



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**GERAÇÃO DE MODELO VIA REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA DESCREVER O
AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA**

EDILENE DE SOUSA MARTINS

BELÉM - PA

2026

EDILENE DE SOUSA MARTINS

**GERAÇÃO DE MODELO VIA REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA DESCREVER O
AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de Engenharia
Civil do Instituto de Tecnologia da
Universidade Federal do Pará, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Gérson Jacques
Miranda dos Anjos.

BELÉM - PA

2026

EDILENE DE SOUSA MARTINS

**GERAÇÃO DE MODELO VIA REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA DESCREVER O
AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de Engenharia
Civil do Instituto de Tecnologia da
Universidade Federal do Pará, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Gérson Jacques
Miranda dos Anjos.

Belém, 05/06/2026

Examinadores

Prof. D.Sc. Gérson Jacques Miranda dos Anjos.

Universidade Federal do Pará | UFPA

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar

Universidade Federal do Pará | UFPA

Membro da banca

Profº. Dr. Rodrigo da Cruz de Araújo

Universidade Federal do Pará | UFPA

Membro da banca

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada.

À minha família, Agradeço ao meu pai, Esaú, e a minha mãe Leci, e meus irmãos pelo apoio constante e pela base que sempre me proporcionaram, pelo apoio incondicional, incentivo e compreensão durante os momentos de maior dedicação. Ao meu orientador, expresso minha gratidão pela paciência, pela orientação técnica, paciência e pelas contribuições essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu companheiro, Wilson Filho, registro meu reconhecimento pelo incentivo e compreensão ao longo desta jornada

Aos colegas e amigos que, direta ou indiretamente, colaboraram com palavras de apoio, compartilhamento de conhecimentos e motivação contínua.

Por fim, agradeço às instituições e profissionais que forneceram suporte e materiais necessários para que esta pesquisa fosse concluída com êxito.

“A coragem não é a ausência do medo;
mas o triunfo sobre ele.” -Nelson Mandela

MARTINS, Edilene. **GERAÇÃO DE MODELO VIA REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA DESCREVER O AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA**. 2026. 50 p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2026.

RESUMO

A infraestrutura viária constitui elemento essencial para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, sendo os pavimentos flexíveis a solução predominante em virtude de sua adaptabilidade e menor custo inicial. Entretanto, um dos principais problemas enfrentados por esse tipo de estrutura é o afundamento de trilha de roda (ATR), que compromete a segurança, o conforto e a durabilidade das rodovias. Os métodos tradicionais de dimensionamento, como o do DNER/1966, mostraram-se insuficientes para prever o fenômeno, motivando a adoção do método mecanístico-empírico MeDiNa. Contudo, a aplicação plena do MeDiNa é limitada pelo elevado custo e pela complexidade dos ensaios laboratoriais exigidos. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de Rede Neural Artificial (RNA) capaz de prever o ATR a partir de parâmetros do tráfego, da base e do subleito, utilizando uma base de 1250 simulações realizadas no MeDiNa. O modelo foi treinado pelo algoritmo de retropropagação, validado por métricas estatísticas (R^2 , RMSE, SSE, MAPE) e comparado a métodos de regressão linear múltipla. Os resultados demonstraram elevado desempenho da RNA, com $R^2 \approx 0,998$ e mínima dispersão em relação à reta de tendência 1:1, superando os modelos lineares tradicionais. A análise de sensibilidade indicou que os coeficientes estruturais Ψ_4 e Ψ_2 foram os mais influentes, enquanto tráfego e coeficiente de Poisson tiveram impacto secundário. Conclui-se que a RNA constitui alternativa eficiente ao MeDiNa, oferecendo contribuição metodológica e prática para o dimensionamento de pavimentos, sobretudo em regiões onde há limitações de ensaios laboratoriais.

Palavras-chave: Pavimentos flexíveis. Afundamento de trilha de roda. MeDiNa. Rede Neural Artificial. Dimensionamento mecanístico-empírico.

MARTINS, Edilene. **GENERATION OF A MODEL BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TO DESCRIBE RUTTING**. 2026. 50 p. Undergraduate Thesis (Civil Engineering) – Faculty of Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém, 2026.

ABSTRACT

Road infrastructure is an essential element for Brazil's socioeconomic development, with flexible pavements representing the predominant solution due to their adaptability and lower initial costs. However, one of the main problems faced by this type of structure is rutting, which compromises road safety, user comfort, and pavement durability. Traditional design methods, such as DNER/1966, have proven insufficient to predict this phenomenon, which motivated the adoption of the mechanistic-empirical method MeDiNa. Nevertheless, the full application of MeDiNa is limited by the high cost and complexity of the required laboratory tests. In this context, this study aimed to develop an Artificial Neural Network (ANN) model capable of predicting rut depth (ATR) based on traffic, base, and subgrade parameters, using a dataset of 1250 simulations generated by MeDiNa. The model was trained using the backpropagation algorithm, validated with statistical metrics (R^2 , RMSE, SSE, MAPE), and compared to multiple linear regression models. The results demonstrated the ANN's high performance, with $R^2 \approx 0.998$ and minimal dispersion relative to the 1:1 trend line, outperforming traditional linear models. Sensitivity analysis indicated that structural coefficients Ψ_4 and Ψ_2 were the most influential parameters, followed by Ψ_3 , while traffic (N) and the Poisson ratio showed secondary influence. It is concluded that ANN constitutes an efficient alternative to MeDiNa, offering methodological and practical contributions to pavement design, particularly in regions where laboratory tests are limited.

Keywords: Flexible pavements. Rutting. MeDiNa. Artificial Neural Network. Mechanistic-empirical design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura típica de um pavimento flexível	18
Figura 2 - Afundamento em Trilha de Roda na Pavimentação Asfáltica	21
Figura 3 - Tela inicial MeDiNa.....	33
Figura 4 - Exemplo de Redes Neurais Artificiais	37
Figura 5 - Arquitetura da Rede Neural Artificial e desempenho estatístico (treinamento e validação)	48
Figura 6 - Importância relativa das variáveis na predição do ATR (mm)	49
Figura 7 - Relação entre valores observados (MeDiNa) e previstos pela RNA para o ATR (mm).....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Modos de falha em pavimentos flexíveis: causas e efeitos.....	19
Quadro 2 - Tipologias do afundamento de trilha de roda em pavimentos flexíveis ...	22
Quadro 3 - Código da RNA – Arquitetura final.....	4645

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANN – *Artificial Neural Network* (Rede Neural Artificial)

ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

ATR – Afundamento de Trilha de Roda

CBR – *California Bearing Ratio* (Índice de Suporte Califórnia)

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias

K1 – Parâmetro de deformação permanente utilizado no MeDiNa

MAPE – *Mean Absolute Percentage Error* (Erro Percentual Absoluto Médio)

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Asfálticos

MR – Módulo de Resiliência

RASE – *Root Average Squared Error* (Raiz Quadrada do Erro Médio ao Quadrado)

RNA – Rede Neural Artificial

RMSE – *Root Mean Square Error* (Raiz do Erro Quadrático Médio)

R^2 – Coeficiente de Determinação

SSE – *Sum of Squared Errors* (Soma dos Erros ao Quadrado)

Ψ_i (Psi i) – Coeficientes de regressão utilizados no modelo de deformação permanente do MeDiNa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 Justificativa	15
1.4 Estrutura do Trabalho	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Pavimentos Flexíveis: aspectos estruturais e funcionais	18
2.2. Afundamento de Trilha de Roda (ATR)	21
2.3. Fatores que influenciam o ATR.....	25
2.4. Evolução dos Métodos de Dimensionamento	28
2.5. Software MeDiNa.....	32
2.6. Modelos de Previsão Aplicados ao ATR	35
2.7. Redes Neurais Artificiais (RNA)	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. Fonte de Dados	40
3.2. Pré-processamento dos Dados	41
3.3. Arquitetura da RNA.....	42
3.4. Procedimentos de Treinamento e Validação.....	43
3.5. Análise de Sensibilidade	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1. Função Matemática Gerada pela RNA	46
4.2. Desempenho do Modelo de Rede Neural Artificial	47
4.3. Importância das Variáveis	48
4.4. Validação Gráfica.....	50
4.5. Comparação com Modelos Tradicionais	51
4.6. Discussão dos Resultados.....	52

5. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transportes constitui elemento fundamental para o desenvolvimento econômico e social de qualquer nação, uma vez que viabiliza a circulação de bens, pessoas e serviços, reduzindo custos logísticos e ampliando a competitividade regional. No Brasil, país de dimensões continentais, a rede rodoviária desempenha papel ainda mais estratégico, por concentrar a maior parte do transporte de cargas e passageiros. Conforme ressaltam Bernucci et al. (2010) e Balbo (2007), a qualidade dos pavimentos está diretamente associada à eficiência da malha rodoviária, influenciando a produtividade de setores econômicos e o bem-estar da população.

Entre os tipos de pavimento empregados, os pavimentos flexíveis representam a solução predominante no território nacional, devido ao menor custo inicial de implantação, maior facilidade construtiva e adaptabilidade às condições geotécnicas locais. Essa predominância é destacada por Brito e Graeff (2009), ao observar que a pavimentação flexível se consolidou como a principal escolha em rodovias federais e estaduais, especialmente em virtude da disponibilidade de materiais asfálticos no mercado interno. Apesar dessas vantagens, trata-se de uma estrutura sensível à ação repetida das cargas do tráfego, demandando constante monitoramento e intervenções periódicas de manutenção.

Um dos problemas mais recorrentes em pavimentos flexíveis é o afundamento de trilha de roda (ATR), que consiste na formação de depressões longitudinais nas faixas de rolamento devido ao acúmulo de deformações permanentes nas camadas do pavimento. Esse defeito compromete não apenas o conforto dos usuários, mas também a segurança viária, aumentando o risco de aquaplanagem, perda de controle e acidentes, além de elevar os custos de manutenção e reabilitação. Estudos como os de Fernandes Júnior (1994) e Guimarães (2009) demonstram que a deformação permanente é um dos principais mecanismos de deterioração de pavimentos no Brasil, sobretudo em regiões de intenso tráfego rodoviário.

Nesse contexto, a previsão adequada do ATR torna-se um desafio central para engenheiros projetistas e gestores de infraestrutura. Métodos empíricos historicamente utilizados no país, como o do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER/1966), mostraram-se insuficientes para capturar a complexidade do fenômeno, baseando-se apenas em observações experimentais acumuladas ao longo

de décadas. Com o avanço das pesquisas, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) implementou o MeDiNa, um método mecanístico-empírico que permite relacionar variáveis de tráfego, materiais e estrutura do pavimento com o desempenho ao longo do tempo (DNIT, 2022).

Apesar dos avanços representados pelo MeDiNa, a aplicação prática do método ainda enfrenta limitações relacionadas ao custo elevado e à complexidade dos ensaios laboratoriais exigidos, necessários para determinar parâmetros como os coeficientes de deformação permanente (Ψ) e o módulo resiliente dos materiais. Esse cenário motivou o surgimento de pesquisas que buscam alternativas computacionais mais acessíveis, capazes de reproduzir ou mesmo superar os resultados obtidos pelo MeDiNa. Nesse campo, destacam-se as Redes Neurais Artificiais (RNAs), ferramentas de inteligência computacional com elevado potencial para modelagem de sistemas não lineares e multifatoriais (Álvares Júnior, 2019; Ardakani; Kordnaeij, 2017).

A previsão do afundamento de trilha de roda ainda se configura como um dos maiores desafios no dimensionamento de pavimentos, sobretudo em função da multiplicidade de variáveis envolvidas, que incluem as características do tráfego, as propriedades mecânicas do subleito e da base, e os parâmetros obtidos em ensaios laboratoriais de deformação permanente. Essa complexidade dificulta a obtenção de modelos matemáticos lineares que representem com precisão o comportamento do pavimento ao longo do tempo (Fernandes Júnior et al., 2007; Almeida, 2022).

Embora o MeDiNa represente um marco metodológico ao incorporar a abordagem mecanístico-empírica no Brasil, sua utilização plena é limitada pelo elevado custo dos ensaios exigidos e pela necessidade de laboratórios especializados. Diante desse cenário, surge a questão central que orienta esta pesquisa: seria possível desenvolver um modelo baseado em Redes Neurais Artificiais capaz de prever o ATR a partir dos parâmetros de tráfego, base e subleito, oferecendo desempenho comparável ou superior ao MeDiNa e aos métodos estatísticos tradicionais?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo baseado em Rede Neural Artificial (RNA) capaz de descrever o afundamento de trilha de roda a partir de parâmetros do tráfego, da base e do subleito.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência dos parâmetros de entrada sobre o ATR; Treinar e validar a RNA a partir de simulações no software MeDiNa; Comparar o desempenho da RNA com modelos tradicionais de regressão; Fornecer subsídios técnicos para projetistas de pavimentos na tomada de decisão.

1.3 Justificativa

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho contribui para o avanço das pesquisas em engenharia de transportes ao aplicar técnicas de inteligência computacional ao dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos. A utilização de RNAs como ferramenta alternativa ao MeDiNa reforça a integração entre métodos tradicionais de engenharia e abordagens inovadoras de modelagem matemática, ampliando as possibilidades de aplicação em contextos de restrição de recursos (Álvares Júnior, 2019; Günaydin, 2009).

No âmbito prático, a pesquisa oferece um modelo alternativo mais acessível e eficiente para a previsão do ATR, o que se torna especialmente relevante em regiões com carência de ensaios laboratoriais especializados, como a região Norte do Brasil. Em tais contextos, o emprego da RNA pode reduzir custos de projeto, acelerar a tomada de decisões e contribuir para a ampliação da malha rodoviária pavimentada, conforme defendem Bernucci et al. (2010).

Outra justificativa reside na importância do ATR como um dos principais mecanismos de falha em pavimentos flexíveis. A dificuldade de previsão desse fenômeno acarreta elevados custos de manutenção e reabilitação, onerando os cofres públicos e comprometendo a segurança dos usuários. Assim, a busca por metodologias que aumentem a precisão das previsões representa também uma forma

de promover a sustentabilidade econômica e operacional das rodovias brasileiras (Brito; Graeff, 2009; Bueno et al., 2017).

Além disso, o estudo contribui para a consolidação de práticas de engenharia que associam tecnologias emergentes a metodologias tradicionais, em consonância com a tendência internacional de integração de ferramentas de inteligência artificial ao dimensionamento de pavimentos (Haas et al., 2007; Schwartz et al., 2013). Dessa forma, o trabalho se insere em um campo inovador, com potencial de impacto tanto no meio acadêmico quanto na prática profissional.

Por fim, a justificativa também se fundamenta na importância estratégica da infraestrutura viária para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, especialmente em regiões de solos tropicais e elevada pluviosidade, como a Amazônia, onde as condições geotécnicas impõem desafios adicionais ao desempenho dos pavimentos. A adoção de modelos computacionais robustos pode contribuir para superar tais limitações, assegurando maior durabilidade das rodovias e promovendo integração regional (Guimarães, 2009).

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, além dos elementos pré-textuais e pós-textuais. No Capítulo 1, apresenta-se a introdução, com a contextualização do tema, a formulação do problema de pesquisa, os objetivos, a justificativa e a estrutura da dissertação. O Capítulo 2 reúne a revisão de literatura, contemplando o estado da arte sobre pavimentos flexíveis, aprofundamento de trilha de roda, métodos de dimensionamento e aplicações de Redes Neurais Artificiais na engenharia de transportes.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos adotados, incluindo a fonte de dados, o pré-processamento, os procedimentos de treinamento e validação e a análise de sensibilidade. O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões, abrangendo a arquitetura da RNA, o desempenho do modelo, a importância das variáveis, a validação gráfica, a formulação matemática obtida, a comparação com modelos tradicionais e a comparação com estudos anteriores.

Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões da pesquisa, destacando a síntese dos achados, as contribuições acadêmicas e práticas, as limitações identificadas e as sugestões para futuras investigações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como objetivo reunir, organizar e discutir os principais referenciais teóricos e práticos relacionados ao dimensionamento e ao desempenho de pavimentos flexíveis, com ênfase no fenômeno do afundamento de trilha de roda (ATR) e nas metodologias utilizadas para sua previsão. A revisão bibliográfica cumpre a função de situar o trabalho no estado da arte da área de Engenharia de Transportes, evidenciando os avanços obtidos nas últimas décadas e as lacunas que justificam a proposta do modelo baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA).

Inicialmente, serão abordados os aspectos estruturais e funcionais dos pavimentos flexíveis, destacando-se sua configuração multicamadas e os principais modos de falha, de modo a fornecer a base conceitual necessária para compreender a relevância do ATR no ciclo de vida das rodovias. Em seguida, discute-se o afundamento de trilha de roda, sua definição segundo a norma DNIT-005/2003-TER, suas tipologias e as implicações no desempenho funcional e estrutural dos pavimentos.

Posteriormente, são analisados os fatores que influenciam a ocorrência do ATR, incluindo as características dos materiais constituintes, a espessura e a rigidez das camadas, as condições de tráfego e os aspectos climáticos, que atuam de forma combinada sobre o processo de deformação permanente. Também se apresenta a evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos no Brasil, desde o método empírico do DNER/1966 até a consolidação do método mecanístico-empírico nacional, o MeDiNa, que representa um marco no avanço da engenharia rodoviária nacional.

O capítulo contempla ainda uma explanação sobre o software MeDiNa, seus fundamentos teóricos, parâmetros de entrada exigidos e dificuldades práticas de aplicação, bem como a revisão de modelos preditivos aplicados ao ATR, que incluem a regressão linear múltipla, análises de sensibilidade e aplicações recentes de redes neurais artificiais em problemas de engenharia civil.

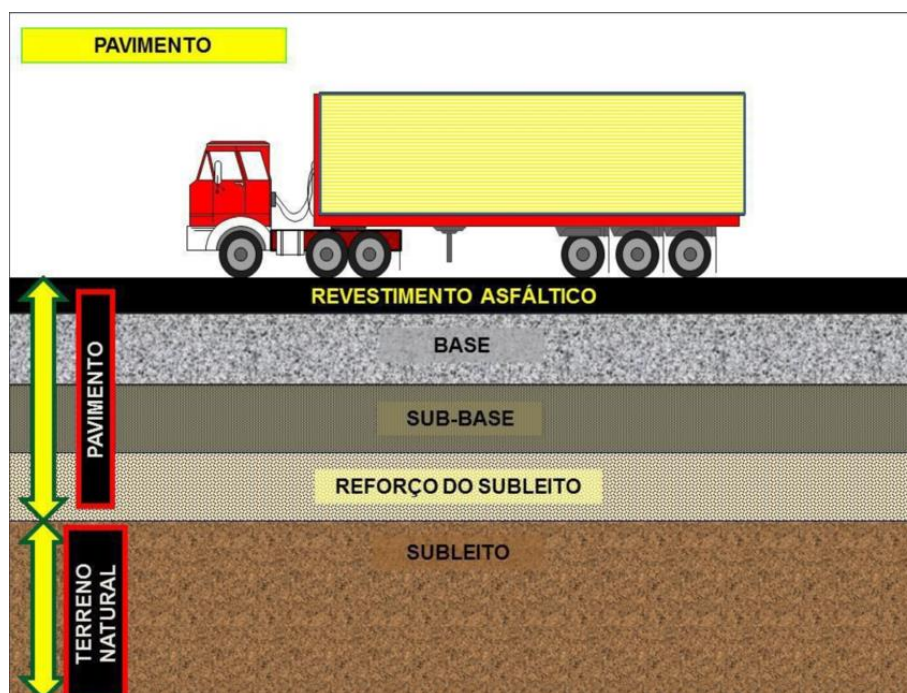
Por fim, será dedicada uma seção específica às Redes Neurais Artificiais (RNA), apresentando seus conceitos fundamentais, arquiteturas de camadas e funções de ativação, além de destacar as potencialidades dessa ferramenta no campo da previsão de parâmetros de pavimentação. Dessa forma, o capítulo estabelece os

alicerces teóricos que sustentam a metodologia proposta, situando a pesquisa no contexto científico e tecnológico atual.

2.1. Pavimentos Flexíveis: aspectos estruturais e funcionais

Os pavimentos flexíveis podem ser definidos como estruturas rodoviárias compostas por múltiplas camadas de materiais granulares e ligantes asfálticos, projetadas para distribuir as tensões oriundas do tráfego de veículos até o subleito de forma gradativa. Sua função primordial é garantir condições adequadas de rolamento, promovendo conforto, segurança e economia operacional aos usuários. Além disso, devem apresentar resistência mecânica suficiente para suportar as cargas repetidas dos eixos veiculares, mantendo desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil (Bernucci et al., 2010; Balbo, 2007).

Figura 1 - Estrutura típica de um pavimento flexível



Fonte: Silva (2017)

A estrutura de um pavimento flexível segue o conceito de sistema multicamadas, no qual cada camada desempenha uma função específica dentro do conjunto. O revestimento, geralmente constituído de misturas asfálticas, atua como camada de desgaste, responsável por resistir diretamente às solicitações do tráfego e às intempéries ambientais. Logo abaixo, localiza-se a base, formada por materiais granulares ou estabilizados, cuja função é distribuir os esforços recebidos do revestimento para a camada subsequente. A sub-base, quando prevista, atua como

elemento intermediário de reforço e regularização, enquanto o subleito corresponde ao solo natural compactado sobre o qual todas as camadas se apoiam (Bernucci et al., 2022; Souza, 1981).

A eficiência desse arranjo multicamadas está relacionada ao módulo de resiliência (MR) e à espessura de cada camada, que determinam a forma como as tensões e deformações são transmitidas e dissipadas. Estudos de Coutinho (2011) e Motta (1991) apontam que a seleção adequada dos materiais e a correta proporção entre rigidez e espessura das camadas são fundamentais para prolongar a vida de serviço dos pavimentos, reduzindo a ocorrência de falhas prematuras.

Entretanto, mesmo quando adequadamente dimensionados, os pavimentos flexíveis estão sujeitos a diferentes modos de falha estrutural e funcional. Entre os principais, destacam-se o afundamento de trilha de roda (ATR), a fadiga do revestimento asfáltico, a perda de aderência entre camadas e a fissuração térmica. Esses fenômenos, quando não tratados oportunamente, comprometem a integridade da estrutura e aumentam os custos de manutenção. Segundo Fernandes Júnior (1994), as deformações permanentes no subleito e na base representam uma das manifestações mais críticas, pois evoluem de forma cumulativa e irreversível.

Quadro 1 - Modos de falha em pavimentos flexíveis: causas e efeitos

Modo de falha	Definição	Causas principais	Consequências
Afundamento de trilha de roda (ATR)	Deformação permanente caracterizada por depressões contínuas nas trilhas de roda.	Excesso de carga por eixo, baixa qualidade dos materiais, compactação insuficiente.	Risco de aquaplanagem, perda de conforto, aumento de custos de manutenção.
Fadiga do revestimento	Fissuração em forma de escamas ou malha decorrente de repetidas cargas de tráfego.	Dimensionamento inadequado, ligante asfáltico de baixa qualidade, variações climáticas.	Infiltração de água, perda de rigidez estrutural, aceleração de falhas.
Fissuração térmica	Trincas longitudinais ou transversais provocadas por variações de temperatura.	Contração do ligante asfáltico, ausência de aditivos modificadores, variações térmicas intensas.	Redução da durabilidade do revestimento, infiltração de água.
Perda de aderência entre camadas	Separação parcial ou total entre revestimento, base e sub-base.	Falhas de execução, ausência de ligante de ligação, umidade excessiva.	Diminuição da resistência estrutural, surgimento de trincas e deslocamentos.

Polimento do agregado	Redução da macrotextura superficial, comprometendo o atrito pneu/pavimento.	Uso de agregados inadequados, tráfego intenso de veículos leves.	Maior risco de acidentes por derrapagem, perda de segurança viária
------------------------------	---	--	--

Fonte: Adaptado de Fernandes Júnior (1994); DNIT (2003); Almeida (2022); Balbo (2007).

O ATR merece destaque especial por se constituir em um dos problemas mais recorrentes nos pavimentos flexíveis brasileiros. Conforme definido pelo DNIT (2003), trata-se de uma deformação plástica localizada nas trilhas de roda, resultante do acúmulo de tensões repetidas que excedem a capacidade de suporte dos materiais constituintes. Esse defeito não apenas compromete a segurança, por aumentar a propensão à aquaplanagem, mas também impacta negativamente a dirigibilidade e o conforto dos usuários (Araújo; Lima, 2022).

Outro modo de falha relevante é a fadiga do revestimento, caracterizada pela formação de trincas em forma de escamas ou malha, associadas à repetição de cargas de tráfego. Almeida (2022) ressalta que o fenômeno está diretamente relacionado ao dimensionamento inadequado da espessura das camadas superiores, à qualidade dos ligantes asfálticos utilizados e às condições climáticas que afetam a rigidez do material betuminoso. Esse tipo de deterioração acelera a infiltração de água, fragilizando a estrutura e potencializando outras falhas.

Além disso, podem ocorrer falhas funcionais, como o polimento do agregado do revestimento, que reduz a macrotextura superficial e aumenta os riscos de acidentes. Balbo (2007) observa que, embora não comprometa diretamente a estrutura, a perda de atrito representa sério risco à segurança viária, exigindo medidas corretivas rápidas, como microrrevestimentos ou recapeamentos.

No contexto de rodovias brasileiras, outro fator crítico é a influência do tráfego pesado e das condições ambientais adversas, particularmente em regiões tropicais sujeitas a variações significativas de umidade. Guimarães (2009) aponta que solos tropicais, quando saturados, podem apresentar significativa perda de resistência, resultando em deformações irreversíveis no subleito e acelerando o processo de degradação do pavimento.

Adicionalmente, estudos como os de Chiarello et al. (2019) e Bueno et al. (2017) destacam a influência da pressão de inflação dos pneus e do carregamento por eixo sobre o desempenho estrutural. Cargas excessivas e mal distribuídas são responsáveis por acelerar tanto o ATR quanto a fadiga, demonstrando a necessidade

de fiscalização rigorosa e de políticas públicas que regulem o transporte rodoviário de cargas no país.

Portanto, a compreensão dos aspectos estruturais e funcionais dos pavimentos flexíveis exige uma análise integrada das propriedades dos materiais, do comportamento estrutural das camadas, das condições ambientais e das solicitações de tráfego. Esse conjunto de fatores evidencia a complexidade do problema e justifica a busca por metodologias de dimensionamento mais sofisticadas, capazes de prever com maior precisão os modos de falha, entre os quais o ATR ocupa posição de destaque no cenário nacional (Araújo; Lima, 2022; Almeida, 2022; Bernucci et al., 2010).

2.2. Afundamento de Trilha de Roda (ATR)

O afundamento de trilha de roda (ATR) é classificado pelo DNIT (2003) como uma deformação permanente na superfície do pavimento asfáltico, caracterizada por depressões longitudinais que se desenvolvem ao longo das faixas de rolamento dos veículos, podendo ou não estar acompanhadas de sollevamento lateral. Essa definição oficial enfatiza o caráter duradouro da falha, distinguindo-a de condições temporárias como a deformação elástica, que tende a se recuperar após a passagem das cargas. Assim, o ATR constitui um defeito crítico, de caráter cumulativo e progressivo, associado diretamente à repetição das solicitações do tráfego e à resposta mecânica das camadas constituintes do pavimento (Bernucci et al., 2010; Balbo, 2007).

Figura 2 - Afundamento em Trilha de Roda na Pavimentação Asfáltica



Fonte: DNIT (2003)

Do ponto de vista mecânico, o ATR configura-se como uma alteração irreversível da geometria do pavimento, provocada pela incapacidade de uma ou mais camadas resistirem às tensões impostas pelo tráfego. Araújo e Lima (2022) destacam que essa falha ocorre tipicamente nas trilhas de roda, ou seja, nas áreas de contato direto dos pneus, o que confere ao defeito uma forma de concavidade linear, perceptível tanto visualmente quanto por meio de levantamentos deflectométricos. A progressão desse fenômeno tende a se intensificar com o aumento do volume de tráfego pesado e da repetição de cargas de eixo.

Entre as tipologias de ATR, a primeira é o afundamento plástico, decorrente da fluência das misturas asfálticas ou de materiais granulares sob condições de tensões elevadas e, muitas vezes, associada a temperaturas críticas que reduzem a rigidez dos ligantes betuminosos. Almeida (2022) observa que esse tipo de defeito é comum em pavimentos submetidos a climas quentes, quando a viscosidade do ligante diminui e as camadas superficiais perdem resistência ao cisalhamento. Esse mecanismo resulta em deformações contínuas e progressivas, dificultando a recuperação do desempenho estrutural sem intervenções corretivas.

A segunda tipologia é o afundamento por consolidação, que ocorre quando há compactação diferencial das camadas inferiores, como a sub-base ou o subleito. Fernandes Júnior (1994) e Guimarães (2009) apontam que, em casos de compactação inadequada ou solos tropicais com baixa capacidade de suporte, o tráfego intenso gera adensamentos adicionais, provocando afundamentos localizados ou contínuos ao longo das trilhas de roda. Esse tipo de falha é particularmente crítico em regiões úmidas, onde a variação de umidade pode reduzir ainda mais a rigidez do subleito.

Quadro 2 - Tipologias do afundamento de trilha de roda em pavimentos flexíveis

Tipologia	Definição	Causas principais	Exemplos típicos
Afundamento plástico	Deformação permanente resultante da fluência de uma ou mais camadas do pavimento sob tráfego.	Excesso de ligante asfáltico, granulometria inadequada, temperaturas elevadas, perda de rigidez do ligante.	Rodovias em regiões de clima quente com alto volume de tráfego pesado.
Afundamento por consolidação	Deformação devido à compactação diferencial de camadas	Compactação insuficiente, solos tropicais de baixa	Trechos com solos saturados em regiões úmidas,

	inferiores (sub-base ou subleito).	capacidade de suporte, variação de umidade.	submetidos a tráfego intenso.
Afundamento local	Rebaixamento pontual ou restrito a trechos específicos da pista, de natureza plástica ou estrutural.	Falhas de execução, segregação de materiais, defeitos pontuais de compactação.	Depressões isoladas em segmentos curtos, geralmente associadas a falhas construtivas.

Fonte: Adaptado de Almeida (2022); Araújo e Lima (2022); Fernandes Júnior (1994).

Por sua vez, o chamado afundamento local não constitui uma tipologia distinta, mas uma descrição espacial da manifestação do defeito. Trata-se de um rebaixamento restrito a um ponto ou trecho específico do pavimento, que pode ter origem tanto em processos de fluência plástica quanto em consolidação diferencial. Segundo Balbo (2007), esses casos estão frequentemente associados a defeitos construtivos, como segregação de materiais ou falhas de compactação pontuais, o que reforça a necessidade de rigor no controle tecnológico das obras.

As causas do ATR estão relacionadas a múltiplos fatores, entre os quais se destacam: granulometria inadequada da mistura asfáltica, teor excessivo de ligante, uso de agregados de forma arredondada, grau insuficiente de compactação e sobrecarga decorrente do tráfego pesado. Bueno et al. (2017) demonstram que a pressão de inflação dos pneus e o excesso de carga por eixo são determinantes na aceleração do processo de deformação, evidenciando a necessidade de fiscalização mais rigorosa sobre os limites legais de carga no transporte rodoviário.

As consequências do ATR no desempenho do pavimento são expressivas. Do ponto de vista funcional, a formação de depressões longitudinais prejudica o conforto da viagem, aumentando vibrações e ruídos percebidos pelos usuários. Mais grave, porém, é o impacto na segurança viária, uma vez que o acúmulo de água nas trilhas de roda eleva significativamente o risco de aquaplanagem. Estudos de Chiarello et al. (2019) mostram que rodovias com elevados índices de ATR apresentam maior probabilidade de acidentes em condições de chuva, o que reforça a urgência de medidas preventivas.

Um ponto que merece destaque é a relação entre o ATR e a durabilidade da camada de rolamento asfáltico em diferentes condições climáticas. Pesquisas como as de Motta (1991) e Coutinho (2011) indicam que, em regiões tropicais, as altas temperaturas reduzem significativamente a rigidez dos ligantes betuminosos, favorecendo a fluência plástica do revestimento e acelerando o processo de formação do defeito. Assim, observa-se que o ATR não pode ser analisado apenas em função

do tráfego, mas também das condições ambientais específicas de cada localidade, exigindo ajustes regionais nos critérios de dimensionamento.

Outro aspecto crítico está associado à interação entre tráfego e materiais constituintes das camadas. Fernandes Júnior (1994) já havia apontado que a repetição de cargas por eixos sobrecarregados gera um acúmulo progressivo de deformações, especialmente em camadas mal compactadas ou constituídas por solos de baixa capacidade de suporte. Nesse sentido, estudos mais recentes, como os de Pelisson et al. (2015), confirmam que a espessura e a rigidez da base possuem papel decisivo na mitigação do ATR, uma vez que absorvem parte significativa das tensões impostas pelo tráfego.

Cabe ainda mencionar que o ATR, além de ser uma anomalia estrutural, possui implicações diretas na manutenção e na gestão da malha rodoviária. Schwartz et al. (2013) observaram que defeitos desse tipo apresentam progressão acelerada, reduzindo o intervalo entre intervenções corretivas e impactando de forma negativa a relação custo-benefício dos investimentos públicos. Nesse sentido, metodologias mecanístico-empíricas como o MeDiNa representam um avanço substancial, pois possibilitam estimar a vida útil residual da rodovia com maior realismo, antecipando o momento de intervenções preventivas.

É importante destacar a crescente utilização de ferramentas computacionais, como modelos probabilísticos e redes neurais artificiais, para compreender a complexidade do ATR. Estudos de Álvares Júnior (2019) e Almeida (2022) mostram que técnicas de inteligência artificial podem identificar padrões não lineares de interação entre tráfego, materiais e clima, superando as limitações de modelos determinísticos clássicos. Essa abordagem permite prever com maior precisão a evolução do defeito, fornecendo subsídios para estratégias de dimensionamento e manutenção mais eficientes, adaptadas às condições específicas de cada projeto rodoviário.

Sob a ótica estrutural, o ATR compromete a distribuição uniforme de tensões entre as camadas, favorecendo o surgimento de fissuração por fadiga e de defeitos secundários, como o arrancamento do revestimento asfáltico. Araújo e Lima (2022) ressaltam que, à medida que a trilha de roda se aprofunda, ocorre uma concentração localizada de tensões, acelerando processos de ruptura e reduzindo significativamente a vida útil projetada do pavimento. Assim, o ATR não deve ser

tratado apenas como uma falha estética ou de conforto, mas como um indicador do desempenho estrutural da rodovia.

O agravamento progressivo do ATR resulta em aumento dos custos de manutenção e reabilitação. Intervenções corretivas simples, como fresagem e recapeamento, tornam-se recorrentes em rodovias com esse tipo de defeito, onerando os órgãos gestores e comprometendo a economicidade do sistema viário. Brito e Graeff (2009) defendem que a prevenção do ATR, por meio de dimensionamento adequado e controle tecnológico rigoroso, é mais eficiente e menos onerosa do que as medidas de correção posteriores.

Assim, o ATR deve ser compreendido como um dos principais mecanismos de deterioração de pavimentos flexíveis no Brasil, exigindo abordagens de dimensionamento que considerem tanto os aspectos estruturais quanto os funcionais da rodovia. Pesquisas recentes, como as de Almeida (2022) e Araújo e Lima (2022), reforçam que a previsão desse defeito requer metodologias mecanístico-empíricas robustas e, mais recentemente, o emprego de ferramentas computacionais avançadas, como as redes neurais artificiais, capazes de capturar a complexidade do fenômeno e contribuir para a durabilidade da infraestrutura rodoviária.

2.3. Fatores que influenciam o ATR

O afundamento de trilha de roda (ATR) é um fenômeno multifatorial, cuja evolução depende da interação entre os materiais constituintes, as condições estruturais, o tráfego aplicado e as variáveis ambientais. Assim, compreender os fatores que influenciam a ocorrência e a severidade do ATR é essencial para o dimensionamento e a manutenção de pavimentos flexíveis. Segundo Bernucci et al. (2010), a durabilidade das rodovias está diretamente associada à qualidade dos materiais empregados e à adequação das camadas estruturais ao volume de tráfego projetado.

Entre os materiais constituintes, a granulometria da mistura asfáltica desempenha papel fundamental. Misturas mal graduadas, com excesso de finos ou distribuição inadequada dos agregados, apresentam maior suscetibilidade à deformação permanente, uma vez que perdem resistência ao cisalhamento sob repetição de cargas. Balbo (2007) destaca que a correta seleção granulométrica é determinante para garantir a estabilidade interna da mistura e a capacidade de resistir às solicitações impostas pelo tráfego pesado.

O ligante asfáltico também constitui variável crítica para o desempenho frente ao ATR. Ligantes excessivamente moles, utilizados sem adequação às condições climáticas locais, favorecem a fluência plástica das camadas superficiais. Almeida (2022) observa que, em regiões de clima quente, como grande parte do território brasileiro, a escolha inadequada do ligante acelera a formação de trilhas de roda. Bernucci et al. (2022) reforçam que a utilização de ligantes modificados, como os poliméricos, pode melhorar significativamente a resistência ao afundamento.

Outro fator relevante é o grau de compactação das camadas asfálticas e granulares. Compactações insuficientes geram maior volume de vazios, propiciando o rearranjo dos grãos sob a ação das cargas de tráfego. Segundo Araújo e Lima (2022), a falta de controle tecnológico durante a execução é uma das principais causas de consolidação diferencial em bases e subleitos, resultando em deformações permanentes expressivas. Souza (1981) já destacava que a compactação adequada é a primeira linha de defesa contra falhas prematuras.

No que se refere às camadas estruturais, a espessura exerce influência direta na capacidade de distribuir tensões. Pavimentos com camadas delgadas tendem a concentrar esforços nas camadas inferiores, elevando o risco de ATR. Guimarães (2009) demonstra que pequenas reduções na espessura da base ou do revestimento podem reduzir drasticamente a vida útil projetada, especialmente em subleitos de baixa qualidade. Assim, assegurar espessuras compatíveis com o tráfego previsto é indispensável.

O módulo de resiliência (MR) das camadas granulares e do subleito representa outro fator crítico. Materiais com baixo MR apresentam menor capacidade de recuperação elástica, acumulando deformações plásticas sob tráfego repetido. Coutinho (2011) e Motta (1991) evidenciam que, em solos tropicais, as variações de umidade alteram significativamente o MR, tornando o pavimento mais suscetível a deformações permanentes. Esses estudos ressaltam a necessidade de considerar variações sazonais no dimensionamento.

As condições de tráfego figuram como variável determinante no processo de deterioração. O aumento da carga por eixo, aliado ao crescimento da frota de veículos pesados, intensifica a pressão sobre as camadas, acelerando o ATR. Bueno et al. (2017) demonstraram que a pressão de inflação dos pneus e as cargas superiores ao permitido em lei são fatores críticos para a degradação precoce das rodovias brasileiras. De forma complementar, Chiarello et al. (2019) identificaram que a

duplicação de rodovias sem controle de carga acarreta deteriorações aceleradas, mesmo em pavimentos recentemente executados.

Além da carga, a repetição de solicitações de tráfego é fator central para a progressão do ATR. Segundo Fernandes Júnior (1994), o fenômeno de deformação permanente apresenta natureza acumulativa: cada passagem de eixo contribui para a evolução da trilha de roda, ainda que em magnitudes reduzidas. Araújo e Lima (2022) reforçam que a intensidade de tráfego pesado em rodovias federais do Norte do país representa um desafio adicional ao dimensionamento mecanístico-empírico, exigindo ferramentas de previsão mais robustas.

A velocidade do tráfego também exerce influência sobre a magnitude das deformações. Balbo (2007) explica que veículos em baixa velocidade impõem maiores tempos de aplicação de carga, permitindo maior fluência dos materiais e agravando o ATR. Em contrapartida, velocidades mais elevadas reduzem esse efeito, embora ampliem o risco de fadiga superficial. Portanto, o regime de tráfego deve ser considerado nas análises de desempenho.

As condições climáticas afetam tanto os materiais quanto as respostas estruturais do pavimento. A variação de temperatura pode alterar a rigidez do ligante asfáltico, tornando-o mais susceptível à fluência em climas quentes e mais frágil em climas frios. Segundo Brito e Graeff (2009), a presença de água no subleito e em camadas mal drenadas reduz substancialmente a capacidade de suporte, potencializando o processo de afundamento. Essas constatações reforçam a importância da drenagem adequada e da escolha de materiais adaptados ao contexto climático.

Finalmente, deve-se destacar a interação entre os fatores descritos, pois o ATR raramente resulta de um único elemento isolado. Como apontam Almeida (2022) e Araújo e Lima (2022), o fenômeno decorre da combinação entre tráfego excessivo, materiais mal dimensionados e variáveis ambientais desfavoráveis. Essa complexidade evidencia a limitação dos métodos empíricos tradicionais, justificando o avanço em direção a modelos mecanístico-empíricos e, mais recentemente, ao emprego de técnicas de inteligência artificial, que permitem captar as interações não lineares entre os fatores que influenciam o ATR.

2.4. Evolução dos Métodos de Dimensionamento

O dimensionamento de pavimentos no Brasil possui trajetória histórica marcada pela adoção inicial de métodos empíricos e pela posterior transição para modelos mecanístico-empíricos. O primeiro marco foi o método do DNER/1966, amplamente difundido em projetos rodoviários por quase cinco décadas. Esse método baseava-se no índice CBR (California Bearing Ratio) para estimar a capacidade de suporte do subleito, estabelecendo correlações diretas entre valores experimentais e a espessura mínima das camadas de pavimento (Souza, 1981; Bernucci et al., 2010).

A simplicidade operacional do método DNER/1966 foi um dos fatores responsáveis por sua longevidade. Ele permitia que engenheiros, mesmo com recursos laboratoriais limitados, dimensionassem pavimentos utilizando tabelas e gráficos correlacionados ao CBR. Balbo (2007) observa que essa característica foi determinante para o crescimento da malha rodoviária nacional, sobretudo em períodos de intensificação da infraestrutura viária, como nos anos 1970 e 1980.

Contudo, o método empírico apresentava restrições significativas. O principal problema estava na ausência de critérios que considerassem a mecânica dos pavimentos e os fenômenos de fadiga e deformação permanente. Segundo Brito e Graeff (2009), a dependência exclusiva de ensaios CBR levava a dimensionamentos sub ou superestimados, sem representar adequadamente as condições reais de tráfego e de solicitação estrutural.

Além disso, o método DNER/1966 não incorporava fatores como repetição de cargas, variação climática e características dos materiais locais. Fernandes Júnior (1994) destacou que a não consideração dos efeitos acumulativos do tráfego comprometia a confiabilidade do dimensionamento, gerando projetos que frequentemente falhavam antes do previsto. Esses aspectos evidenciam o caráter limitado do método, restrito a condições experimentais específicas de sua época.

Outro ponto crítico do DNER/1966 era a incompatibilidade com o crescimento do tráfego pesado. Quando o método foi desenvolvido, a frota brasileira era composta predominantemente por veículos leves e caminhões de carga moderada. Entretanto, com o aumento exponencial do transporte rodoviário, especialmente a partir dos anos 1990, o método mostrou-se incapaz de prever adequadamente as solicitações estruturais impostas pelos eixos sobrecarregados (Bueno et al., 2017).

Em resposta a essas limitações, a comunidade técnica passou a demandar uma metodologia mais robusta, que fosse capaz de integrar os princípios da mecânica

dos pavimentos com a variabilidade dos materiais e das condições de tráfego. Nesse contexto, o dimensionamento mecanístico-empírico passou a ser amplamente discutido e consolidado em diferentes países. Haas et al. (2007) ressaltam que essa abordagem representava um salto qualitativo, ao considerar tanto as tensões e deformações internas do pavimento quanto a calibração empírica com dados de campo.

No Brasil, os primeiros esforços nesse sentido remontam às pesquisas conduzidas por Motta (1991) e Franco (2007), que investigaram metodologias mecanístico-empíricas aplicadas a solos tropicais e misturas asfálticas. Guimarães (2009) complementa que a tropicalização dessas metodologias era necessária, visto que os modelos internacionais não representavam adequadamente as condições de solos e clima brasileiros.

Pitangui (2019) realizou uma análise comparativa entre o método empírico do DNER/1966 e o método mecanístico-empírico MeDiNa, evidenciando que a transição metodológica representa um avanço significativo na engenharia de pavimentos no Brasil. Enquanto o método do DNER se limita ao uso do índice CBR, desconsiderando fatores como repetição de cargas e variações climáticas, o MeDiNa incorpora parâmetros estruturais e modelos de deterioração calibrados para as condições nacionais. O autor conclui que, embora mais complexo, o MeDiNa fornece previsões de desempenho mais realistas e confiáveis, justificando sua adoção como referência oficial em projetos rodoviários.

Esse movimento culminou no desenvolvimento do método mecanístico-empírico brasileiro, o MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), coordenado pelo DNIT e implementado entre 2015 e 2018. Segundo o manual oficial do software MeDiNa, o método foi concebido para substituir definitivamente o DNER/1966, oferecendo uma base científica mais consistente e compatível com as demandas atuais de tráfego e desempenho.

O MeDiNa se fundamenta na teoria da elasticidade multicamadas e no cálculo de tensões, deformações e deflexões em diferentes pontos do pavimento. Esses resultados são comparados a modelos de deterioração, calibrados a partir de dados de campo nacionais, para prever falhas por fadiga, deformação permanente e fissuração térmica. Diferentemente do DNER/1966, o método leva em consideração a repetição de cargas, o espectro de tráfego e as condições ambientais regionais (DNIT, 2018; Araújo; Lima, 2022).

Além do avanço técnico, o MeDiNa representa também um avanço institucional e normativo. Ele foi incorporado ao acervo de normas do DNIT como referência oficial para projetos rodoviários federais, consolidando-se como ferramenta obrigatória em estudos de dimensionamento de pavimentos. Barbosa e Silva (2021) reforçam que a adoção do MeDiNa simboliza a transição definitiva da engenharia rodoviária nacional para o paradigma mecanístico-empírico.

Fritzen (2016) desenvolveu e validou uma função de transferência voltada à previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos, propondo modelos que relacionam diretamente as tensões e deformações atuantes às condições de deterioração observadas. O estudo evidenciou que o uso de abordagens mecanístico-empíricas possibilita resultados mais consistentes, uma vez que incorpora variáveis estruturais e funcionais do pavimento, em contraste com métodos puramente empíricos. Os resultados da tese confirmam que a calibração de modelos para as condições brasileiras é essencial para estimar, com maior realismo, o desempenho a longo prazo das rodovias e auxiliar no planejamento de estratégias de manutenção preventiva.

Pelisson et al. (2015) analisaram o desempenho de pavimentos flexíveis a partir do método mecanístico-empírico norte-americano (MEPDG), verificando como a variação das espessuras das camadas influencia diretamente os mecanismos de deterioração. Os autores demonstraram que pequenas alterações na espessura do revestimento ou da base podem gerar impactos significativos na previsão de vida útil, especialmente no que se refere ao afundamento de trilha de roda e à fadiga do revestimento. Esse estudo reforça a relevância do dimensionamento mecanístico-empírico, pois permite avaliar cenários distintos de projeto com maior precisão, superando a rigidez dos métodos empíricos tradicionais baseados em índices simplificados como o CBR.

Por fim, cabe destacar que, embora o MeDiNa represente um marco para o Brasil, seu uso ainda apresenta desafios práticos. Almeida (2022) e Araújo e Lima (2022) observam que a obtenção de parâmetros como o módulo resiliente e os coeficientes Ψ exige ensaios laboratoriais avançados, muitas vezes indisponíveis em contextos regionais. Essa limitação reforça a importância de pesquisas complementares, como a aplicação de modelos computacionais baseados em redes neurais artificiais, capazes de reduzir a dependência de ensaios experimentais complexos sem comprometer a acurácia do dimensionamento.

A transição para o paradigma mecanístico-empírico no Brasil não ocorreu de forma abrupta, mas sim gradativa, a partir de uma série de pesquisas aplicadas e projetos-piloto que buscaram verificar a aplicabilidade das metodologias internacionais às condições locais. Franco (2007), por exemplo, já havia desenvolvido o SisPav, um sistema de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos, que serviu como um dos referenciais para a construção do MeDiNa. Esse movimento evidencia que a engenharia nacional buscou adaptar e tropicalizar modelos consolidados no exterior, em vez de simplesmente reproduzi-los, respeitando as particularidades dos solos tropicais e das condições ambientais brasileiras.

Outro aspecto relevante da evolução metodológica é a integração entre conhecimento técnico-científico e demandas institucionais. Haas et al. (2007) destacam que o avanço dos métodos mecanístico-empíricos a nível mundial esteve associado não apenas a inovações acadêmicas, mas também à necessidade de agências rodoviárias gerirem de forma mais eficiente os recursos destinados à manutenção. No Brasil, esse movimento foi igualmente impulsionado pela busca de maior economicidade e previsibilidade nos investimentos, de modo que o MeDiNa surgiu como resposta a uma demanda prática dos órgãos gestores, que necessitavam de uma ferramenta de maior confiabilidade para orientar a tomada de decisão.

Além da calibração dos modelos de deterioração, um dos grandes diferenciais do MeDiNa em relação ao método do DNER/1966 é a possibilidade de realizar análises probabilísticas associadas à confiabilidade estrutural. Pitangui (2019) enfatiza que essa característica permite considerar a variabilidade inerente dos materiais e das condições de tráfego, fornecendo resultados mais próximos da realidade e diminuindo a margem de incerteza nos projetos. Esse enfoque probabilístico aproxima o MeDiNa das práticas internacionais modernas, como o MEPDG nos Estados Unidos, e constitui um avanço metodológico fundamental para a engenharia rodoviária brasileira.

No entanto, a consolidação do MeDiNa não elimina completamente a relevância histórica do método DNER/1966. Barbosa e Silva (2021) lembram que, em muitos contextos regionais, sobretudo em municípios pequenos ou em obras de menor porte, o método empírico ainda é utilizado por sua simplicidade e baixo custo. Isso indica que o processo de transição entre paradigmas de dimensionamento no Brasil ainda se encontra em curso, sendo comum a coexistência de métodos antigos e novos. Tal cenário reforça a necessidade de capacitação técnica contínua de

profissionais da área, bem como de políticas públicas que incentivem a aplicação de metodologias mais robustas, como o MeDiNa.

Finalmente, observa-se que a evolução dos métodos de dimensionamento no Brasil reflete também um movimento mais amplo de integração entre engenharia civil e ferramentas computacionais avançadas. Trabalhos recentes, como o de Álvares Júnior (2019), apontam que modelos de inteligência artificial, como as redes neurais artificiais, podem ser empregados como complementares aos métodos mecanístico-empíricos, reduzindo a necessidade de ensaios laboratoriais onerosos e acelerando a obtenção de resultados. Essa convergência entre métodos clássicos e tecnologias emergentes sinaliza o futuro do dimensionamento de pavimentos, em que a precisão dos modelos mecanísticos poderá ser potencializada por soluções de aprendizado de máquina.

2.5. Software MeDiNa

O MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Asfálticos) representa o marco mais recente na evolução do dimensionamento mecanístico-empírico no Brasil, desenvolvido pelo DNIT com apoio de universidades e centros de pesquisa entre 2015 e 2018. O software foi concebido para substituir o método empírico do DNER/1966, incorporando modelos de desempenho calibrados às condições nacionais de tráfego, clima e solos. Sua base teórica apoia-se na teoria da elasticidade multicamadas, permitindo o cálculo de tensões, deformações e deflexões em diferentes pontos do pavimento, a partir da consideração de todas as suas camadas estruturais (DNIT, 2018).

Figura 3 - Tela inicial MeDiNa

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Nome do autor ou dos autores do projeto EMPRESA: Nome da empresa projetista

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaiose C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS	0,0	189	0,45

EXIB PADRÃO RODVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1,000
N anual (1º ano):	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Acervo da autora (2026)

O modelo utilizado no MeDiNa prevê a progressão de falhas a partir de três mecanismos principais: fadiga do revestimento asfáltico, deformação permanente em camadas granulares e no subleito e fissuração térmica. Para tanto, o software utiliza funções de transferência calibradas com dados obtidos em rodovias experimentais e em bancos de ensaios brasileiros, conferindo maior realismo às previsões (Franco, 2007; Guimarães, 2009). Essa abordagem permite que o dimensionamento seja mais confiável, refletindo as condições reais do tráfego rodoviário no país.

Um dos principais diferenciais do MeDiNa é a utilização de parâmetros de entrada mais completos em relação ao método DNER/1966. Entre os mais importantes estão: módulo de resiliência (MR), coeficiente de Poisson (μ), coeficientes de regressão Ψ_i (relacionados ao desempenho estrutural), além dos parâmetros de fadiga e de deformação permanente como o K1. Esses elementos permitem descrever o comportamento mecânico de cada camada do pavimento com maior precisão (Araújo; Lima, 2022; Almeida, 2022).

O módulo de resiliência (MR), por exemplo, é essencial para caracterizar a capacidade de recuperação elástica dos materiais granulares e do subleito. O

coeficiente de Poisson (μ) descreve a relação entre deformações horizontais e verticais, influenciando na distribuição das tensões internas. Já os coeficientes Ψ_i têm papel relevante no modelo de deformação permanente, sendo utilizados para ajustar as funções de transferência do software a diferentes condições de carregamento e materiais (DNIT, 2018).

Apesar da robustez metodológica, o MeDiNa apresenta dificuldades práticas de aplicação. Muitos dos parâmetros exigidos requerem ensaios laboratoriais sofisticados, como o triaxial de cargas repetidas para determinação do MR, que nem sempre estão disponíveis em laboratórios regionais. Almeida (2022) e Araújo e Lima (2022) ressaltam que a ausência de infraestrutura laboratorial adequada compromete a utilização plena do método, sobretudo em estados da região Norte, onde a realidade de solos tropicais demanda investigações específicas.

Outro desafio refere-se ao custo e tempo necessários para a obtenção dos parâmetros. Ensaios laboratoriais avançados demandam equipamentos caros, mão de obra especializada e prazos prolongados, o que pode inviabilizar economicamente sua aplicação em projetos de menor porte. Segundo Bernucci et al. (2010), essa dificuldade gera uma lacuna entre a sofisticação teórica do MeDiNa e sua efetiva aplicação em projetos executivos, especialmente em municípios de menor capacidade técnica e financeira.

Adicionalmente, estudos como o de Barbosa e Silva (2021) apontam que a correta utilização do MeDiNa exige um nível de capacitação técnica elevado, não apenas para a realização dos ensaios, mas também para a interpretação dos resultados gerados pelo software. Nesse sentido, o DNIT disponibilizou manuais e treinamentos oficiais, mas ainda assim persiste a necessidade de maior difusão de conhecimento entre engenheiros projetistas.

Embora apresente limitações práticas, o MeDiNa constitui ferramenta indispensável para o avanço do dimensionamento de pavimentos no Brasil. Sua implementação consolidou o paradigma mecanístico-empírico na engenharia rodoviária nacional, alinhando o país às melhores práticas internacionais. Como complementam Almeida (2022) e Araújo e Lima (2022), pesquisas recentes têm buscado superar as dificuldades de aplicação por meio do uso de modelos computacionais complementares, como as redes neurais artificiais (RNA), que permitem estimar parâmetros complexos a partir de dados simulados ou secundários, tornando o processo mais acessível e eficiente.

2.6. Modelos de Previsão Aplicados ao ATR

A previsão do afundamento de trilha de roda (ATR) é um dos principais desafios da engenharia de pavimentos, dado o caráter multifatorial do fenômeno e sua forte dependência das condições de tráfego, materiais e clima. Ao longo das últimas décadas, diferentes modelos foram empregados para estimar a ocorrência e a progressão do ATR, variando desde abordagens estatísticas mais simples até técnicas avançadas de inteligência artificial. Esses modelos têm buscado não apenas compreender a influência das variáveis envolvidas, mas também fornecer instrumentos de apoio ao dimensionamento e à gestão de rodovias.

Entre os métodos estatísticos mais tradicionais, destaca-se a regressão linear múltipla, aplicada por Almeida (2022) em um estudo baseado em simulações realizadas com o software MeDiNa. O autor desenvolveu equações de regressão para correlacionar parâmetros do tráfego, da base e do subleito com os valores de ATR, obtendo coeficientes de determinação (R^2) satisfatórios em diferentes cenários. No entanto, os resultados revelaram limitações da técnica diante de relações não lineares entre as variáveis, especialmente quando os efeitos combinados de deformação permanente e tráfego pesado eram considerados.

Os modelos de regressão são úteis pela simplicidade e pela facilidade de interpretação, mas sua eficiência tende a diminuir em situações que envolvem interações complexas. Barbosa e Silva (2021) observaram que, embora tais modelos possam oferecer boas aproximações iniciais, eles não capturam adequadamente a variabilidade estrutural dos pavimentos submetidos a condições heterogêneas de tráfego. Assim, métodos mais avançados tornam-se necessários para representar com maior fidelidade os fenômenos de deformação.

Nesse sentido, os estudos de análise de sensibilidade têm desempenhado papel relevante. Araújo e Lima (2022) aplicaram o software MeDiNa para investigar o impacto da variação de parâmetros como o módulo de resiliência, os coeficientes Ψ e o tráfego acumulado na evolução do ATR. Os autores demonstraram que variáveis estruturais, como a rigidez da base e do subleito, apresentam maior influência sobre as deformações permanentes do que o tráfego isolado, corroborando a necessidade de maior atenção ao controle de materiais durante a execução das camadas.

A análise de sensibilidade também fornece subsídios práticos para projetistas, pois permite identificar quais parâmetros exigem maior rigor no processo de investigação e ensaio. Segundo Schwartz et al. (2013), essa abordagem contribui para

reduzir a incerteza nos modelos mecanístico-empíricos, priorizando o levantamento de variáveis mais críticas ao desempenho estrutural. No contexto brasileiro, essa técnica tem se consolidado como etapa fundamental em estudos de confiabilidade de pavimentos.

Nos últimos anos, observa-se crescente interesse pela aplicação de redes neurais artificiais (RNA) como alternativa para previsão do ATR e de outros parâmetros de desempenho. Álvares Júnior (2019) aplicou RNA para estimar parâmetros de compactação de solos, demonstrando a viabilidade dessa técnica em problemas geotécnicos. Seus resultados indicaram que a RNA é capaz de superar limitações de modelos lineares, pois identifica padrões não explícitos e relações não lineares entre variáveis, alcançando maior precisão preditiva.

A aplicação das RNA no contexto de pavimentos tem se mostrado promissora, sobretudo na previsão de falhas relacionadas à fadiga e à deformação permanente. Almeida (2022) já apontava que a utilização de RNA permitiria estimar o ATR com maior acurácia do que a regressão linear, principalmente quando os parâmetros do MeDiNa eram empregados como base de dados. Essa constatação reforça a convergência entre a modelagem mecanístico-empírica e as ferramentas de inteligência computacional.

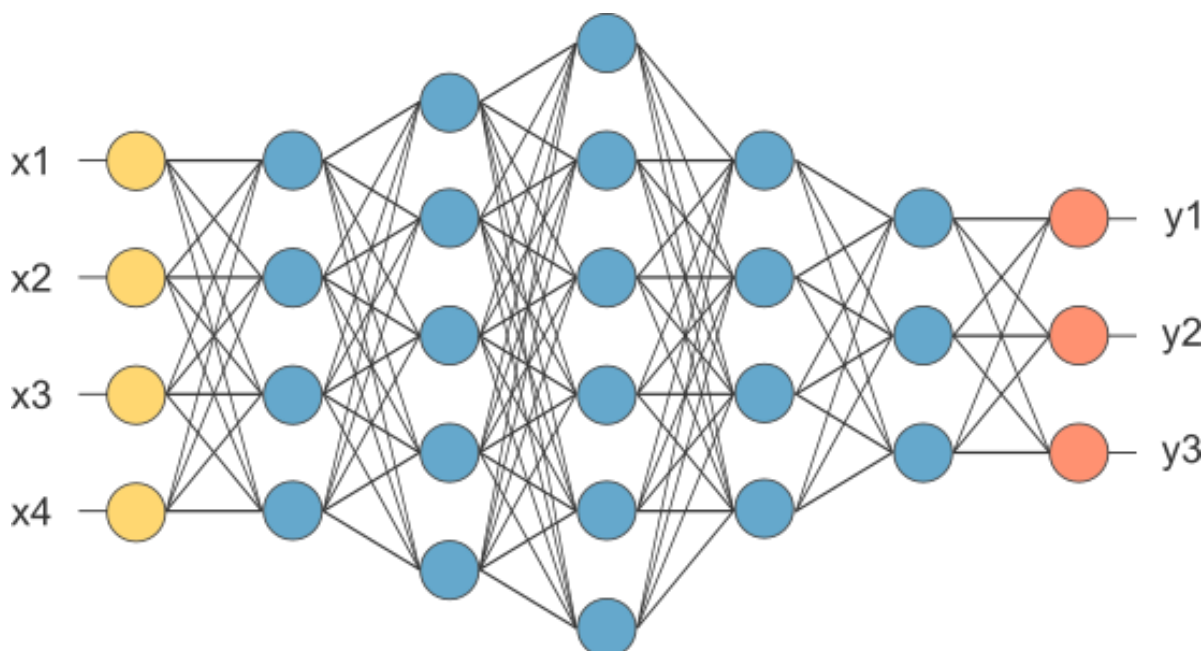
Além disso, a literatura internacional também valida o uso das RNA nesse campo. Estudos como os de Ardakani e Kordnaeij (2017) e Günaydin (2009) mostraram que redes neurais treinadas com bases experimentais de compactação de solos e desempenho de pavimentos apresentaram resultados superiores em comparação a modelos empíricos. Esses achados fortalecem a ideia de que a inteligência artificial pode auxiliar o avanço dos métodos de dimensionamento no Brasil, complementando o MeDiNa.

Em síntese, observa-se que os modelos de previsão aplicados ao ATR evoluíram de métodos estatísticos simples para técnicas mais sofisticadas, como as análises de sensibilidade e as RNA. Enquanto a regressão linear múltipla ainda se mostra útil em cenários iniciais de análise, sua aplicação é limitada frente à complexidade do fenômeno. Já as análises de sensibilidade e as redes neurais oferecem maior potencial para lidar com interações complexas, fornecendo resultados mais robustos e alinhados às necessidades da engenharia rodoviária contemporânea.

2.7. Redes Neurais Artificiais (RNA)

As Redes Neurais Artificiais (RNA) constituem uma das principais ferramentas de inteligência computacional aplicadas a problemas de modelagem e previsão. Inspiradas no funcionamento do sistema nervoso biológico, as RNA são capazes de identificar padrões complexos em conjuntos de dados, mesmo quando as relações entre variáveis não são lineares ou explícitas. Segundo Goh (1995), esse potencial decorre da capacidade de aprendizado a partir de exemplos, permitindo que os modelos generalizem o conhecimento adquirido e realizem previsões precisas em novos cenários.

Figura 4 - Exemplo de Redes Neurais Artificiais



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

O funcionamento das RNA baseia-se em uma estrutura composta por neurônios artificiais interconectados, distribuídos em diferentes camadas. A primeira camada, denominada camada de entrada, recebe as variáveis explicativas do problema. Em seguida, os dados são processados em uma ou mais camadas ocultas, nas quais ocorre a transformação não linear das informações. Por fim, a camada de saída gera as respostas preditivas, que podem assumir forma numérica, categórica ou probabilística, dependendo da natureza do problema (Álvares Júnior, 2019).

Cada conexão entre neurônios é associada a um peso sináptico, ajustado durante o processo de treinamento. Esses pesos controlam a influência das variáveis de entrada sobre a saída final, desempenhando papel semelhante ao de coeficientes em modelos estatísticos. De acordo com Najjar, Basheer e Naouss (1996), a principal

diferença é que as RNA não pressupõem linearidade, o que lhes confere maior flexibilidade para lidar com dados complexos, como aqueles observados em problemas de engenharia de pavimentos.

Outro elemento fundamental são as funções de ativação, que introduzem não linearidade ao modelo. Entre as mais utilizadas destacam-se a sigmoide, a tangente hiperbólica (tanh) e a ReLU (Rectified Linear Unit). Cada função apresenta vantagens específicas: enquanto a sigmoide é adequada para problemas de classificação, a tangente hiperbólica proporciona maior sensibilidade a variações em torno de zero, e a ReLU favorece a eficiência computacional em arquiteturas profundas (Ardakani; Kordnaeij, 2017). A escolha da função depende da natureza do problema e do comportamento esperado dos dados.

No contexto da engenharia de pavimentos, as RNA vêm sendo aplicadas com crescente frequência para previsão de parâmetros críticos. Álvares Júnior (2019) demonstrou que redes neurais podem estimar parâmetros de compactação de solos com elevado grau de precisão, reduzindo a necessidade de ensaios laboratoriais exaustivos.

As vantagens das RNA tornam-se ainda mais evidentes quando comparadas aos métodos empíricos convencionais. Enquanto técnicas como a regressão linear múltipla apresentam desempenho limitado diante da não linearidade do fenômeno, as RNA conseguem capturar interações complexas entre tráfego, materiais e condições ambientais. Estudos internacionais, como os de Günaydin (2009), confirmam essa superioridade, ao mostrarem que modelos neurais treinados com dados geotécnicos apresentam maior capacidade preditiva em comparação a equações empíricas.

Por fim, a aplicação das RNA em pavimentos não se restringe ao ATR. Diversos autores têm explorado seu uso na previsão de vida à fadiga, no dimensionamento de misturas asfálticas e na avaliação do desempenho estrutural de camadas granulares. Esses avanços apontam para um cenário no qual as RNA se consolidam como ferramentas indispensáveis no dimensionamento mecanístico-empírico, fornecendo suporte metodológico e prático para engenheiros projetistas diante das limitações dos métodos tradicionais (Araújo; Lima, 2022; Franco, 2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve os procedimentos metodológicos empregados no desenvolvimento do modelo de Rede Neural Artificial (RNA) destinado à previsão do afundamento de trilha de roda (ATR) em pavimentos flexíveis. A definição clara dos materiais utilizados e das etapas de tratamento e análise dos dados é essencial para garantir a reprodutibilidade da pesquisa e a transparência científica do processo investigativo.

Inicialmente, apresenta-se a fonte de dados, composta por um conjunto de 1250 simulações realizadas no software MeDiNa, que constitui atualmente a principal ferramenta mecanístico-empírica para dimensionamento de pavimentos no Brasil. Esse banco de dados contempla variáveis relacionadas ao tráfego, às propriedades do subleito e da base, bem como parâmetros derivados de ensaios de caracterização, incluindo coeficientes de regressão e módulo resiliente.

Em seguida, descreve-se o pré-processamento dos dados, etapa indispensável para adequar as variáveis ao treinamento da rede neural. Foram realizadas a seleção dos atributos mais relevantes, a normalização das informações em escala padronizada e a divisão da amostra em subconjuntos de treinamento, validação e teste, de modo a assegurar a robustez do modelo e evitar problemas de sobreajuste.

A seção subsequente apresenta a arquitetura da RNA, detalhando a estrutura das camadas de entrada, os neurônios nas camadas ocultas, as funções de ativação empregadas e a camada de saída responsável por gerar a estimativa do ATR em milímetros. As equações matemáticas resultantes do processo de treinamento são igualmente expostas, de modo a oferecer transparência sobre a modelagem computacional adotada.

No que se refere aos procedimentos de treinamento e validação, são discutidos o algoritmo de retropropagação utilizado, os critérios de parada definidos e os métodos de validação cruzada aplicados, bem como as métricas de erro calculadas para avaliar a consistência das previsões. Essa etapa é fundamental para assegurar que o modelo apresente desempenho estável tanto nos dados de treino quanto nos conjuntos independentes de validação e teste.

Por fim, aborda-se a análise de sensibilidade, voltada a investigar a influência relativa de cada variável de entrada sobre os resultados da RNA. Essa etapa combina a interpretação dos pesos atribuídos pelo modelo com técnicas de reamostragem independente, de modo a identificar quais parâmetros exercem maior impacto sobre

o ATR e fornecer subsídios para futuras pesquisas e práticas de dimensionamento de pavimentos.

Dessa forma, a metodologia proposta articula o rigor científico da modelagem mecanístico-empírica com a flexibilidade e a capacidade preditiva das redes neurais, constituindo um caminho promissor para o avanço das técnicas de previsão de desempenho de pavimentos

3.1. Fonte de Dados

A base de dados utilizada neste estudo foi composta por 1.250 simulações geradas no software MeDiNa, ferramenta oficial brasileira de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos, desenvolvida pelo IPR/DNIT. Esses dados foram obtidos a partir do apêndice do trabalho de Almeida (2022).

As condições de contorno dessa pesquisa será um pavimento com apenas 2 camadas, revestimento e base, constituída por Concreto Asfáltico Classe C1 e Material Granular tipo BGG C1 e com espessuras de 7,50 cm e 20,0 cm, respectivamente. Modificações importantes nessas condições de contorno como inclusão de camadas, mudanças de material ou mesmo de espessura ensejariam novas análises.

As simulações consideraram diferentes combinações de variáveis importantes para o desempenho do pavimento, como o tráfego acumulado, representado pelo número de repetições de carga padrão, conhecido como N , variando entre 10^6 e 3×10^6 , além do coeficiente de Poisson da base (μ), com valores entre 0,30 e 0,40, parâmetro responsável por descrever a relação entre deformações horizontais e verticais no comportamento elástico dos materiais.

Também foram utilizados os coeficientes de regressão Ψ (psi) empregados pelo MeDiNa para modelar a deformação permanente dos materiais. Para a camada de base, o coeficiente Ψ_2 variou entre -0,0647 e -0,4085. Para o subleito, composto por um material hipotético, os coeficientes Ψ_3 e Ψ_4 apresentaram variações entre 1,3090 e 1,8750, e entre 0,0380 e 0,0690, respectivamente. Esses coeficientes refletem a suscetibilidade dos materiais ao acúmulo de deformações plásticas, sendo determinantes na previsão do afundamento de trilha de roda (ATR).

A combinação desses parâmetros permitiu a construção de uma base de dados abrangente e representativa, contemplando cenários de variação realistas das condições de tráfego e propriedades dos materiais. Essa base serviu como insumo

primário para o treinamento, validação e teste da Rede Neural Artificial, possibilitando a análise da capacidade do modelo em prever o ATR a partir de informações tipicamente disponíveis em projetos e investigações geotécnicas de pavimentos.

3.2. Pré-processamento dos Dados

Após a construção da base inicial composta por 1250 simulações provenientes do MeDiNa, foi necessário realizar um processo de pré-processamento dos dados, a fim de adequá-los ao treinamento da Rede Neural Artificial (RNA). Essa etapa é indispensável para assegurar a consistência das informações, evitar redundâncias e preparar as variáveis de entrada de forma compatível com os algoritmos de aprendizado supervisionado.

A primeira etapa consistiu na seleção das variáveis mais relevantes para o estudo, com base tanto na literatura especializada (Araújo; Lima, 2022; Almeida, 2022) quanto na análise de coerência estatística dos parâmetros disponíveis. Foram mantidas as variáveis relacionadas ao tráfego (N), ao coeficiente de Poisson da base, aos coeficientes de regressão (Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4) da base e do subleito, uma vez que esses parâmetros apresentam correlação direta com o fenômeno do afundamento de trilha de roda (ATR). Variáveis de caráter redundante ou de baixa influência foram descartadas, evitando aumento desnecessário da complexidade do modelo.

Em seguida, procedeu-se à normalização dos dados, convertendo todas as variáveis para uma escala adimensional compreendida entre 0 e 1. Essa transformação é especialmente importante em modelos de RNA, visto que a diferença de magnitude entre variáveis pode comprometer a convergência do algoritmo de retropropagação e prejudicar a correta atribuição de pesos aos neurônios. Ao uniformizar as escalas, garantiu-se que todas as variáveis tivessem a mesma ordem de importância no processo de aprendizado, reduzindo vieses relacionados a unidades de medida distintas.

Por fim, a base de dados foi submetida à divisão em subconjuntos de treinamento, validação e teste, respeitando proporções amplamente aceitas na literatura de inteligência artificial aplicada à engenharia (Álvares Júnior, 2019; Ardakani; Kordnaeij, 2017). Aproximadamente 70% dos registros foram destinados ao treinamento, 15% à validação e 15% ao teste. O conjunto de treinamento foi utilizado para ajuste inicial dos pesos da RNA, o de validação para monitoramento do

desempenho e prevenção de sobreajuste (*overfitting*), e o de teste para avaliação final da acurácia do modelo com dados independentes.

Esse procedimento de pré-processamento assegurou que a base de dados estivesse devidamente preparada para alimentar a RNA, possibilitando o desenvolvimento de um modelo estável, confiável e apto a reproduzir o comportamento do ATR a partir das variáveis selecionadas.

3.3. Arquitetura da RNA

A Rede Neural Artificial (RNA) desenvolvida neste estudo foi estruturada de forma a representar, de maneira simplificada e eficiente, a relação entre as variáveis de entrada e o afundamento de trilha de roda (ATR). A definição de sua arquitetura foi realizada considerando a natureza dos dados disponíveis, a complexidade do fenômeno analisado e as recomendações da literatura especializada em aplicações geotécnicas (Álvares Júnior, 2019; Goh, 1995; Günaydin, 2009).

A camada de entrada foi composta pelas variáveis previamente selecionadas no processo de pré-processamento: tráfego acumulado (N), coeficiente de Poisson, coeficientes de regressão Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4 da base e do subleito. Essas variáveis representam os fatores mais diretamente associados à formação do ATR, conforme descrito por Araújo e Lima (2022) e Almeida (2022).

A RNA contou com três camadas ocultas, compostas por um número reduzido de neurônios, organizados de modo a captar as não linearidades existentes nas relações entre as variáveis de entrada e a resposta. Nessas camadas foi utilizada a função de ativação hiperbólica tangente (*tanh*), amplamente empregada em problemas de engenharia devido à sua capacidade de modelar interações complexas entre parâmetros e garantir estabilidade numérica durante o processo de aprendizado.

A camada de saída foi definida por um único neurônio responsável por fornecer a estimativa do afundamento de trilha de roda em milímetros (ATR). Essa configuração atende ao caráter supervisionado do problema, no qual as variáveis de entrada possuem correlação direta com uma única variável de resposta, permitindo a formulação de um modelo preditivo objetivo e funcional.

O processo de treinamento gerou as fórmulas matemáticas correspondentes às combinações ponderadas de cada variável, passando pelas camadas ocultas e culminando na camada de saída. As equações finais foram extraídas diretamente do software de modelagem e permitem a replicação da função preditiva obtida. A

representação matemática do modelo confere transparência e reprodutibilidade ao estudo, possibilitando que o cálculo do ATR seja realizado de forma independente da execução de novas simulações no MeDiNa.

Assim, a arquitetura da RNA estabelecida combina simplicidade estrutural com elevada capacidade de generalização, assegurando que o modelo seja ao mesmo tempo interpretável e eficaz para aplicação em contextos práticos de engenharia de pavimentos.

3.4. Procedimentos de Treinamento e Validação

O treinamento da Rede Neural Artificial (RNA) foi realizado utilizando o algoritmo de retropropagação do erro (*backpropagation*), amplamente consolidado na literatura de inteligência computacional (Goh, 1995; Najjar; Basheer; Naouss, 1996). Esse algoritmo baseia-se na atualização iterativa dos pesos sinápticos da rede a partir da minimização do erro entre os valores previstos e os valores de referência oriundos das simulações do MeDiNa. A cada iteração, o erro é propagado no sentido inverso, ajustando-se os pesos de modo proporcional ao gradiente da função de custo, até a obtenção de uma configuração estável e satisfatória.

Foram definidos critérios de parada rigorosos para evitar tanto o subajuste (*underfitting*) quanto o sobreajuste (*overfitting*). O processo de treinamento foi interrompido quando a redução do erro médio quadrático (RMSE) entre épocas consecutivas tornou-se desprezível ou quando foi atingido o número máximo de iterações previamente estabelecido. Essa estratégia assegurou que a rede alcançasse um ponto de equilíbrio entre complexidade e capacidade de generalização.

Além disso, foi adotada a validação cruzada, que consistiu na divisão da base de dados em subconjuntos de treinamento, validação e teste. Durante o processo, aproximadamente 70% dos dados foram utilizados para o ajuste dos pesos, 15% para a validação intermediária do modelo e 15% para a avaliação final. Essa prática permitiu monitorar continuamente o desempenho da RNA, identificando eventuais sinais de sobreajuste quando o erro no conjunto de validação aumentava em relação ao conjunto de treinamento.

A análise de erros foi conduzida por meio de métricas estatísticas consolidadas, como o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro absoluto médio (MAE) e a soma dos erros ao quadrado (SSE). Esses indicadores

foram empregados tanto nas fases de treinamento quanto na validação e no teste, possibilitando a comparação direta entre os desempenhos e assegurando a confiabilidade do modelo em diferentes cenários de aplicação.

Dessa forma, os procedimentos de treinamento e validação adotados garantiram que a RNA apresentasse elevada acurácia, estabilidade estatística e robustez preditiva, tornando-a apta a ser comparada com modelos tradicionais e a ser utilizada como ferramenta auxiliar em projetos de pavimentação.

3.5. Análise de Sensibilidade

Após o treinamento da Rede Neural Artificial (RNA), foi conduzida uma análise de sensibilidade com o objetivo de avaliar a influência relativa das variáveis de entrada sobre a previsão do afundamento de trilha de roda (ATR). Essa etapa metodológica é de grande relevância, pois permite identificar quais parâmetros exercem maior impacto na resposta do modelo, subsidiando tanto a interpretação dos resultados quanto a tomada de decisão em projetos de dimensionamento de pavimentos.

A avaliação foi realizada considerando as principais variáveis que compõem a base de dados: tráfego acumulado (N), coeficiente de Poisson, coeficientes de regressão (Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4) da base e do subleito.

Para garantir robustez às conclusões, utilizou-se a técnica de interpretação dos pesos da RNA combinada à reamostragem independente (*independent resampling*). Nessa abordagem, cada variável é reamostrada de forma isolada, mantendo-se as demais constantes, e o impacto resultante sobre a saída (ATR) é quantificado. Essa estratégia permite contornar eventuais problemas de correlação entre variáveis e assegurar que a importância atribuída a cada fator seja de fato representativa de sua contribuição individual ao desempenho do modelo.

A análise de sensibilidade não apenas reforça a interpretação técnica da RNA, mas também evidencia a coerência do modelo neural com o conhecimento consolidado na literatura especializada, assegurando que as previsões realizadas não decorrem de simples ajuste matemático, mas refletem as interações físicas subjacentes ao comportamento dos pavimentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção reúne e interpreta os principais achados obtidos a partir da aplicação da Rede Neural Artificial (RNA) desenvolvida para a previsão do Afundamento de Trilha de Roda (ATR), com base nos dados simulados pelo software MeDiNa. O objetivo central desta etapa consiste em avaliar o desempenho estatístico do modelo, compreender a relevância relativa das variáveis de entrada, verificar a capacidade preditiva por meio de análises gráficas comparativas e, finalmente, apresentar a função matemática resultante da rede, passível de aplicação em estudos futuros.

Na primeira subseção, expõe-se a função matemática gerada pela RNA, composta pelas equações das camadas ocultas e da camada de saída. A formalização da função possibilita sua aplicação prática, permitindo a estimativa do ATR sem a necessidade de executar simulações adicionais no MeDiNa.

Em seguida, analisa-se o desempenho do modelo de RNA, apresentando métricas como o coeficiente de determinação (R^2), o erro absoluto médio (Mean Abs Dev), o erro quadrático médio (RASE) e a soma dos erros ao quadrado (SSE), tanto para a fase de treinamento quanto para a validação. Esses indicadores são fundamentais para aferir a robustez do modelo e sua confiabilidade na previsão do ATR.

Em seguida, são discutidos os resultados referentes à importância das variáveis de entrada, destacando quais parâmetros exerceram maior influência na resposta da RNA. Os efeitos marginais também são explorados, permitindo uma análise comparativa com trabalhos anteriores que igualmente identificaram maior impacto de fatores estruturais do pavimento em relação ao tráfego isolado.

Na subseção seguinte, apresenta-se a validação gráfica do modelo, por meio da comparação entre valores reais e previstos de ATR, a fim de verificar a aderência da RNA aos resultados de referência do MeDiNa. A proximidade dos pontos à reta 1:1 fornece uma evidência visual da qualidade preditiva obtida.

Adicionalmente, inclui-se a comparação com modelos tradicionais de regressão linear múltipla, permitindo avaliar em termos quantitativos o ganho proporcionado pelo uso de técnicas de inteligência artificial. Para tanto, foram consideradas métricas consagradas, como o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro percentual médio, garantindo uma análise objetiva do desempenho comparativo.

Por fim, procede-se à discussão crítica dos resultados, confrontando o desempenho da RNA com modelos tradicionais, em especial regressões lineares múltiplas, e estudos de sensibilidade aplicados ao dimensionamento mecanístico-empírico. São também abordadas as limitações do estudo, incluindo a dependência de dados simulados e a necessidade de validação em campo, bem como perspectivas para aprimoramentos futuros.

4.1. Função Matemática Gerada pela RNA

O modelo de Rede Neural Artificial (RNA) desenvolvido neste trabalho resultou em uma função matemática explícita capaz de estimar o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) a partir dos parâmetros de entrada considerados, sem necessidade de recorrer ao software MeDiNa. A seguir são apresentadas as equações correspondentes às camadas ocultas e à camada de saída:

Quadro 3 - Código da RNA – Arquitetura final

$$\begin{aligned}
 H_1 &= \tanh [0,5*(-0,205894425752292* \nu - 0,211224287026295* \psi_2 - 0,662762569203611* \psi_3 \\
 &+ 22,6144507818421* \psi_4 - 0,0000002570133749409*N \\
 &- 2,64458893927335)]; \\
 H_2 &= \tanh[0,5*(-3,54279984281823* \nu - 2,60999554316631* \psi_2 \\
 &+ 0,105873314202768* \psi_3 - 2,83719964609791* \psi_4 + -0,0000001499630625384*N - \\
 &2,7455993512881)]; \\
 H_3 &= \tanh[0,5*(-0,219368315630014* \nu + 0,112207770396615* \psi_2 + 0,0752904461567665* \psi_3 \\
 &- 1,67590883982239* \psi_4 - 0,0000000017387937636*N - 0,5345633287802)]; \\
 ATR(mm) &= 13,6763712780581*H_1 + 14,1298679663447*H_2 - 16,942808697715*H_3 + \\
 &25,6898671036401;
 \end{aligned}$$

Legenda: ν = coeficiente de Poisson do material; ψ_2, ψ_3, ψ_4 = coeficientes de regressão; N = número de repetições de tráfego (N); ATR = valor estimado do ATR em milímetros.

A função resultante apresenta-se como uma combinação não linear de parâmetros mecânicos e de tráfego, processados em três camadas ocultas (H_1, H_2 e H_3) com função de ativação hiperbólica tangente ($\tanh$), culminando em uma camada de saída linear que fornece o valor estimado de ATR (em mm).

A principal contribuição dessa formalização é a possibilidade de prever o afundamento de trilha de roda sem a necessidade de simulações adicionais no MeDiNa, desde que os parâmetros de entrada sejam previamente determinados em ensaios laboratoriais ou estimados por correlações empíricas. Assim, a RNA atua como um modelo preditivo autônomo, de aplicação prática em análises preliminares e estudos comparativos de desempenho de pavimentos.

Além disso, a inserção da rotina de “Entradas Reamostradas Independentemente” assegura que a avaliação da importância das variáveis seja robusta frente à presença de correlações internas, reforçando a confiabilidade do modelo como ferramenta de apoio ao dimensionamento mecanístico-empírico.

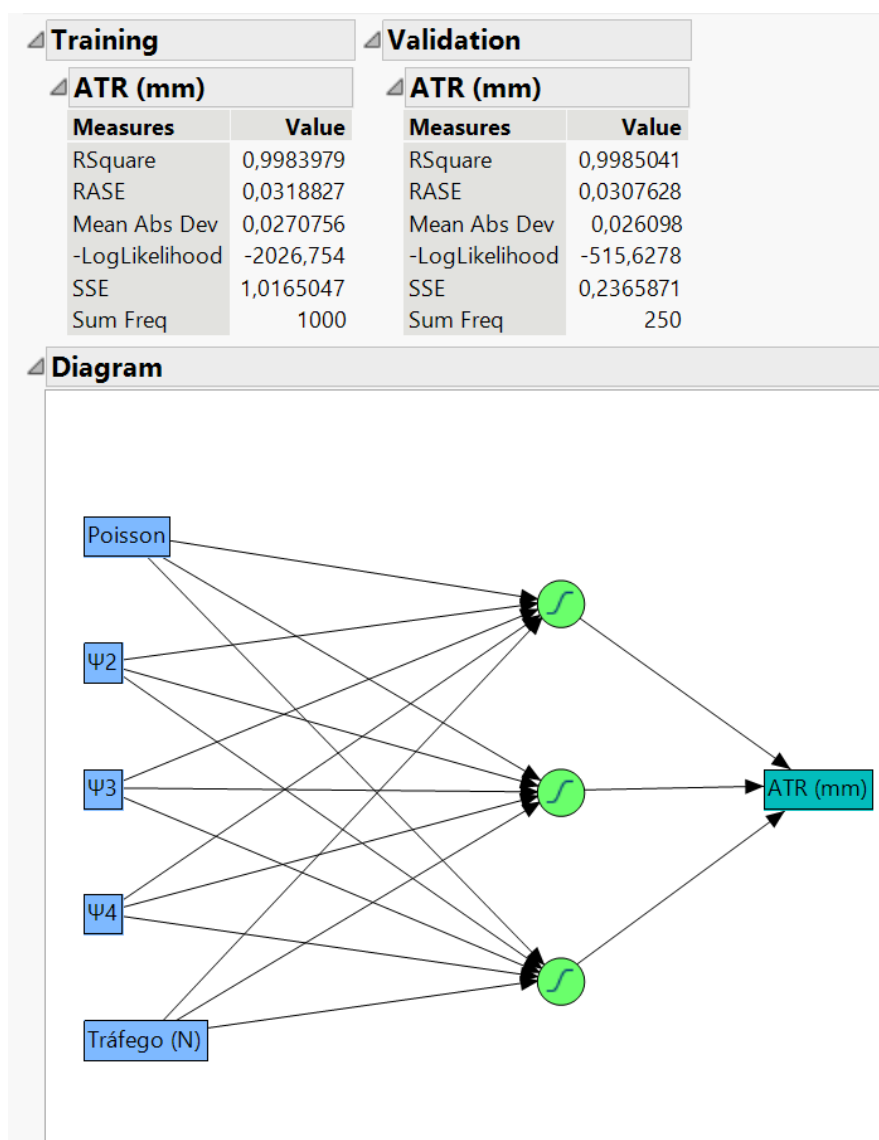
4.2. Desempenho do Modelo de Rede Neural Artificial

A Rede Neural Artificial (RNA) desenvolvida apresentou desempenho altamente satisfatório na previsão do Afundamento de Trilha de Roda (ATR). Os resultados da fase de treinamento revelaram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9984, indicando que mais de 99% da variabilidade dos dados foi explicada pelo modelo. Adicionalmente, o erro quadrático médio padronizado (RASE) foi de aproximadamente 0,0318, enquanto o desvio absoluto médio (Mean Abs Dev) alcançou 0,0271. Esses indicadores demonstram reduzida discrepância entre valores observados e estimados, confirmando a robustez do treinamento.

Na etapa de validação, o modelo manteve elevado desempenho, apresentando R^2 igual a 0,9985 e RASE de 0,0307, valores muito próximos aos obtidos no treinamento. O erro absoluto médio (0,0261) e a soma dos erros ao quadrado (SSE = 0,237) corroboram a consistência da rede em reproduzir os resultados do software MeDiNa com elevada precisão. A proximidade entre as métricas de treinamento e validação também evidencia a ausência de sobreajuste (overfitting), aspecto essencial para a confiabilidade preditiva do modelo em diferentes conjuntos de dados.

A Figura 5 apresenta a arquitetura da rede neural utilizada, bem como os resultados estatísticos do treinamento e validação, permitindo a visualização da estrutura de conexões entre as variáveis de entrada (coeficiente de Poisson, Ψ_2 , Ψ_3 , Ψ_4 e tráfego N) e a variável de saída (ATR em mm).

Figura 5 - Arquitetura da Rede Neural Artificial e desempenho estatístico (treinamento e validação)



Fonte: Autoria própria (2026).

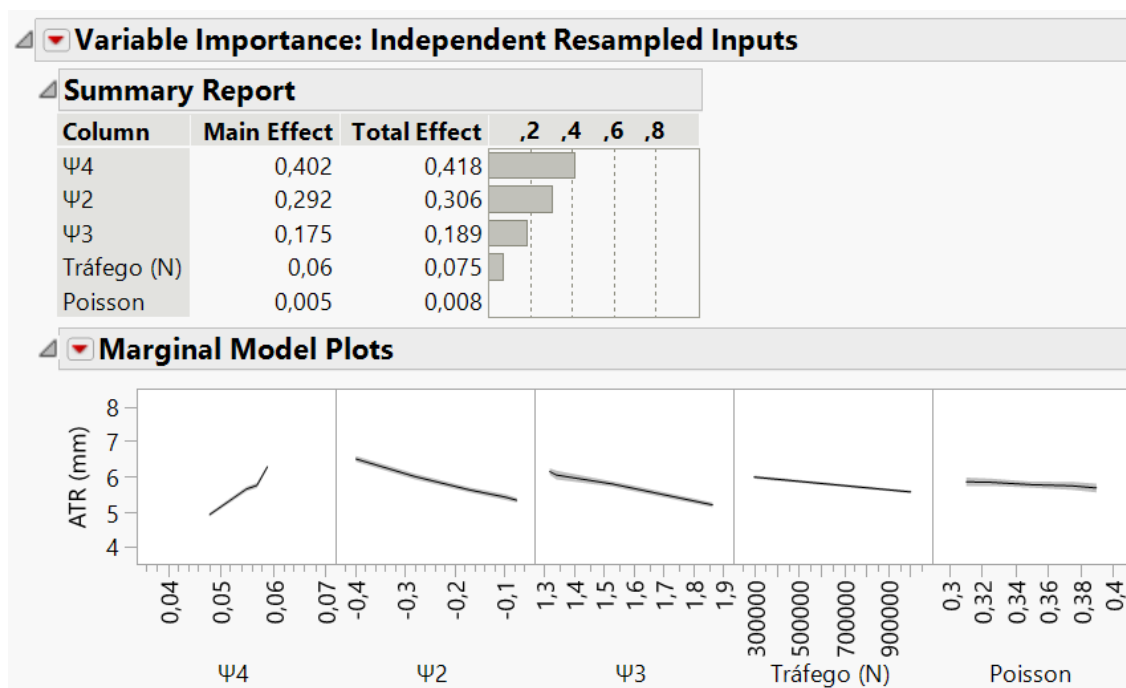
4.3. Importância das Variáveis

A análise da importância das variáveis (Figura 6) demonstra que os parâmetros estruturais Ψ_4 e Ψ_2 exercem maior influência sobre a predição do afundamento de trilha de roda (ATR), com efeitos totais de 0,418 e 0,306, respectivamente. Em seguida, o parâmetro Ψ_3 apresenta contribuição moderada (0,189), enquanto o tráfego (N) e o coeficiente de Poisson se mostraram menos relevantes, com efeitos totais de apenas 0,075 e 0,008, respectivamente. Esses resultados reforçam que a resposta do pavimento está fortemente condicionada às propriedades dos materiais constituintes da base e do subleito, enquanto variáveis ligadas ao carregamento,

embora importantes, apresentam impacto relativamente menor quando analisadas isoladamente.

Os gráficos de efeitos marginais corroboram essa tendência: valores crescentes de Ψ_4 levam a aumentos expressivos do ATR, ao passo que variações em Ψ_2 e Ψ_3 resultam em reduções graduais do afundamento. Já o número de repetições de carga (N) e o coeficiente de Poisson indicam influência pouco significativa sobre o comportamento final do modelo.

Figura 6 - Importância relativa das variáveis na predição do ATR (mm)



Fonte: Autoria própria (2026).

Essas conclusões estão em consonância com a literatura recente. Araújo e Lima (2022), em estudo de análise de sensibilidade com o MeDiNa, verificaram que a deformação permanente do pavimento é altamente sensível a parâmetros estruturais (como os coeficientes Ψ), em especial quando associados à base e ao subleito, enquanto o tráfego exerce influência mais limitada dentro do intervalo de variação analisado. De forma semelhante, Almeida (2022) constatou que os parâmetros Ψ_4 e Ψ_3 foram os que mais modificaram os resultados de ATR, com efeitos diretos e inversos respectivamente, ao passo que o número N (tráfego) e o coeficiente de Poisson apresentaram impacto reduzido.

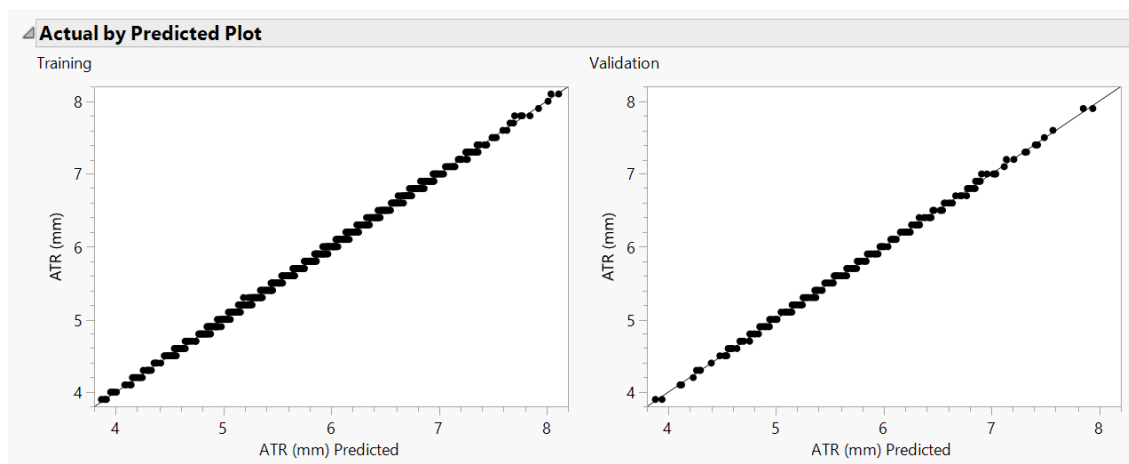
Dessa forma, os achados do presente trabalho confirmam e expandem as evidências da literatura, demonstrando que o desempenho dos pavimentos flexíveis é determinado prioritariamente pelas características intrínsecas dos materiais. Isso

evidencia a importância de ensaios laboratoriais robustos para a determinação precisa dos coeficientes de deformação permanente, uma vez que erros nessas estimativas podem resultar em projeções significativamente distorcidas do comportamento estrutural.

4.4. Validação Gráfica

A Figura 7 apresenta a validação gráfica do modelo de Rede Neural Artificial (RNA) por meio da comparação entre os valores de afundamento de trilha de roda (ATR) simulados pelo software MeDiNa e aqueles previstos pela função gerada. Observa-se que os pontos se distribuem de forma bastante próxima à reta 1:1, o que evidencia uma aderência quase perfeita entre valores reais e previstos.

Figura 7 - Relação entre valores observados (MeDiNa) e previstos pela RNA para o ATR (mm)



Fonte: Autoria própria (2026).

A dispersão em torno da linha de tendência é mínima, confirmando a capacidade da RNA em reproduzir, com elevada acurácia, os resultados de referência. Essa proximidade não apenas valida o processo de treinamento e ajuste do modelo, mas também reforça a consistência observada nas métricas estatísticas já discutidas na Seção 4.1, em que os coeficientes de determinação ($R^2 \approx 0,998$) e os erros médios reduzidos evidenciaram a robustez do ajuste.

Esse resultado gráfico é de grande relevância prática, pois ilustra de forma clara que a RNA pode atuar como uma ferramenta alternativa confiável ao MeDiNa para estimativas de ATR, reduzindo a dependência de simulações extensas no software. Além disso, a fidelidade do modelo sugere seu potencial de aplicação em análises preliminares de projetos, agilizando a avaliação do desempenho de pavimentos em função de diferentes parâmetros estruturais e de tráfego.

4.5. Comparação com Modelos Tradicionais

Com o intuito de avaliar o desempenho da Rede Neural Artificial (RNA) de forma objetiva, realizou-se uma comparação direta com modelos tradicionais de regressão linear múltipla, técnica amplamente utilizada em estudos anteriores voltados à previsão do afundamento de trilha de roda (ATR). A análise das estatísticas de regressão é um importante parâmetro para se avaliar numericamente a precisão do modelo. No trabalho de Almeida (2022) o coeficiente de determinação (R^2) foi igual 0,693. Nesse caso, aproximadamente, 70% dos resultados foram explicados pelo modelo de regressão. Em outras palavras, aproximadamente, 30% da variabilidade do modelo não é explicada. A regressão linear múltipla busca estabelecer uma relação estatística entre variáveis independentes e a variável dependente por meio de combinações lineares, sendo, portanto, um modelo mais restritivo do ponto de vista matemático.

A aplicação da regressão linear foi conduzida utilizando-se as mesmas variáveis de entrada consideradas na RNA, a saber: tráfego acumulado (N), coeficiente de Poisson, coeficientes de regressão (Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4) da base e do subleito. Essa padronização garantiu que a comparação fosse conduzida em condições equânimes, permitindo avaliar exclusivamente a influência da metodologia na qualidade preditiva e não a seleção de variáveis.

Os resultados indicaram que, embora a regressão linear múltipla tenha alcançado valores aceitáveis de R^2 , sua capacidade de representar os fenômenos observados foi limitada quando comparada à RNA. Isso se deve ao fato de que a regressão assume relações puramente lineares entre variáveis, não captando as não linearidades e interações que caracterizam o comportamento estrutural dos pavimentos sob solicitações repetidas de tráfego. Consequentemente, tanto o RMSE quanto o erro percentual médio mostraram-se superiores no modelo linear, evidenciando maior dispersão dos valores previstos em relação aos observados.

Assim, a análise comparativa demonstrou que a RNA apresenta vantagens claras sobre a regressão linear múltipla, ao incorporar não linearidades e reduzir significativamente os erros estatísticos. Essa superioridade metodológica confirma os achados da literatura recente (Almeida, 2022; Araújo; Lima, 2022), a qual destaca que, apesar da simplicidade da regressão linear, abordagens baseadas em inteligência artificial oferecem ganhos expressivos em acurácia e aplicabilidade prática.

4.6. Discussão dos Resultados

O desempenho obtido pela Rede Neural Artificial (RNA) no presente estudo evidencia um avanço significativo em relação às abordagens tradicionais de previsão do afundamento de trilha de roda (ATR) em pavimentos flexíveis. Enquanto métodos clássicos de regressão linear múltipla, como os explorados por Almeida (2022), apresentam limitações em capturar interações complexas entre variáveis, a RNA demonstrou elevada capacidade de generalização, com coeficientes de determinação superiores a 0,998 e baixa dispersão residual. Esse nível de precisão indica que o modelo neural é capaz de replicar de maneira quase integral os resultados gerados pelo software MeDiNa, o que o habilita como ferramenta de apoio robusta no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos.

Ao se comparar diretamente com os modelos de regressão linear múltipla apresentados por Almeida (2022), percebe-se que, embora esses modelos consigam fornecer explicações razoáveis para tendências gerais, apresentam limitações expressivas quando as variáveis apresentam comportamento não linear ou quando múltiplos fatores atuam de forma simultânea sobre o ATR. A RNA, ao incorporar funções de ativação não lineares em suas camadas ocultas, consegue captar tais interações, gerando previsões mais consistentes e reduzindo erros de ajuste. Essa característica confere ao modelo neural uma vantagem prática para cenários onde o tráfego, as condições do subleito e os parâmetros estruturais variam amplamente.

No trabalho de Araújo e Lima (2022), a análise de sensibilidade do MeDiNa evidenciou que os coeficientes de deformação permanente (Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4) são determinantes para o comportamento do ATR, em detrimento de variáveis ligadas exclusivamente ao tráfego, como o número N . Os resultados da presente pesquisa corroboram esse achado, uma vez que a RNA também apontou Ψ_4 e Ψ_2 como os parâmetros mais influentes na resposta do modelo, seguidos por Ψ_3 , enquanto o tráfego e o coeficiente de Poisson exerceram papel secundário. A convergência entre os estudos reforça a centralidade das propriedades estruturais dos materiais na durabilidade do pavimento.

A análise conjunta dos trabalhos de Almeida (2022) e Araújo & Lima (2022) com os achados deste TCC permite inferir que as metodologias baseadas em regressões lineares ou em testes de sensibilidade, embora úteis para análises exploratórias, não são capazes de oferecer a mesma acurácia das RNAs em contextos preditivos. Isso ocorre porque tais métodos assumem relações lineares ou simplificadas entre as

variáveis, enquanto a RNA consegue capturar efeitos de interação e não linearidades, que são intrínsecos ao comportamento de materiais granulares e ligantes asfálticos sob repetidas solicitações de carga.

Álvares Júnior (2019), em estudo voltado à estimativa de parâmetros de compactação de solos utilizando RNA, também apontou ganhos expressivos em termos de acurácia quando comparado a métodos convencionais. Seus achados dialogam com os presentes resultados ao confirmar que, em problemas geotécnicos, onde predominam comportamentos complexos e multifatoriais, o emprego de redes neurais permite ganhos significativos na capacidade de previsão. Assim, verifica-se que a utilização da inteligência computacional aplicada à engenharia de pavimentos tem potencial para redefinir paradigmas metodológicos.

Nesse sentido, a adoção de modelos neurais como ferramentas auxiliares não se configura apenas como uma inovação tecnológica, mas como uma resposta prática às dificuldades de execução de ensaios laboratoriais complexos, frequentemente exigidos para alimentar softwares como o MeDiNa. Conforme apontado por Bernucci et al. (2010) e Balbo (2007), o custo e a dificuldade de obtenção de parâmetros de campo representam um desafio recorrente no dimensionamento de pavimentos no Brasil. A RNA, ao sintetizar relações a partir de bases simuladas, pode reduzir significativamente essa dependência, permitindo estimativas rápidas e de baixo custo.

Além disso, estudos clássicos como os de Motta (1991) e Franco (2007) já destacavam a importância de se evoluir para modelos mecanístico-empíricos capazes de incorporar as variabilidades do tráfego e dos materiais. Entretanto, tais modelos ainda demandam grande quantidade de dados de entrada, nem sempre disponíveis em cenários de projeto. A RNA aqui apresentada surge como solução intermediária: mantém a sofisticação de um modelo mecanístico-empírico, mas simplifica sua aplicação prática ao reduzir o número de etapas laboratoriais necessárias.

Outro aspecto que merece destaque refere-se à consistência da RNA frente às análises de sensibilidade conduzidas por Araújo & Lima (2022). Enquanto no estudo dos autores foi possível identificar qualitativamente a predominância de determinados coeficientes estruturais sobre o ATR, a RNA deste trabalho quantificou tais influências, estabelecendo hierarquias de importância. Essa objetividade é um ganho significativo, uma vez que auxilia projetistas na priorização de ensaios e no foco dos esforços de caracterização.

Por outro lado, estudos como os de Schwartz et al. (2013) e Shajhi (2006), que exploraram metodologias de análise de sensibilidade em contextos internacionais (AASHTO e MEPDG), também ressaltam que a incorporação de abordagens avançadas de predição é essencial para aumentar a confiabilidade dos métodos de dimensionamento. A RNA proposta insere-se nesse mesmo contexto, contribuindo para o fortalecimento da abordagem mecanístico-empírica nacional representada pelo MeDiNa.

Os resultados aqui apresentados também dialogam com as discussões de Guimarães (2009) sobre deformação permanente em solos tropicais, uma vez que o modelo neural reforça a relevância de parâmetros estruturais sobre a performance final do pavimento. Tais evidências apontam para uma convergência teórica entre modelos empíricos, mecanístico-empíricos e de inteligência artificial, sugerindo caminhos para integração futura.

Entretanto, algumas limitações precisam ser explicitadas. Primeiramente, o modelo foi desenvolvido a partir de dados simulados no MeDiNa, e não com dados empíricos de campo. Isso significa que sua robustez prática ainda depende de validações adicionais em contextos reais, nos quais fatores ambientais, construtivos e operacionais podem alterar significativamente o desempenho previsto.

Outro ponto a considerar é que a confiabilidade do modelo depende da qualidade dos dados de entrada.

Por fim, ressalta-se que os resultados e conclusões obtidos neste estudo estão condicionados às características específicas adotadas na presente pesquisa. O modelo analisado considerou um pavimento composto por duas camadas, revestimento e base, constituídas por Concreto Asfáltico Classe C1 e Material Granular tipo BGG C1, com espessuras de 7,50 cm e 20,0 cm, respectivamente. Dessa forma, alterações significativas nas condições analisadas, como a incorporação de novas camadas estruturais, substituição dos materiais empregados ou modificações nas espessuras adotadas, podem influenciar o comportamento do sistema, tornando necessária a realização de novas investigações para validação dos resultados.

Como alertam Coutinho (2011) e Barbosa & Silva (2021), a adoção de modelos sofisticados não elimina a necessidade de rigor na coleta e caracterização dos parâmetros básicos, sob pena de comprometer as previsões. Nesse contexto, a

RNA deve ser entendida como um complemento, e não como substituto absoluto, dos ensaios de campo e laboratório.

No entanto, mesmo com tais restrições, os resultados obtidos aqui representam uma contribuição relevante para a literatura e para a prática de engenharia de pavimentos. Conforme defendem Brito & Graeff (2009) e Bueno et al. (2017), a busca por metodologias que aumentem a eficiência no uso de recursos e reduzam a ocorrência de falhas precoces é um dos grandes desafios da engenharia rodoviária. A RNA apresentada neste estudo, ao permitir previsões rápidas e precisas, responde diretamente a essa demanda.

No campo da aplicação prática, a função matemática obtida pode ser implementada em planilhas eletrônicas ou softwares de cálculo, permitindo que engenheiros projetistas tenham acesso imediato a estimativas de ATR. Isso amplia o alcance da ferramenta e reduz a dependência de softwares proprietários, aumentando a autonomia técnica em escritórios de projeto e órgãos públicos. O potencial de disseminação da metodologia, portanto, não se limita ao meio acadêmico, mas alcança diretamente a prática profissional.

Diante desse cenário, a RNA deve ser vista como um passo em direção à integração de métodos tradicionais de dimensionamento com ferramentas de inteligência computacional. Como defendem Haas et al. (2007), o futuro do dimensionamento de pavimentos reside justamente na convergência entre modelos mecanístico-empíricos e algoritmos avançados de previsão. O presente trabalho, ao confirmar a aplicabilidade da RNA ao contexto brasileiro, contribui para consolidar essa tendência.

Estudos internacionais também corroboram os achados deste trabalho quanto à superioridade das RNAs em relação a métodos estatísticos convencionais. Günaydin (2009), por exemplo, utilizou redes neurais para prever parâmetros de compactação de solos e demonstrou que essas técnicas apresentam desempenho superior a modelos baseados em regressões lineares, sobretudo em situações que envolvem dados heterogêneos e comportamento não linear. Essa constatação dialoga com os resultados aqui obtidos, uma vez que o ATR também deriva de múltiplos fatores interdependentes, cuja interação é mais bem captada por modelos de inteligência artificial.

Na mesma direção, Najjar et al. (1996) aplicaram redes neurais para a identificação de características de compactação e observaram que o método era

capaz de reproduzir relações complexas entre variáveis com alta precisão. Tais evidências reforçam que a RNA desenvolvida neste TCC se insere em um contexto mais amplo de validação científica, no qual modelos neurais têm se consolidado como ferramentas eficazes para previsão de deformações permanentes em solos e pavimentos. A comparação entre o presente estudo e esses trabalhos internacionais evidencia um alinhamento metodológico e consolida a relevância do modelo proposto para o cenário brasileiro.

Outro aspecto que merece destaque é a possibilidade de integração da RNA com softwares existentes, como o MeDiNa. Enquanto o software oficial exige a execução de ensaios laboratoriais sofisticados para a determinação de parâmetros como módulo resiliente e coeficientes Ψ , a RNA pode oferecer estimativas rápidas desses resultados, reduzindo custos e tempo de projeto. Essa sinergia metodológica pode potencializar a eficiência dos processos de dimensionamento, atuando como uma camada adicional de validação ou como ferramenta preliminar de análise, especialmente em regiões com menor infraestrutura laboratorial.

Entretanto, é importante reconhecer que os dados utilizados no treinamento e validação do modelo neural foram provenientes de simulações computacionais realizadas no MeDiNa. Embora esse procedimento assegure consistência nos resultados, ele limita a representatividade da base de dados, uma vez que não contempla variabilidades inerentes a condições reais de campo, como falhas construtivas, variações climáticas e efeitos de envelhecimento dos materiais asfálticos. Assim, uma das principais limitações do presente estudo é a necessidade de validação empírica em trechos experimentais monitorados, o que garantirá maior robustez às previsões realizadas pela RNA.

Os resultados permitem concluir que a RNA constitui não apenas uma alternativa metodológica, mas também uma inovação prática para a engenharia de pavimentos. Ao quantificar a importância das variáveis estruturais e superar as limitações dos métodos tradicionais, a RNA proposta neste TCC abre caminho para o desenvolvimento de ferramentas híbridas que conciliem a robustez de modelos mecanístico-empíricos com a flexibilidade da inteligência artificial. Esse avanço, além de atender a demandas acadêmicas, oferece soluções concretas para órgãos gestores e profissionais da área, que enfrentam diariamente os desafios de manter a qualidade da infraestrutura viária em um cenário de recursos limitados e tráfego crescente.

Cabe ressaltar que este estudo abre espaço para pesquisas futuras que explorem arquiteturas mais complexas de aprendizado profundo (deep learning), a integração de dados climáticos e de manutenção, bem como a validação em trechos experimentais monitorados. Essas iniciativas poderão ampliar a aplicabilidade do modelo e reforçar seu papel como ferramenta auxiliar no planejamento e dimensionamento de pavimentos de alto desempenho.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos ao longo deste estudo permitem afirmar que a Rede Neural Artificial (RNA) se mostrou altamente eficaz na previsão do afundamento de trilha de roda (ATR) em pavimentos flexíveis, utilizando como base a ampla gama de simulações fornecidas pelo software MeDiNa. O modelo alcançou coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,998, associado a baixos valores de erro médio e erro quadrático, demonstrando elevada acurácia e consistência entre as fases de treinamento e validação.

A análise de sensibilidade evidenciou que os parâmetros estruturais, em especial os coeficientes de regressão Ψ_4 e Ψ_2 , foram os mais determinantes para a resposta do modelo, seguidos pelo Ψ_3 . Em contrapartida, o tráfego acumulado (N) e o coeficiente de Poisson apresentaram contribuição menos expressiva. Essa hierarquização de importância está em consonância com os achados da literatura, reforçando a robustez da RNA e sua capacidade de reproduzir o comportamento previsto pelo MeDiNa.

Ao se comparar o desempenho da RNA com modelos tradicionais, notadamente a regressão linear múltipla, verificou-se a superioridade da abordagem baseada em inteligência artificial. Enquanto a regressão mostrou limitações na captura de relações não lineares entre variáveis, a RNA conseguiu representar de forma mais fidedigna as interações complexas do problema, alcançando melhor ajuste e reduzindo significativamente os erros.

O presente trabalho oferece uma contribuição relevante ao campo do dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos, ao demonstrar que a integração de técnicas de inteligência computacional pode ampliar a eficiência e a precisão das previsões estruturais. O modelo neural desenvolvido constitui um avanço metodológico em relação às abordagens convencionais, abrindo caminho para novas formas de análise e projeto.

Do ponto de vista prático, a pesquisa possui especial relevância para os projetos rodoviários da região Norte do Brasil, onde a carência de dados empíricos de campo e as particularidades geotécnicas dos solos tropicais frequentemente dificultam a aplicação plena de metodologias mecânico-empíricas. A RNA proposta surge como ferramenta auxiliar capaz de reduzir custos e agilizar a etapa de projeto, fornecendo estimativas confiáveis do ATR a partir de parâmetros de entrada relativamente acessíveis.

Com vistas ao aprimoramento e expansão da presente investigação, sugerem-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

- Aplicar o modelo de RNA a bases experimentais de campo, permitindo validar sua performance em condições reais de tráfego e clima.
- Explorar arquiteturas mais complexas de aprendizado de máquina, como modelos de *deep learning* e redes convolucionais, que possam capturar interações ainda mais sofisticadas entre variáveis.
- Ampliar o escopo do modelo para a previsão simultânea de múltiplos mecanismos de deterioração, incluindo não apenas o ATR, mas também a fadiga das camadas ligadas e a evolução de trincas, conferindo maior abrangência e aplicabilidade à ferramenta.

Essas iniciativas têm potencial para consolidar a RNA como instrumento complementar de grande valor no dimensionamento e na manutenção de pavimentos, contribuindo para práticas de engenharia mais eficientes e alinhadas às demandas contemporâneas de infraestrutura viária.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Gilberto; ALVES, Custodio da Cunha; HENNING, Elisa. **Gerenciamento de projetos: simulação de Monte Carlo via a ferramenta Simular**. [S. l.], p. 1-13, 12 out. 2010.
- AL-KHAFAJI, A. N. Estimation of soil compaction parameters by means of Atterberg limits. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 26, p. 359-368, 1993.
- ALMEIDA, Danilo Ferreira. **Geração de modelo, a partir dos dados do Medina, para descrever o afundamento de trilha de roda em função de parâmetros do tráfego, da base e subleito**. 2022. 104 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.
- ÁLVARES JÚNIOR. Reginaldo César Lima. **Estudo da estimativa dos Parâmetros de Compactação de Solos Utilizando Rede Neural Artificial (RNA)**. 2019. 56 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
- ANJOS, Gérson Jacques Miranda dos. **Acervo pessoal de dados**. Brasília, 2016.
- ANJOS, Gérson Jacques Miranda dos. **Aplicação de técnicas probabilísticas e estatísticas na avaliação da representatividade de resultados de ensaios in situ**. 1999. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- ANJOS, Gérson Jacques Miranda dos. **Estudo experimental do comportamento de fundações escavadas em solos tropicais**. 2006. 341 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- ARAÚJO, Ana Beatriz Marques de; LIMA, Luan Patrick Reis. **Análise de sensibilidade das respostas do software MeDiNa às variações dos parâmetros de entrada das camadas e do subleito de um pavimento flexível**. 2022. 81 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.
- ARDAKANI, A.; KORDNAEIJ, A. Soil compaction parameters prediction using GMDH-type neural network and genetic algorithm. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2017. DOI: 10.1080/19648189.2017.1304269.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solos – Ensaio de compactação – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARBOSA, Diego Souza; SILVA, Daniel Cardoso. **Análise comparativa entre o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos – MeDiNa e o método do DNER**. 2021. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/3428>. Acesso em: 16 mar. 2022.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras; Abeda, 2010.

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

BLOTZ, L. R.; BENSON, C. H.; BOUTWELL, G. P. Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE**, v. 124, n. 9, p. 907–912, 1998.

BRITO, Lélío A. T.; GRAEFF, Ângela G. **Métodos de dimensionamento de pavimentos: metodologias e seus impactos nos projetos de pavimentos novos e restaurações**. Porto Alegre: Prime Engenharia e Consultoria, 2009.

BUENO, L. D.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. P.; OLIVEIRA, M. F. **Influência da pressão de inflação dos pneus e da carga dos veículos comerciais na degradação dos pavimentos**. *Revista Pavimentação*, ano XII, n. 44, p. 38-57, 2017. ISSN 1809-1865.

CARDOSO, Sebastião H. **Estudo de deformações resilientes de solos lateríticos da região de Brasília**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23., 1988, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ABPv, 1988. v. 1, p. 203-219.

CHIARELLO, Gabriéli Pires et al. **Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): estudo de caso da duplicação da BR 287 – Trecho Santa Cruz do Sul a Tabaí/RS**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE, 33., 2019, Balneário Camboriú. *Anais eletrônicos...* Balneário Camboriú: ANPET, 2019. p. 1-12.

COUTINHO, João Camilo Penna. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho**. 2011. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 162/94: Solos – compactação utilizando amostras trabalhadas**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 005/2003-TER: classificação de defeitos de pavimentos flexíveis e semi-rígidos**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2003.

FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. 1994. 293 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

FRITZEN, Marcos Antonio. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GUIMARÃES, André Corrêa Ribeiro. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

GÜNAYDIN, O. Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks. **Environmental Geology**, v. 57, p. 203–215, 2009. DOI: 10.1007/s00254-008-1300-6.

HAAS, Ralph et al. **Mechanistic-empirical pavement design: evolution and future challenges**. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, 2007, Saskatoon. *Proceedings...* Saskatoon: TAC, 2007.

INFORMAÇÕES gerais. **Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/informacoes-gerais>. Acesso em: 13 dez. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTE; DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de utilização do software MeDiNa**. Brasília: DNIT, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.5>. Acesso em: 12 dez. 2022.

LIMA, Luan Patrick Reis; ARAÚJO, Ana Beatriz Marques. **Análise de sensibilidade das respostas do software Medina às variações dos parâmetros de entrada**. 2022. 81 f. Trabalho de Diplomação de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

MEDINA, Jorge; PREUSSLER, Eduardo Silveira. **Características resilientes de solos em estudos de pavimentos**. *Solos e Rochas*, v. 3, n. 1, p. 3-26, abr. 1980.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaio de cargas repetidas**. 1991. 366 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1991.

NAJJAR, Y. M.; BASHEER, I. A.; NAOUSS, W. A. On the identification of compaction characteristics by neuronets. **Computers and Geotechnics**, v. 18, n. 3, p. 167–187, 1996.

PELISSON, N. D.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. **Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis**. *Journal of Transport Literature*, v. 9, n. 1, p. 20-24, 2015. DOI: 10.1590/2238-1031.jtl.v9n1a4.

PITANGUI, Lucas Ribeiro. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa**. 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2019.

SCHWARTZ, W. C. et al. **Global sensitivity analysis of mechanistic-empirical performance predictions for flexible pavements**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 2013, Washington, D.C. *Proceedings...* Washington, D.C.: TRB, 2013.

SHAJHI, S. **Sensitivity analysis of AASHTO's 2002 flexible and rigid pavement design methods**. 2006. Dissertation (Master of Science in Civil & Environmental Engineering) – University of Central Florida, Orlando, 2006.

SILVA, R. G. O. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. 2017. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: IPR/DNER, 1981. (IPR – 667).