

Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecanística-empírica de pavimentos

Consideration of the permanent deformation of soils that occurred in the northeast region in the mechanistic-empirical analysis of pavements

Wendel Silva Cabral¹, Suelly Helena de Araújo Barroso²,
Samuel de Almeida Torquato e Silva³

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Departamento de Engenharias, RN 233, km 01, Sítio Esperança II, Zona Rural, Campus Caraúbas. CEP: 59780-000, Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil.

² Universidade Federal do Ceará - UFC, Departamento de Engenharia de Transportes, Rua Armando Farias, Campus do Pici, Bloco 703. CEP: 60440-900, Fortaleza, Ceará, Brasil.

³ Universidade de Brasília - UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF, CEP 70910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

E-mail: wendel@det.ufc.br, suelly@det.ufc.br, samuel@det.ufc.br

RESUMO

Para estabelecer projetos mais eficientes e critérios construtivos adequados na área de pavimentação é indispensável o entendimento do desempenho dos materiais com relação aos métodos de dimensionamentos mecanístico-empírico. Este trabalho analisa as propriedades de Deformação Permanente (DP) e Módulo de Resiliência (MR) de solos utilizados em camadas de pavimentos para análises de diferentes tipos de dimensionamento, mecanístico-empírico e empírico de rodovias brasileiras. O método de ensaio para obtenção da DP foi o triaxial de carga repetidas de múltiplo estágios (RLT), com aplicação de 10.000 ciclos por estágio, e o dimensionamento mecanístico-empírico realizado pelo método MeDiNa, recém divulgado no Brasil, e pelo programa CAP 3D-D, que realiza análises numéricas de tensões e deslocamentos dos pavimentos propostos. Utilizou-se a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) para o desenvolvimento dos modelos de previsão de DP. Os resultados mostraram que tanto o método de ensaio, quanto as equações de predição tiveram desempenho satisfatório na obtenção do comportamento da DP. Já os dimensionamentos realizados através dos métodos utilizados resultaram em estruturas distintas. Conclui-se que o modelo e a técnica de obtenção utilizada, bem como a metodologia de ensaio possuem grande potencial para caracterizar e modelar a DP de materiais granulares e que o Brasil deve investir cada vez mais no uso de métodos mecanístico-empírico para análise de pavimentos.

Palavras-chave: Deformação permanente, pavimento, dimensionamento, ensaio triaxial, rede neural artificial.

ABSTRACT

In order to establish more efficient designs and adequate construction criteria in the paving area, it is essential to understand the performance of the materials in relation to the mechanistic-empirical dimensioning methods. This work analyzes the properties of Permanent Deformation (DP) and Resilience Module (MR) of soils used in pavement layers to evaluate different types of dimensioning, mechanistic-empirical and empirical of Brazilian highways. The test method for obtaining PD was the multi-stage repeated load triaxial (RLT), with the application of 10,000 cycles per stage, and the mechanistic-empirical dimensioning was performed using the MeDiNa method, recently disclosed in Brazil, and the CAP program 3D-D, which performs numerical analyzes of stresses and displacements of the proposed pavements. The technique used for the development of PD prediction models was Artificial Neural Networks (ANN). The results showed that both the test method and the prediction equations performed satisfactorily in obtaining the behavior of PD. The sizing per-

formed using the methods used resulted in different structures. It is concluded that the model and the technique of obtaining used, as well as the test methodology have great potential to characterize and model the PD of granular materials and that Brazil should invest more and more in the use of mechanistic-empirical methods for analysis of pavements.

Keywords: Permanent deformation, pavement, dimensioning, triaxial test, artificial neural network.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos é caracterizado pelo cálculo das espessuras das camadas que compõem sua estrutura, proporcionando suporte adequado as solicitações de carga. Tal procedimento baseia-se tanto em métodos empíricos tradicionais, quanto em técnicas mais complexas que envolvem análises mecânicas do comportamento da estrutura. A utilização de métodos empíricos e mecânicos-empíricos geram estruturas diferentes, as quais podem ou não resistir aos esforços solicitantes durante o período de projeto [1].

Na prática, no Brasil o pavimento ainda é dimensionado empiricamente [2] levando-se em consideração informações das camadas de solo obtidas por ensaios de aplicação de cargas estáticas, ou seja, baseadas nos dados de seu CBR (California Bearing Ratio). Porém, busca-se uma metodologia de dimensionamento que utilize os recursos disponíveis para desenvolver um modelo de pavimento que, por meio de simulações, apresente uma estrutura mais apropriada para as condições específicas, atendendo às necessidades locais. Segundo SANTOS *et al.* [3], essas novas necessidades constitui o princípio base da abordagem mecanístico-empírica, adotada atualmente por grande parcela dos órgãos rodoviários ao redor do mundo para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Um dos desafios nesse processo é o estudo da deformação. A deformação consiste em duas partes: deformação recuperável (resiliente) e a plástica (permanente). A Deformação Permanente (DP) é um dos fenômenos relevantes no estudo do comportamento estrutural do pavimento, cujo somatório acumulado nas camadas favorece significativamente o defeito de Afundamento de Trilha de Roda (ATR). De acordo com SA-LOUR *et al.* [4], o solo do subleito em estradas de baixo volume pode contribuir com mais de 40% do ATR total da superfície do pavimento.

A caracterização da DP geralmente é realizada através de estudos laboratoriais com testes triaxiais de carga repetida. Nesse teste de cargas cíclicas as amostras são submetidas às diversas pressões de confinamento e teor de umidade de modo a simular as condições que ocorrem no campo. Os dados dos testes são então utilizados para desenvolver e calibrar modelos constitutivos que podem estimar o comportamento da DP dos materiais [5].

Através de estudos bibliográficos verificou-se que há, claramente, uma dificuldade em modelar adequadamente a DP de materiais granulares, pois são apresentadas várias formulações matemáticas distintas que incluem um conjunto de variáveis, nem sempre as mesmas em cada caso. Diante disso, a introdução de técnicas que realizam análises de sensibilidade para estimar parâmetros, como as redes neurais artificiais (RNA), auxiliam no desenvolvimento de modelos de previsão mais racionais.

Basicamente RNA trata-se de técnicas de Inteligência Artificial (IA) que possuem a propriedade essencial de serem capazes de aprender uma função a partir de processos que simulam sistemas nervosos biológicos. Atualmente um dos principais usos são aplicações que trabalham com simulação de dados [6, 7] relatam que as principais vantagens das RNA são a capacidade de aproximar o comportamento de fenômenos físicos não lineares, não exigindo compreensão estatística profunda e tratamento estatístico complexo dos dados modelados, bem como a capacidade de aprender quaisquer variáveis de entrada/saída de forma contínua.

No Brasil um método de ensaio [8] recentemente publicado está sendo investigado em análises e avaliações mecânicas para projetos de pavimentos à luz de métodos mecanísticos-empíricos, a partir da aplicação de cargas cíclicas de amplitude constante em estágio único com ciclos longos (mínimo 150.000). Porém, nos últimos anos, vários estudos foram realizados para usar o teste de múltiplos estágios [9-11]. Nesses testes, a carga cíclica (10.000) de diferentes magnitudes é aplicada a uma única amostra.

Programas computacionais como o MeDiNa recém publicado pelo DNIT estão sendo utilizadas como ferramentas de dimensionamento de pavimentos. Segundo SANTOS *et al.* [12], esse método avalia a estrutura da via observando, dentre outros parâmetros, o comportamento da DP total do pavimento após submetido ao número de solicitações de carga do eixo padrão (N) e a vida útil de projeto. Outro programa o CAP 3D-D (Computational Analysis of Pavements – 3D Dimensioning), além de dimensionar estruturas de pavimento considerando mais facilmente a elasticidade não linear, também realiza análises numéricas baseado no MEF (Métodos dos Elementos Finitos) desenvolvido a partir de técnicas de Programação Orientada a Objetos (POO).

Tendo em vista as limitações das análises de pavimentos brasileiros na consideração das propriedades de DP e MR, este trabalho propõe gerar modelos de estimativas de DP e MR de solos regionais contribuindo para a concepção de projetos mais racionais de pavimentação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para este trabalho foram investigados materiais da microrregião de Mossoró, situado no estado do Rio Grande do Norte (RN), localizada no nordeste do Brasil (ver Figura 1). Para tanto, foram coletados dois solos (Mossoró-M1 e Areia Branca-AB) e uma brita que foi usada para compor uma mistura solo+brita. Os solos apresentam propriedades do tipo cambissolo háplico (M1) e latossolo amarelo distrófico (AB), sendo materiais de perfil geológico calcarenito e argilito/arenoso, respectivamente.

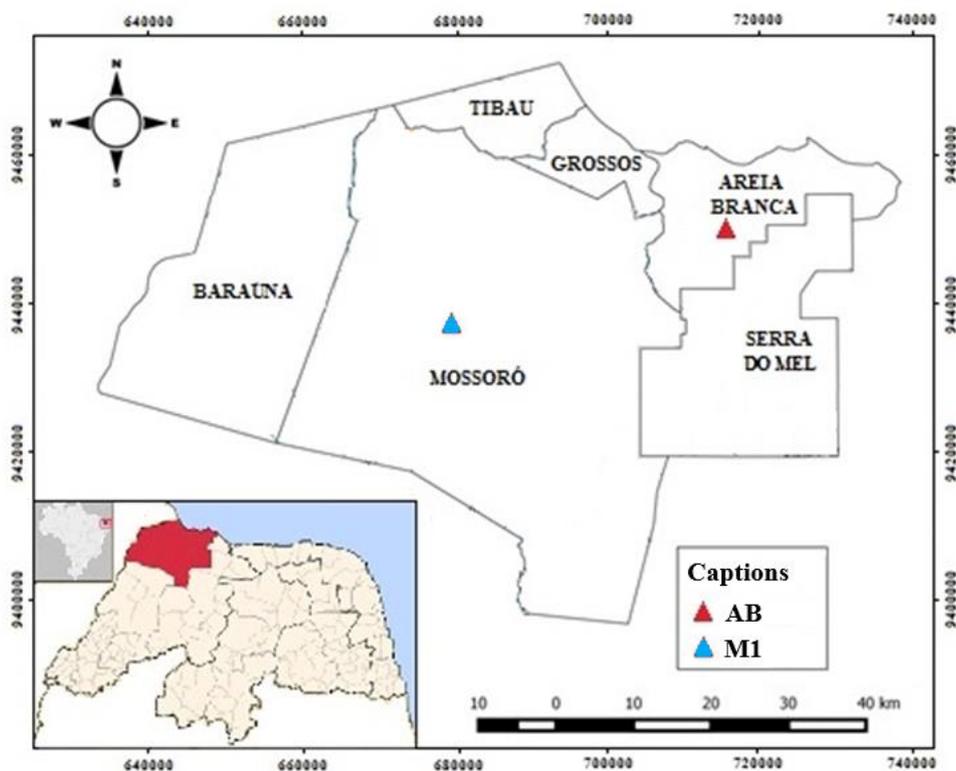


Figura 1: Localização das jazidas dos solos.

O cambissolo apresenta uma microestrutura composta por grânulos e blocos sub angulares (pedras na massa do solo) moderadamente desenvolvida. A acomodação é forte a parcialmente acomodados apresentando porosidade composta por fissuras não orientadas. O latossolo encontrado são solos coesos e duros quando secos, tornando-se friáveis quando úmidos, cor homogênea, com pouca diferenciação entre os horizontes ou camadas e uma textura média ou mais fina com presença significativa de argila.

Segundo levantamento em projetos rodoviários locais, o solo cambissolo M1 ocorre em cerca de 39% dos subleitos de rodovias estaduais e federais do estado do Rio Grande do Norte/Brasil e são classificados como A-2-6 na classificação de solos da AASTHO [13]. Já o latossolo AB, classificados como A-2-4 na classificação da AASTHO, está presente em aproximadamente 48% dos subleitos das rodovias que cruzam a área pesquisada.

Foi elaborada uma mistura em laboratório composta de 50% de uma Brita Graduada Simples (BGS) com 50% do solo identificado com AB para ser testada em uma camada de base. A BGS, de origem granítica, também é utilizada em diversos projetos rodoviários da região em estudo. Coletou-se esse material na pedreira Coelho de Brito Comercial no município de Caraúbas distante 75km de Mossoró.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação das amostras e ensaios mecânicos convencionais

Em laboratório, os solos foram submetidos aos procedimentos de preparo, conforme a norma do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem [14]. Na etapa seguinte, realizaram-se os ensaios de análise granulométrica pela norma brasileira [15], massa específica [16], limites de liquidez [17] e plasticidade [18], além dos ensaios mecânicos convencionais, tais como os ensaios de compactação [19], utilizando a energia intermediária, California Bearing Ratio (CBR) e expansão [20], na energia intermediária.

2.2.2 Ensaios com carregamento dinâmico

Os valores de MR foram obtidos por meio da realização do ensaio triaxial de carga repetida, conforme a norma do [21]. Os dados experimentais foram analisados através da técnica de regressão não linear.

O software usado para realização dos cálculos e determinação dos modelos não lineares foi o LAB Fit. Realizou-se a seleção do melhor modelo pela análise do maior coeficiente de correlação (R^2) dentre os modelos testados apresentados nas equações de [22-25].

Para análise da DP utilizou-se o método de ensaio triaxial de carga repetidas de múltiplo estágios (RLT) apresentado pela norma europeia [26]. Essa técnica pode ser utilizada para uma avaliação rápida da DP produzidos por carregamentos cíclicos de magnitudes variáveis, conduzidas em um único corpo de prova. Todo o procedimento de preparo da amostra de solo, bem como as técnicas de moldagem dos corpos de prova e preparo do equipamento de ensaio foram iguais ao método de ensaio do MR.

Após a compactação das amostras de solo no cilindro tripartido (dimensões de 10×20 cm), os corpos de prova foram colocados no equipamento triaxial e submetidos ao ensaio para determinação dos parâmetros de deformabilidade. Nos ensaios de RLT, as cargas cíclicas são aplicadas em amostras sob determinadas pressões de confinamento e teor de umidade na ótima.

Os valores das tensões confinantes, bem como das tensões desvios utilizados nos ensaios de DP são apresentados na Tabela 1. Utilizou-se uma frequência de carregamento de 1Hz (pulso de 0,1 segundo, sendo seguido de um tempo de repouso de 0,9 segundo ou 60 ciclos por minuto) submetido a um número de ciclo de carga (N) programado.

Tabela 1: Relação das tensões utilizadas para a realização dos ensaios de deformação permanente.

ENSAIO	TENSÃO (kPa)		N
	σ_d	σ_3	
1	40		
2	80		
3	120		
4	160		
5	80		
6	120		
7	240		
8	320		
9	120		
10	240		
11	360		
12	480		

No ensaio de DP foram adotadas relações σ_d/σ_3 de 1, 2, 3 e 4 totalizando 12 ensaios realizados. Esse procedimento teve o objetivo de abordar diferentes simulações de cargas nos materiais testados, de forma a avaliar o comportamento do solo e sua real capacidade estrutural. Assim a execução dos ensaios triaxiais foi realizada de modo sequenciado, sendo composto por quatro estágios de tensões no mesmo corpo de prova de cada amostra, através de combinações estabelecidas de tensões desvio (σ_d) diferentes e confinantes (σ_3) constantes, porém, mantendo-se as demais condições impostas inalteradas. Em cada estágio aplicou-se 10.000

ciclos, totalizando 40.000 carregamentos no experimento, buscando simular diferentes perfis de cargas (veículos) por meio do acréscimo da intensidade da energia vertical sob o revestimento.

Quando todos os processos operacionais foram concluídos, iniciaram-se o ensaio com os LVDT's (Transdutores de Deslocamentos Variáveis Lineares), automaticamente, registrando as leituras em um intervalo previamente fixado, caracterizando o acúmulo das deformações do corpo de prova ao longo do ensaio. A Figura 2 apresenta as principais etapas do ensaio de DP, mostrando a desmoldagem do corpo de prova, instalação dos LVDT's, o equipamento triaxial e o programa de controle dos ensaios.



Figura 2: Etapas do ensaio de deformação permanente.

Utilizou-se o modelo de [25] ($\epsilon_p^{esp} = K1 \times \sigma_3^{k2} \times \sigma_d^{k3} \times N^{k4}$) para obter os parâmetros de deformabilidade (K) preliminares para prever a DP total (δp) de cada material investigado nesta pesquisa, por meio da correlação entre as variáveis tensão confinante (σ_3), desvio (σ_d) e tráfego (N), através da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA). A ferramenta de linguagem de programação utilizada foi o MATLAB (*MATrix LABoratory*) em uma rede neural de múltiplas camadas e foram realizados testes em diferentes topologias na busca do maior nível de confiança possível, ou seja, um modelo com o menor erro. Para o treinamento, validação e teste do modelo, utilizou-se o NNTOOL (Neural Network Tool) que consiste em um módulo de ferramentas denominado Toolboxes.

Para calibrar os parâmetros dos modelos foram realizadas análises iterativas de otimização e sensibilidade. Durante cada iteração, comparou-se a DP acumulada calculada pelo modelo com um conjunto de parâmetros assumido, com a DP medida nos ensaios triaxiais. Determinou-se para cada conjunto de dados, o erro quadrado médio ou Mean of Squared Error (MSE) (a diferença entre a DP calculada e medida). A otimização dos parâmetros do modelo teve como objetivo minimizar a soma dos erros quadráticos (R^2) com a função solver no Microsoft Excel.

2.2.3 Dimensionamento das estruturas dos pavimentos propostos

Nesta etapa, realizou-se um dimensionamento empírico conforme [2], usando-se o critério CBR do subleito e o número N (tráfego), bem como dois outros projetos mecanístico-empírico utilizando-se os parâmetros de modelos de MR e DP obtidos, para fins de comparação das estruturas dos pavimentos propostos. O dimensionamento mecanístico-empírico, por meio da previsão de deformações e dos critérios de ruptura da estrutura, foram realizados com o auxílio dos programas computacionais MeDiNa e CAP 3D-D.

Além dos cálculos das espessuras das camadas, O CAP 3D-D também possibilitou a análise numérica no regime elástico-linear do comportamento da estrutura. O uso desse programa para cálculos de tensões, deformações e deslocamentos ocorridas nos pavimentos dimensionados gerou economia de tempo e mais versatilidade.

A estrutura dos pavimentos propostos, é composta de uma camada de base estabilizada granulometricamente (50% BGS + 50% AB), uma sub-base constituída de solo do tipo AB, além de um subleito com o solo M1. Adotou-se um revestimento em Tratamento Superficial Duplo (TSD) e dois em Concreto Asfáltico (CA), um com 5cm e outro com 7,5cm de espessura, bem como valores de níveis de solicitação “ N ” também diferentes, sendo 1×10^6 para estrutura com TSD, 5×10^6 com CA de 5cm e 1×10^7 para a estrutura com revestimento CA com 7,5cm de espessura, para todos os métodos analisados.

Considerou-se o tempo de projeto de 10 anos a uma taxa de 2% de crescimento do tráfego. Segundo projetos rodoviários consultados, o perfil das estruturas das vias da microrregião estudada apresenta tais características que serão usadas para uma análise mais real dos pavimentos locais.

Ressalta-se que as estruturas obtidas tanto pelo CAP 3D-D quanto pelo MeDiNa incluíram ainda o uso dos coeficientes de regressão dos modelos de deformação permanente e módulo de resiliência obtidos dos materiais estudados, coeficientes de Poisson (ν) extraídos de [27]. Já os dados de rigidez, parâmetros da curva de fadiga e deformação permanente da mistura asfáltica adotado nos programas, para uma análise viscoelástico linear, foram extraídos de [1].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Classificação, caracterização e ensaios mecânicos convencionais dos materiais

O resumo da composição granulométrica, dos resultados dos ensaios de caracterização e pavimentação, bem como a classificação AASTHO dos materiais investigados são apresentados na Tabela 2 e 3. A amostra M1, AB, além da mistura, apresentaram umidade ótima (Wot) de 12,5, 6,0 e 6,5%, respectivamente.

Tabela 2: Resumo da composição granulométrica (%) dos materiais em estudo.

SOLOS	ARGILA + SILTE	AREIA			PEDREGULHO
		FINO	MÉDIO	GROSSO	
M1	29	43	23	3	2
AB	19	33	27	10	11
Mistura	2,9	3,2	13,3	15,8	64,9

Tabela 3: Resultados dos ensaios de compactação, CBR, expansão e classificação da AASTHO.

MATERIAIS	CBR (%)	EXPANSÃO (%)	ME (g/cm ³)	Wot (%)	AASTHO
M1	11,3	0,070	1,89	12,5	A-2-6
AB	41,9	-	1,97	6,0	A-2-4
Mistura	66,3	-	2,122	6,5	-

Os solos M1 e AB, respectivamente, apresentaram: (i) limites de liquidez, todos abaixo do limite máximo de 25%, de 24,2% e 20,2%; (ii) limites de plasticidade de 15,61% e 12,31%, e (iii) índice de plasticidade de 8,55% e 7,85%. Embora o índice de plasticidade obtido seja maior que o limite admissível, os solos apresentaram comportamento satisfatório quando utilizados como materiais de construção de rodovias. A BGS utilizada na mistura ainda apresentou uma abrasão Los Angeles de 36,67%, índice de forma de 0,91, pelo método do paquímetro, além de uma adesividade (sem DOPE) satisfatória.

3.2 Ensaios com carregamento dinâmico

O comportamento resiliente do material mostrou uma variação significativa nos primeiros ciclos de aplicação de carga e uma acomodação nos ciclos finais. Esse desempenho reflete uma situação próxima à realidade quando as camadas do pavimento são submetidas à ação das cargas, mostrando que durante o uso a estrutura absorverá essas tensões até certo período, passando por uma estabilização resiliente até atingir uma rigidez ao longo do período de operação do pavimento.

Com a realização do ensaio do módulo de resiliência, os modelos de estimativa da variação MR foram gerados em função do estado de tensão (σ_d e σ_3). Foram testados os modelos: (i) composto ($MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3}$) proposto por [22]; (ii) [25] ($MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \times N^{k_4}$); (iii) combinado ($MR = [k_1 + k_2 \times (K_3 - \sigma_d^{k_2})] \times \sigma_3^{k_3}$) desenvolvido por [23]; (iv) [24] ($MR = k_1 \times \theta^{k_2} \times \tau_{oct}^{k_3}$) que inclui o primeiro invariante de tensão (θ) e a tensão octaédrica cisalhante (τ_{oct}).

Após simulações observou-se que o modelo composto apresentou melhor desempenho quanto ao comportamento resiliente do material, indicando os maiores coeficientes de correlação R^2 e possibilitando a obtenção do modelo MR mais representativo dos materiais. De acordo com as equações mostradas na Tabela 4, esses modelos permitem a análise do comportamento dos solos M1 e AB, além da mistura em estudo, no uso em camadas granulares de pavimento.

Tabela 4: Modelos avaliados de MR para os materiais ensaiados.

MATERIAIS	MODELO	EQUAÇÃO	R ²
M1	Composto	$MR = 141,79\sigma^3^{0,0197} \cdot \sigma d^{-0,5567}$	0,863
AB	Composto	$MR = 590,77\sigma^3^{0,2169} \cdot \sigma d^{0,1431}$	0,845
Mistura	Composto	$MR = 935,81\sigma^3^{0,3261} \cdot \sigma d^{-0,0168}$	0,887

Os resultados da DP para os solos M1, AB bem como para a mistura BGS + AB são mostrados, respectivamente, nas Figuras 3(a), 3(b) e 3(c). São três seqüências de tensões de cargas determinadas nos ensaios, desde o primeiro pulso de carga aplicada até a totalidade de 40.000 ciclos, representando a evolução do afundamento nas camadas granulares de um pavimento.

As Figuras 3(a), 3(b) e 3(c) permitem analisar a ocorrência, o desenvolvimento e as conseqüências em diferentes níveis de carregamento e, a partir disso, justificar o uso dos materiais em determinados tipos de estruturas rodoviárias. Com os valores das deformações apresentados observa-se que os materiais ensaiados tenderam a uma estabilização em todas as seqüências de carregamentos utilizadas antes do ciclo total concluído.

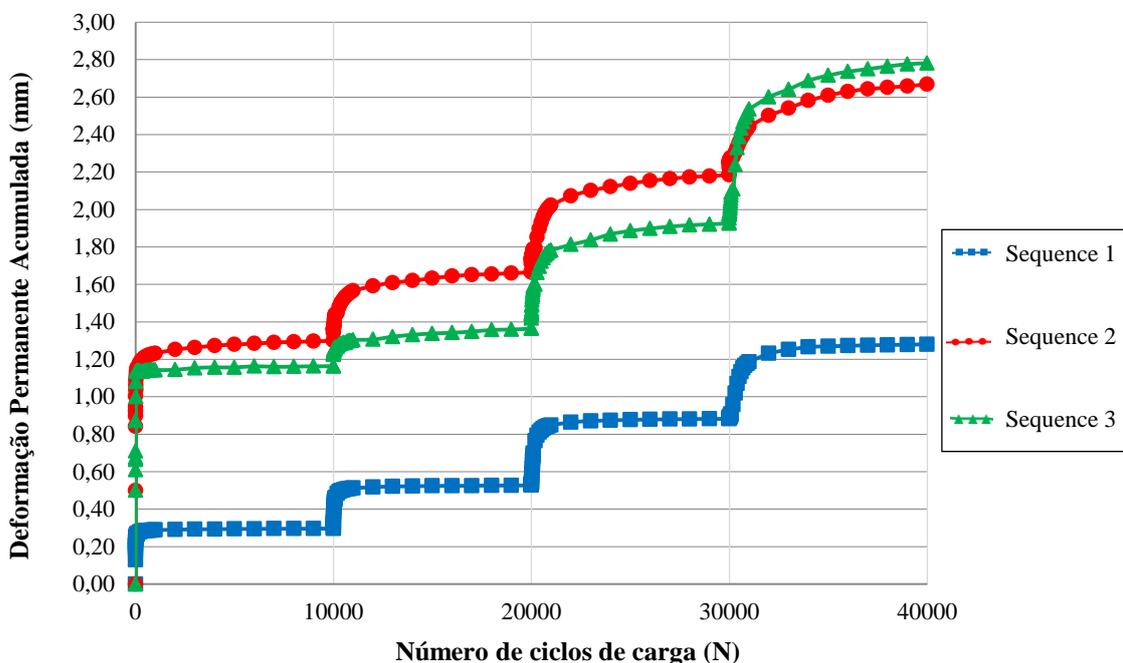

Figura 3(a): Deformação permanente acumulada medida para a amostra M1.

Figura 3(b): Deformação permanente acumulada medida para a amostra AB.

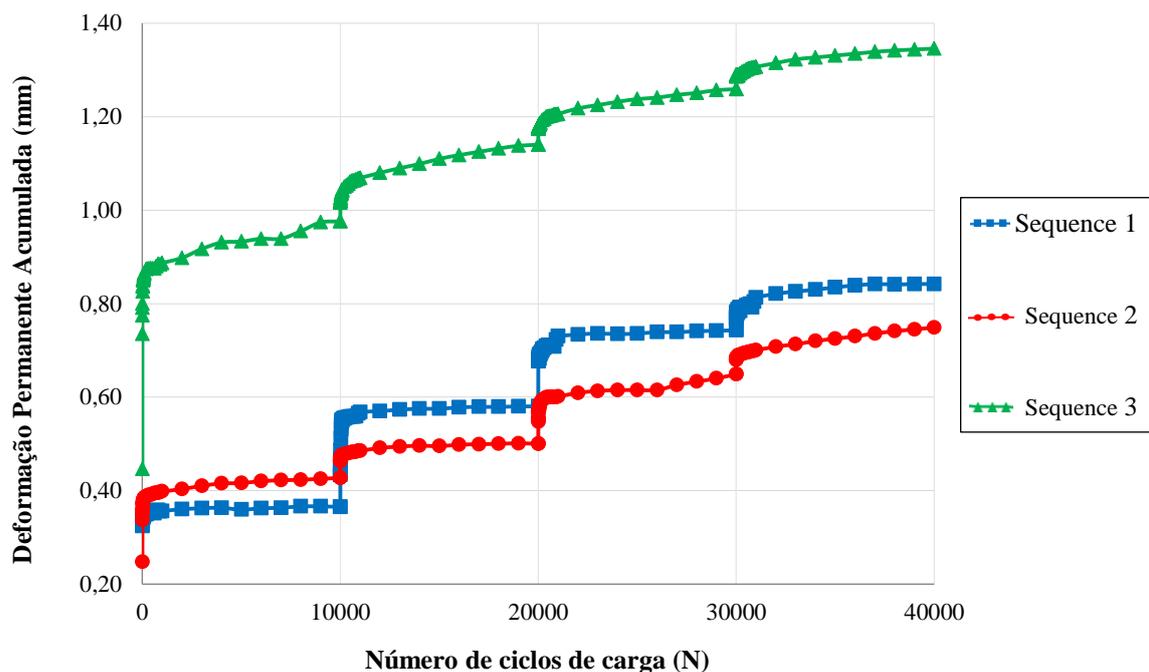


Figura 3(b): Deformação permanente acumulada medida para a amostra AB.

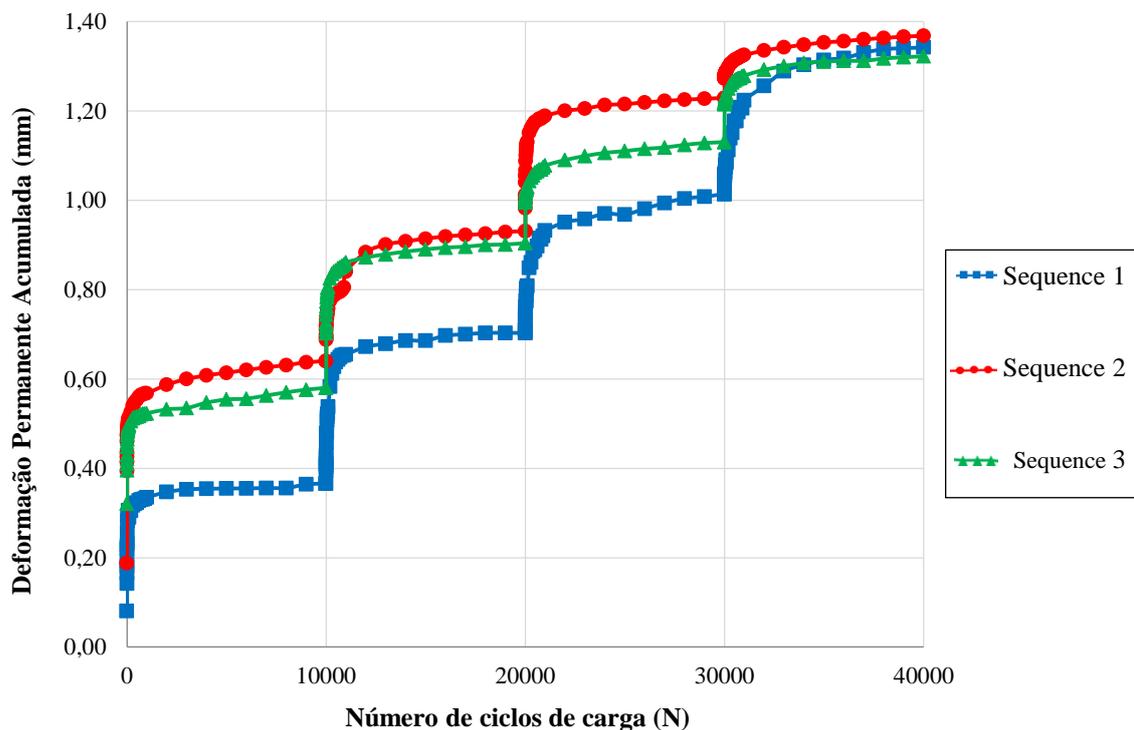


Figura 3(c): Deformação permanente acumulada medida para mistura (BGS + solo AB).

Os dados apresentados nas Figuras 3(a), 3(b) e 3(c) mostram uma boa resistência quanto à DP, haja vista que de acordo com FRANCO [28] e NORBACK [29], os valores admissíveis para DP em um pavimento são de 13,0mm e 12,5mm, respectivamente. Observa-se que os materiais estudados não atingiram esses limites de afundamentos.

Com o comportamento do afundamento apresentado nas amostras ensaiadas, observa-se que no cenário de maior carregamento aplicado (sequência 3) os solos M1, AB e da mistura (brita + solo AB) irão contribuir com 2,789, 1,346 e 1,322 mm para o ATR, ou seja, 22,3, 10,77 e 10,58%, respectivamente. Esses valores são considerados baixos quanto a DP, pra o limite de 12,5mm aceito em projetos rodoviários brasileiros e defendido por [25].

A Tabela 5 apresenta os parâmetros de deformabilidade (K) dos modelos para prever a DP dos materiais estudados e a qualidade de ajuste. No geral, foi observada uma boa qualidade de ajuste para os materiais testados. Percebe-se quais tensões (confinante ou desvio) apresentam mais influência na ocorrência da DP, de acordo com o sinal apresentado em seus respectivos parâmetros. Esse comportamento não homogêneo é explicado pela diversidade biofísica da microrregião, ou seja, diferenças pedológica, geológica, vegetação, morfológica e hidrológicos existentes na área em estudo.

Tabela 5: Parâmetros do modelo de DP dos materiais estudados.

$\varepsilon_p^{esp} = K1 \times \sigma^3 \times \sigma^2 \times N^k$	MATERIAIS		
	M1	AB	MISTURA
K1	0,3156	0,7227	1,1464
K2	0,5433	0,1770	0,2460
K3	-0,3740	-0,2117	-0,1518
K4	0,1970	0,0887	0,0191
R ²	0,72	0,82	0,76

Após executar todos os procedimentos para o desenvolvimento da modelagem neural, obteve-se algumas redes de estimativas de DP. Dentre as RNA geradas, a topologia que apresentou melhor desempenho teve o TRAINLM (*Levenberg-Marquardt*) como o algoritmo que produziu os resultados dos parâmetros de saída das redes para a estimativa da DP nos solos, mais satisfatórios.

A variável resposta da modelagem neural estimada nesta pesquisa foi a DP total ocorrida nos solos utilizados em pavimentos na microrregião mossoroense. As variáveis explicativas, cujo valores afetaram a resposta da rede (dado de saída), foram σ_3 , σ_d , N, MR, CBR, Wot, IP além da classificação AASTHO dos solos. A estrutura da rede apresentou uma camada intermediária com teste de variação de números de neurônios, resultando numa rede com 8 neurônios na camada de entrada, 31 neurônios na camada intermediária e 1 neurônio na camada de saída (8:31:1).

Optou-se por utilizar a ferramenta MSE (*Mean of Squared Error* ou Quadrado Médio dos Erros) para medir o desempenho da topologia testada, além do coeficiente de correlação (R^2), considerando os conjuntos de treinamento, validação e teste. Os resultados do desempenho da topologia do modelo neural desenvolvido, para esse conjunto de dados, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Desempenho da RNA gerada para o modelo de DP

MODELO	δp		
	Treinamento	Validade	Teste
R	0,89	0,85	0,85
MSE	0,04	0,05	0,04

3.3 Dimensionamento das estruturas dos pavimentos propostos

Seguindo o método tradicional empírico baseado no CBR, determinou-se a espessura das camadas obtendo-se as configurações dos pavimentos de acordo com [2]. Utilizando os mesmos dados do método anterior, também foram dimensionados pavimentos pelo método mecanístico-empírico através dos programas computacionais CAP 3D-D e MeDiNa. Esse método possibilitou análises mecânicas para o entendimento das tensões e deflexões ocorridas após a ação das cargas.

A Figura 4 apresenta as espessuras obtidas das estruturas dos três tipos de pavimentos adotados, para diferentes tráfegos e espessuras de revestimentos, através dos três métodos de dimensionamento utilizados. Em (a) é apresentado a estrutura determinada pelo método empírico do [2]. Em (b) as espessuras mínimas das camadas obtidas pelo programa MeDiNa e (c) as espessuras mínimas calculadas pelo CAP 3D-D. Os revestimentos adotados foi um TSD ($N = 1 \times 10^6$) e dois em CA, um com 5cm ($N = 5 \times 10^6$) e outro com 7,5cm de espessura ($N = 1 \times 10^7$).

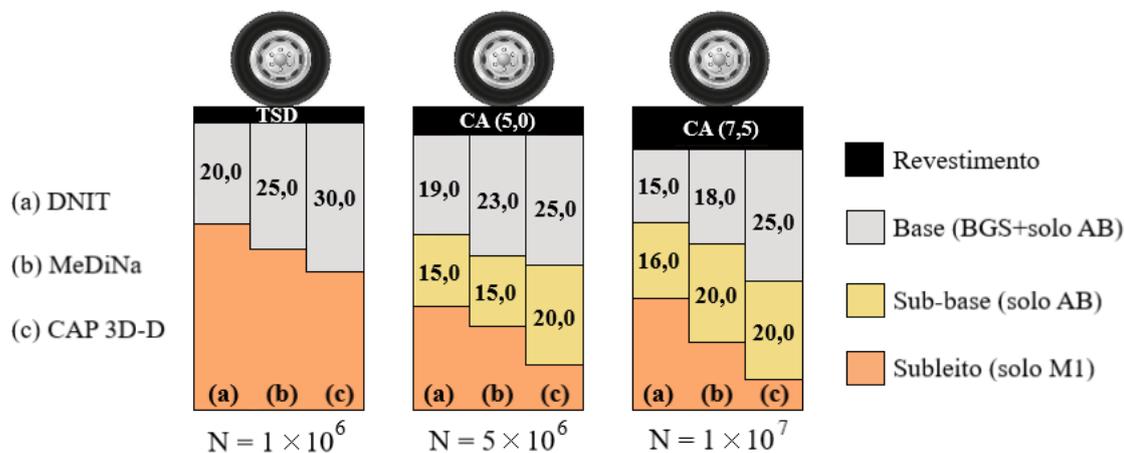


Figura 4: Espessuras das camadas (cm) dos pavimentos dimensionados por DNIR (2006), MeDiNa e CAP 3D-D.

Os dimensionamentos realizados, através dos métodos empírico e mecanístico-empírico, resultaram em estruturas distintas conforme verifica-se na Figura 4. No pavimento que representa uma estrutura de rodovia de baixo volume de tráfego, com N de 1×10^6 e revestimento de 2,5cm, a base obtida pelo método do DNIT apresentou espessura 20% e 33,3% menor que a calculada pelos programas MeDiNa e CAP 3D-D, respectivamente. Esse comportamento também foi constatado por [27], quando nos cálculos das estruturas de pavimentos utilizando os dois métodos, observou-se espessuras de base superiores quando dimensionados mecânica-empíricamente.

Ainda na Figura 4, observa-se espessuras totais dos pavimentos com tráfego (N) de 5×10^6 e 1×10^7 maiores utilizando os programas computacionais. O pavimento com revestimento em CA (5,0cm) o MeDiNa e CAP 3D-D dimensionaram estruturas com 43cm e 50cm, respectivamente, acréscimo de 10,3% e 28,2% superiores as medidas do pavimento DNIT. Quando o cálculo inclui um N com 1×10^7 e 7,5cm de revestimento, os programas determinaram um pavimento com 45,5cm no MeDiNa, 18,2% superior ao pavimento DNIT e 52,5cm no CAP 3D-D, medida 36,7% acima comparado a espessura total calculado com o método DNIT.

[27] apresentou valores semelhantes ao comparar estruturas calculadas com os mesmos dados de N e espessuras de revestimentos utilizando os métodos empírico e mecanístico-empírico. Em pavimento com revestimento de 5,0cm obteve-se a mesma espessura de sub-base, com valores superiores na camada de base. Quando os cálculos foram realizados com 7,5cm de revestimento, as medidas obtidas pelos programas foram superiores.

As camadas granulares das estruturas propostas exigiram espessuras superiores, nos métodos mecanístico-empíricos, para apresentar desempenho adequado durante todo o período de vida de projeto. Há previsão de que os pavimentos dimensionados tradicionalmente (a) não apresentará comportamento satisfatório durante o tempo projetado (10 anos), haja vista que as camadas calculadas apresentaram espessuras significativamente reduzidas em comparação as estruturas (b) e (c).

Por se tratar de um método com análises de parâmetros obtidos por ensaios simples, entende-se que ocorra um subdimensionamento de pavimentos quando utilizado o método empírico ainda em uso no Brasil. A Figura 5 apresenta a redução de vida útil dos pavimentos caso a estrutura do DNIT fosse mantida.

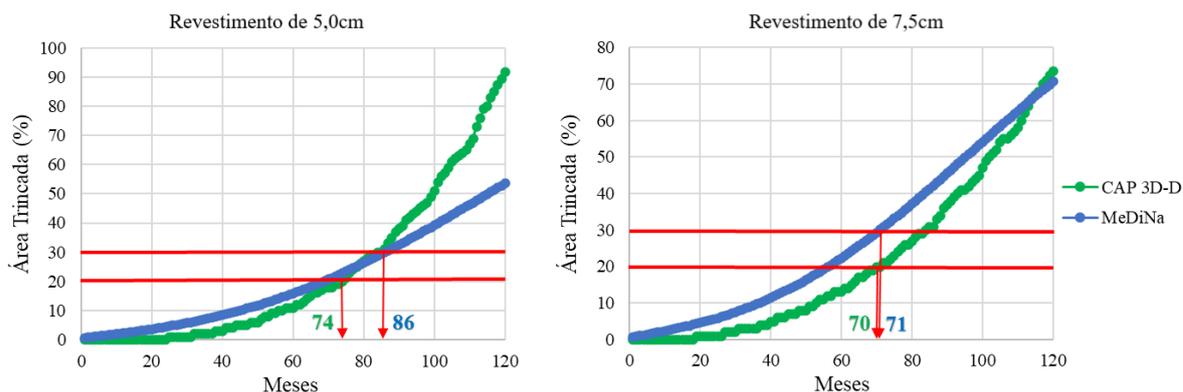


Figura 5: Vida útil dos pavimentos com estrutura calculada pelo método [2].

Utilizando os programas MeDiNa e CAP 3D-D para a análise do tempo de vida útil para às estruturas (b) e (c) da Figura 4, observa-se que a duração das condições adequadas de uma rodovia seria diminuída, haja vista que a AT (%) limite seria atingida antes do tempo de projeto adotado. Segundo SANTIAGO [1], o valor típico para análise de AT para fins de projeto no Brasil é de 20%. FRANCO [28] determina que no uso do MeDiNa, a AT admissível utilizado é de 30%.

Diante disso, caso a estrutura do DNIT fosse mantida, as estruturas com revestimento de 5,0cm a AT limite seria atingida com 74 meses quando considerada a análise com o CAP 3D-D e 86 meses no MeDiNa, ou seja, redução de 38% e 28% do tempo de vida útil de projeto, respectivamente. No pavimento com revestimento de 7,5cm, de 120 meses de período adotado, ocorreria uma diminuição para 70 e 71 meses quando determinados pelo CAP 3D-D e MeDiNa, respectivamente. Segundo o gráfico da Figura 5, o tempo com desempenho adequado da rodovia (b) seria reduzido em 42% quando analisado pelo CAP 3D-D e 41% pelo MeDiNa.

A Tabela 7 apresenta os valores totais obtidos, para os pavimentos dimensionados com os diferentes pavimentos, da ocorrência de deformação permanente, fenômeno causador do afundamento de trilha de roda, além da fadiga na superfície do revestimento na forma de Área Trincada (AT). Observa-se que esses parâmetros não comprometerá o desempenho dos pavimentos devido aos limites admissíveis não atingidos.

Tabela 7: Valores totais de DP e AT obtidos nos pavimentos com diferentes revestimentos.

OCORRÊNCIA	TEMPO DE PROJETO (ANOS)	PAVIMENTOS DIMENSIONADOS (TIPOS DE REVESTIMENTOS)					
		TSD		CA (5,0cm)		CA (7,5cm)	
		CAP 3D-D	MeDiNa	CAP 3D-D	MeDiNa	CAP 3D-D	MeDiNa
DP (mm)	10	8,9	9,4	10,9	11,9	11,1	11,1
AT (%)		-	-	1,0	21,5	13,0	23,0

As tensões verticais de compressão atuantes no topo do subleito serviram para a análise da DP ocorridas no eixo vertical central do carregamento, onde os valores máximos admitidos foram obtidos pelo método citado por [30] e utilizada por [31]. Além disso, também foi verificado a fadiga das estruturas através da deflexão (deslocamento) na superfície do pavimento. As deflexões máximas totais admitidas (D) na superfície da estrutura do pavimento ocasionada por um carregamento conhecido (N) foram calculadas pela equação $\log(D) = 3,148 - 0,188 \times \log(N)$, recomendada por [32].

A visualização da propagação das tensões verticais (compressão) e da deflexão no topo do pavimento (deslocamento vertical) ocorridas nas estruturas dimensionadas após carregamento, são observadas nas imagens processadas pelo NIPos do CAP 3D-D. As Figuras 6 e 7 apresentam essas ocorrências no pavimento com revestimentos CA ($N = 1 \times 10^7$). Verifica-se que, diante das tensões verticais e da deflexão (deslocamento vertical) surgidas com o carregamento, o pavimento não apresentará comprometimento, haja vista que não atingiram níveis de afundamentos que cause desconforto e insegurança ao condutor.

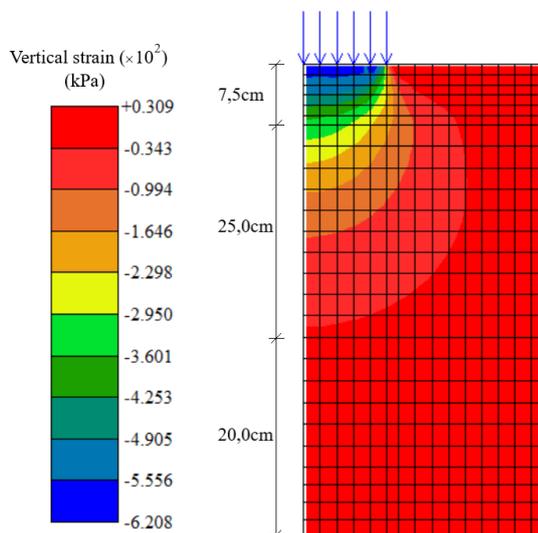


Figura 6: Distribuição das tensões verticais no pavimento.

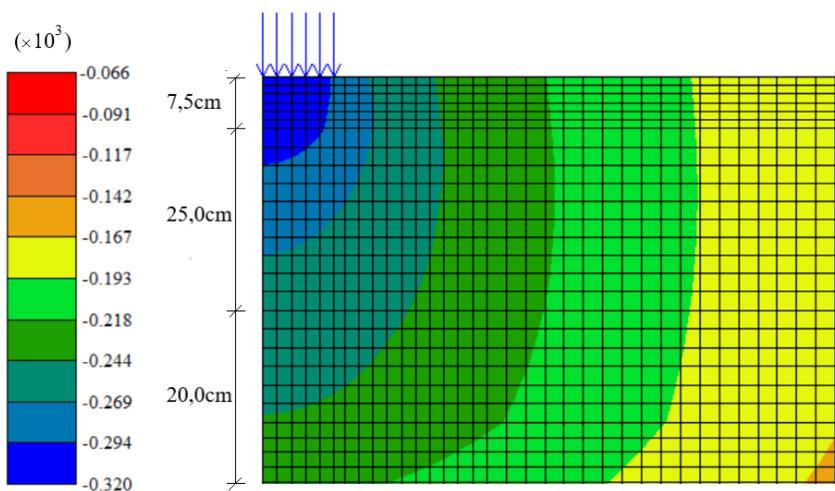


Figura 7: Deflexão no topo do pavimento.

4. CONCLUSÕES

Uma série de ensaios RLT de múltiplos estágios foram realizadas em dois solos e uma mistura, observando-se que o modelo proposto por [25] demonstrou um bom desempenho ao prever a relação entre o número total de aplicações de carga, nível de tensão e resposta a ocorrência de DP. Portanto, conclui-se que essa equação apresenta uma previsão satisfatória do comportamento dos materiais aqui pesquisados.

A metodologia de ensaios triaxiais de cargas repetidas de múltiplo estágios (aplicações de 10.000 ciclos por estágio) apresentou comportamento satisfatório na obtenção dos valores da DP dos materiais aqui pesquisados. Os valores de DP obtidos são admissíveis, ou seja, os materiais ensaiados são aptos ao uso em obras de pavimentação, pois o uso nas camadas granulares não atingiram valores limites aceitáveis (12,5mm). Além disso, com a obtenção dos modelos de previsão dos materiais aqui estudados utilizou-se os parâmetros (K) em programas de dimensionamentos mecanístico-empíricos de pavimentos rodoviários.

Após diversas tentativas e análises para a obtenção da melhor topologia explicativa do modelo neural, e ciente de que outras possíveis combinações para alcançar a rede mais satisfatória não foi possível realizá-los, o desenvolvimento de RNA disponibilizado mostrou-se capaz de gerar parâmetros de modelos de previsão de DP para os solos estudados.

Comparando os métodos utilizados, os programas mecanísticos-empírico, e em especial o CAP 3D-D, previram o desempenho da estrutura do pavimento ao longo de sua vida útil considerando ocorrência e influências de tensões no aparecimento de rupturas por deformação permanente e área trincada. Vale salientar que tomando-se esses aspectos nas análises de desempenho estrutural percebe-se o subdimensionamento de pavimentos pelo método DNIT, comprovado na deterioração precoce observado nas rodovias projetadas pelo método.

Foi possível visualizar a ocorrência das tensões e deflexões na estrutura, o entendimento de seus efeitos, bem como o provável comportamento do solo após a aplicação do carregamento. Observa-se que tanto os valores das tensões verticais de compressão atuantes no topo do subleito, quanto a deflexão no topo do pavimento (deslocamento vertical) são inferiores às máximas admitidas, revelando que os números de repetições adotados não causarão a ruptura por deformação permanente na estrutura, ou seja, o pavimento terá desempenho satisfatório durante todo o período do projeto.

5. AGRADECIMENTOS

À FUNCAP pela bolsa concedida, à Petrobras pelo apoio financeiro através da Rede Tecnológica de Asfaltos, bem como as Universidades Federais do Ceará (UFC), através do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] SANTIAGO, L.S., *Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2017.
- [2] DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – IPR 719. *Manual de Pavimentação*, 3 ed, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- [3] SANTOS, T.A., PINHEIRO, R.J.B., SPECHT, L.P., *et al.*, “Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da Mecânica dos Pavimentos”, *Revista Matéria*, v.25, n.3, 2020.
- [4] SALOUR, F., RAHMAN, M.S., ERLINGSSON, S., “Transportation Research Record”: *Journal of the Transportation Research Board*, DOI: 10.3141/2578-06. No. 2578, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 47–57, 2016.
- [5] SALOUR, F., ERLINGSSON, S., “Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests”, DOI: 10.1080/10298436.2015.1065991. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 18, pp. 236-246, 2017.
- [6] RIBEIRO, A.J.A., *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, Fortaleza, CE, Brasil, 2016.
- [7] MONTEIRO, L.V., SANTANNA, A.M.O. “Forecast model for dephosphorization process of ferromanganese steels using artificial neural networks”, *Revista Matéria*, v. 25, n. 2, 2020.
- [8] DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - 179 IE. *Pavimentação: Solos: Determinação da deformação permanente*, Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- [9] ERLINGSSON, S., RAHMAN, M.S., “Evaluation of permanent deformation characteristics of unbound granular materials by means of multistage repeated-load triaxial tests”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2369, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 11-19, 2013.
- [10] NGUYEN, B., MOHAJERANI, A., “Possible simplified method for the determination of the resilient modulus of unbound granular materials”, DOI: 10.1080/14680629.2015.1130162. *Road Materials and Pavement Design* 17(4): pp. 841-858, 2016.
- [11] ARULRAJAH, A., MAGHOOL, F., MOHAMMADINIA, A., *et al.* “Wheel tracker testing of recycled concrete and tyre aggregates in Australia”, DOI: 10.1680/jgere.19.00038. *Geotechnical Research*, v. 7, pp. 49–57, 2020.

- [12] SANTOS, R.L.A., CAMARGO, V.A.F., RODRIGUES, C.S., *et al.*, “Avaliação do efeito da adição de resíduo de ardósia no módulo de resiliência de misturas com solo argiloso”, DOI:10.14295/transportes.v27i4.1824. *Revista Transportes*, v. 27, pp.145-158, 2019.
- [13] AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials – M 145. *Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes*, United States of America, 1973.
- [14] DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - ME 041, *Solos – Preparação de Amostras de Solos para Ensaio de Caracterização*, Rio de Janeiro, RJ, 1994.
- [15] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7181. *Solo - Análise granulométrica*, Rio de Janeiro, RJ, 1984d.
- [16] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6508. *Grãos de solo passando na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica*, Rio de Janeiro, RJ, 1984^a.
- [17] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez*, Rio de Janeiro, RJ, 1984b.
- [18] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7180. *Solo - Determinação do limite de plasticidade*, Rio de Janeiro, RJ, 1984.
- [19] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7182. *Solo - Teste de compactação. Análise de parâmetros que afetam a deformação permanente no pavimento rodoviário*, Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- [20] DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - ME 172. *Pavimentação: Solos: Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*, Rio de Janeiro, RJ, 2016
- [21] DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - ME 134. *Pavimentação: Solos: Determinação do módulo de resiliência*, Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- [22] PEZO, R.F. “A General Method of Reporting Resilient Modulus Tests of Soils: A Pavement Engineer’s Point of View”, In: *72nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 1993.
- [23] ARANOVICH, L.A.S., *Desempenho de Pavimentos de Baixo Custo no Estado do Paraná*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1985.
- [24] AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: Of New and Rehabilitated Pavement Structures – Final Report*. NCHRP. United States of America, 2004.
- [25] GUIMARÃES, A.C.R., *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [26] CEN - European Committee for Standardization – EN. 13286–13287. *Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures*, European Standard, Brussels, 2004.
- [27] BASTOS, J.B.S., *Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2013.
- [28] FRANCO, F.A.C.P., *MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual de Utilização*. Versão 1.0.0. Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- [29] NORBACK, C., *Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de duas misturas solo-brita*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [30] MOTTA, L.M.G., *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critérios de confiabilidade e ensaios de carga repetidas*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.
- [31] BENEVIDES, S.A.S., MOTTA, L.M.G., SOARES, J.B., “Dimensionamento de pavimentos asfálticos pelos métodos empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do Ceará”, In: *XIV ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Gramado. v.1. pp. 591-602, 2000.
- [32] PREUSSLER, E.S., *Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1983.



ORCID

Wendel Silva Cabral

<https://orcid.org/0000-0003-3161-1587>

Suelyly Helena de Araújo Barroso

<https://orcid.org/0000-0003-0580-8706>

Samuel de Almeida Torquato e Silva

<https://orcid.org/0000-0002-4903-2391>