



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

VIABILIDADE DO USO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DO SUBLEITO PREVISTO A PARTIR DE UM MODELO NEURAL NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Yhasmim Vitória Vanderlei Dias¹; João Paulo Ferreira de Lacerda¹; Flávio Santos Sousa Costa¹; Benaffe Santos Cardoso de Almeida¹ & Antonio Júnior Alves Ribeiro.¹

RESUMO

Os pavimentos flexíveis são estruturas multicamadas que devem ser dimensionadas de modo a atender a determinados aspectos de rigidez e durabilidade ao menor custo possível, oferecendo assim segurança e conforto aos usuários. Em 2022, cerca de 71% do modal rodoviário cearense foi classificado em condições regulares a péssimas, fato este que demonstra a precariedade das condições da malha rodoviária e evidencia a necessidade de atualização dos métodos de dimensionamento aplicados. Tendo em vista esta problemática e a fim de contribuir com a utilização dos métodos empíricos-mecanísticos, este artigo teve por objetivo propor um modelo de previsão do módulo de resiliência (MR) de solos do estado do Ceará a partir dos parâmetros básicos de caracterização física dos materiais e das tensões (desvio e confinante) predefinidas em norma. Para tanto, foi utilizada uma ferramenta computacional denominada Redes Neurais Artificiais (RNAs). O modelo gerado a partir desses dados apresentou coeficientes de correlação satisfatórios em torno de 0,99 na fase de treinamento da rede e 0,98 nas fases de validação e testes. Ademais, foram realizadas simulações utilizando o software de dimensionamento de pavimentos, MeDiNa, objetivando a realização de um comparativo entre os dimensionamentos, do MR previsto pela rede e o MR real. Percebe-se, assim, que houve uma pequena variação do afundamento de trilha de roda entre os modelos testados, garantindo a confiabilidade da rede neural.

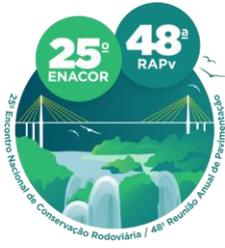
PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação; Módulo de Resiliência; Redes Neurais Artificiais; MeDiNa; Rodovias de Baixo Volume de Tráfego.

ABSTRACT

Pavements are structures that must be designed with certain rigidity and durability criteria at the lowest possible cost, offering safety and comfort to users. In 2022, around 71% of the highways in the state of Ceará were classified in fair to bad conditions, a fact that demonstrates the precarious conditions of the road network and highlights the need to modernize design methods. In order to contribute to the use of empirical-mechanistic methods, this article aimed to propose a model for predicting the resilience modulus (MR) of soils in the state of Ceará based on the basic parameters of the physical characterization of materials and stresses. For that, a computational tool called Artificial Neural Networks (ANNs) was used. The model generated from these data showed satisfactory correlation coefficients of around 0.99 in the ANN training stage and 0.98 in the validation and testing stages. Furthermore, simulations were carried out using the pavement design software, MeDiNa, with the aim of carrying out a comparison between the designs, the MR projected by the network and the real MR. It can be seen, therefore, that there was a small variation in permanent deformation between the tested models, guaranteeing the accuracy of the neural network.

KEY WORDS: Paving; Resilience Module; Artificial neural networks; MeDiNa; Low-Volume Roads.

¹ Instituto Federal do Ceará, diasyhasmim@gmail.com; jpaulolacerda47@gmail.com; flavio.santos150998@gmail.com; benaffelima@gmail.com; junior.ribeiro@ifce.edu.br.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Cerca de 71% do modal rodoviário estudado pela Confederação Nacional do Transporte, no estado do Ceará, em 2022, foi classificado em condições regulares a péssimas (CNT, 2022). Situação caracterizada pelo aparecimento de fissuras, trincas por fadiga, afundamentos de trilha de roda, entre outros defeitos que demonstram a precariedade das condições da malha rodoviária e destacam a necessidade de atualização dos métodos de dimensionamento aplicados no país.

Os pavimentos flexíveis são estruturas multicamadas que tem por finalidade resistir aos esforços ocasionados pela ação do tráfego de veículos e dissipá-los, de forma atenuada, ao subleito (BERNUCCI *et al.*, 2010). Estes, por sua vez, devem ser dimensionados de modo a atender a determinados aspectos rigidez e durabilidade ao menor custo possível, proporcionando conforto e segurança aos usuários (FERREIRA, 2002).

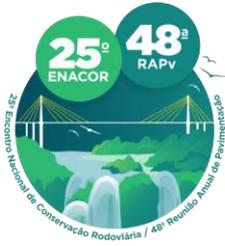
Tradicionalmente, são constituídos por quatro camadas principais, sendo elas, o revestimento asfáltico, as camadas de base, sub-base e o reforço do subleito. Cada camada tem espessura finita e é composta por materiais que resistam às tensões e deformações induzidas pelas cargas aplicadas (BERNUCCI *et al.*, 2010). Sendo assim, o mau comportamento da estrutura do pavimento é reflexo das características apresentadas pelos seus materiais constituintes, tornando fundamental o conhecimento de suas propriedades para o seu dimensionamento adequado.

Embora um novo método de dimensionamento de pavimentos empírico-mecanístico (MeDiNa) esteja em implementação no Brasil pelo DNIT, ainda é comum e vigente o uso de métodos empíricos que se baseiam nas informações oriundas do ensaio CBR (*California Bearing Ratio*). Entretanto, apesar de sua simplicidade, esta metodologia não representa de maneira apropriada a natureza dinâmica das cargas aplicadas, podendo provocar a deterioração prematura das rodovias. Fato este que levou a busca de métodos que melhor representassem o comportamento dessas estruturas (RIBEIRO, 2016).

Os métodos empíricos-mecanísticos utilizam as propriedades de rigidez dos materiais como forma de se obter os valores de tensão e deformação, sendo o módulo de resiliência (MR) uma das propriedades mais utilizadas (MAIA, 2016). Aliado a isto, Lehmert *et al.* (2020) afirmam que a adoção de um método empírico-mecanístico contribui de maneira significativa na qualidade dos projetos, proporcionando uma melhoria nas condições das rodovias.

O MR consiste, basicamente, em um parâmetro de caracterização do comportamento elástico dos materiais, ou seja, trata-se da capacidade do material de não resguardar deformações após cessada a ação de uma carga. Experimentalmente, sua determinação é realizada por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas que requerem equipamentos de alto valor aquisitivo e mão de obra especializada para sua execução, dificultando a utilização do parâmetro e, conseqüentemente, dificultando a aplicação dos métodos empíricos-mecanísticos no Brasil, onde atualmente tais equipamento estão concentrados nas instituições de ensino e pesquisa (RIBEIRO, 2016).

Diversos são os fatores que podem influenciar no módulo de resiliência. Bastos (2013) constatou uma variação no módulo de resiliência em função do teor de umidade de compactação; Rodrigues (1997) notou que o solo com maior valor de índice de plasticidade apresentou valores de MR maiores; Liu *et al.* (2014) mencionaram em suas pesquisas que agregados bem graduados tendem a



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



apresentar valores de módulo de resiliência mais altos. Assim, fica evidente a relação existente entre as propriedades físicas dos materiais e o módulo de resiliência.

A fim de contribuir com a utilização do parâmetro, este artigo objetiva apresentar um modelo de Rede Neural Artificial (RNA) para previsão do módulo de resiliência de solos do estado do Ceará por meio de dados de caracterização geotécnicos básicos e das tensões estabelecidas pela norma DNIT 134/2018-ME. Ademais, serão apresentados o tratamento estatístico dos dados utilizados e uma aplicação dos resultados no *software* MeDiNa, demonstrando a viabilidade do uso do MR gerado pelo modelo para o dimensionamento de rodovias.

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

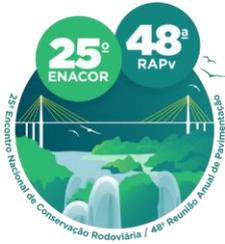
As Redes Neurais Artificiais são técnicas computacionais utilizadas na resolução de problemas complexos que envolvem o reconhecimento de padrões, mesmo não havendo o conhecimento prévio da relação entre as variáveis envolvidas no processo (SILVA, 2008). De maneira geral, consiste em uma ferramenta inspirada nos princípios de funcionamento do cérebro humano, assemelhando-se em dois aspectos básicos: o processo de aprendizagem, adquirido através da rede de acordo com os dados fornecidos, e as forças de conexões estabelecidas entre os neurônios no processo de aprendizagem, acondicionando o conhecimento obtido, os chamados pesos sinápticos (FLECK, 2016).

Haykin (2001) conceitua as RNAs como redes conexionistas, processadores maciçamente paralelamente distribuídos constituídos de unidades de processamento simples, os neurônios, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento e torná-lo disponível para o uso posteriormente. Ou seja, trata-se de um sistema composto por elementos de processamento interconectados, dispostos em camadas paralelas, que se organizam de modo a processar as informações sobre um determinado fenômeno, aprender e generalizar, produzindo saídas adequadas para a aplicação à qual se destina.

Tipicamente, as redes de múltiplas camadas são estruturadas em uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída. A quantidade de camadas influi diretamente no desempenho da rede, o que intuitivamente leva a pensar que quanto maior a quantidade, maior será a capacidade de aprendizado. No entanto, na prática, observa-se que um grande número de camadas pode se tornar inviável devido ao custo de processamento da rede (SILVA, 2003).

O número de neurônios na camada intermediária, normalmente, é definido de modo empírico, dependendo fortemente da distribuição dos padrões de treinamento e validação da rede (SILVA, 2008). Hecht-Nelson (1987) sugerem que a quantidade de nós dessas camadas devem ser estabelecidas em torno de $(2i+1)$ neurônios, onde o “i” corresponde a quantidade de parâmetros utilizados para prever o fenômeno.

Durante a fase de treinamento, ocorre o processo de aprendizagem da rede ao qual são realizados ajustes sucessivos dos pesos e bias até que a saída produzida seja a mais próximo possível da saída desejada. Assim, com a posse dos pesos sinápticos e seus limiares, é possível implementar o modelo em uma planilha de cálculos.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



MATERIAIS E MÉTODOS

Escolha da área de estudo

O estado do Ceará está localizado na região nordeste brasileira, limitando-se a Norte com o Oceano Atlântico; ao Sul com o Estado de Pernambuco; a Leste com os estados do Rio Grande do Norte e Paraíba; e a Oeste com o Estado do Piauí. O estado possui uma população em torno de 9.240.580 habitantes, ocupando um espaço territorial de 148.894,447 quilômetros quadrados (IBGE, 2021).

Em 2022, a CNT realizou uma pesquisa para classificação do estado da malha rodoviária cearense, onde foram contabilizados cerca de 3.872km de rodovias, os quais 2.700km foram classificados de regulares a péssima (CNT, 2022). Sabe-se que a malha rodoviária é o principal meio de transporte de cargas e pessoas, estando diretamente ligada à economia, fato que evidencia a necessidade de uma atualização dos métodos de dimensionamento no estado.

Como forma de contribuir para a disseminação do uso dos métodos empíricos-mecanísticos de pavimentos, como o MeDiNa no estado Ceará, foi proposto o desenvolvimento de um modelo de previsão do MR para ser usado como alternativa aos ensaios, quando houver a impossibilidade de realização dos ensaios de MR e em casos específicos, como em rodovias de baixo volume de tráfego. A figura 1 consiste em um mapa que fornece a distribuição espacial dos pontos das amostras de solos com ensaios de MR usados neste estudo.

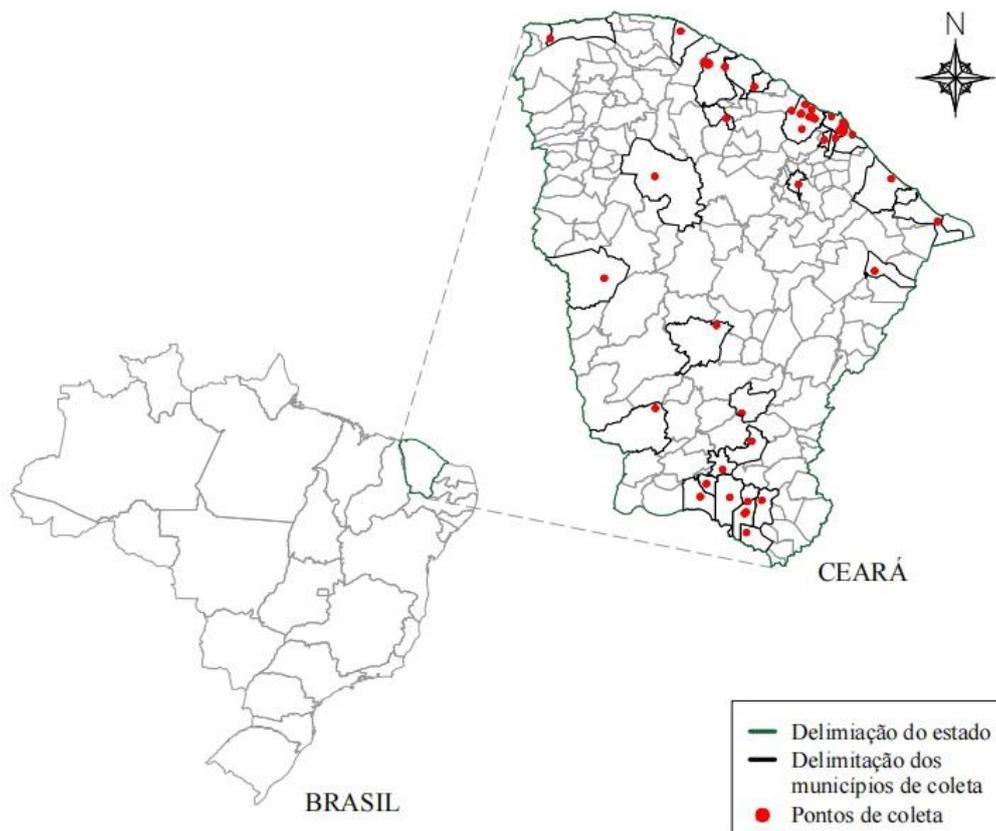
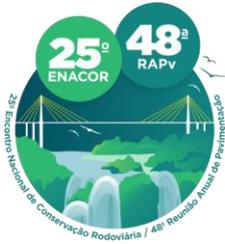


Figura 1. Geolocalização dos pontos de amostragens no Ceará, Brasil (AUTORES, 2023).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Pesquisa e aquisição de dados

Para desenvolver o modelo, foi necessário confeccionar um banco de dados compreendendo os valores referentes às entradas e à saída da rede. As informações utilizadas foram obtidas através de uma pesquisa na literatura e pela execução de ensaios laboratoriais de amostras retiradas na região de estudo.

A princípio, foi elaborado um banco de informações contendo os resultados oriundos dos ensaios de caracterização geotécnica, como os dados do ensaio de compactação, granulometria, limite de plasticidade, limite de liquidez, expansão, CBR, módulo de resiliência e as tensões estabelecidas pela norma do DNIT 134/2018. Após definidos os parâmetros, o banco foi separado em diversas configurações de tabelas com diferentes combinações de parâmetros para posterior modelagem.

Parte dos dados foram extraídos dos trabalhos acadêmicos desenvolvidos por Bastos (2013), Benevides (2000), Chaves (2000), Souza Júnior (2006), Ribeiro (2016) e Mascarenhas (2016). E, para fornecer maior representatividade ao banco de dados, foram realizados ensaios laboratoriais de pontos amostrais de alguns municípios do estado do Ceará como Aiuaba, Aracati, Barbalha, Baturité, Beberibe, Camocim, Crateús, Itarema, Mombaça, Limoeiro do Norte, Paraipaba, Santa Quitéria e Várzea Alegre. Os ensaios foram executados obedecendo às seguintes normas: a NBR-7181/2018 para análise granulométrica de solos; a NBR 7182/2020 para o ensaio de compactação; a NBR-7180/2016 para o limite de plasticidade; a NBR-6459/2017 para o limite de liquidez; a NBR-9895/2017 para determinação do CBR e; a norma DNIT 134/2018 para determinação do módulo de resiliência.

Modelagem Neural

A modelagem foi realizada utilizando o *software* MATLAB que possui uma interface gráfica de treinamento das redes neurais. Este, por sua vez, possibilita a criação e treinamento de uma rede, além de permitir a avaliação do seu desempenho através do erro quadrático médio e a análise de regressão. O modelo proposto foi concebido através do *toolbox* de treinamento de RNAs que permite a obtenção de uma rede composta por uma camada de entrada, uma camada oculta e uma camada de saída.

O próprio programa realiza a separação do banco de dados em três categorias, sendo 60% dos dados destinados ao treinamento da rede, 20% para validação e 20% para realização de testes. Por fim, foram testadas, treinadas e validadas diversas arquiteturas de redes, variando-se os nós de entrada e o número de neurônios presentes na camada intermediária, buscando-se uma rede simples e com menor custo de processamento possível.

Simulações no MeDiNa

Objetivando a realização de um comparativo entre as simulações de dimensionamento foram realizados testes utilizando os valores oriundos do MR calculado pela rede e com os valores reais de MR utilizando o MeDiNa.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



O módulo de resiliência no MeDiNa pode ser utilizado por meio da representação elástico linear e elástico não linear, sendo o primeiro expresso como a média dos MRs dos 18 pares de tensões estabelecidos pela norma e o segundo se refere a um modelo matemático descrito através das constantes (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) e as correlacionam com o MR. A determinação das constantes utilizadas foram obtidas por meio do *software* de ajuste de curvas de regressão não linear LABFit.

As simulações foram realizadas adotando-se os parâmetros referentes ao sistema local do banco de dados do MeDiNa, que representa o tráfego de rodovias de baixo volume de tráfego (Tabela 1), cuja deformação permanente possui um valor máximo permitido em torno de 20mm e um nível de confiabilidade de 65%. Como revestimento, foi adotado o tratamento superficial duplo (TSD). Vale ressaltar que, nesse tipo de análise, o MeDiNa não leva em consideração o dano por fadiga, é utilizado apenas o Afundamento de Trilha de Roda (ATR). Os materiais das camadas de base e sub-base adotadas nas simulações foram, respectivamente, o solo-brita constante em Bastos (2013) e um solo arenoso extraído de Vasconcelos (2018), ambos materiais do estado do Ceará. Já como material de subleito, adotou-se os valores ensaiados de MR de um dos solos constantes no banco de dados e a previsão do MR pelo modelo neural escolhido para esse mesmo solo, com a finalidade de comparar a influência do uso do MR ensaiado e previsto pela RNA no dimensionamento de pavimentos.

Tabela 1: Parâmetros do tráfego em sistema local (AUTORES, 2023).

Parâmetros de tráfego	
Volume médio diário (1° ano)	274
Fator de veículo (1° ano)	1
Número de passagens anual do eixo padrão (1° ano)	10^5
% de veículos na faixa de projeto	100
Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto	10^5
Período do projeto em anos	10
Número total de passagens do eixo padrão na faixa de pedestres	10^6

Os testes no MeDiNa foram realizados utilizando duas estruturas típicas com a variação do MR do subleito entre MR real e MR previsto pela RNA. As espessuras das camadas das estruturas atenderam os seguintes critério: espessura das camadas de base e sub-base de 15cm, revestimento com 2,0cm, conforme mostra a figura 2.

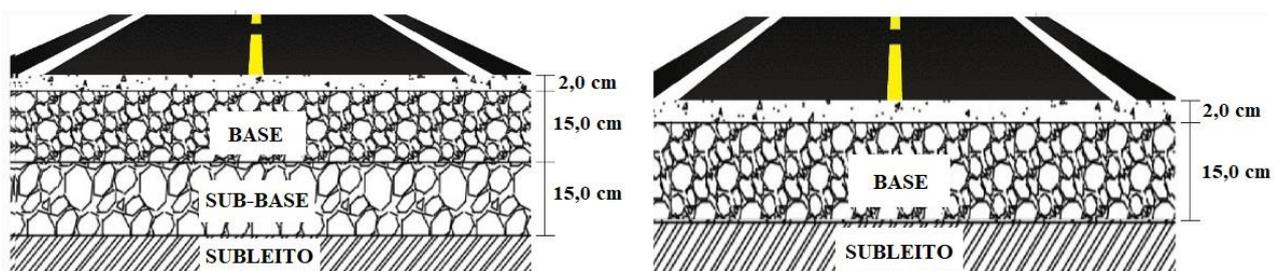
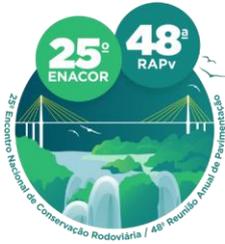


Figura 2. Ilustração das estruturas pavimentadas simuladas com 2 e 3 camadas (AUTORES, 2023).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise dos dados

A geração do modelo proposto foi obtida por meio da modelagem de 1673 resultados de módulo de resiliência. Os parâmetros utilizados e o tratamento estatístico dos dados (medidas de dispersão e tendência central) foram descritos na tabela 2.

Tabela 2. Estatística descritiva dos valores representados no banco de dados (AUTORES, 2023).

Variáveis	Mín.	Máx.	Amp.	Média	Moda	Mediana	Desvio Padrão	Variância
OT (%)	4	17	13	9,624	9,5	9,5	2,501	6,256
IP (%)	0	20	20	4,666	0	4	4,834	23,368
25,4mm	80	100	20	95,180	100	100	6,803	46,284
9,5mm	40	100	60	82,815	100	94	20,370	414,944
4,76mm	22	100	78	77,692	100	92	25,678	659,335
2,0mm	18	100	82	74,558	98	86	26,167	684,690
0,42mm	14	92,95	78,95	56,858	20	60,1	23,964	0574,286
0,074mm	4,31	86,83	82,52	24,263	13	19	16,427	269,838
MR(MPa)	50,069	2038	1987,931	442,87	635	284,216	351,920	123847,526

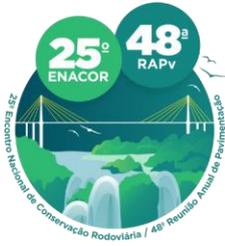
Os valores obtidos a partir da estatística descritiva mostram que o banco de dados apresenta uma boa representativa dos dados. Além disso, verifica-se que o MR foi o parâmetro que apresentou o maior valor de amplitude de variação e, conseqüentemente, os maiores resultados.

Rede neural proposta

O modelo neural que apresentou os melhores resultados foi obtido através das variáveis preditoras: umidade ótima de compactação (OT), índice de plasticidade (IP), os valores referentes ao percentual passante nas peneiras granulométricas (25,4mm, 9,5mm, 4,76mm, 2,0mm, 0,42mm e 0,074mm) e as tensões desvio e confinante. Este foi estruturado em uma camada de entrada contendo 10 nós, uma camada oculta contendo 21 neurônios e uma camada de saída (A: 10-21-1), conforme representado pela figura 3.

A RNA foi desenvolvida utilizando a função de ativação tangente sigmoideal com intervalo de ativação [-1,1]. A avaliação do desempenho da rede foi realizada por meio da análise dos coeficientes de correlação fornecidos pelo MATLAB após a modelagem.

Na figura 4 foi demonstrada a correlação entre os dados de entrada e saída da rede durante todas as fases da modelagem. Vale ressaltar que o modelo apresentou coeficientes de correlação em torno de 0,99 na fase de treinamento da rede e 0,98 nas fases de validação e testes. Portanto, entende-se que o modelo é eficiente para prever o módulo de resiliência.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br

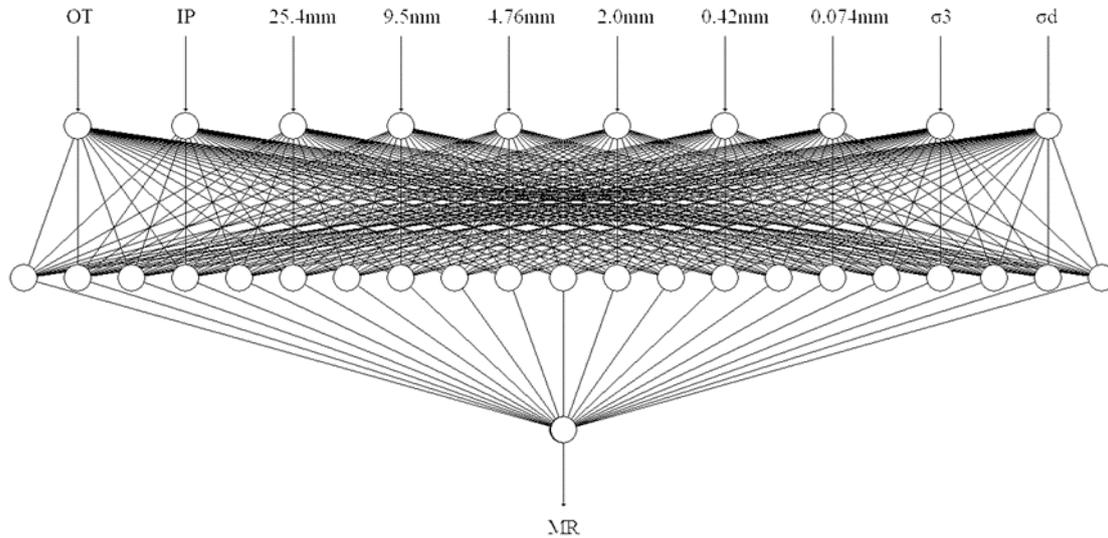


Figura 3. Modelo da rede neural artificial proposta (AUTORES, 2023).

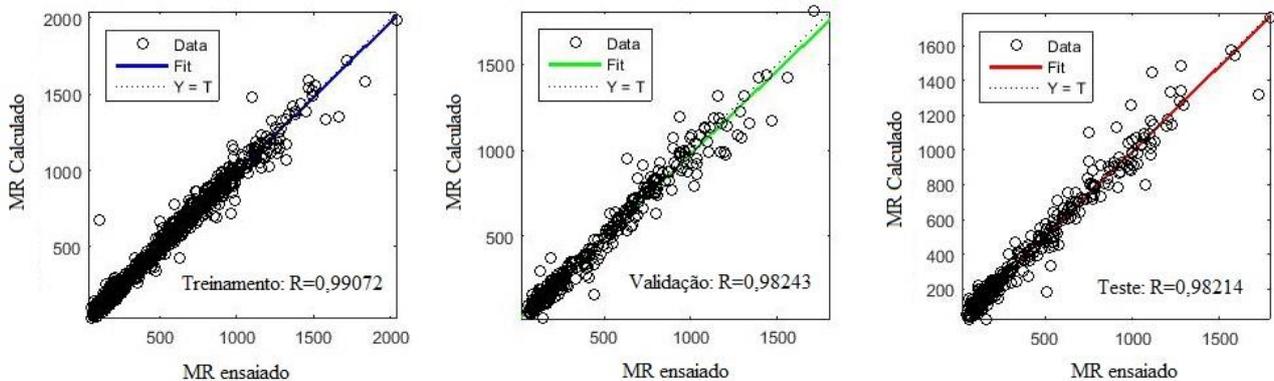


Figura 4. Gráficos de dispersão obtidos durante o treinamento, validação e teste do modelo (AUTORES, 2023).

Na figura 5 está representado um gráfico de linhas que demarca os valores referentes ao módulo de resiliência real e o calculado. Dessa forma, é possível observar que os valores de MR calculados se ajustam bem aos valores reais ensaiados, oferecendo assim, bons resultados de previsão.

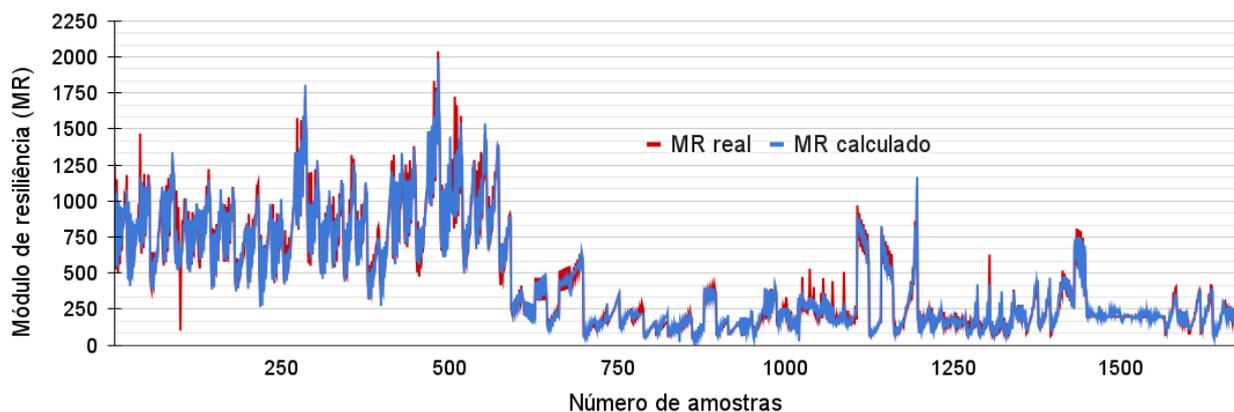
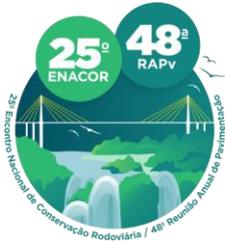


Figura 5. Representação do MR real e o MR calculado (AUTORES, 2023).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Para implementação do modelo em uma planilha de cálculos, foi disponibilizado o *QR Code* da figura 6, os pesos e biases obtidos durante a modelagem neural. Estes valores representam a força de conexão entre as ligações dos elementos da rede neural.



Figura 6. *QR Code* para acessar os pesos e biases do modelo neural calibrado.

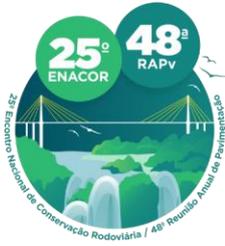
MeDiNa

Com o intuito de avaliar o desempenho do MR calculado em relação ao MR ensaiado nos subleitos, foram realizadas várias simulações utilizando o *software* MeDiNa, alterando a quantidade de camadas da estrutura e alternando o modelo constituinte do MR do subleito entre o resiliente linear e resiliente não linear, avaliando o ATR gerado pela tensão induzida pelo eixo padrão em vias de baixo volume, conforme relatado na metodologia. Na Tabela 3 são apresentados os ATRs totais dos pavimentos analisados e, especificamente, o comportamento da camada de subleito. Salienta-se que foi avaliado o afundamento de trilha de roda provenientes dos dimensionamentos utilizando o MR previsto e o MR real para duas e três camadas.

Tabela 3. Afundamentos de trilha de roda fornecidos pelo MeDiNa (AUTORES, 2023).

Modelo Constitutivo	Qtd. Camadas do pavimento	Subleito		Pavimento total	
		ATR MR Real (mm)	ATR - MR Calculado (mm)	ATR - MR Real (mm)	ATR - MR Calculado (mm)
Linear	3	2,63	2,64	4,8	4,9
Não-linear	3	2,50	2,44	4,7	4,6
Linear	2	2,86	2,86	4,0	3,9
Não-linear	2	2,79	2,75	3,8	3,8

De acordo com os dados obtidos na simulação do dimensionamento, percebeu-se que houve pequenas variações do ATR entre os modelos testados com máximas de 0,1mm de diferença comparando-se o módulo de resiliência real e o MR calculado dos subleitos, garantindo a confiabilidade da RNA e atendendo aos limites máximos de ATR para vias de sistema local que devem ser menores que 20 mm para toda a estrutura. Averigua-se que, na ausência da camada de sub-base, houve uma maior sobrecarga no subleito, como esperado. No entanto, este se manteve dentro da faixa especificada pelo MeDiNa, visto que apresentou valores de ATR menores que 5mm, conforme mostrado na tabela 3.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Na figura 7 são apresentados, graficamente, os dados referentes a Tabela 3, para fins comparativos entre os níveis de ATR em toda a espessura e no subleito, aplicando diferentes estruturas, variando-se o MR real e calculado, elástico linear ou não linear, e o número de camadas.

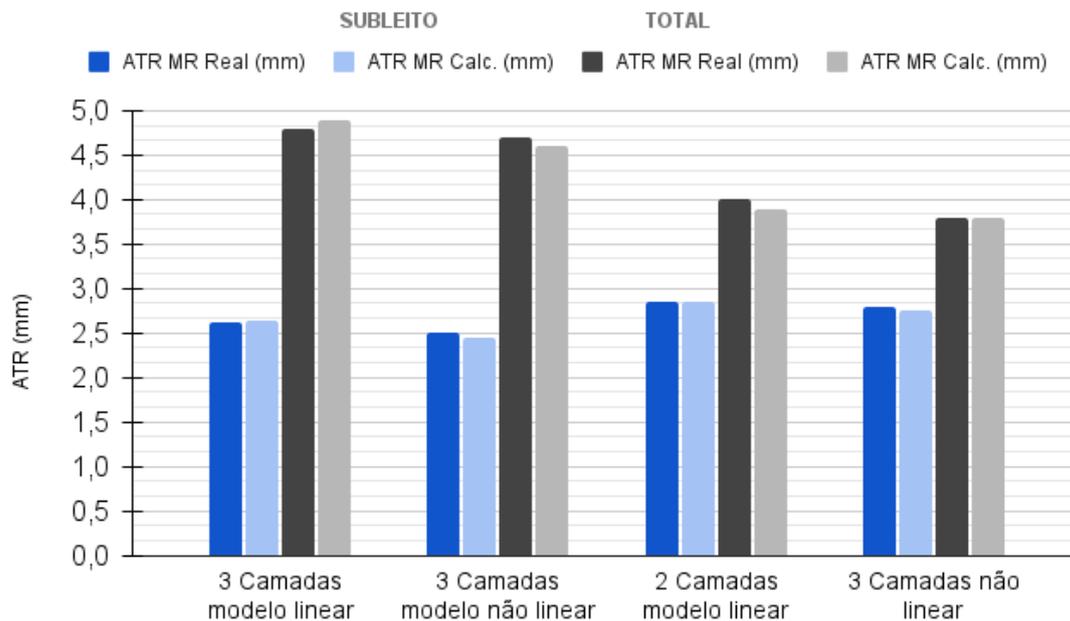


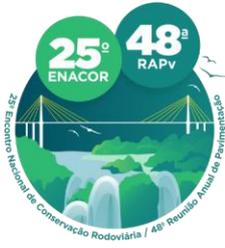
Figura 7. Gráfico comparativo do afundamento de trilhas de roda (AUTORES, 2023).

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um modelo de previsão do módulo de resiliência de solos cearense utilizando as propriedades físicas, umidade ótima de compactação, índice de plasticidade, os percentuais passantes nas peneiras granulométricas e as tensões desvio e confinante.

O modelo gerado forneceu os pesos sinápticos e os biases obtidos através de todas conexões existentes entre cada neurônio, o que permite a aplicação dos dados em planilhas de cálculo. Em consonância, a rede apresentou coeficientes de correlação em torno de 0,99 na fase de treinamento e 0,98 nas fases de validação e testes, indicando que se trata de um modelo de previsão eficiente. Além disso, foram realizadas simulações aplicando os valores do MR gerado pela rede neural e o MR real, utilizando o *software* MeDiNa, que realiza uma dimensionamento das camadas de pavimentos, avaliando o ATR provocado pela carga proveniente do tráfego de veículos.

Os resultados gerados pela simulação realizada no MeDiNa com o módulo de resiliência previsto pela RNA apresentaram valores de ATR em torno de 2,64mm para subleito e afundamento total de 4,9mm. Já as simulações realizadas por meio do MR real apresentaram valores de ATR de 2,63mm para subleito e afundamento total de 4,8mm, evidenciando uma variação de 0,01mm e 0,10mm quando comparados ao MR real. Portanto, o estudo se mostrou eficaz quanto ao modelo de previsão do módulo de resiliência, visto que o mesmo apresentou altos percentuais de confiabilidade e baixos valores de afundamento de trilha de roda. Portanto, o modelo proposto poderá ser utilizado para prever o módulo de resiliência nos casos em que não seja possível realizar os ensaios triaxiais de cargas repetidas ou para projetos de vias com baixo tráfego de veículos no estado do Ceará.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores agradecem ao CNPq, ao DNIT, à FUNCAP e ao Instituto Federal do Ceará (IFCE) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANUÁRIO CNT DO TRANSPORTE. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Rodoviario/1-3-1-2-/Condi%C3%A7%C3%A3o-das-rodovias---Pesquisa-CNT-de-Rodovias>>. Acesso em: 30 maio. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016) ABNT NBR 7180: SOLO – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2017) ABNT NBR 6459: SOLO – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2017) ABNT NBR 9895: SOLO – Índice de suporte Califórnia (ISC) – método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2018) ABNT NBR 7181: SOLO – Análise granulométrica. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020) ABNT NBR 7182: SOLO – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro/RJ.

BASTOS, Juceline Batista dos Santos. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará - UFC. Fortaleza, 2013.

BENEVIDES, Sérgio Armando de Sá. Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos: empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do estado do Ceará. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2010.

CEARÁ | Cidades e Estados | IBGE (2021). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce.html>>.

CHAVES, Franklin José. **Caracterização geotécnica de solos da formação barreiras da região metropolitana de fortaleza para aplicação em obras rodoviárias**. 2000. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 134/2018 - ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro.

FAROL DA ECONOMIA CEARENSE. Disponível em: <<https://www.ipece.ce.gov.br/farol-da-economia-cearense/>>. Acesso em: 30 maio. 2023.

FERREIRA, José Gustavo Hermida de Mello. Elaboração e análise da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2002.

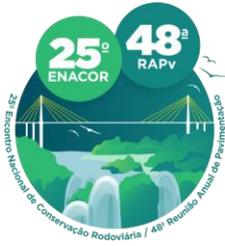
FLECK, Leandro *et al.* Redes neurais artificiais: Princípios básicos. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 1, n. 13, p. 47-57, 2016.

HAYKIN, Simon. **Redes neurais: princípios e prática**. Bookman Editora, 2001.

HECHT-NIELSEN, Robert. **Neurocomputing**. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.

LEHMERT, Mariele Barboza de Souza *et al.* **Análise comparativa de soluções entre os métodos brasileiros e o MEPDG para reabilitação de pavimentos flexíveis: estudo de caso**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2020.

LIU, Ying *et al.* Stress-path dependency of resilient behaviour of granular materials. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 15, n. 7, p. 614-622, 2014.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



MAIA, Camila Lima. **Análise comparativa de módulos de resiliência obtidos com o geogauge para o controle de qualidade de camadas granulares dos pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza, 2016.

MASCARENHAS, Ilania Maria Nascimento. **Caracterização geotécnica de solos na região metropolitana do Cariri/CE para uso em pavimentação.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará - UFC. Fortaleza, 2016.

MATLAB: The language of technical computing. Versão 8.5.0.197613. The MathWorks, Inc, 2012. Disponível em: <http://www.mathworks.com>.

RIBEIRO, Antonio Júnior Alves. **Um modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do Ceará para fins de pavimentação.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Ceará - UFC. Fortaleza, 2016.

RODRIGUES, Marcia Rodrigues de. **Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 1997.

SILVA, Antônio Néelson Rodrigues da *et al.* **SIG: uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes.** Ed. EdUFSCar, 2008.

SILVA, Carlos Augusto Uchôa da. **Um método para estimar observáveis GPS usando Redes Neurais Artificiais.** 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA JUNIOR, Joacy Demétrio de. **O Efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do Estado do Ceará.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará - UFC. Fortaleza, 2005.

VASCONCELOS, Sarah Denise. **Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará - UFC. Fortaleza, 2018.