos(as) os membros da banca.

Santa Luzia, 10 de março de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br **MARCOS VINICIUS VIEIRA PEREIRA**
Data: 11/03/2025 19:04:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nome do orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br **JANAÍNA AGUIAR PARK**
Data: 12/03/2025 09:43:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nome do avaliador interno/externo

Documento assinado digitalmente
gov.br **HUDSON CLEITON REIS PEREIRA**
Data: 13/03/2025 14:38:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nome do avaliador interno/externo

RESUMO

A infraestrutura rodoviária urbana desempenha um papel essencial no desenvolvimento socioeconômico do Brasil, sendo crucial para o transporte de mercadorias e passageiros. No entanto, enfrenta desafios significativos, como a deterioração de pavimentos devido ao tráfego intenso e à falta de manutenção preventiva. Este estudo visa avaliar o uso da regressão logística como ferramenta para prever a ocorrência de trincas por fadiga em pavimentos urbanos. Utilizando um banco de dados fictício com variáveis como a inclinação absoluta, volume médio diário de tráfego (VMD) e percentual de caminhões pesados, a análise foi realizada no software JASP. Os resultados mostraram que o percentual de caminhões tem um impacto considerável na degradação dos pavimentos, seguido pela inclinação da via e o volume de tráfego. Apesar de o modelo ter apresentado uma acurácia superior a 70%, a especificidade foi relativamente baixa (cerca de 50%), indicando a necessidade de refinamento do modelo para melhor prever os trechos sem falhas. A utilização de um banco de dados fictício, embora útil, limitou a representatividade das vias reais. Em estudos futuros, sugere-se a coleta de dados reais, ampliação da amostragem e o uso de técnicas alternativas, como redes neurais artificiais e árvores de decisão, para melhorar a precisão do modelo e otimizar a gestão de pavimentos urbanos.

Palavras-chave: Pavimentos urbanos. Regressão Logística. Manutenção de viária. Trincas por fadiga. Análise estatística.

ABSTRACT

Urban road infrastructure plays a crucial role in Brazil's socioeconomic development, as it is essential for the transportation of goods and passengers. However, it faces significant challenges, such as pavement deterioration due to heavy traffic and a lack of preventive maintenance. This study aims to assess the use of logistic regression as a tool for predicting fatigue cracks in urban pavements. Using a fictional database with variables such as absolute slope, average daily traffic volume (ADT), and percentage of heavy trucks, the analysis was performed using the JASP software. The results showed that the percentage of trucks has a significant impact on pavement deterioration, followed by road incline and traffic volume. Although the model demonstrated an accuracy of over 70%, specificity was relatively low (around 50%), indicating the need for refinement to better predict segments without faults. The use of a fictional database, while useful, limited the representativeness of real roads. Future studies should prioritize the collection of real data, increased sample size, and experimentation with alternative techniques such as artificial neural networks and decision trees to improve model accuracy and optimize urban pavement management.

Keywords: Urban pavements. Logistic Regression. Roads maintenance. Fatigue cracking. Statistical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema simplificado de distribuição de carga nos pavimentos flexíveis	20
Figura 2 – Esquema de camadas do pavimento flexível	21
Figura 3 – Defeitos no pavimento	22
Quadro 1 – Metodologias comuns para o diagnóstico de pavimentos	26
Quadro 2 – Tipos de VMD e suas Definições	29
Gráfico 1 – Representação gráfica de uma Regressão Logística Binária	36
Quadro 3 – Conceitos de regressão logística	37
Gráfico 2 – Representação gráfica sobre a probabilidade de ocorrência de segundo ataque por meio da variável independente Nível de stress, indicando relação proporcional direta dado o valor de coeficiente β maior que zero e com razão de chances maior que 1	40
Tabela 1 – Banco de Dados	46
Gráfico 3 – Distribuição da Inclinação Absoluta	50
Gráfico 4 – Distribuição do Volume médio diário (VMD).....	50
Gráfico 5 – Distribuição do Percentual de Caminhões	51
Tabela 2 – Análise de Regressão	53
Tabela 3 – Matriz de Confusão	53
Tabela 4 – Diagnóstico de Performance	55
Tabela 5 – Tabela de Multicolinearidade	56
Tabela 6 – Coeficientes	56
Gráfico 6 – Elevação da probabilidade de patologias na forma de trinca devido ao aumento do percentual de caminhões, segundo os resultados do banco de dados	59
Gráfico 7 – Elevação da probabilidade de patologias na forma de trinca devido ao VMD, segundo os resultados do banco de dados	60
Gráfico 8 – Elevação da probabilidade de patologias na forma de trinca devido a inclinação do trecho viário, segundo os resultados do banco de dados	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS NO BRASIL: CENÁRIO E DESAFIOS	18
2.2 PAVIMENTO FLEXÍVEL: ESTRUTURA E CARACTERÍSTICAS.....	20
2.3 IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DEFEITOS EM PAVIMENTOS	21
2.4 DIAGNÓSTICO DE PAVIMENTOS: METODOLOGIAS E FERRAMENTAS	25
2.4.1 Índices de Condição de Pavimento	25
2.4.2 Geotecnologias no Diagnóstico.....	26
2.4.3 Modelagem Preditiva e Análise Estatística.....	26
2.4.4 Ensaios Não Destrutivos e Instrumentação Técnica	27
2.5 VOLUME MÉDIO DIÁRIO (VMD): CONCEITO E APLICAÇÕES.....	27
2.5.1 Tipos de VMD.....	28
2.5.2 Variações no Volume de Tráfego.....	29
2.6 ÍNDICE DE CAMINHÕES: IMPORTÂNCIA E CÁLCULO.....	29
2.7 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA VIA NAS PATOLOGIAS	31
2.7.1 Cálculo da Inclinação Média	31
2.7.2 Impacto da Geometria da Via.....	32
2.7.3 Medidas de Mitigação	32
2.8 REGRESSÃO LOGÍSTICA BINÁRIA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES.....	33
2.8.1 Conceitos e Equações da Regressão Logística	33
2.8.2 Planejamento de uma Regressão Logística	36
2.8.3 Conceitos Chave na Análise de Regressão Logística	37
2.8.4 Softwares para Análise de Regressão Logística	39
3 METODOLOGIA	41
3.1. CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS FICTÍCIO	41
3.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA COM REGRESSÃO LOGÍSTICA BINÁRIA NO JASP	42
3.3. OPERACIONALIZAÇÃO DA ANÁLISE	43
3.3.1 Coleta e organização dos dados.....	43
3.3.2. Definição da variável dependente	44
3.3.3. Modelagem estatística	44
3.3.4. Interpretação dos resultados.....	44

3.4. USO DE ABORDAGENS ESTATÍSTICAS EM ESTUDOS DE PAVIMENTAÇÃO.....	45
3.5. BANCO DE DADOS UTILIZADO	46
3.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE O TAMANHO DA AMOSTRA	48
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	49
4.1. DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES.....	49
4.2. DISTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES	49
4.3. TAMANHO AMOSTRAL E VALIDADE DA ANÁLISE.....	51
4.4. ANÁLISE DE REGRESSÃO: DEVIANCE E PSEUDO R ²	52
4.5. MATRIZ DE CONFUSÃO E ACURÁCIA DO MODELO	53
4.6. DIAGNÓSTICO DE PERFORMANCE DO MODELO.....	54
4.7. ANÁLISE DE MULTICOLINEARIDADE	55
4.8. COEFICIENTES DA REGRESSÃO LOGÍSTICA E RAZÃO DE CHANCES.....	56
4.8.1. Impacto do Percentual de Caminhões	57
4.8.2. Impacto do Volume Médio Diário (VMD)	57
4.8.3. Impacto da Inclinação Absoluta	59
4.9. REGRESSÃO LOGÍSTICA COMO FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO NA CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS.....	61
5 CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA.....	67

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária brasileira desempenha um papel essencial no contexto socioeconômico do país, sendo responsável por uma parcela significativa do transporte de cargas e passageiros. A circulação de veículos urbanos, impulsionada pelo crescimento da indústria automobilística e pela crescente demanda por transporte de mercadorias, tem se tornado uma opção amplamente utilizada desde meados do século XX. No entanto, a infraestrutura viária urbana enfrenta desafios significativos, como a falta de pavimentação adequada, deficiências na fiscalização e insuficiência de investimentos em manutenção e expansão da infraestrutura.

Conforme dados apresentados pela Pesquisa CNT de Rodovias 2024, 67,5% da malha rodoviária brasileira apresentava algum tipo de deficiência, incluindo problemas em pavimento, sinalização e geometria das vias. As condições específicas de pavimento (55,2%), sinalização (61,4%) e geometria das vias (65,5%) reforçam o quadro preocupante da infraestrutura viária, impactando diretamente a mobilidade e a segurança viária, não apenas em rodovias, mas também em áreas urbanas densamente povoadas.

A Pesquisa CNT de Rodovias 2024 também indicou que 62,9% da malha viária federal está em estado regular, ruim ou péssimo, necessitando de conservação pesada, enquanto 37,1% está em boas ou ótimas condições. Isso reflete um grande desafio na gestão e conservação das rodovias no Brasil. Em comparação, os Estados Unidos têm 438,1 km, a China 359,9 km e a Rússia 54,3 km por 1.000 km² de rodovias pavimentadas (de Paula Veiga, 2019). Estudos também identificam deficiências relevantes de pavimentação em áreas urbanas, com impacto direto na durabilidade das vias e na segurança viária.

Embora os dados apresentados se refiram ao contexto nacional e incluam rodovias interurbanas, muitos dos desafios observados também se refletem no ambiente urbano, especialmente no que diz respeito à manutenção da malha viária pavimentada e à necessidade de conservação adequada para garantir a mobilidade e a segurança dos usuários.

A infraestrutura urbana é essencial para o desenvolvimento socioeconômico dos países, pois o transporte de produtos, pessoas e mercadorias depende

majoritariamente das rodovias. A qualidade dos pavimentos urbanos V é crucial para garantir circulação contínua, independentemente das condições climáticas, proporcionando uma experiência de condução segura e confortável.

No entanto, como visto, no Brasil, as rodovias enfrentam diversos desafios que afetam sua eficiência, como problemas no planejamento, falta de investimentos, impacto das condições climáticas e desgaste pelo tráfego, resultando em defeitos no asfalto que comprometem a funcionalidade das estradas e a segurança dos motoristas (de Souza, 2023). Entre esses fatores, destaca-se a sobrecarga de tráfego, que exerce pressão constante sobre a infraestrutura urbana, especialmente quando os veículos excedem os limites de peso regulamentares. De acordo com de Oliveira *et al.* (2020), o dimensionamento técnico inadequado dos pavimentos, incluindo falhas na definição do subleito, amplifica os problemas estruturais, pois compromete a capacidade da superestrutura de suportar o tráfego pesado ao longo do tempo.

Outro agravante é a ineficiência da fiscalização de tráfego e da manutenção das rodovias. de Carvalho *et al.* (2022) apontam que a ausência de monitoramento efetivo e de políticas públicas consistentes para controlar o excesso de carga resulta em danos cumulativos à infraestrutura. Fissuras, trincas e buracos tornam-se recorrentes, reduzindo significativamente a vida útil das rodovias e aumentando os custos de manutenção. Esse quadro não apenas compromete a qualidade do patrimônio público, mas também coloca em risco a segurança dos motoristas, uma vez que as condições precárias das vias estão diretamente ligadas ao aumento de acidentes.

Além disso, em áreas urbanas, intervenções na infraestrutura pública também contribuem para a deterioração dos pavimentos. Modificações em pontos de visita, ligações de água, sistemas de drenagem e coletores urbanos, quando não realizadas de forma adequada, geram patologias que afetam a estrutura do asfalto, agravando ainda mais os problemas (de Oliveira *et al.*, 2020). Essas ações, muitas vezes realizadas sem planejamento integrado, revelam a ausência de estratégias eficientes de gestão que considerem a interação entre as necessidades urbanas e a conservação da malha viária.

A falta de investimento e planejamento a longo prazo agrava ainda mais o cenário. A utilização de métodos de dimensionamento desatualizados, que não

contemplam as novas configurações de veículos e suas maiores capacidades de carga, revela a defasagem técnica enfrentada pelos órgãos responsáveis pela gestão urbana (de Carvalho *et al.*, 2022). Isso demonstra a urgência de modernizar as práticas de engenharia, incorporando avanços tecnológicos e critérios baseados em dados reais de tráfego e cargas.

Assim, solução para os problemas das rodovias brasileiras passa pela adoção de uma governança mais eficiente e pela implementação de políticas públicas que combinem fiscalização rigorosa, conscientização dos transportadores e investimentos em tecnologia e capacitação técnica. O fortalecimento dos processos de planejamento e manutenção, aliado à modernização dos métodos de dimensionamento e à gestão integrada das intervenções urbanas, pode não apenas prolongar a vida útil dos pavimentos, mas também melhorar a segurança viária e reduzir os custos sociais e econômicos associados à deterioração das estradas. Esses passos são essenciais para assegurar que a infraestrutura urbana brasileira atenda às demandas crescentes de transporte com eficiência e sustentabilidade (de Carvalho *et al.* 2022; de Oliveira *et al.*, 2020).

Embora as patologias das vias de rolamento sejam associadas diretamente à qualidade dos materiais utilizados ou à falta de manutenção preventiva periódica, existem outros fatores que também influenciam de forma significativa o avanço da deterioração do pavimento. Por exemplo, o impacto das variações de temperatura pode alterar as propriedades dos ligantes asfálticos, contribuindo para o surgimento de trincas por fadiga. Essas alterações térmicas geram tensões internas no pavimento, que se acumulam ao longo do tempo e afetam negativamente sua durabilidade (Arruda, 2021).

Luo *et al.* (2020) pontuam que pesquisas avançadas, como modelos de decisão multicritério e regressões logísticas, têm melhorado a previsão de necessidades de manutenção. A temperatura da pista, condições da superestrutura, tráfego com zonas diferenciadas de operação, contabilização de veículos em marcha lenta são alguns dos fatores indiretos utilizados nestas análises.

A utilização de técnicas eficientes de previsão de manutenção de pavimentos com base na Regressão Logística é amplamente empregada para modelar e prever comportamentos em diferentes contextos rodoviários. A aplicação dessa técnica tem se mostrado eficaz em análises das condições viárias que levam a acidentes, como

demonstrado por de Miranda, da Silva e Ross (2020). Esses autores utilizaram a regressão logística para investigar fatores relacionados à segurança nas rodovias. Nakahara (2005) também explorou a previsão do comportamento de vias urbanas submetidas a tráfego intenso, ressaltando a relevância dessa metodologia para prever falhas e planejar a manutenção. Estudos recentes destacam a importância de incorporar variáveis ambientais e estruturais na modelagem de pavimentos, ampliando a precisão na previsão de falhas e na priorização de intervenções.

A escolha das variáveis na regressão logística é essencial para fundamentar sua aplicação como ferramenta de apoio à decisão na manutenção urbana, podendo ser utilizados fatores ambientais, como a temperatura e a umidade, além de características específicas do pavimento, como o tipo de agregado utilizado, o teor de ligante asfáltico, o volume de vazios e as frequências de carregamento impostas pelo tráfego. Essas variáveis permitem uma análise detalhada das condições viárias, contribuindo para a identificação de falhas estruturais e a definição de estratégias de manutenção mais eficazes (Arruda, 2021).

A identificação de defeitos nos pavimentos é fundamental para avaliar o estado de conservação das estradas, conforme preconiza a norma 005/2003-TER. Esse processo orienta a definição de soluções técnicas adequadas e, quando necessário, direciona as abordagens mais eficazes para a restauração. Ferramentas de avaliação têm sido amplamente utilizadas por pesquisadores para resumir os danos em trechos específicos e priorizar necessidades. Estudos apontam índices como o Índice de Gravidade Global (IGG), Levantamento Visual Contínuo (LVC), *Pavement Distress Index* (PDI) e Índice de Condição do Pavimento (ICP), também conhecido como *Pavement Condition Index* (PCI), como essenciais na definição de alternativas de intervenção e planejamento de manutenção (de Souza, 2023).

Lorino *et al.* (2012) pontua que a vantagem de utilizar métodos matemáticos se dá na facilidade de interpretação dos dados observados porque eles acabam refletindo a evolução das patologias em pavimentos urbanos como uma função dos parâmetros que podem ser comparados estatisticamente. Justo-Silva *et al.* (2021) reforçam que muitos modelos de regressão logística podem ser aplicados ao gerenciamento de conservação de pavimentos, além disso Hassan (2015) pontua que a regressão logística é uma técnica viável para desenvolver modelos que utilizam dados inerentes aos pavimentos urbanos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é ressaltar a regressão logística como ferramenta de apoio à decisão de manutenção em pavimentos urbanos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Revisar as patologias mais comuns em pavimentos urbanos;
- Verificar as metodologias diagnósticas mais utilizadas na manutenção de pavimentação;
- Interpretar os parâmetros da análise de regressão logística visando melhor predição de trincas por fadiga em um conjunto de vias urbanas;
- Verificar a possibilidade de uso da regressão logística como ferramenta de apoio à prevenção de patologias e manutenção de vias urbanas.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

2.1. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS NO BRASIL: CENÁRIO E DESAFIOS

Os pavimentos urbanos são considerados um patrimônio essencial, e sua conservação e restauração oportunas são fundamentais para evitar o aumento substancial nos custos operacionais dos veículos e a necessidade de investimentos elevados em sua recuperação. Regionalmente, o Nordeste concentra 30,8% da infraestrutura urbana pavimentada, seguido pelo Sudeste (19,3%), Sul (18,5%), Centro-Oeste (17,6%) e Norte (13,7%). A infraestrutura viária urbana pavimentada não acompanha o crescimento das frotas de veículos, que aumentaram 110,4% entre 2006 e 2016, enquanto o desenvolvimento das rodovias federais cresceu apenas 11,7%. Além disso, muitas rodovias pavimentadas estão em mau estado (de Paula Veiga, 2019).

A Pesquisa CNT de Rodovias de 2022 ainda revelou que 66,0% das rodovias avaliadas apresentaram problemas no estado geral, 55,5% dos trechos tinham problemas no pavimento, 60,7% apresentavam deficiências na sinalização e 64,0% tinham falhas na geometria. A frota de veículos registrada em 2021 era de 111.446.870 veículos, um crescimento de 58% em relação a 2011, quando havia 70.543.535 registros. A composição da frota era de 53,2% automóveis, 22,2% motocicletas, 2,6% caminhões e 0,6% ônibus. Em 2021, foram produzidos 2.248.253 veículos, um aumento de 11,6% em relação a 2020, quando foram fabricados 2.014.055 veículos.

A referida pesquisa ainda informou que o transporte público urbano, em 2021, transportou 185,8 milhões de passageiros por mês em nove capitais brasileiras, uma redução de 2,1% em relação a 2020. No setor de transporte de cargas, havia 291.134 empresas, 556 cooperativas e 917.742 autônomos registrados em 2022. No mesmo ano, foram registrados 52.762 acidentes de trânsito com vítimas nas rodovias federais, um aumento de 1,7% em relação a 2020. Houve um total de 5.391 óbitos, 2,0% a mais do que em 2020. O número de mortos por acidente subiu para 8,4 em 2021, um aumento de 0,4% em relação a 2020. Essa má qualidade das rodovias contribui para um alto número de acidentes (de Souza, 2023).

Em 2024, até julho, foram registrados 2.946 acidentes fatais em rodovias federais, com um total de 51.944 vítimas feridas. A Pesquisa CNT de Rodovias 2024

também revelou que mais de 62,9% da malha viária federal se encontra em estado regular, ruim ou péssimo, necessitando de conservação pesada, enquanto 37,1% está em boas ou ótimas condições.

Conforme de Paula Araújo *et al.* (2024) apontam que há significativos desafios na conservação da malha viária brasileira, especialmente em Minas Gerais, que possui a maior extensão urbana do país, sendo os principais a ausência de bancos de dados centralizados, a baixa frequência de atualizações, o uso limitado de tecnologias e o subfinanciamento evidenciam a necessidade urgente de aprimorar a gestão e priorizar investimentos, focando na ampliação do uso de tecnologias e na criação de bancos de dados integrados para decisões mais eficazes.

A falta de fiscalização efetiva nas rodovias brasileiras é um fator crítico que contribui diretamente para o excesso de carga nos pavimentos, impactando sua vida útil. Segundo de Carvalho *et al.* (2022), muitas empresas de transporte optam por trafegar com sobrecarga, pois isso reduz o número de viagens necessárias e aumenta os lucros operacionais. No entanto, essa prática acelera a deterioração dos pavimentos, causando fissuras, trincas e deformações que demandam manutenções corretivas mais frequentes e onerosas.

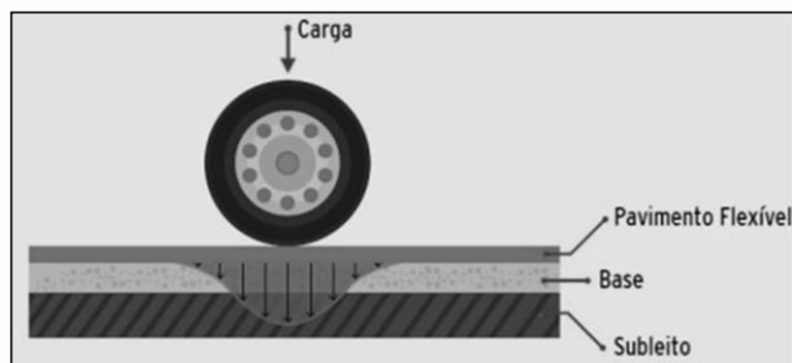
De acordo com de Paula Araújo *et al.* (2024), o dimensionamento atual dos pavimentos no Brasil se baseia em métodos desatualizados, que não acompanham a evolução das configurações dos veículos e o aumento da capacidade de carga. Esse descompasso, aliado à fiscalização insuficiente, intensifica os danos estruturais das rodovias. Estudos apontam que a sobrecarga em veículos pode reduzir a vida útil dos pavimentos em até 50%, elevando significativamente os custos de manutenção urbana e aumentando os riscos para a segurança dos usuários.

Guo *et al.* (2020) ressaltam que uma fiscalização mais rigorosa e frequente, aliada à modernização das políticas de controle de carga, é essencial para mitigar esses impactos. O investimento em tecnologias de monitoramento em tempo real e na melhoria da gestão das rodovias pode trazer benefícios significativos, tanto para a preservação da infraestrutura quanto para a eficiência logística do país.

2.2 PAVIMENTO FLEXÍVEL: ESTRUTURA E CARACTERÍSTICAS

O pavimento flexível é uma estrutura composta por várias camadas sobrepostas, projetadas para distribuir as cargas do tráfego de maneira progressiva e eficiente. Uma característica marcante desse tipo de pavimento ressaltada por Bianchi *et al.* (2008) é a capacidade de deformar-se mais verticalmente em relação a pavimentos rígidos quando submetidos à carga de tráfego, contudo, sua distribuição de tensões alcança camadas mais inferiores da superestrutura do pavimento. Essa flexibilidade exige o uso de materiais com boas propriedades mecânicas e de durabilidade, além de uma execução correta durante a construção. Quando essas condições são atendidas, o pavimento flexível apresenta excelente desempenho e longa vida útil (Ye, 2021).

Figura 1 - Esquema simplificado de distribuição de carga nos pavimentos flexíveis.



Fonte: Pereira, 2020.

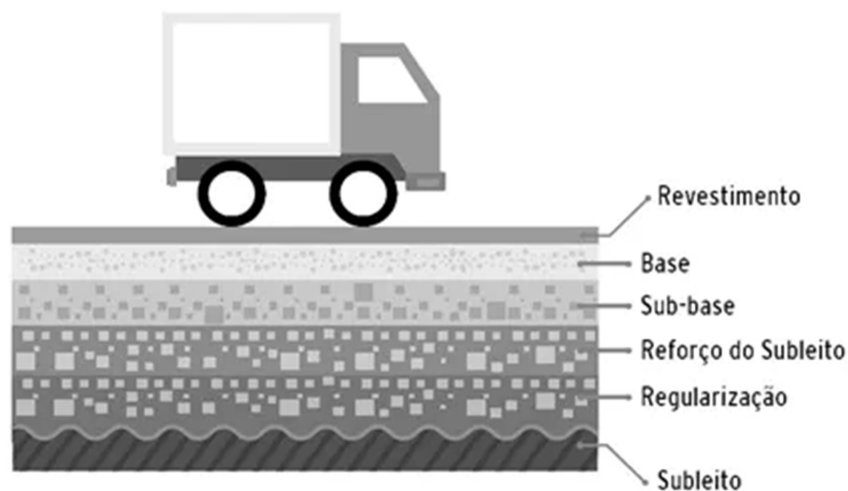
A camada mais superficial, denominada revestimento asfáltico, é composta por misturas de agregados minerais e ligante betuminoso. Guo *et al.* (2020) e Ye (2021) reforçam que esta camada é responsável pela impermeabilização e pela resistência direta às cargas e condições climáticas, sendo essencial para garantir a segurança e o conforto dos usuários. Segundo Fernandes (2016), por meio de uma imprimação de material betuminoso há a impermeabilização e melhora da aderência entre o revestimento asfáltico e a camada subjacente chamada base oferecendo conforto e durabilidade ao pavimento.

Abaixo do revestimento, encontramos a camada chamada base, que pode ser feita de materiais granulares compactados ou estabilizados. Essa é a camada mais próxima à superfície de contato com o tráfego com função de absorver e redistribuir

as tensões para as camadas inferiores, protegendo o subleito e assegurando a estabilidade estrutural.

Acima do subleito, quando não há a necessidade de reforço, a sub-base complementa a base, auxiliando na resistência estrutural, geralmente feita com misturas de solos e agregados. Em sequência, a sub-base e o subleito desempenham papéis complementares, reduzindo ainda mais as tensões transmitidas e mantendo a integridade do solo natural (Guo *et al.*, 2020).

Figura 2 - Esquema de camadas do pavimento flexível



Fonte: Pereira (2020).

O subleito é o terreno natural compactado que serve de apoio à superestrutura do pavimento, absorvendo os esforços verticais do tráfego. Sua regularização nivela o terreno, evitando falhas na pavimentação, enquanto o reforço do subleito, opcional, melhora a resistência em solos de baixa qualidade ou sob tráfego intenso.

2.3 IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DEFEITOS EM PAVIMENTOS

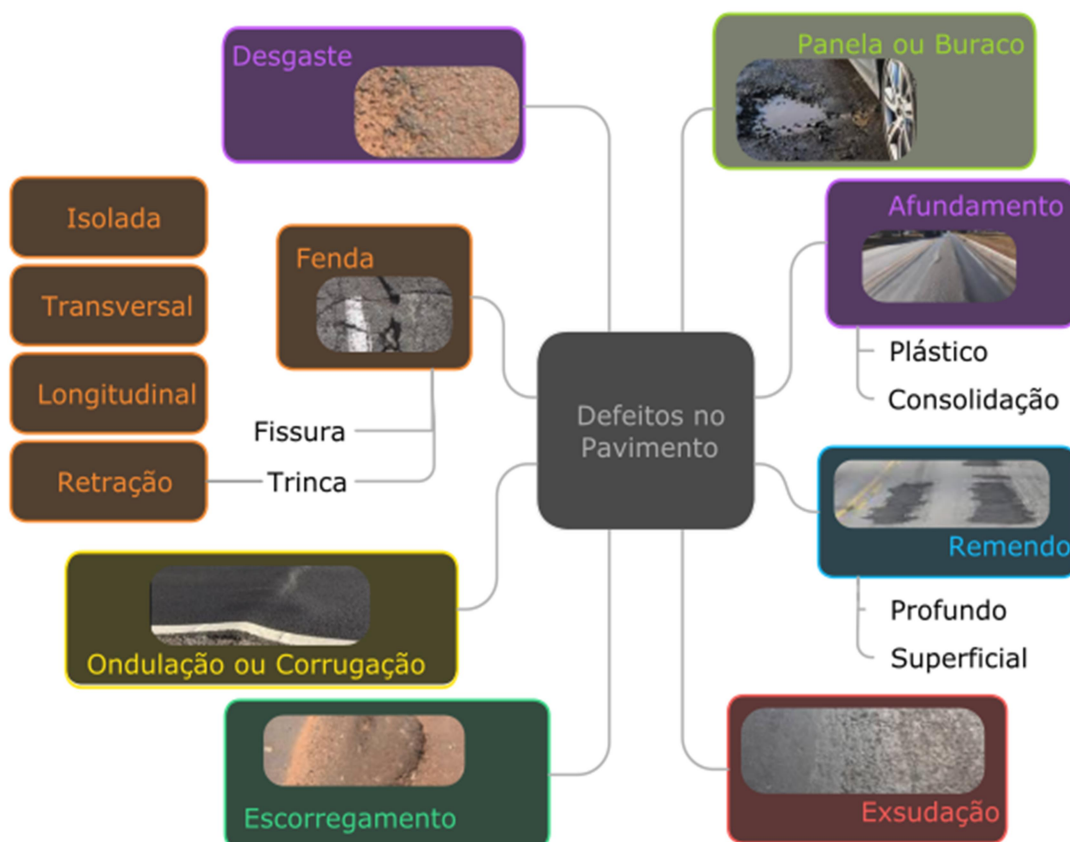
As avaliações do pavimento consideram buracos, remendos, trincamentos, sinalização, drenagem e roçagem, com rodovias de pista simples avaliadas em um sentido e as de pista dupla em ambos os sentidos (de Paula Veiga, 2019).

As patologias em pavimentos flexíveis refletem tanto o impacto das cargas veiculares quanto às condições climáticas e a qualidade da construção. Entre as

falhas mais frequentes estão as trincas, que podem ser longitudinais ou transversais. Essas fissuras surgem devido ao envelhecimento do material asfáltico, esforços repetitivos do tráfego ou movimentação estrutural das camadas inferiores. Além de comprometerem a estética e funcionalidade da via, as trincas facilitam a infiltração de água, acelerando o processo de deterioração (Guo *et al.*, 2020; Ye, 2021).

Outra patologia comum é o afundamento em trilhas de rodas, que ocorre quando as camadas de revestimento e base não conseguem suportar as cargas repetitivas de veículos pesados. Esse tipo de deformação, também conhecido como "rutting", é intensificado em regiões com alto tráfego de caminhões ou em áreas onde o pavimento não foi adequadamente dimensionado. Além disso, buracos e desagregação superficial são problemas recorrentes, especialmente em locais onde a drenagem é inadequada ou onde há exposição prolongada a temperaturas extremas (Ye, 2021). No quadro a seguir, estão esquematizados alguns defeitos de pavimento:

Figura 3 - Defeitos no pavimento



Conforme a Norma DNIT 005/2003, sobre a terminologia dos Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos, cada defeito pode ser conceituado como:

a) Fenda

Qualquer descontinuidade na superfície do pavimento que conduza a aberturas de menor ou maior porta, podendo apresentar-se sob diversas formas.

i) Fissura

Fenda de largura existente sem revestimento, visível a menos de 1,50 m.

ii) Trinca

Fenda visível com abertura superior à fissura, podendo ser isolada ou interligada.

iii) Trinca Isolada

Fenda isolada que pode ser uma variedade de acordo com sua direção:

a. Trinca Transversal: direção apresenta ortogonal ao eixo da via, podendo ser curta (até 100 cm) ou longa (acima de 100 cm).

b. Trinca Longitudinal: Possui direção paralela ao eixo da via, podendo ser curta (até 100 cm) ou longa (acima de 100 cm).

c. Trinca de Retração: Relacionada a características de retração térmica ou à contração do material do revestimento/base.

iv) Trinca Interligada

Conjunto de trincas interligadas, sem direção preferencial, podendo se apresentar em dois formatos:

a. Trinca Tipo "Couro de Jacaré": Trincas interligadas formando um padrão semelhante à couro de jacaré.

b. Trinca Tipo "Bloco": Trincas interligadas formando blocos bem definidos, podendo apresentar erosão.

b) Afundamento

Deformação permanente caracterizada por uma depressão na superfície do pavimento.

i) Afundamento Plástico

Ocasionado pela fluência plástica do pavimento, podendo ocorrer nas seguintes formas:

a. Local: Quando sua extensão for de até 6 metros.

b. Na trilha de roda: Quando sua extensão é superior a 6 metros.

ii) Afundamento de Consolidação

Resultante da consolidação diferencial do pavimento, podendo ocorrer em:

a. Local: Com extensão de até 6 metros.

b. Na trilha de roda: Com extensão superior a 6 metros.

c) Ondulação ou Corrugação

Deformação caracterizada por ondulações transversais na superfície do pavimento.

d) Escorregamento

Deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente, formando fendas em meia-lua.

e) Exsudação

Excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, causando migração de material betuminoso.

f) Desgaste

Arrancamento progressivo do agregado superficial, resultando em aspereza na superfície do pavimento.

g) Panela ou Buraco

Cavidade no revestimento que pode atingir camadas inferiores do pavimento.

h) Remendo

Preenchimento de painelas ou buracos utilizando camadas adicionais de pavimento, comumente chamadas de "tapa-buraco".

i) Remendo Profundo

Consiste na substituição do revestimento e das camadas inferiores do pavimento, geralmente executado em formato retangular.

ii) Remendo Correção Superficial

localizada da superfície do pavimento com a aplicação de uma camada betuminosa.

Essas falhas ressaltam a importância de um controle rigoroso na escolha dos materiais e na execução das obras. Medidas preventivas, como o uso de misturas asfálticas de alta qualidade e sistemas de drenagem eficazes, podem reduzir significativamente a frequência e a gravidade dessas patologias, prolongando a vida útil do pavimento (Hu *et al.*, 2017).

2.4 DIAGNÓSTICO DE PAVIMENTOS: METODOLOGIAS E FERRAMENTAS

O diagnóstico de pavimentos é uma etapa crucial no planejamento de ações de manutenção e restauração, pois permite identificar as condições estruturais e funcionais da via, além de priorizar intervenções de maneira eficiente. Para tanto, diversas metodologias são amplamente utilizadas, combinando avaliações visuais, geotecnologias, análises preditivas e ensaios não destrutivos.

2.4.1 Índices de Condição de Pavimento

Entre as abordagens mais comuns, Araújo *et al.* (2024) destacam o uso de índices de condição de pavimento, como o Índice de Gravidade Global (IGG), o Levantamento Visual Contínuo (LVC), o *Pavement Distress Index* (PDI) e o *Pavement Condition Index* (PCI). Esses métodos baseiam-se em levantamentos visuais para identificar defeitos superficiais, como trincas, buracos e deformações, que afetam a funcionalidade e segurança da via. Lacerda (2024) acrescenta que essas ferramentas sintetizam as condições observadas em métricas objetivas, auxiliando gestores na hierarquização das ações de manutenção com base na urgência e gravidade dos problemas detectados. A tabela a seguir apresenta um panorama dessas metodologias:

Quadro 1 - Metodologias comuns para o diagnóstico de pavimentos

Método	Normativa	Modo de avaliação
IGG (Índice de Gravidade Global)	DNIT 006/2003	Contagem e classificação de ocorrências aparentes e medição das deformações permanentes nas trilhas de roda. Para rodovias de pista simples, a avaliação ocorre a cada 20 metros alternados em relação ao eixo da pista de rolamento (40 m em 40 m em cada faixa de tráfego). Em rodovias de pista dupla, a medição é feita a cada 20 metros na faixa de tráfego mais solicitada. Os dados são convertidos em um índice individual (IGI), ponderado conforme o tipo de patologia identificado.

LVC (Levantamento Visual Contínuo)	DNIT 008/2003	Levantamento visual realizado em extensões mínimas de 1 km e máximas de 6 km de forma contínua. São obtidos os seguintes índices: Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis (ICPF), Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE) e Índice do Estado da Superfície (IES). As informações coletadas são registradas em um formulário que categoriza o estado do pavimento.
PDI (Pavement Distress Index)	-	Avaliação do estado do pavimento com base em inspeções visuais, atribuindo pontuações conforme a severidade e extensão dos defeitos observados. O índice final resulta da ponderação de diferentes tipos de patologias.
PCI (Pavement Condition Index)	ASTM D6433-20	Método padronizado que classifica a condição do pavimento em uma escala de 0 a 100, levando em consideração a presença e severidade de defeitos. A coleta de dados é feita por meio de inspeção visual sistemática.

2.4.2 Geotecnologias no Diagnóstico

O uso de geotecnologias também tem ganhado destaque no diagnóstico de pavimentos. De acordo com Araújo *et al.* (2024), ferramentas como QGIS e Google Earth são amplamente empregadas para coletar, organizar e monitorar dados georreferenciados sobre as condições do pavimento e de seus dispositivos complementares, como sistemas de drenagem e sinalização. Lacerda (2024) complementa que esses bancos de dados atualizados são essenciais para o planejamento estratégico de intervenções, permitindo que os recursos sejam aplicados de maneira mais eficiente.

2.4.3 Modelagem Preditiva e Análise Estatística

Metodologias analíticas também vêm sendo utilizadas para prever a deterioração dos pavimentos. Segundo Lacerda (2024), modelos estatísticos, como a regressão logística, incorporam variáveis como volume de tráfego, percentual de veículos pesados, condições ambientais e características dos materiais utilizados. Essa modelagem preditiva facilita a identificação de áreas críticas e embasa decisões baseadas em dados, permitindo uma abordagem preventiva que reduz

custos com ações corretivas.

2.4.4 Ensaio Não Destrutivo e Instrumentação Técnica

Ensaio não destrutivo e instrumentação técnica desempenham um papel fundamental na avaliação da capacidade estrutural do pavimento. de Carvalho *et al.* (2022) apontam que o uso de deflectômetros de impacto (FWD) permite medir a resistência da estrutura viária à carga, fornecendo dados detalhados sobre o desempenho do pavimento. Guo *et al.* (2020) ressaltam que essas informações são indispensáveis para embasar decisões sobre restauração e prolongamento da vida útil das rodovias.

Assim, a integração dessas metodologias promove diagnósticos mais completos e confiáveis. Isso contribui para um planejamento mais eficiente das ações de manutenção, otimizando recursos públicos e garantindo uma infraestrutura viária segura e funcional.

2.5 VOLUME MÉDIO DIÁRIO (VMD): CONCEITO E APLICAÇÕES

O VMD é um indicador essencial no planejamento e manutenção de rodovias. Ele mede a quantidade média de veículos que trafegam por uma seção específica de uma via durante um dia típico. Essa métrica é obtida a partir de dados coletados ao longo de períodos representativos, como semanas ou meses, considerando flutuações sazonais e diárias no fluxo de tráfego. Sua aplicação é fundamental para avaliar a demanda sobre o pavimento e planejar intervenções apropriadas (Ye, 2021).

O VMD é particularmente relevante no dimensionamento de pavimentos. Rodovias com altos volumes de tráfego exigem materiais mais resistentes e projetos estruturais que suportam cargas elevadas sem comprometer a funcionalidade. Por outro lado, vias com baixos volumes permitem o uso de soluções construtivas mais simples e econômicas. Assim, o VMD ajuda a equilibrar custos de construção com a durabilidade necessária para atender à demanda (Ye, 2021).

Além disso, esse indicador é amplamente utilizado em estudos preditivos de desempenho. Quando combinado com outros parâmetros, como o índice de

caminhões, o VMD permite simular o desgaste acumulado no pavimento ao longo do tempo, ajudando os gestores a priorizar manutenções e prolongar a vida útil das vias (Ye, 2021; Hu *et al.*, 2017).

2.5.1 Tipos de VMD

De acordo com o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006), a coleta sistemática desses dados permite a adaptação da infraestrutura viária às reais necessidades de tráfego, garantindo um planejamento eficiente e sustentável das rodovias (DNIT, 2006). A seguir, apresentam-se os principais tipos de VMD e suas aplicações:

Quadro 2 - Tipos de VMD e suas Definições

Tipo de VMD	Definição	Fatores de Expansão
VMDa (Anual)	Número total (V_t) de veículos trafegando em um ano dividido por 365.	Não há, pois é a métrica mais ampla e fundamental para estudos de tráfego.
VMDm (Mensal)	Número total de veículos trafegando em um mês dividido pelo número de dias do mês. É sempre acompanhado do nome do mês correspondente.	Quando a contagem ocorre apenas em um mês devido a fatores sazonais: $f = VMDa / VMDm$.
VMDs (Semanal)	Número total de veículos trafegando em uma semana dividido por 7. Deve ser acompanhado do mês correspondente.	Quando a contagem ocorre apenas em alguns dias da semana: $f = V_s / V_{xd}$, onde: V_s = volume medido na semana; V_{xd} = volume medido em x dias da semana.
VMDd (Diário)	Número total de veículos trafegando em um dia específico da semana. Deve ser acompanhado da indicação do dia e do mês correspondente.	Quando a contagem ocorre apenas em algumas horas do dia: $f = V_{24h} / V_{xh}$, onde: V_{24h} = volume medido em 24h; V_{xh} = volume medido em x horas do dia.

Fonte: DNIT (2006).

2.5.2 Variações no Volume de Tráfego

O volume de tráfego sofre variações ao longo do tempo, sendo influenciado por diferentes fatores. A variação sazonal ocorre em ciclos mensais e é determinada por aspectos econômicos, turísticos e sociais. Segundo o relatório DNIT/UFSC (2008), essas flutuações podem afetar a capacidade operacional das rodovias e devem ser consideradas na definição de estratégias de manutenção e ampliação da infraestrutura viária urbana (DNIT/UFSC, 2008). Os principais fatores que afetam a variação sazonal são:

- **Férias escolares:** Aumento do tráfego em períodos de recesso, principalmente em rodovias turísticas.
- **Atividades econômicas:** Fluxos intensificados em épocas de colheita ou eventos comerciais, conforme indicado no levantamento do **Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT)**.
- **Feriados prolongados:** Maior movimento em vias de acesso a regiões de lazer e turismo, resultando em picos sazonais de tráfego (**DNIT, 2006**).
- **Condições climáticas:** Chuvas e nevascas podem impactar a circulação, reduzindo ou desviando fluxos viários (DNIT/UFSC, 2008).
- **Alterações de infraestrutura:** Obras e modificações no sistema viário podem redistribuir o tráfego ao longo do ano, tornando fundamental a utilização de fatores de expansão para ajustes de VMD (DNIT, 2006).

A análise dessas variações permite o desenvolvimento de estratégias eficientes para a melhoria da mobilidade e segurança nas rodovias, garantindo uma melhor adaptação da infraestrutura às necessidades dos usuários. A correta aplicação dos fatores de expansão e o acompanhamento contínuo dos volumes de tráfego são fundamentais para a tomada de decisões que impactam diretamente a economia e a segurança viária (DNIT, 2006; DNIT/UFSC, 2008).

2.6 ÍNDICE DE CAMINHÕES: IMPORTÂNCIA E CÁLCULO

O índice de caminhões é uma medida que identifica a proporção de veículos pesados no fluxo de tráfego de uma rodovia. Esses veículos, devido às suas

elevadas cargas por eixo, são responsáveis por grande parte do desgaste estrutural do pavimento. Assim, este índice é essencial para o dimensionamento e a manutenção de rodovias, uma vez que rodovias com alta proporção de caminhões requerem estruturas mais robustas para suportar as tensões adicionais (Ye, 2021; Hu *et al.*, 2017). Esse índice é obtido a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Índice de caminhões \%} = [(\text{Volume de caminhões/dia}) / \text{VMD}] * 100$$

onde:

- **O volume de tráfego/dia** representa a contagem diária de tráfego que trafega na rodovia;
- **VMD (Volume Médio Diário)** é o número médio de veículos que circulam pela rodovia em um dia típico.

Os caminhões desempenham um papel crucial na manipulação do pavimento devido às suas cargas elevadas por eixo, sendo responsáveis por grande parte do desgaste estrutural das rodovias. Diferentemente dos automóveis, os veículos pesados geram impactos mais severos, promovendo o desenvolvimento de fissuras, recalques diferenciais e deformações permanentes como o afundamento por trilha de roda (*rutting*) (Dambros Fernandes, 2016).

O tráfego de veículos pesados tem um impacto direto na estrutura dos pavimentos urbanos, acelerando os processos de deterioração. Estudos indicam que esses veículos frequentemente ultrapassam os limites de carga previstos pela legislação, o que aumenta significativamente o esforço físico sobre a via. Como resultado, há um incremento nas demandas de manutenção, e o pavimento pode sofrer falhas precoces se o projeto da via não considerar adequadamente o dimensionamento necessário para suportar esse fluxo de tráfego (Dambros Fernandes, 2016).

Para mitigar esses impactos, é essencial empregar materiais com maior resistência ao cisalhamento e projetar camadas inferiores capazes de dissipar eficientemente as tensões impostas. Além disso, a inclusão do índice de tráfego no planejamento viário permite prever a manipulação acumulada e definir estratégias de manutenção preventiva, prolongando a vida útil do pavimento (Dambros Fernandes, 2016).

A compreensão do índice de trânsito é fundamental para a concepção de

rodovias modernas, possibilitando:

- A previsão da circulação acumulada do pavimento com base no volume de veículos pesados;
- O ajuste do projeto às condições reais de tráfego, garantindo maior durabilidade da infraestrutura;
- A implementação de ações de manutenção preventiva, reduzindo custos operacionais e aumentando a segurança viária (DNIT/UFSC, 2008),

Portanto, o índice de caminhões é uma ferramenta indispensável no planejamento de rodovias modernas. Ele permite prever a degradação acumulada, ajustando o projeto às condições reais de tráfego, e contribui para estratégias de manutenção preventiva que aumentam a vida útil do pavimento e a segurança dos usuários (Hu *et al.*, 20217).

2.7 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA VIA NAS PATOLOGIAS

A orientação da via tem um papel determinante na ocorrência de patologias em pavimentos urbanos, especialmente em trechos de curvas e rampas. Nessas áreas, as forças criadas pela interação entre os veículos e a superfície da rodovia, como a tração em subidas e a frenagem em descidas, criam elevações elevadas de cisalhamento. Eles intensificaram a ocorrência de deformações permanentes, como o fundamento da trilha de roda, além de acelerar o aparecimento de fissuras estruturais, principalmente em rodovias com tráfego pesado e frequente (Dambros Fernandes, 2016).

2.7.1 Cálculo da Inclinação Média

A orientação média de um trecho de rodovia pode ser calculada pela seguinte pesquisa:

$$\text{Inclinação absoluta média} = \frac{\text{desnível total}}{\text{cumprimento do trecho}}$$

onde:

- **Desnível Total** refere-se à diferença de altitude entre o início e o fim do trecho considerado;
- **Comprimento do Trecho** representa a extensão da via ao longo da qual ocorre a variação altimétrica (DNIT, 2006).

2.7.2 Impacto da Geometria da Via

A geometria da via desempenha um papel crucial na distribuição de cargas sobre o pavimento, com destaque para as curvas acentuadas e o ângulo de inclinação dos pneus, que aumentam as forças laterais sobre o revestimento viário. Este efeito é potencializado em rampas, especialmente em rodovias montanhosas, onde a velocidade reduzida nas subidas e as tensões horizontais nas descidas contribuem para o desgaste do pavimento. Em curvas, as cargas dinâmicas repetitivas aceleram processos de fadiga do material. Em locais como interseções e áreas de desaceleração, o impacto das forças laterais é ainda mais intensificado, resultando em danos que podem comprometer a estabilidade da estrutura e provocar a formação de trincas longitudinais e transversais (Dambros Fernandes, 2016; DNIT, 2006).

2.7.3 Medidas de Mitigação

Para reduzir os impactos adversos da orientação da via no pavimento, algumas medidas de engenharia podem ser adotadas:

- **Uso de misturas asfálticas modificadas:** Uma seleção de materiais com maior resistência ao cisalhamento e melhores propriedades mecânicas pode reduzir a deformação plástica e o surgimento de fissuras (Dambros Fernandes, 2016).
- **Projetos geométricos otimizados:** A adequação do traçado da rodovia, incluindo ajustes na orientação e na superelevação das curvas, contribui para melhorar a distribuição das cargas e reduzir localizadas (DNIT, 2006).
- **Sistemas de drenagem eficientes:** A presença de água na superfície do pavimento pode reduzir a aderência dos veículos e acelerar os processos de

manipulação estrutural. Sistemas de escoamento bem dimensionados ajudam a minimizar esses efeitos (Dambros Fernandes, 2016).

Portanto, compreender a influência da orientação da via na manipulação do pavimento é essencial para um planejamento rodoviário eficaz. A implementação de estratégias de mitigação pode prolongar a vida útil da infraestrutura e garantir maior segurança e conforto aos usuários das rodovias.

2.8 REGRESSÃO LOGÍSTICA BINÁRIA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

A ferramenta estatística utilizada na pesquisa é a Regressão Logística Binária, sendo utilizada quando a variável dependente possui duas categorias, geralmente codificadas como “1” para a ocorrência do evento de interesse e “0” para a ausência. Essa codificação impacta a interpretação dos coeficientes do modelo (Fernandes *et al.*, 2021; Gonzalez, 2018).

2.8.1 Conceitos e Equações da Regressão Logística

A regressão logística pode ser entendida como um caso particular dos modelos lineares generalizados, onde a variável dependente é dicotômica. Como a variável dependente assume apenas dois valores, a probabilidade prevista pelo modelo se limita entre 0 e 1 (Fernandes *et al.*, 2021; Gonzalez, 2018).

Xavier *et al.* (2018) destacam que a regressão logística pressupõe que a probabilidade de ocorrência de um evento está relacionada a um conjunto de variáveis explicativas, conforme descrito na função a seguir:

$$\log(1 - \pi) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \text{ (Eq. 1)}$$

A Equação 1 representa a função logística que estima a probabilidade de ocorrência de um evento binário — neste caso, a ocorrência de trincas por fadiga ($Y=1$).

Onde:

- π representa a probabilidade de ocorrência do evento de interesse, ou seja, o surgimento de trincas por fadiga ($Y = 1$);

- β_0 é o intercepto da regressão, que indica o valor da função quando todas as variáveis independentes são iguais a zero;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ são os coeficientes estimados que expressam o efeito de cada variável independente no modelo;
- X_1, X_2, X_3 são, respectivamente, as variáveis explicativas: Inclinação Absoluta, Percentual de Caminhões e VMD;
- e é a base do logaritmo natural (aproximadamente 2,718), utilizada na função exponencial que compõe a equação logística.

Percebe-se que os coeficientes estimados no modelo são diretamente proporcionais à razão de chances de ocorrência do evento. Ou seja, quanto maiores forem os valores desses coeficientes, maior será a probabilidade do evento ocorrer, e vice-versa. No entanto, a Equação 1, por si só, não limita os valores da probabilidade ao intervalo $[0,1][0,1][0,1]$, como exige uma função de Bernoulli. Nesse sentido, Gonzalez (2018) ressalta que, na regressão logística, a função probabilidade precisa estar contida em um intervalo fechado entre 0 e 1.

Para garantir essa limitação, utiliza-se a transformação conhecida como logit, que consiste no logaritmo natural da razão entre a probabilidade de ocorrência do evento ($\pi / (1 - \pi)$) e a probabilidade de sua não ocorrência ($(1 - \pi) / \pi$), conforme representado na Equação 2:

$$\log(\pi / (1 - \pi)) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

- π : probabilidade de ocorrência do evento ($Y = 1$);
- $\pi / (1 - \pi)$: razão de chances (odds) entre ocorrência e não ocorrência;
- **log**: logaritmo natural aplicado à razão de chances;
- β_0 : intercepto da equação;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: coeficientes das variáveis independentes;
- X_1, X_2, X_3 : variáveis explicativas (Inclinação Absoluta, Percentual de Caminhões, VMD).

Ao aplicar a função exponencial e isolar π , obtém-se a Equação 3, que fornece a probabilidade estimada de ocorrência do evento diretamente no intervalo desejado $[0,1]$:

$$\pi = z = 1 / (1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k)}) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

- **e**: base do logaritmo natural ($\approx 2,718$);
- **e^{-z}**: garante que a saída da função estará sempre entre 0 e 1;
- **1 + e^{-z}**: transforma a combinação linear das variáveis explicativas em uma probabilidade;
- **π** : probabilidade estimada da ocorrência do evento ($Y = 1$), de forma contínua e limitada.

A Equação 3 é, portanto, a função logística propriamente dita, utilizada para converter a combinação linear das variáveis explicativas em uma probabilidade válida, viabilizando a interpretação estatística do modelo em contextos práticos.

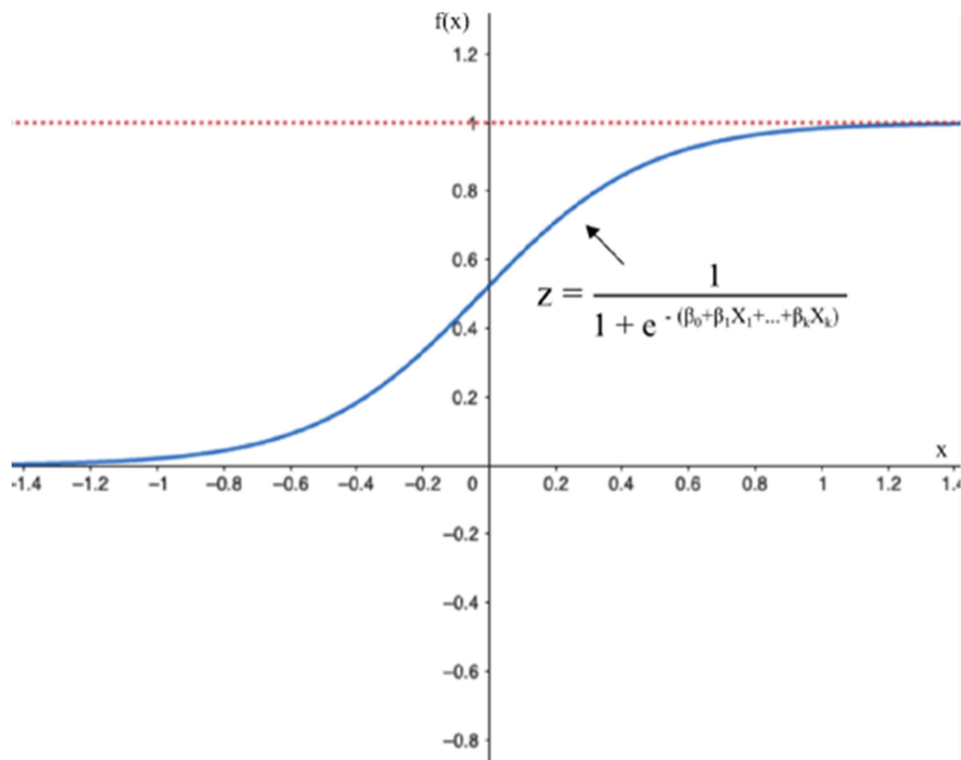


Gráfico 1 - Representação gráfica de uma Regressão Logística Binária

Conforme a variável independente aumenta, a probabilidade de o evento ocorrer (codificado como “1”) também aumenta. Essa propriedade faz com que o modelo seja amplamente utilizado, especialmente quando as características binárias da variável dependente violam os pressupostos do modelo linear, como

homoscedasticidade e linearidade. A regressão logística, portanto, fornece a probabilidade da ocorrência do evento de interesse, considerando a direção, magnitude e significância estatística das variáveis independentes. É recomendada, assim, quando a variável dependente é categórica binária (Fernandes *et al.*, 2021; Gonzalez, 2018).

2.8.2 Planejamento de uma Regressão Logística

Segundo Fernandes *et al.* (2021), a regressão logística envolve uma série de etapas cruciais para garantir sua aplicação correta. Primeiramente, é necessário identificar uma variável dependente dicotômica, como, por exemplo, a ocorrência ou não de um evento. A transformação de variáveis contínuas ou discretas em dicotômicas, embora comum, pode resultar em perdas de informações importantes, o que afeta a robustez do modelo.

O próximo passo consiste em avaliar o tamanho da amostra e a multicolinearidade entre as variáveis explicativas. Uma amostra muito pequena pode gerar estimativas imprecisas, enquanto uma amostra excessivamente grande pode tornar significantes efeitos que, na prática, são irrelevantes. Além disso, é essencial tratar os outliers corretamente para que o modelo seja consistente e preciso.

A terceira etapa envolve a estimação do modelo. Aqui, a comparação entre o modelo ajustado e o modelo nulo indica o quão eficaz é o modelo em relação à variável dependente. Quando há uma diferença significativa entre os modelos, isso indica que as variáveis explicativas têm um papel importante na previsão do resultado.

Finalmente, a interpretação dos resultados é fundamental. A análise dos coeficientes da regressão logística deve considerar não apenas a significância estatística, mas também a magnitude dos efeitos das variáveis independentes. Para isso, é recomendada a análise do *Odds ratio* (OR), que ajuda a entender como cada variável impacta a probabilidade de ocorrência do evento de interesse.

2.8.3 Conceitos Chave na Análise de Regressão Logística

Para melhor entendimento dos conceitos pontuados pelos autores quanto à sequência da análise, serão discutidos a seguir o que significam e como podem contribuir para a análise de regressão logística binária. Conforme Mesquita (2014) e Fernandes *et al.* (2021):

Quadro 3 – Conceitos da Regressão Logística

Conceito/parâmetro	Mecanismo	Interpretação
Razão de chances (<i>Odds ratio</i>)	A razão de chances é a razão entre as chances de um evento acontecer devido a influência de determinado fator, e a chance de o evento acontecer sem a interferência deste fator, resumindo, é a medida de efeito que compara a probabilidade de determinada condição ocorrer entre grupos. OR=p1-p	Para cada variável explicativa há uma OR que costuma ser diretamente relacionada ao valor e sinal dos coeficientes estimados da função Logit.
Método da Máxima Verossimilhança e Razão de Verossimilhança (<i>DEVIANCE</i>)	Razão de Verossimilhança: A razão para testar a significância do coeficiente de uma variável no modelo é comparar os valores observados da variável resposta com os valores preditos, utilizando a razão de verossimilhança. <i>Deviance</i> : A <i>Deviance</i> é calculada como a diferença entre as verossimilhanças do modelo completo e do modelo sem a variável de interesse. $DEVIANCE = -2(\ln(\text{Verossimilhança sem a variável}) - \ln(\text{Verossimilhança com a variável}))$	O ajuste de um modelo logístico é determinado pelo vetor de estimativas dos parâmetros. O método utilizado na estimação dos parâmetros é o da máxima verossimilhança (E.V.). A função de verossimilhança é sempre positiva, e quanto maior for o valor da verossimilhança, melhor é o ajuste do modelo. Para estimar a significância de uma variável independente, compara-se a razão de verossimilhança (<i>Deviance</i>) entre os modelos com e sem a variável.
Pseudo R ² - MacFadden, Nagelkerke, Tjur e Cox & Snell	São medidas de qualidade do ajuste do modelo que variam de 0 a 1. Compreendem as funções dos resíduos definidos como a diferença entre o valor observado e o valor ajustado.	Quanto maior melhor, pois, tem-se o mesmo entendimento que os coeficientes de determinação da regressão linear.

Multicolinearidade	A multicolinearidade ocorre quando duas ou mais variáveis independentes estão altamente correlacionadas. É feita uma regressão linear entre pares de variáveis explicativas.	Quanto maior for o seu valor, mais fortemente correlacionadas as variáveis independentes estão.
Tabela de contingência (Matriz de confusão)	Conta os resultados do modelo com as observações do banco de dados que por meio de uma matriz.	É possível perceber quantas previsões o modelo efetivamente acertou e errou dos dois resultados possíveis, já que a regressão é binária.
Sensibilidade	Mede a capacidade do modelo em classificar corretamente, ou seja, é a relação entre os eventos previstos sobre os eventos que realmente ocorreram segundo o banco de dados.	Quanto maior for o seu valor melhor a previsão do modelo encontrado.
Especificidade	Outro parâmetro que mede a capacidade do modelo em classificar corretamente, ou seja, é a relação entre os eventos não previstos sobre os eventos que realmente não ocorreram segundo o banco de dados.	Quanto maior for o seu valor melhor a previsão do modelo encontrado.
Precisão	Indica a proporção de verdadeiros positivos em todas as ocorrências positivas previstas.	Quanto maior, melhor o modelo é capaz de prever verdadeiras ocorrências observadas.
Acurácia	Grau de exatidão do modelo no geral, considerando ocorrências e não ocorrências verificadas, ou seja, é o percentual das confirmações previstas do modelo na realidade dentre o total das previsões.	Quanto maior, melhor o modelo é capaz de prever as ocorrências e não ocorrências verdadeiras.
Fator de Inflação de Variância (VIF)	Técnica estatística que mede a multicolinearidade em modelos de regressão. $VIF=1-R^2$	Quanto mais elevados maior o nível de correlação entre as variáveis.
Erro Padrão	É uma medida da variabilidade na estimativa de um coeficiente.	Quanto menor for um erro padrão, mais ajustadas ao modelo de regressão estarão as observações.

Fonte: Mesquita (2014); Fernandes *et al.* (2021).

2.8.4 Softwares para Análise de Regressão Logística

Alguns softwares de análise de regressão logística (SSPS, JASP, JAMOVI etc.) mostram como resposta representações gráficas que relacionam tanto as probabilidades de cada variável independente com base em seus coeficientes estimados com intervalos de confiança definidos, conforme mostrado no Gráfico 1. A importância desta verificação se dá por meio da observação do comportamento dos coeficientes estimados dentro do espaço amostral.

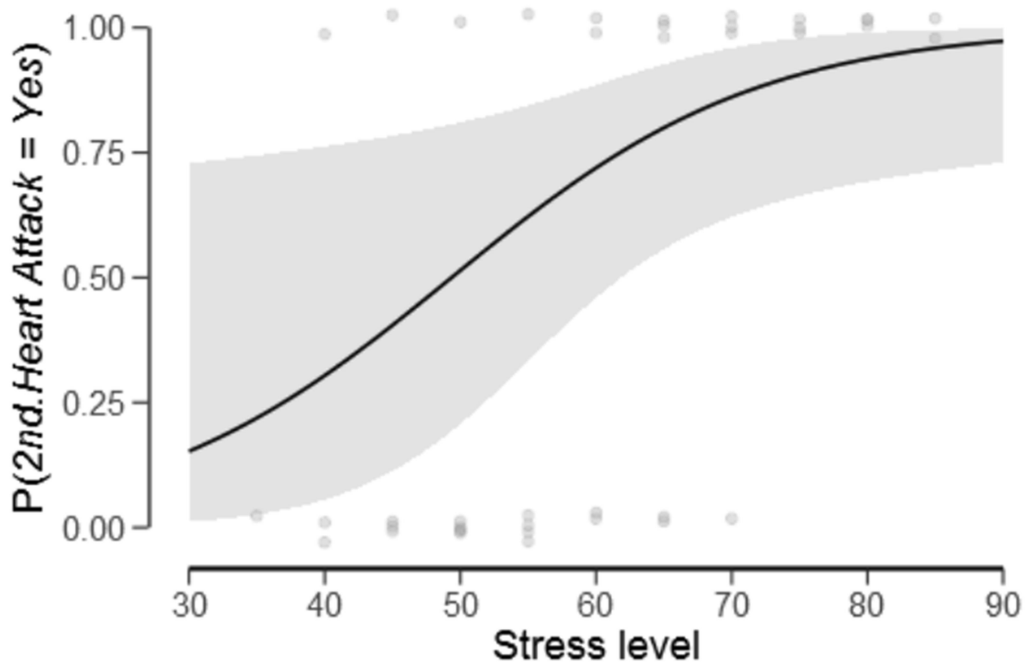


Gráfico 2 – Representação gráfica sobre a probabilidade de ocorrência de segundo ataque por meio da variável independente Nível de stress, indicando relação proporcional direta dado o valor de coeficiente maior que zero e com razão de chances maior que 1. Gráfico gerado no software JASP.

Fonte: Goss-Sampson (2019).

O avanço computacional permite que pesquisadores com menor treinamento específico em Matemática e Estatística possam se beneficiar das vantagens associadas às diferentes técnicas multivariadas (Fernandes *et al.*, 2021). Portanto, mostra-se viável a utilização de um modelo sofisticado de regressão para melhorar

abordagens de conservação de pavimentos urbanos, como os observados em Miranda *et al.* (2021) e em Nakahara (2025).

3 METODOLOGIA

O estudo terá início com uma ampla revisão bibliográfica sobre as principais patologias observadas em pavimentos flexíveis. Este tipo de pavimento, amplamente utilizado em vias urbanas e rodovias, é suscetível a uma variedade de problemas estruturais causados pelo tráfego intenso, mudanças climáticas e insuficiência de manutenção. A revisão buscará identificar as falhas mais recorrentes, como fissuras, buracos e deformações permanentes, investigando as condições que favorecem seu aparecimento e as possíveis intervenções para mitigá-las. Além disso, serão analisadas estratégias de prevenção e técnicas de recuperação de pavimentos, que podem variar desde recapeamentos simples até reconstruções completas de camadas comprometidas.

3.1. CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS FICTÍCIO

A pesquisa foi fundamentada em um banco de dados fictício, construído com variáveis que refletem condicionantes estruturais e operacionais, como o Volume Médio Diário (VMD) de tráfego, o índice de caminhões com mais de seis toneladas, e a inclinação média da via de rolamento. Essas variáveis serão tratadas como fatores potenciais de influência sobre a geração de patologias. O objetivo central foi compreender como esses elementos interagem e contribuem para o surgimento de falhas significativas, auxiliando no desenvolvimento de estratégias de manutenção mais assertivas.

O banco de dados utilizado neste estudo foi gerado artificialmente com o auxílio da ferramenta de inteligência artificial ChatGPT. A criação do conjunto de dados ocorreu por meio do seguinte comando fornecido ao modelo:

“Construa um banco de dados com 80 observações para ser analisado por meio de Regressão Logística Binária que testará a predição de trincas por fadiga em pavimentação urbana no software JASP. Atribua ao banco de dados as premissas de uma boa análise de regressão. As variáveis independentes do banco de dados serão a ‘Inclinação Absoluta’, ‘Percentual de Caminhões’, ‘VMD’, sendo a variável dependente binária a ocorrência de ‘Trincas por fadiga’.”

A geração do banco foi conduzida respeitando critérios estatísticos

essenciais, como variabilidade entre as variáveis explicativas, proporcionalidade entre eventos e não eventos na variável dependente, e ausência de multicolinearidade severa. Essa abordagem viabilizou a análise mesmo diante da indisponibilidade de dados reais, fornecendo uma base minimamente consistente e adequada para a aplicação da regressão logística binária.

A análise proposta neste estudo adota uma perspectiva temporal anual. Considera-se que o período de progressão das patologias observadas é válido para um ciclo de 1 ano, o que possibilita a elaboração de planos de prevenção e correção de forma anualizada. Essa delimitação temporal está alinhada com práticas recomendadas de manutenção preventiva em pavimentação urbana, permitindo intervenções planejadas com base na previsão estatística da ocorrência de falhas estruturais.

3.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA COM REGRESSÃO LOGÍSTICA BINÁRIA NO JASP

A análise estatística foi conduzida no software JASP, uma ferramenta de código aberto amplamente utilizada em estudos quantitativos. A regressão logística binária foi a técnica escolhida, uma vez que permite modelar a relação entre uma variável dependente categórica (presença ou ausência de patologias) e um conjunto de variáveis independentes. A partir dos dados fictícios, foi possível calcular coeficientes de regressão que indiquem a influência de cada variável no risco de ocorrência de falhas no pavimento. Por exemplo, variáveis como a distância em relação a vias arteriais e o índice de caminhões poderão ser analisadas para identificar padrões críticos.

Ressalta-se que o modelo estatístico utilizado neste estudo — a regressão logística binária — é independente do software adotado para sua execução. Embora a análise tenha sido conduzida no programa JASP, o mesmo modelo poderia ser aplicado em outras plataformas estatísticas, como R, SPSS, STATA ou JAMOVI, uma vez que sua estrutura matemática e seus procedimentos de estimativa são universalmente reconhecidos e replicáveis.

3.3. OPERACIONALIZAÇÃO DA ANÁLISE

Para avaliar a qualidade do ajuste do modelo de regressão logística, foram utilizados os coeficientes de pseudo R^2 , que são uma adaptação do R^2 da regressão linear para a análise logística. Dentre os métodos mais amplamente reconhecidos, destacam-se os coeficientes de McFadden, Nagelkerke e Cox & Snell.

O coeficiente McFadden (0,252) reflete a fração da variabilidade explicada pelo modelo em comparação com o modelo nulo (sem variáveis explicativas). Um valor de McFadden próximo de 1 indica um modelo com excelente poder explicativo, enquanto valores abaixo de 0,4 são considerados razoáveis para modelos de regressão logística (McFadden, 1974).

O coeficiente de Nagelkerke (0,385) ajusta o valor de McFadden para que ele varie entre 0 e 1, oferecendo uma melhor comparação entre modelos. Esse índice forneceu o maior valor entre os três coeficientes analisados neste estudo, indicando que o modelo tem uma boa capacidade de previsão das trincas por fadiga nos pavimentos urbanos (Nagelkerke, 1991).

O coeficiente de Cox & Snell (0,281), embora útil, tende a se aproximar de 1 apenas em modelos extremamente bem ajustados, sendo, portanto, menos eficaz em modelos com baixa explicação da variabilidade. No estudo em questão, este índice situou-se em uma posição intermediária, reforçando a importância da combinação de diferentes índices para uma avaliação mais robusta.

Apesar das limitações destes coeficientes, especialmente no contexto de dados de regressão logística, os valores de pseudo R^2 indicam que o modelo ajustado tem um desempenho satisfatório na previsão das falhas nos pavimentos urbanos.

3.3.1 Coleta e organização dos dados

As variáveis independentes incluem: volume médio de tráfego, índice de caminhões com peso superior a seis toneladas e a inclinação média das vias de rolamento.

3.3.2. Definição da variável dependente

A variável binária "presença de patologias em forma de trincas por fadiga" foi estabelecida, onde "1" indica falhas significativas e "0" indica sua ausência. A identificação de falhas foi hipoteticamente baseada em registros simulados e análises prévias do banco de dados.

3.3.3. Modelagem estatística

A regressão logística binária foi aplicada no JASP para avaliar a contribuição de cada variável independente na probabilidade de ocorrência de patologias.

3.3.4. Interpretação dos resultados

Os coeficientes (estimadores da função logit) indicarão o impacto de cada fator na probabilidade de ocorrência das trincas por fadiga:

- **Coeficientes positivos** indicam aumento do risco de patologias, enquanto negativos sugerem efeito protetivo; coeficientes nulos indicam ausência de efeito estatisticamente relevante sobre a probabilidade de ocorrência das patologias;
- **Erro Padrão:** representa a variabilidade na estimativa de cada coeficiente. Quanto menor o erro padrão, maior a precisão da estimativa e a confiabilidade do modelo;
- **Odds ratios** serão calculados para traduzir os coeficientes em termos de chances relativas;
- **Pseudo R²** indicam quão ajustados os dados estão em relação ao modelo;
- **VIF (Fator de Inflação da Variância):** utilizado para verificar a presença de multicolinearidade entre as variáveis independentes. Valores elevados indicam forte correlação entre as variáveis, o que pode comprometer a interpretação dos coeficientes;
- **Métricas de performance:** serão analisadas a precisão, sensibilidade, especificidade e acurácia da regressão realizada.

Por fim, a análise buscará responder a questões-chave, como quais fatores possuem maior influência no surgimento de patologias e a regressão logística pode ser útil em proposições na conservação de pavimentos urbanos. Os resultados poderão fornecer subsídios para o planejamento urbano e a gestão de vias, com foco em maximizar a durabilidade do pavimento e reduzir os custos associados à manutenção. O estudo, ao integrar dados quantitativos e técnicas avançadas de análise estatística, representa uma contribuição prática e inovadora para o campo da engenharia civil e o gerenciamento de infraestrutura urbana.

3.4. USO DE ABORDAGENS ESTATÍSTICAS EM ESTUDOS DE PAVIMENTAÇÃO

O uso de abordagens estatísticas e bancos de dados fictícios tem se mostrado uma estratégia eficaz para modelar cenários complexos e prever condições críticas em estudos de pavimentação urbana. Segundo Ferri (2013), essas ferramentas permitem aprofundar a análise de problemas estruturais, antecipar patologias e propor soluções mais assertivas para o planejamento e manutenção de infraestruturas urbanas.

O estudo de Ferri (2013) propôs um modelo estatístico para controle da fundação de pavimentos, utilizando ensaios deflectométricos não destrutivos. Com base em simulações e critérios preditivos, a pesquisa demonstrou que técnicas estatísticas avançadas, como o controle estatístico de qualidade, podem validar espessuras e características das camadas de pavimentos flexíveis, garantindo maior precisão no atendimento às exigências do projeto e reduzindo custos futuros com manutenção.

A pesquisa de Strieder, Isatto e Nuñez (2023) analisou vulnerabilidades climáticas em infraestrutura urbana por meio da combinação de sistemas de informação geográfica (SIG) e modelos estatísticos. A integração de bancos de dados fictícios a informações reais permitiu prever a suscetibilidade de pavimentos a eventos extremos, como chuvas intensas e variações térmicas. Além de mapear vulnerabilidades, o estudo propôs estratégias para mitigar impactos, evidenciando o papel da análise preditiva na construção de uma infraestrutura mais resiliente.

A regressão logística também tem sido amplamente utilizada em estudos de

pavimentação, especialmente para analisar variáveis categóricas, como a presença ou ausência de patologias. Pesquisas apontam que essa técnica pode modelar relações entre fatores como fluxo de tráfego, índice de caminhões pesados e características do solo, sendo aplicada a bancos de dados fictícios para calibração dos modelos. Os resultados evidenciam que essa abordagem contribui para a identificação dos principais fatores que levam ao surgimento de danos estruturais, facilitando o dimensionamento e a priorização de manutenções (Gonzalez, 2018).

3.5. BANCO DE DADOS UTILIZADO

O uso de bancos de dados fictícios aliados a ferramentas estatísticas se mostra essencial para pesquisas em pavimentação urbana. Além de fornecerem uma base confiável para análises detalhadas, essas técnicas possibilitam simulações de cenários hipotéticos, fundamentais para prever falhas e implementar medidas preventivas. Assim, a aplicação dessas metodologias fortalece a engenharia de transportes, promovendo infraestrutura de qualidade e maior eficiência na gestão de rodovias (Fernandes *et al.*, 2021).

O banco de dados trabalhado neste estudo foi o seguinte:

Tabela 1 – Banco de dados

Via	Inclinacao_Absoluta	Volume_Medio_Diario	Percentual_Caminhoes	Trincas_Fadiga
1	0,048	251	8,7	0
2	0,041	925	8,5	0
3	0,058	1089	18,3	1
4	0,028	207	18,2	0
5	0,079	765	14,1	1
6	0,021	1298	18,1	1
7	0,072	221	14,3	1
8	0,031	111	14,6	1
9	0,034	741	23,1	0
10	0,051	780	7,9	0
11	0,042	537	21,6	1
12	0,043	345	20,2	0
13	0,029	578	15,8	0
14	0,037	739	24,2	1
15	0,014	712	16,9	1

16	0,025	260	26,3	1
17	0,039	231	21,1	0
18	0,027	857	11,6	0
19	0,015	472	22,8	1
20	0,037	450	19,3	1
21	0,007	830	16,1	1
22	0,034	280	28,7	1
23	0,003	648	17,2	1
24	0,042	1100	19,9	1
25	0,047	392	21,7	1
26	0,034	420	13	0
27	0,025	235	24,2	1
28	0,041	1490	17,7	1
29	0,049	140	15,3	0
30	0,026	1011	27,1	1
31	0,044	109	15,9	0
32	0,036	169	20,5	1
33	0,002	1026	23,3	1
34	0,028	1031	16,8	0
35	0,046	20	24,3	1
36	0,013	508	20,2	1
37	0,016	775	21,9	1
38	0,032	1160	18	0
39	0,048	128	23,6	1
40	0,036	558	18,9	1
41	0,005	913	26	1
42	0,025	168	20,7	0
43	0,042	544	23,1	1
44	0,039	13	17,3	0
45	0,004	175	25,2	1
46	0,034	163	19,8	0
47	0,015	218	22,2	1
48	0,041	170	17,9	1
49	0,019	75	24	1
50	0,027	1210	19,2	1
51	0,014	628	25,6	1
52	0,036	38	21,3	1
53	0,012	1098	22,5	1
54	0,029	198	18,2	0
55	0,046	12	24,7	1
56	0,041	743	20,1	1
57	0,056	1068	21,8	0

58	0,032	32	18,2	0
59	0,048	675	24,3	1
60	0,037	12	19,5	0
61	0,055	1580	26,1	1
62	0,026	252	20,9	0
63	0,042	503	22,7	1
64	0,039	118	17,7	0
65	0,017	931	24,9	1
66	0,034	1200	20,3	1
67	0,045	995	22	1
68	0,041	642	19	0
69	0,049	680	23,8	1
70	0,027	1160	19,7	0
71	0,044	439	25,5	1
72	0,036	1108	21,2	1
73	0,011	1837	22,9	1
74	0,028	986	18,1	0
75	0,046	548	24,6	1
76	0,043	1268	20	0
77	0,056	682	22,1	1
78	0,032	575	18,8	0
79	0,008	1887	24,2	1
80	0,037	310	19,6	0

3.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE O TAMANHO DA AMOSTRA

Vittinghoff e McCulloch (2007) asseguram que as análises de regressão logística são sensíveis em relação ao tamanho da amostra, sendo estas propensas a vícios matemáticos quando o banco de dados não possui robustez, por isso salientam ao menos 10 eventos para cada variável independente descrita na regressão para que o banco de dados seja conservador.

Fernandes *et al.* (2021) pontuam que a técnica de regressão logística é sensível a alta correlação entre as variáveis explicativas do modelo. Ou seja, para modelar eventos que possuem fatores fortemente correlacionáveis a técnica mostra limitação, contudo os mesmos autores pontuam que aumentar o tamanho da amostra tende a diminuir tal sensibilidade do modelo, ou até mesmo, estabelecer uma medida síntese que possua a mesma variância das medidas originais.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

De acordo com os dados da amostra fictícia de tráfego que serviu de base para a regressão, percebe-se que a inclinação absoluta variou entre 0,2% e 7,9%, com uma média de aproximadamente 3,4%, sendo uma localidade predominantemente plana. Gráfico 3 ilustra a variação da inclinação absoluta ao longo da amostra.

O VMD observado apresentou um mínimo de 12 veículos e máximo de 1887 veículos registrados em 24h, com uma média de 618 veículos/dia. Gráfico 4 apresenta a distribuição do volume VMD de tráfego.

Já o percentual de caminhões variou entre 7,9% e 28,7%, com uma média de 19,6%. Gráfico 5 ilustra o percentual de caminhões na amostra, evidenciando a distribuição entre os diferentes segmentos de tráfego.

4.2. DISTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

Os valores extremos observados para cada uma das variáveis independentes sugerem uma ampla variação nas condições das vias, evidenciando que o tráfego influencia diretamente na previsão de manutenção dos pavimentos. Em especial, o percentual médio de tráfego, que supera 19%, indica uma carga significativa que contribui sobremaneira para a formação de patologias no pavimento rodoviário.

Pelos valores do VMD percebe-se que esta variável independente se mostrou com elevada variabilidade, visto que os valores extremos se diferiram em mais de 150 vezes, denotando diferenças marcantes no tráfego nestes locais.

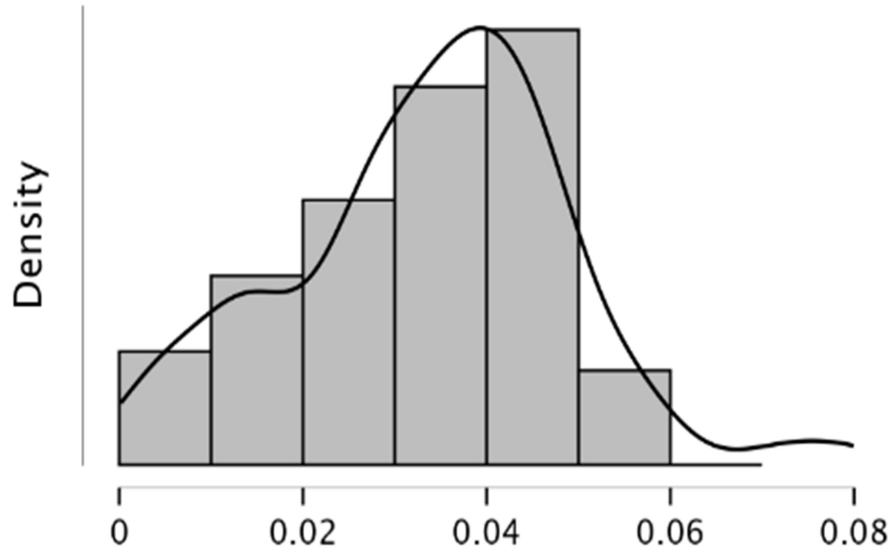


Gráfico 3 - Distribuição da Inclinação Absoluta

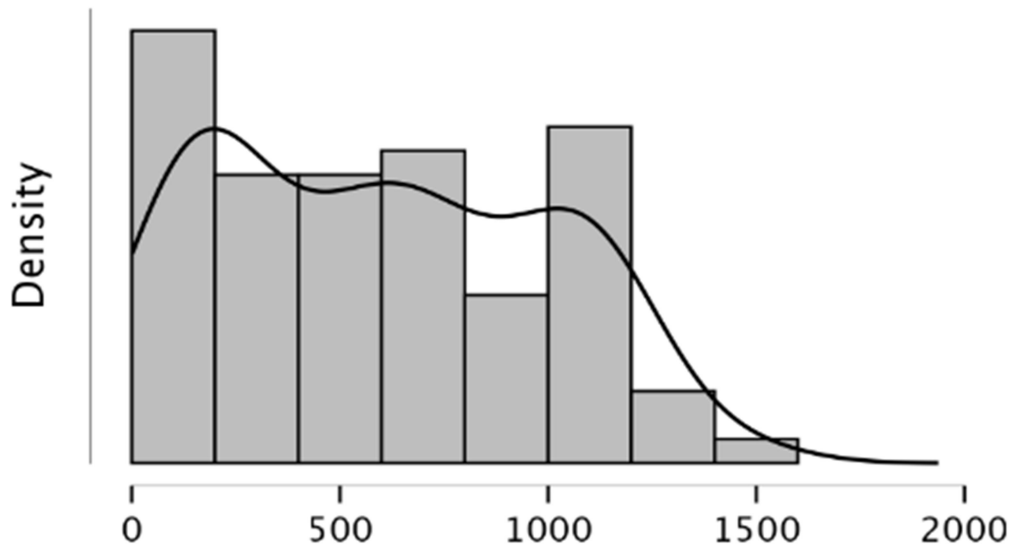


Gráfico 4 - Distribuição do VMD

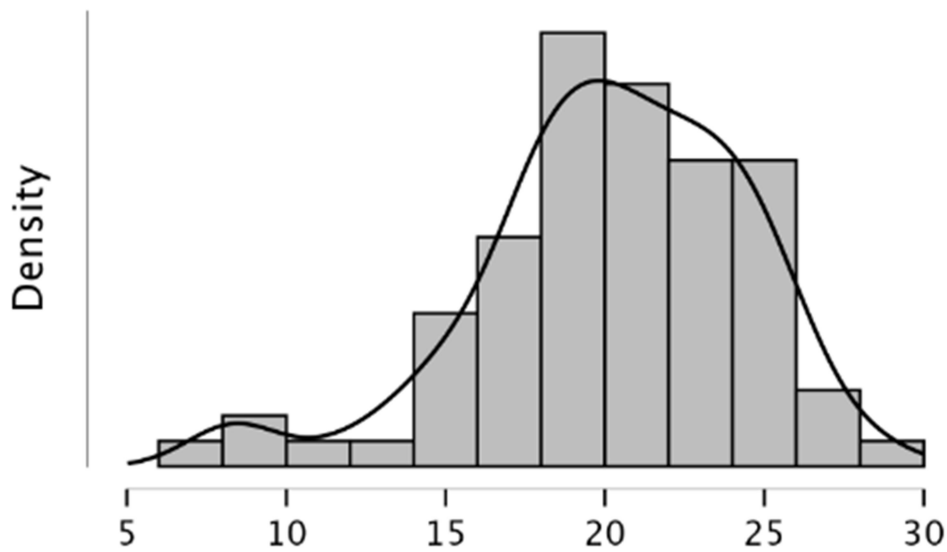


Gráfico 5 - Distribuição do Percentual de Caminhões

4.3. TAMANHO AMOSTRAL E VALIDADE DA ANÁLISE

A definição do tamanho amostral é um aspecto fundamental em pesquisas quantitativas, especialmente quando se utilizam modelos estatísticos como a regressão logística. De acordo com Fernandes (2021), um critério amplamente aceito é que o tamanho da amostra deve corresponder, no mínimo, a dez vezes o número de variáveis explicativas utilizadas no modelo. Esse princípio visa garantir a robustez das estimativas e minimizar a ocorrência de vieses que possam comprometer a validade dos resultados.

No presente estudo, foram consideradas três variáveis explicativas: inclinação absoluta, VMD e percentual de caminhões. Seguindo a recomendação mencionada, o tamanho mínimo adequado para a amostra deveria ser de 30 observações (ou seja, 3 variáveis explicativas \times 10). Entretanto, a base de dados utilizada conta com 80 observações, um número consideravelmente superior ao mínimo exigido. Esse aspecto confere maior confiabilidade às análises realizadas, contribuindo para a precisão das estimativas e reduzindo o risco de problemas estatísticos, como multicolinearidade e sobreajuste (*overfitting*) do modelo.

Dessa forma, a amostra utilizada no estudo não apenas atende aos requisitos metodológicos mínimos, mas também reforça a validade dos achados,

proporcionando uma base empírica mais sólida para a interpretação dos dados e a formulação de conclusões fundamentadas.

As variáveis explicativas são os fatores independentes que influenciam a variável dependente em uma análise de regressão logística. No contexto deste estudo, as variáveis explicativas utilizadas foram a inclinação absoluta da via, o percentual de caminhões e o VMD de tráfego. Essas variáveis foram escolhidas porque têm um impacto direto sobre o desgaste do pavimento e o surgimento de trincas por fadiga. Ao incluir essas variáveis no modelo de regressão, busca-se entender melhor como cada uma delas contribui para a probabilidade de ocorrência das falhas.

O valor de *Deviance* é uma medida de ajuste do modelo, indicando a qualidade da previsão do modelo em relação ao modelo nulo, que não leva em consideração as variáveis explicativas. Quanto menor o valor de *Deviance*, melhor o modelo ajustado se ajusta aos dados observados. A análise revelou que a inclusão das variáveis explicativas reduziu significativamente o valor de *Deviance*, o que demonstra que esses fatores são fundamentais para melhorar a precisão do modelo na previsão de falhas nos pavimentos.

4.4. ANÁLISE DE REGRESSÃO: DEVIANCE E PSEUDO R²

No que se refere aos coeficientes de pseudo R², o valor encontrado para McFadden (0,252) indica que o modelo explica aproximadamente 25,2% da variabilidade na ocorrência de trincas. O coeficiente de Nagelkerke R², por sua vez, apresentou o maior valor entre os três índices analisados (0,385), correspondendo a cerca de 38,5% da variabilidade explicada. Já o coeficiente de Cox & Snell (0,281) situou-se em uma posição intermediária, sem, contudo, ultrapassar o patamar de 0,4. Embora esses indicadores sejam análogos ao coeficiente de determinação (R²) da regressão linear, na regressão logística não se espera que esses valores atinjam níveis próximos de 1, conforme argumentado por Fernandes *et al.* (2021).

Tabela 2 - Análise de Regressão

Modelo	Deviance	McFadden R ²	Nagelkerke R ²	Cox & Snell R ²
M ₀	104,775	-	-	-
M ₁	78,341	0,252	0,385	0,281

4.5. MATRIZ DE CONFUSÃO E ACURÁCIA DO MODELO

Na análise de regressão logística, a Matriz de Confusão, indicada pela Tabela 3, é uma ferramenta essencial para avaliar o desempenho do modelo, permitindo comparar as previsões feitas com os valores reais observados. Nesse contexto, "Predito 0" e "Predito 1" representam as previsões do modelo para a variável dependente, que, neste estudo, é a ocorrência de trincas por fadiga nos pavimentos. O valor 0 (Predito 0) corresponde à previsão de ausência de trinca (sem falhas no pavimento), enquanto 1 (Predito 1) corresponde à previsão de presença de trinca (falhas no pavimento). A matriz de confusão classifica essas previsões de acordo com o resultado real, resultando em quatro possíveis categorias: Verdadeiro Positivo (VP), Falso Positivo (FP), Verdadeiro Negativo (VN) e Falso Negativo (FN). Essa estrutura permite calcular métricas importantes, como a acurácia, sensibilidade e especificidade, ajudando a entender como bem o modelo está prevendo os eventos de interesse, neste caso, a formação de trincas nos pavimentos. A matriz está organizada da seguinte maneira:

Tabela 3 - Matriz de Confusão

Observado (Real)	Previsto: 0 (Predito 0)	Previsto: 1 (predito 1)	% Correto
0 (Sem Trinca)	15	14	51,724%
1 (Com Trinca)	7	44	86,275%
Total	22	58	73,750%

O modelo previu corretamente 15 observações como sem trinca. Esse é um acerto do modelo, indicando que o pavimento realmente não apresenta trincas, e o modelo fez a previsão correta. No entanto, o modelo também previu 14 vezes erradamente que o pavimento tinha trincas (Classe 1), quando na realidade o pavimento estava sem trinca. Esse é um erro do modelo, mostrando que ele falhou ao identificar que o pavimento não tinha trincas. O percentual de acerto para a classe 0 (sem trinca) foi de 51,72%, o que indica que o modelo teve um desempenho

moderado para essa classe, com muitos erros de classificação (ou seja, classificando pavimentos sem trinca como se tivessem trincas).

Para os pavimentos com trinca, o modelo teve um desempenho muito melhor. Ele previu corretamente 44 observações como com trinca, o que representa um acerto significativo, já que o pavimento realmente apresenta trincas. O modelo cometeu 7 erros, classificando pavimentos com trinca como sem trinca (Classe 0). Este é o erro do modelo, que não conseguiu identificar corretamente a presença de trincas em algumas situações. O percentual de acerto para a classe 1 (com trinca) foi de 86,28%, um desempenho bastante alto. Isso mostra que o modelo está bastante eficiente na identificação de pavimentos com trincas.

A acurácia geral do modelo foi de 73,75%, o que significa que, em média, o modelo acertou aproximadamente 74% das previsões para ambas as classes (com e sem trinca). Essa taxa de acerto sugere que o modelo tem um bom desempenho geral, mas com áreas para melhoria, principalmente no que diz respeito à capacidade de identificar pavimentos sem trincas.

O valor de corte do modelo foi ajustado para 0,5. Isso significa que, para cada observação, o modelo considera que um pavimento tem trinca (classe 1) se a probabilidade prevista para a classe 1 for superior a 50%. Caso contrário, o pavimento é classificado como sem trinca (classe 0). O valor de corte de 0,5 é um ponto de equilíbrio, mas em algumas situações, pode ser ajustado para otimizar a performance, dependendo dos objetivos específicos do modelo, como melhorar a sensibilidade ou a especificidade.

4.6. DIAGNÓSTICO DE PERFORMANCE DO MODELO

Embora o modelo tenha um bom desempenho para identificar pavimentos com trincas (86,28% de acerto), ele ainda apresenta uma taxa de erro significativa ao classificar pavimentos sem trincas (51,72% de acerto). O valor de acurácia geral de 73,75% é indicativo de que o modelo ainda pode ser aprimorado, especialmente em termos de especificidade, ou seja, sua capacidade de prever corretamente a ausência de trincas (classe 0). O ajuste do valor de corte poderia ser uma estratégia interessante para melhorar esse desempenho.

Tabela 4 - Diagnóstico de Performance

Métrica	Valor
Acurácia	0,738 (73,8%)
Sensibilidade	0,863 (86,3%)
Especificidade	0,517 (51,7%)
Precisão	0,759 (75,9%)

Conforme os dados da Tabela 4, a sensibilidade, que mede a capacidade do modelo de identificar corretamente os casos positivos, foi de 86,3%, o que significa que 86,3% dos pavimentos com trinca foram corretamente identificados pelo modelo, indicando que o modelo tem uma boa capacidade de detectar pavimentos danificados.

A especificidade, que é a capacidade do modelo de identificar corretamente os casos negativos, foi de 51,7%, o que significa que o modelo está identificando corretamente apenas metade dos pavimentos sem trincas. Esse valor relativamente baixo sugere que o modelo tem dificuldade em distinguir corretamente os pavimentos que não têm trincas, com uma taxa considerável de falsos positivos (quando ele classifica erroneamente pavimentos sem trinca como tendo trinca).

A precisão, que mede a proporção de previsões positivas corretas, foi de 75,9%, indicando que quando o modelo prevê a presença de trinca (classe 1), ele acerta em 75,9% das vezes, resultado que poderia ser maior se o modelo fosse mais cauteloso em prever a presença de trinca.

4.7. ANÁLISE DE MULTICOLINEARIDADE

A análise dessas métricas sugere que, enquanto o modelo tem um bom desempenho na detecção de pavimentos com trincas (alta sensibilidade), ele ainda apresenta limitações em prever corretamente pavimentos sem trincas (especificidade baixa). Isso pode ser melhorado ajustando o valor de corte ou testando abordagens que busquem equilibrar as taxas de falsos positivos e falsos negativos.

Tabela 5 - Tabela de Multicolinearidade

Variável	Tolerância	Fator de Inflação de	Interpretação
-----------------	-------------------	-----------------------------	----------------------

		Variância	
Percentual_Caminhões	0,977	1,024	Baixa multicolinearidade
Inclinação_Absoluta	0,975	1,026	Baixa multicolinearidade
Volume_Medio_Diario	0,984	1,017	Baixa multicolinearidade

Os valores de tolerância e de Fator de Inflação de Variância (VIF) apresentados (todos bem acima de 0,1 e abaixo de 5) indicam que não há multicolinearidade significativa entre as variáveis explicativas. Isso sugere que as variáveis podem ser interpretadas de forma independente, sem que uma variável influencie excessivamente os coeficientes das outras. Isso contribui para a precisão e a confiabilidade dos resultados do modelo. Além disso, a ausência de multicolinearidade forte sugere que as variáveis explicativas não estão redundantes, e cada uma delas está proporcionando informações únicas para a explicação da variável dependente (a ocorrência de trincas nos pavimentos urbanos).

A tabela de multicolinearidade indica que, com base nas variáveis analisadas, o modelo não apresenta problemas significativos de correlação entre as variáveis independentes. As tolerâncias altas e os valores baixos de Fato de Inflação de Variância (VIF) reforçam a robustez do modelo em termos de previsibilidade e interpretação dos coeficientes. A ausência de multicolinearidade forte é um ponto positivo para a qualidade da análise de regressão, pois garante que as variáveis independentes têm contribuições independentes e valiosas para o modelo.

4.8. COEFICIENTES DA REGRESSÃO LOGÍSTICA E RAZÃO DE CHANCES

O comportamento das variantes estudadas pode ser representado na tabela de coeficientes a seguir.

Tabela 6 – Coeficientes

Modelo	Variável	Estimativa	Erro Padrão	Razão de Chances (Odds ratio)
M ₀	(Intercept)	0,565	0,233	1,759
M ₁	(Intercept)	-7,047	2,119	0,0008701
	Percentual_Caminhões	0,351	0,092	1,421
	Inclinação_Absoluta	1,249	19,924	3,488
	Volume_Medio_Diario	0,001	0,001	1,001

Na Tabela 6, os coeficientes de regressão logística são acompanhados de

Erros Padrão e da Razão de Chances (*Odds ratio*) para cada variável explicativa. A *Odds ratio* indica a mudança nas chances de ocorrência de um evento (neste caso, trincas por fadiga) para cada unidade de mudança na variável explicativa, mantendo as outras constantes.

4.8.1. Impacto do Percentual de Caminhões

Para a variável Percentual de Caminhões (coeficiente 0,351), a *Odds ratio* correspondente é 1,42. Isso significa que, para cada aumento de 1 unidade no percentual de caminhões, as chances de ocorrência de trincas aumentam em 42%.

Para Inclinação Absoluta (coeficiente 1,249), a *Odds ratio* é 3,49. Ou seja, um aumento de 1 unidade na inclinação aumenta as chances de ocorrência de trincas em 349%.

4.8.2. Impacto do Volume Médio Diário (VMD)

Volume Médio Diário (VMD) (coeficiente 0,001) tem uma *Odds ratio* de 1,001, indicando que o aumento do volume de tráfego tem um impacto muito pequeno nas chances de ocorrência de trincas.

Essa análise de *Odds ratio* ajuda a entender a importância relativa de cada variável na previsão das falhas dos pavimentos e facilita a interpretação dos resultados do modelo de regressão logística.

A equação apresentada representa a função logística ajustada com os coeficientes estimados a partir dos dados analisados. Nela, o valor de z corresponde à combinação linear das variáveis explicativas:

$$z = -7,047 + 0,351 \cdot X_1 + 1,249 \cdot X_2 + 0,001 \cdot X_3$$

Onde:

- X_1 : Percentual de Caminhões;
- X_2 : Volume Médio Diário (VMD);
- X_3 : Inclinação Absoluta.

O intercepto (-7,047) indica o valor base de z quando todas as variáveis independentes são iguais a zero. O coeficiente 0,351 para X_1 sugere que, a cada aumento de uma unidade percentual no volume de caminhões, a chance de ocorrência de trincas aumenta, mantendo-se as demais variáveis constantes.

De forma análoga, o coeficiente 1,249 associado ao VMD indica um impacto ainda mais expressivo na probabilidade de ocorrência, enquanto o coeficiente da inclinação (0,001) sugere um efeito positivo, porém muito pequeno. Esse efeito pode ser mais bem compreendido ao se analisar a razão de chances (OR), que revelou um impacto de 42,1% na probabilidade de formação de trincas, em comparação com a ausência dessa variável no modelo explicativo.

A função logística transforma essa combinação linear em uma probabilidade entre 0 e 1, por meio da fórmula:

$$\pi = 1 / (1 + e^{(-z)})$$

Assim, o modelo pode ser utilizado para estimar a probabilidade de falhas estruturais com base nos dados observados de tráfego e geometria da via.

Além disso, essa influência também pode ser visualizada no Gráfico 5, que ilustra a tendência crescente da probabilidade de trincamento conforme há um aumento no percentual de veículos pesados sem tráfego. Esse achado reforça a relevância do percentual de tráfego como um fator determinante para a manipulação do pavimento rodoviário.

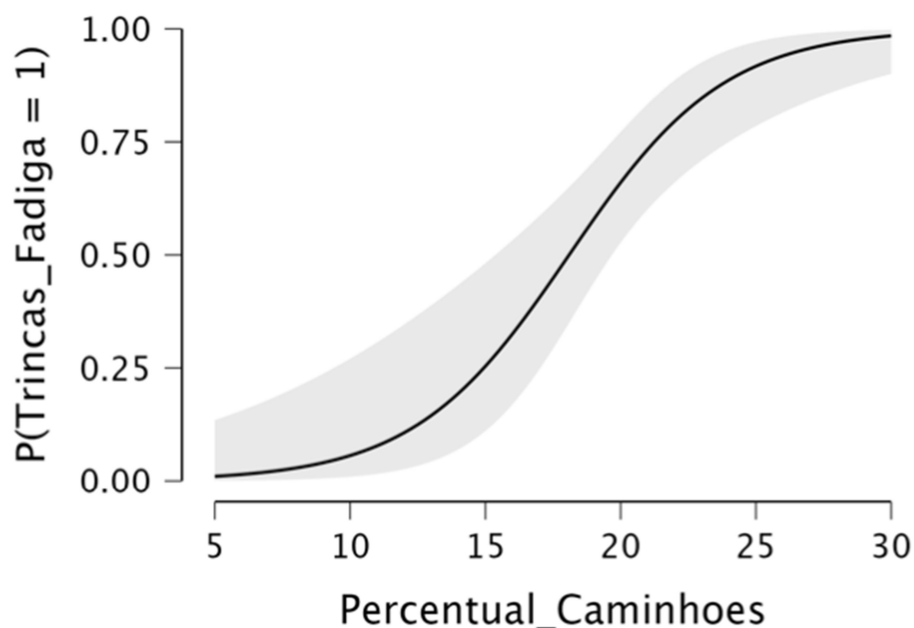


Gráfico 6 – Elevação da probabilidade de patologias na forma de trinca devido ao aumento do percentual de caminhões, segundo os resultados do banco de dados.

O VMD apresentou uma influência menos expressiva sobre a probabilidade de ocorrência de trincas no pavimento rodoviário. Uma razão de chances (OR) de 1.001 indica que a presença dessa variável no modelo não alterou significativamente a previsão das previsões em comparação com a sua ausência.

Apesar disso, observa-se que o coeficiente estimado para o VMD foi positivo (0,001), indicando uma leve tendência de aumento na probabilidade de trincas à medida que o volume de tráfego cresça. Esse comportamento pode ser visualizado no Gráfico 6, onde a curva apresenta uma especificação positiva, embora menos destacada do que a observada no Gráfico 5, para o percentual de caminhões. Esse resultado reforça a ideia de que, embora o VMD tenha alguma influência na amplitude do pavimento, seu impacto é consideravelmente menor quando comparado à presença de veículos pesados.

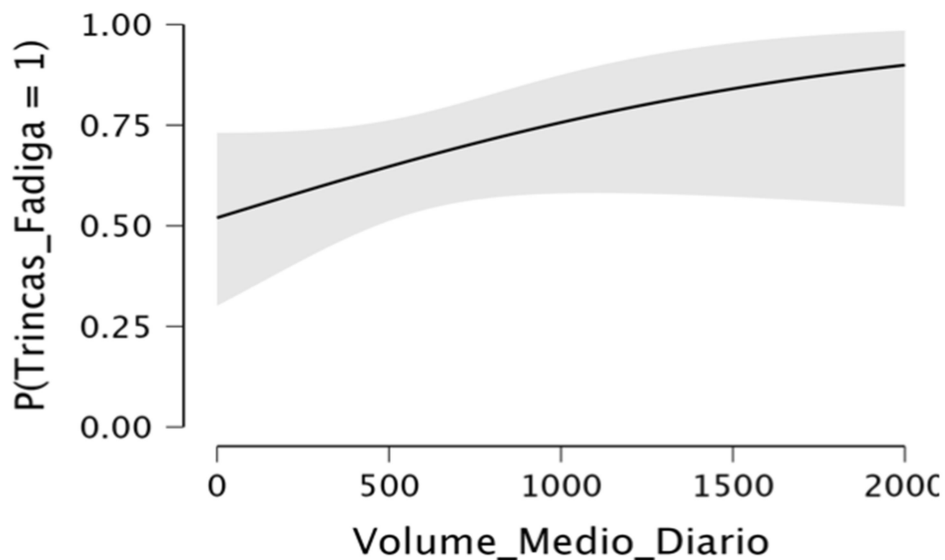


Gráfico 7 - Elevação da probabilidade de patologias na forma de trinca devido ao VMD, segundo os resultados do banco de dados.

4.8.3. Impacto da Inclinação Absoluta

A direção longitudinal da pista apresentou uma razão de chances (OR) de 3.488, indicando que a presença dessa variável no modelo está associada a um

aumento de 348% na probabilidade de ocorrência de trincas, em comparação com sua ausência.

No entanto, apesar desse valor relativamente elevado, a análise do comportamento da variável no Gráfico 7 revela uma alta variabilidade nos dados, com uma concentração significativa de observações nos extremos do intervalo de inclinações.

Esse padrão sugere que a magnitude da razão de chances pode ter sido influenciada por essa distribuição assimétrica dos dados, resultando em uma possível superestimação do efeito da orientação longitudinal. Além disso, observe que a orientação da curva de probabilidade é quase horizontal, o que indica uma grande variabilidade no erro padrão e reduz a confiabilidade da associação entre a proteção e a ocorrência de trincas.

Esses fatores reforçam a necessidade de uma interpretação cautelosa desse coeficiente, considerando a dispersão dos dados e a incerteza estatística associada à estimativa.

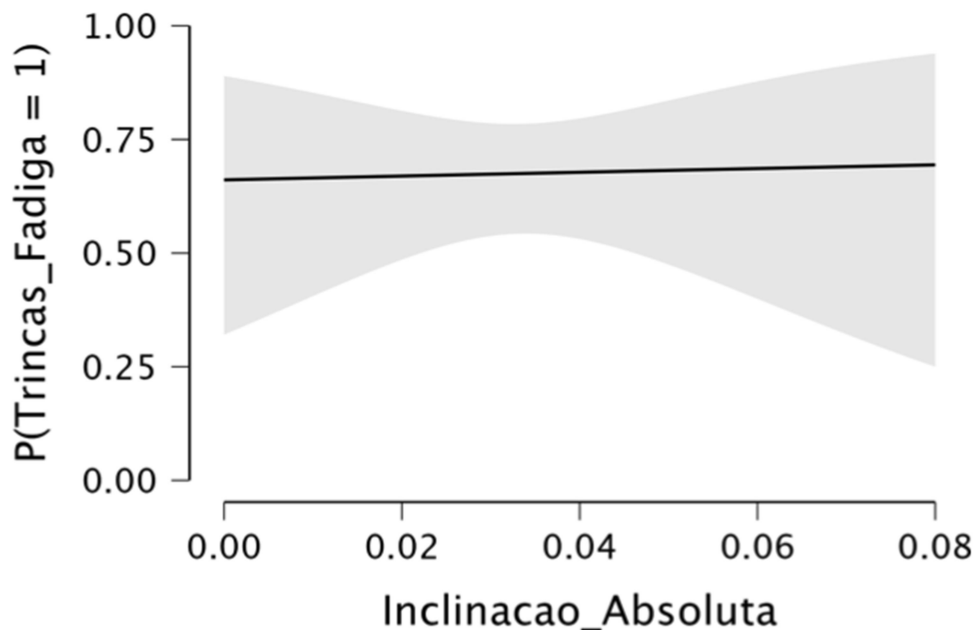


Gráfico 8 - Elevação da probabilidade de patologias na forma de trinca devido a inclinação do trecho viário, segundo os resultados do banco de dados.

4.9. REGRESSÃO LOGÍSTICA COMO FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO NA CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS

A regressão logística pode ser utilizada como uma ferramenta estatística auxiliar na tomada de decisão para a conservação de pavimentos flexíveis, uma vez que permite modelar a probabilidade de ocorrência de falhas estruturais, como a incidência de trincas por fadiga. Conforme Fernandes (2021), esse modelo é especialmente adequado para lidar com variáveis dependentes dicotômicas, ou seja, quando o evento de interesse pode assumir apenas duas categorias distintas, como a presença ou ausência de trincas. Além disso, possibilita a estimativa da influência de fatores explicativos, tais como o percentual de tráfego pesado, a orientação da pista e o VMD, sobre a manipulação do pavimento.

A aplicação da regressão logística na engenharia de transportes contribui para a identificação dos fatores mais críticos para o controle das vias, permitindo que gestores e especialistas quantifiquem o impacto de cada variável sobre a probabilidade de surgimento de danos estruturais. A partir dos coeficientes estimados pelo modelo, é possível calcular probabilidades preditivas, o que viabiliza uma abordagem baseada em evidências para a priorização da manutenção viária. Isso significa que, ao analisar um conjunto de dados históricos e variáveis operacionais da via, a regressão logística pode indicar quais trechos possuem maior probabilidade de apresentar falhas, tornando-se um subsídio fundamental para a definição de estratégias preventivas.

A utilização desse modelo estatístico favorece a otimização dos recursos destinados à manutenção dos pavimentos, pois permite direcionar as instruções para os trechos mais suscetíveis a problemas estruturais, reduzindo assim os custos operacionais e aumentando a eficiência das ações corretivas. Além disso, ao integrar a regressão logística em um sistema de gestão viário, é possível estabelecer políticas mais eficazes de conservação, minimizando a necessidade de reparos emergenciais e garantindo melhores condições de trafegabilidade. Dessa forma, a adoção desse método estatístico na análise da flexibilidade dos pavimentos flexíveis revela uma alternativa relevante para a tomada de decisão, promovendo um planejamento mais preciso e estratégico na gestão da infraestrutura urbana.

Dentre as técnicas mais comuns na avaliação de pavimentos para fins de

conservação, a regressão logística pode ser incorporada como uma ferramenta eficaz. Conforme apontado por Gonzalez (2018), os métodos tradicionais incluem modelos mecânicos-empíricos, que permitem prever falhas estruturais com base em parâmetros físicos e operacionais das vias. Além disso, técnicas de inteligência artificial são amplamente empregadas para previsão de falhas, utilizando grandes volumes de dados para identificar padrões de orientações e sugerir ações corretivas. No âmbito estatístico, a regressão logística se destaca por possibilitar a estimativa da probabilidade de ocorrência de danos, contribuindo para a otimização das estratégias de manutenção preventiva e a consequente redução de custos operacionais.

A análise dos dados disponíveis revela valores críticos que impactam diretamente a integridade dos pavimentos. Nesse sentido, a aplicação da regressão logística pode ser um suporte fundamental para a antecipação de falhas e a elaboração de planos de conservação mais eficientes. Os estudos analisados reforçam a relevância da modelagem preditiva na gestão de infraestrutura viária, evidenciando sua importância para a tomada de decisões baseadas em dados e para a melhoria da manutenção urbana.

Conforme de Carvalho *et al.* (2022), a previsão do uso desse modelo é reforçada por estudos acadêmicos que indicam a influência significativa do tráfego e da carga veicular na manipulação dos pavimentos. Além disso, pesquisas mostram que a fiscalização de sobrecargas pode prolongar a vida útil das rodovias em até 50 %.

A base de dados apresenta valores críticos que afetam a integridade dos pavimentos. O uso da Regressão Logística pode ser um suporte eficiente para prever falhas e melhorar a conservação das vias. A aplicação desses métodos é reforçada pelos estudos anexados, que destacam a importância da modelagem preditiva para manutenção urbana.

É importante reconhecer que a análise de regressão logística é sensível aos valores observados no banco de dados utilizado. Como os dados empregados neste estudo foram gerados artificialmente por meio de uma ferramenta de inteligência artificial, é possível que estejam sujeitos a padrões de aprendizado de máquina que, embora estatisticamente coerentes, podem conter vícios que impactam a generalização dos resultados. A decisão de utilizar um banco de dados fictício foi

motivada tanto pela indisponibilidade de dados reais quanto pela necessidade de obter rapidamente informações minimamente consistentes que viabilizassem a aplicação da técnica estatística proposta.

A estrutura do banco de dados impacta diretamente os resultados obtidos pela regressão logística, especialmente em relação à correlação entre as variáveis explicativas. Essa técnica apresenta melhor desempenho preditivo quando as variáveis independentes são estatisticamente pouco correlacionadas. No entanto, no contexto da pavimentação urbana, é comum que os fatores associados às patologias — como tráfego pesado, inclinação da via e VMD — apresentem interdependências significativas. Esse aspecto representa uma limitação da técnica, já que a presença de multicolinearidade pode comprometer a interpretação isolada dos coeficientes. Ainda assim, a regressão logística mantém sua relevância como ferramenta de apoio à decisão, especialmente quando empregada com critérios técnicos que considerem essas limitações e busquem aperfeiçoar a modelagem e a coleta de dados futuros.

Embora este estudo tenha utilizado a regressão logística binária como técnica principal para modelagem da ocorrência de trincas por fadiga, outras abordagens estatísticas e computacionais também têm sido exploradas na literatura para avaliação da condição de pavimentos. Modelos como redes neurais artificiais, árvores de decisão, análise discriminante e técnicas baseadas em séries temporais apresentam potencial para lidar com relações não lineares entre variáveis, além de oferecerem métricas preditivas distintas. A comparação entre essas metodologias pode ampliar a compreensão sobre o comportamento dos pavimentos e possibilitar a escolha de ferramentas mais ajustadas a contextos específicos. Assim, estudos futuros poderão se beneficiar da experimentação e comparação entre diferentes modelos, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais robustas e adaptadas à realidade urbana.

Uma das principais melhorias possíveis no modelo proposto seria a utilização de dados reais e em maior escala. A coleta de informações provenientes de levantamentos em campo, com representatividade amostral e variedade de contextos urbanos, permitiria maior robustez estatística à análise, reduzindo a chance de viés e aumentando a capacidade preditiva do modelo. A utilização de um banco de dados fictício, embora metodologicamente válida, apresenta limitações

inerentes à simulação e não contempla toda a complexidade dos fenômenos observados nas vias urbanas reais. Assim, o aperfeiçoamento do modelo passa diretamente pela viabilidade de acesso a bases reais de dados sobre patologias, tráfego e geometria das vias.

5 CONCLUSÕES

A regressão logística se mostrou uma técnica eficaz para o estudo da conservação de pavimentos flexíveis, permitindo quantificar a probabilidade de ocorrência de trincas por fadiga com base em variáveis explicativas, como inclinação absoluta, VMD de tráfego e percentual de caminhões. A metodologia possibilitou identificar fatores críticos que influenciam a deterioração, como o impacto significativo de veículos pesados, contribuindo para a priorização de decisões preditivas baseadas em dados. Isso pode otimizar a manutenção preventiva e reduzir custos operacionais.

Os principais agentes deflagradores e fatores de influência nas patologias de pavimentos urbanos foram identificados. O percentual de caminhões foi destacado como o principal fator de impacto, dada a sobrecarga exercida por veículos pesados. Embora a inclinação absoluta tenha sido um fator relevante, o volume médio diário de tráfego demonstrou um impacto mais substancial, especialmente em situações de tráfego intenso, acelerando o desgaste do pavimento. Esses fatores foram avaliados isoladamente e em combinação, revelando como o alto volume de tráfego, associado ao elevado percentual de caminhões e à inclinação da via, contribui para a deterioração acelerada das vias.

Além disso, a análise das interações entre variáveis, como o volume de tráfego e o percentual de caminhões, mostrou um impacto crítico na probabilidade de ocorrência de trincas. A combinação desses fatores é fundamental para decisões mais precisas sobre a manutenção e priorização das vias.

Embora o modelo tenha apresentado uma acurácia superior a 70%, a especificidade foi relativamente baixa (cerca de 50%), o que compromete a confiabilidade do modelo em prever corretamente os trechos sem falhas. Isso é crucial para a priorização de manutenção preventiva, pois pode levar à negligência de áreas que, apesar de parecerem em boas condições, realmente necessitam de atenção.

Outro aspecto relevante foi a concentração de valores extremos na variável inclinação absoluta, o que impactou negativamente a razão de chances e o erro padrão dessa variável. Isso indica a necessidade de uma amostra mais representativa e balanceada, com maior variabilidade entre os fatores analisados.

Embora o uso de um banco de dados fictício tenha sido viável metodologicamente, ele não refletiu todas as nuances operacionais e geométricas das vias urbanas reais.

Apesar dessas limitações, a metodologia permitiu identificar e interpretar corretamente os fatores de influência, oferecendo subsídios valiosos para a definição de estratégias de conservação urbana. As interações entre tráfego intenso, percentual de caminhões e geometria da via demonstraram consistência com a literatura existente.

Em resumo, o modelo desenvolvido tem grande potencial, mas necessita de ajustes para aplicação prática. Estudos futuros devem focar na coleta de dados reais, ampliação da amostragem e na experimentação com outras técnicas estatísticas, como redes neurais artificiais e árvores de decisão. Essas abordagens podem melhorar a robustez preditiva, reduzir vieses analíticos e promover uma gestão mais eficiente e sustentável da infraestrutura viária urbana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA

- ARRUDA, Amanda Mendes *et al.* Análise do fenômeno fadiga em diferentes condições de frequência e temperatura. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba, 66 p., 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/23726>. Acesso em 05 dez. 2024.
- ASTM. ASTM D6433-20. Standart Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM International. EUA, 2023. Disponível em: <https://www.astm.org/d6433-20.html>. Acesso em 10 fev. 2025.
- BIANCHI, Flavia Regina; BRITO, Isis Raquel Tacla; CASTRO, Veronica Amanda Brombley. Estudo comparativo entre pavimento pavimento rígido e flexível. 50º Congresso Brasileiro do Concreto. **IBRACON**, 2008. Disponível em: https://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf. Acesso em: 09 fev. 2025.
- CNT. **Anuário CNT do Transporte** – Estatísticas Consolidadas. Brasília, Confederação Nacional do Transporte, 2022. Disponível em <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Inicial>. Acesso em 16 jul. 2024.
- CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília, Confederação Nacional do Transporte, 2022. Disponível em <http://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em 16 jul. 2024.
- CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2024: relatório executivo**. Brasília: CNT, 2024. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- DAMBRO FERNANDES, Wagner. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da Aashto**. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2016, 169p. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7929>. Acesso em 09 fev. 2025.
- DAOUD, J. I. Multicollinearity and Regression Analysis. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 949, n. 1, dez. 2017.
- DE CARVALHO, Diogenes Costa *et al.* Avaliação da Sobrecarga na Vida Útil de Pavimento Flexível–Estudo de Caso em Veículos de Usina Sucroalcooleira. **ETIS-Journal of Engineering, Technology, Innovation and Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 81-94, 2022. Disponível em: <https://revistas.unievangelica.edu.br/index.php/etis/article/view/3885>. Acesso em 12 dez. 2024.
- DE LACERDA, Isadora Alves. Consensualidade na Administração Pública e a renegociação de concessões urbanas federais Brasil. **Revista do Ministério Público de Contas do Estado do Paraná**, v. 11, n. 20, p. 53-70, 2024. Disponível em: <https://www.revista.mpc.pr.gov.br/index.php/RMPCPR/article/view/166>. Acesso em 09 dez. 2024.
- DE MIRANDA, Rian das Dores; DA SILVA, Walber Paschoal; ROSS, Steven Dutt. Metodologia de análise do impacto de obras de melhoria urbana sobre a segurança do tráfego, utilizando Sig e regressão logística multinomial. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 8881-8902, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/23626>. Acesso em 13 set. 2024.
- DE OLIVEIRA, Silvio Lacerda *et al.* Ecologia de estradas: estado da arte no Brasil e no mundo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 98546-98573, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/21655>. Acesso em 12 dez. 2024.

DE PAULA ARAÚJO, Érica Francisca *et al.* 26º Encontro Nacional de Conservação Urbana (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv). Aracaju/SE, 19 a 22 ago. 2024. Disponível em: <https://rapvenacor.com.br/anais/2024/EC635.pdf>. Acesso em 10 dez. 2024.

DE PAULA VEIGA, Rafael Augusto *et al.* Novas tecnologias na malha viária para mobilidade urbana. **PI-Pesquisa e Inovação**, v. 1, n. 1, p. 86-99, 2019. Disponível em <https://revista.camporeal.edu.br/index.php/pi/article/view/282>. Acesso em 17 jul. 2024.

DE SOUZA, João Paulo Marçal *et al.* Análise de metodologias avaliativas para classificação das condições funcionais de pavimentos asfálticos: um estudo bibliográfico. In: **5º Simpósio de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação**. 2023. Disponível em: <https://eventos.ifpb.edu.br/index.php/v-simpif/v-simpif/paper/view/4327>. Acesso em 15 jul. 2024.

DNIT / UFSC. **Análise e tratamento estatístico dos resultados de contagens de tráfego**. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2008. Disponível em: <https://www.labtrans.ufsc.br/wp-content/uploads/2020/12/Produto-2-%E2%80%93-Listagem-dos-postos-de-contagem-e-seus-VMD-para-o-ano-de-2006.-DNT-2008..pdf>. Acesso em 10 fev. 2025.

DNIT. **Manual de Estudos de Tráfego**. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Urbanas, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em 10 fev. 2025.

DNIT. **Norma DNIT 005/2003**. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Urbanas. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf. Acesso em 10 fev. 2025.

DNIT. **Norma DNIT 006/2003**. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Urbanas. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNIT_006_2003_PRO. Acesso em 10 fev. 2025.

DNIT. **Norma DNIT 008/2003**. Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Urbanas. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNIT_008_2003_PRO. Acesso em 10 fev. 2025.

FERNANDES, Antônio Alves Tôres *et al.* Leia este artigo se você quiser aprender regressão logística. **Revista de Sociologia e Política**, v. 28, p. 006, 2021. Disponível em <https://doi.org/10.1590/1678-987320287406en>. Acesso em 09 set. 2024.

FERNANDES, Wagner Dambro. Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da Aashto. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2016, 169p. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7929>. Acesso em 09 fev. 2025.

FERRI, Santi. **Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-29072013-121302/en.php>. Acesso em 03 dez. 2024.

GONÇALVES, E; COUTO, Cleno; MELO, Saulo Barros de; NEIVA, Elaine Rabelo. **Análises estatísticas JASP: um guia introdutório**. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://jasp-stats.org/wp-content/uploads/2023/04/v.2-Analises-Estatisticas-com-JASP-Um-Guia-Introdutorio.pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2025.

GONZALEZ, Leandro de Azevedo. Regressão logística e suas aplicações. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Curso de Graduação em Ciência da Computação. Universidade Federal do Maranhão, 46p. 2018. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/3572/1/LEANDRO-GONZALEZ.pdf>. Acesso em 09 set. 2024.

GOSS-SAMPSON, M. Statistical analysis in JASP: a guide for students. JASP, 2019. Disponível em: <https://gala.gre.ac.uk/id/eprint/25585/>. Acesso em 10 fev. 2025.

GUO, Rui *et al.* Analysis of factors that influence anti-rutting performance of asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119237, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820312423>. Acesso em 10 dez. 2024.

HASSAN, R. A. Modelling bituminous surfacing distress data using logistic regression. **WIT transactions on the built environment**, v. 1, p. 435–446, 30 abr. 2015.

HU, Xiaodi *et al.* Effects of tire inclination (turning traffic) and dynamic loading on the pavement stress–strain responses using 3-D finite element modeling. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 10, n. 4, p. 304-314, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630164X>. Acesso em 12 dez. 2024.

JUSTO-SILVA, R.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. Review on Machine Learning Techniques for Developing Pavement Performance Prediction Models. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 5248, 7 maio 2021.

LORINO, T. *et al.* Modeling the Road Degradation Process: Non-linear Mixed Effects Models for Correlation and Heteroscedasticity of Pavement Longitudinal Data. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 48, p. 21–29, 14 jul. 2012.

LUO, X. *et al.* Factor analysis of maintenance decisions for warranty pavement projects using mixed-effects logistic regression. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 3, p. 683–694, 18 maio 2020.

MESQUITA, PAULO SÉRGIO BELCHIOR. Um modelo de regressão logística para avaliação dos programas de pós-graduação no Brasil. Dissertação de Mestrado. UENF, 2014. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-producao/wp-content/uploads/sites/13/2013/04/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Paulo-Mesquita.pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2025.

MIRANDA, Rian das Dores de; SILVA, Walber Paschoal da; ROSS, Steven Dutt. Metodologia de análise do impacto de obras de melhoria urbana sobre a segurança do tráfego, utilizando sig e regressão logística multinomial. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 8881–8902, 1 jan. 2021.

NAKAHARA, Suyen Matsumura. **Estudo do desempenho de reforços de pavimentos asfálticos em via urbana sujeita a tráfego comercial pesado**. 2005. 329f. (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2005. Disponível em <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7655>. Acesso em 13 set. 2024.

PEREIRA, André Luiz. Considerações sobre o método ABCP de dimensionamento de pavimentos

urbanos de concreto estruturalmente armado. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiás, 2020, 31p. Disponível em: https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/961/1/Trabalho_007.pdf.pdf. Acesso em 09 fev. 2025.

STRIEDER, Helena; ISATTO, Eduardo Luis; NÚÑEZ, Washington Peres. 25º Encontro Nacional de Conservação Urbana (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv). Foz do Iguaçu/PR: 19 a 22 set. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Helena-Lunkes-Strieder/publication/375274124_Abordagem_para_avaliacao_de_vulnerabilidades_a_riscos_climaticos_da_infraestrutura_rodoviaria/links/6544f7343fa26f66f4d25e0d/Abordagem-para-avaliacao-de-vulnerabilidades-a-riscos-climaticos-da-infraestrutura-rodoviaria.pdf. Acesso em 04 dez. 2024.

VITTINGHOFF, Eric; MCCULLOCH, Charles E. Relaxing the rule of ten events per variable in logistic and Cox regression. *American Journal of Epidemiology*, v. 165, n. 6, p. 710–718, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aje/kwk052>. Acesso em: 29 abr. 2025.

XAVIER, A.; CARVALHO, Y.; GÓES, G. Introdução ao Software R e à Análise Econométrica Junho a Setembro de 2018. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/3452/3/Aula%20%20-%20Geraldo%20Goes%20e%20Alexandre%20Ywata%20-%20Introdu%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0%20Regress%C3%A3o%20Log%C3%ADstica.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2025.

YE, Zhihao. Research on Asphalt Pavement Diseases and Construction Quality Control under the Background of Big Data. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2021. p. 042139. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1744/4/042139/pdf>. Acesso em 10 dez. 2024.