

Análise de solos tropicais para pavimentação da rodovia BR-163/PA**Analysis of tropical soils for paving the road BR-163/PA**

DOI:10.34117/bjdv6n7-841

Recebimento dos originais: 30/06/2020

Aceitação para publicação: 31/07/2020

Jean França Veloso

Mestre em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia
Instituição: Instituto Federal, de Educação Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém
Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155 – Marco, Belém – PA, Brasil
e-mail: jean.veloso@ifpa.edu.br

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituição: Instituto Militar de Engenharia
Endereço: Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
e-mail: guimaraes@ime.eb.br

Maria Esther Soares Marques

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituição: Instituto Militar de Engenharia
Endereço: Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
e-mail: esther@ime.edu.br

Thiago Delgado de Souza

Mestre em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia
Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro
Endereço: Rua Moniz Aragão Nº 360, Bloco 1 – Ilha do Fundão – Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
e-mail: engthiagodelgado@gmail.com

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do comportamento físico e mecânico de dois tipos de solos da região do município de Itaituba no Estado do Pará/Brasil, a serem empregados nos serviços de pavimentação da rodovia BR-163/PA. O estudo baseia-se na caracterização física e mineralógica, na classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) desses solos, bem como nos resultados dos ensaios mecânicos em compactador triaxial de carga repetida. É conhecido o emprego de solos in natura em camadas de pavimentação rodoviária na região amazônica. Esse fato é motivado basicamente pelas grandes distâncias de transportes de materiais pétreos e pelo desempenho em potencial que esses solos podem apresentar aos pavimentos. Entretanto, determinados solos podem não ser recomendados à pavimentação, em virtude de não atenderem aos parâmetros das metodologias clássicas. Dessa forma, para indicar o uso dos solos em pavimentação, buscou-se analisar suas características mineralógicas, granulométricas e de plasticidade; o seu comportamento resiliente e a evolução das deformações permanentes quando submetidos a cargas repetidas. Os resultados mostraram que os solos de comportamento laterítico apresentam certa estabilidade e acomodamento das deformações para maiores ciclos de carga; em contrapartida, os solos de comportamento não laterítico, tiveram magnitude de deformação permanente maior, não alcançando

um nítido acomodamento como nos primeiros solos. Assim, considerando os resultados, pode-se sugerir que os solos estudados são recomendados para compor determinadas camadas do pavimento, ao se empregar técnicas adequadas para o aproveitamento do seu potencial de uso.

Palavras-chave: Solos tropicais, Módulo resiliente, Deformação permanente.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the physical and mechanical behavior of two types of soils in the region of Itaituba in the State of Pará/Brazil, to be used in paving services on the BR-163/PA highway. The study is based on the physical and mineralogical characterization, on the MCT (Miniature, Compacted, Tropical) classification of these soils, as well as on the results of the mechanical tests in a repeated load triaxial compactor. The use of fresh soil in road pavement layers in the Amazon region is known. This fact is motivated basically by the great distances of transport of stone materials and by the potential performance that these soils can present to the pavements. However, certain soils may not be recommended for paving, as they do not meet the parameters of classical methodologies. Thus, to indicate the use of paving soils, we sought to analyze its mineralogical, granulometric and plastic characteristics; its resilient behavior and the evolution of permanent deformations when subjected to repeated loads. The results showed that the soils with lateritic behavior present some stability and accommodation of the deformations for greater load cycles; on the other hand, the soils with a non-lateritic behavior had greater magnitude of permanent deformation, not achieving a clear accommodation as in the first soils. Thus, considering the results, it can be suggested that the studied soils are recommended to compose certain layers of the pavement, by employing appropriate techniques to take advantage of their potential for use.

Keywords: Tropical soils, Resilient module, permanent deformation.

1 INTRODUÇÃO

O uso de solos tropicais em pavimentação rodoviária, atualmente no Brasil, é restrito a materiais que possuem características baseadas em análises de parâmetros empíricos como: os limites de consistência, o Índice de Suporte Califórnia e a granulometria. Dessa forma, alguns solos lateríticos que possuem comportamento mecânico satisfatório quanto a sua resposta resiliente e a sua capacidade de resistir às deformações permanentes com o tempo, em muitos casos são rejeitados nos projetos de pavimentação em virtude de não atenderem àqueles parâmetros empíricos.

Com intuito de projetar os pavimentos com utilização de solos tropicais, foi desenvolvido no Brasil um novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis baseados nos estudos de Franco (2007). A partir da referida metodologia é possível projetar o pavimento para resistir ao tráfego que tende aumentar a cada ano, prever sua vida útil e empregar materiais com respostas mecânicas satisfatórias e não apenas baseadas no empirismo.

Por outro lado, a metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical) desenvolvida a partir dos estudos de Nogami e Villibor (1981), pode indicar materiais finos para emprego em pavimentação de baixo custo, ou seja, quando o volume de tráfego é considerado baixo. O uso dessa metodologia

proporciona economia nos pavimentos devido a menores distâncias de transportes na movimentação de massas e menor degradação ambiental, em virtude da não exploração de jazidas pedregulhosas.

O desenvolvimento dessa sistemática de classificação de solos tropicais para fins de aplicação em camadas do pavimento rodoviário surgiu da necessidade de uma metodologia que melhor representasse o comportamento desses solos, quando empregados em pavimentação. A proposta da classificação de solos tropicais baseou-se nas propriedades mecânicas e hidráulicas da sua fração fina, em que as propriedades índices utilizadas nas sistemáticas de classificação tradicionais não eram suficientes para indicar o real potencial de aplicação rodoviária de um solo laterítico.

A formação geológica dos solos da região Norte do Brasil, basicamente se desenvolveu a partir de grandes depósitos sedimentares e de processos de intemperismo das rochas sedimentares, gerando a formação de espessos depósitos lateríticos maduros e não maduros como descrito por Costa (1991). Assim, a disponibilidade de materiais finos ou com concreções lateríticas é considerada vasta na região. Entretanto, dados geológicos e geotécnicos quanto ao desempenho mecânico desses materiais são escassos na literatura.

Segundo Medina e Motta (2015), o entendimento de resiliência refere-se à energia armazenada por um corpo que sofreu deformação elástica, mas que foi devolvida em forma de deformação recuperável, quando se cessaram as tensões que causaram a deformação, ou seja, os autores a chamam de energia potencial de deformação. Desde os primeiros estudos sistemáticos de deformabilidade de pavimentos de Haveem (1955) citados por Medina e Motta (2015) muito se pesquisou sobre os materiais até que em 1977 a COPPE/UFRJ desenvolveu no Brasil os ensaios tecnológicos para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais de pavimentação. Especial atenção deve-se ao ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas, que procura reproduzir as condições de campo, quando são empregadas tensões de compressão e confinantes controláveis que representam o volume e tipo de tráfego e as frequências em que esses carregamentos se repetem, com a finalidade de indicar a recorrência das cargas dos veículos.

O valor do módulo resiliente pode variar conforme a umidade, energia e método de compactação e mesmo depois de compactado, as condições climáticas e hidrológicas podem contribuir para essa variação (Bernucci et al., 2010). Bernucci (1995) encontrou valores na ordem de 100 a 500 Mpa para solos finos lateríticos utilizados em vias de baixo volume de tráfego.

As camadas do pavimento ao serem submetidas a ciclos de níveis de tensões, sofrem deformações resilientes (reversíveis) em virtude do solo possuir elasticidade. Porém, como o ele não é um material puramente elástico, também há ocorrência de deformações permanentes (irreversíveis). Dessa forma, diz-se que o solo, ao ser submetido a cargas cíclicas, como ocorre na passagem dos

veículos, produzirá uma deformação elástica, que se recompõem, e outra parcela de deformação plástica ou residual.

Assim, os trabalhos de Vertamatti (1988), Castro (2002), Chagas (2004) Dias (2007), Medrado (2009), Delgado (2012), Der Osten (2012) e Barbosa (2017) buscaram analisar o comportamento mecânico de solos ora rejeitados pela metodologia clássica, mas que apresentaram comportamento satisfatório para o emprego em pavimentação, com base na avaliação dos resultados de deformabilidade. Os estudos demonstraram a possibilidade de se utilizar um método brasileiro mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, desenvolvido através de convênio entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e a COPPE/UFRJ.

Nesse sentido, esta pesquisa apresenta os resultados da caracterização física e mineralógica dos materiais, da classificação MCT, e do comportamento resiliente e deformável dos solos para subsidiar a indicação de solos *in natura* em serviços de pavimentação rodoviária no estado do Pará, em uma via de grande importância econômica do Brasil como a BR-163/PA. As análises foram realizadas de amostras de jazidas das obras de pavimentação da rodovia, entre os municípios de Trairão e Novo Progresso no estado do Pará.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para subsidiar a análise do comportamento dos materiais, foram realizados ensaios físicos e mecânicos nos laboratórios do Instituto Militar de Engenharia - IME, Instituto Federal do Pará-IFPA, na COPPE/UFRJ e na Concessionária da Rodovia 040 - VIA 040. As amostras de solo foram caracterizadas fisicamente a partir dos ensaios normatizados da metodologia clássica e classificados pela metodologia MCT. A verificação de suas constituições mineralógicas e de estrutura microscópica foi possível a partir de ensaios microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de raios X por dispersão em energia (EDS). Os ensaios de difração de raios-x foram cedidos pelo 8º Batalhão de Engenharia e Construção do Exército. A base metodológica do trabalho ampara-se na análise dos resultados de caracterização, classificação e estrutura microscópica em conjunto com a interpretação dos ensaios de módulo resiliente de solos, conforme prescreve a norma DNIT –ME 134/2017, ensaios de deformação permanente segundo a DNIT – IN 179/2018.

2.1 MATERIAIS

Os solos utilizados no trabalho foram fornecidos e coletados em conjunto com o 8º Batalhão de Engenharia e Construção do Exército – 8º BEC, sendo coletados em duas jazidas próximas ao distrito de Moraes Almeida, município de Itaituba, no oeste do estado do Pará, dentre as disponíveis para os serviços de pavimentação da BR-163/PA. Foram coletadas oito amostras de um solo fino

proveniente da jazida Bira I, considerado uma alternativa para ampliação de jazidas para o trecho a ser executado; e oito amostras de um solo do tipo laterita pedregulhosa da jazida denominada Bira II, material este previsto no referido projeto de construção daquela via.

O procedimento de coleta das amostras deformadas seguiu o preconizado na norma DNER-PRO 003/94, e consistiu na setorização das jazidas em formato de malha retangular para locação dos oito pontos de coleta afastados de uma distância de 20 m, por ser a dimensão padrão de uma estaca rodoviária, com o propósito de buscar uma melhor representatividade na coleta das amostras. Assim, para cada solo foram realizadas retiradas em oito pontos de coleta e transportadas, via rodo fluvial, ao laboratório de solos do IFPA em Belém/PA; onde se procedeu a caracterização completa clássica dos materiais através de ensaios de granulometria com sedimentação (DNER-ME 051/94), densidade real (DNER-ME 093/94), limite de liquidez (DNER-ME 122/94), limite de plasticidade (DNER-ME 082/94), compactação utilizando amostras não trabalhadas (DNIT-ME 164/2013) e índice suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas (DNIT-ME 172/2016). Esse procedimento de conhecimento inicial dos solos é de grande importância na análise de materiais e serem usados em pavimentação, assim como em qualquer obra de engenharia que envolva a movimentação de terra, conforme ratificado por Sousa e Coelho (2020). Em uma primeira análise tátil visual, estimou-se que as amostras de laterita se tratavam de um cascalho argiloso vermelho claro; enquanto que o solo fino poderia ser uma areia argilosa vermelha. Após os procedimentos de caracterização, confirmou-se a estimativa prévia de caracterização das lateritas, mas possuindo uma graduação descontínua com alta plasticidade e baixa expansão; e o solo fino, em verdade, se tratava de uma argila arenosa com alta plasticidade e expansão.

Após a primeira fase de ensaios, verificou-se o desvio dos valores de caracterização para seleção das amostras mais representativas da coleta inicial, para que fossem transportadas ao Rio de Janeiro para a realização dos demais ensaios de classificação, microscopia eletrônica de varredura no IME; ensaios de módulo de resiliência nos laboratórios da VIA 040, na região metropolitana de Belo Horizonte e os ensaios de deformação permanente na COPPE/UFRJ. Dessa forma, foram selecionadas duas amostras dos solos, que apresentavam os valores dos parâmetros de caracterização mais medianos, entre as amostras caracterizadas inicialmente. A amostra de laterita foi denominada LAT-05 e do solo fino SF-06. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de caracterização das amostras selecionadas para os ensaios mecânicos e os valores médios dos parâmetros de caracterização das amostras coletadas.

Tabela 1. Parâmetros da caracterização completa

Parâmetro	LAT-05	SF-06	X _{Laterita}	X _{Solo Fino}
%Pedregulho	52,30	--	53,43	--
%Areia grossa	7,18	9,41	7,54	9,29
%Areia média	3,42	32,82	3,20	33,10
%Areia fina	2,78	6,22	3,37	6,02
%Silte	6,95	3,84	7,36	3,66
%Argila	26,16	47,61	25,09	47,93
Limite de Liquidez	73,50	68,40	73,97	98,50
Limite de Plasticidade	38,10	42,20	37,89	42,37
Índice de Plasticidade	35,40	26,20	36,08	56,13
Classificação HRB	A-2-7	A-7-5	A-2-7	A-7-5
Densidade Máxima	1,90	1,65	1,92	1,68
Umidade ótima	18,15	22,30	18,11	22,24
Índice Suporte	65,20	17,10	65,42	17,77
Expansão	0,05	2,00	0,05	1,98

Fonte: Autores (2019)

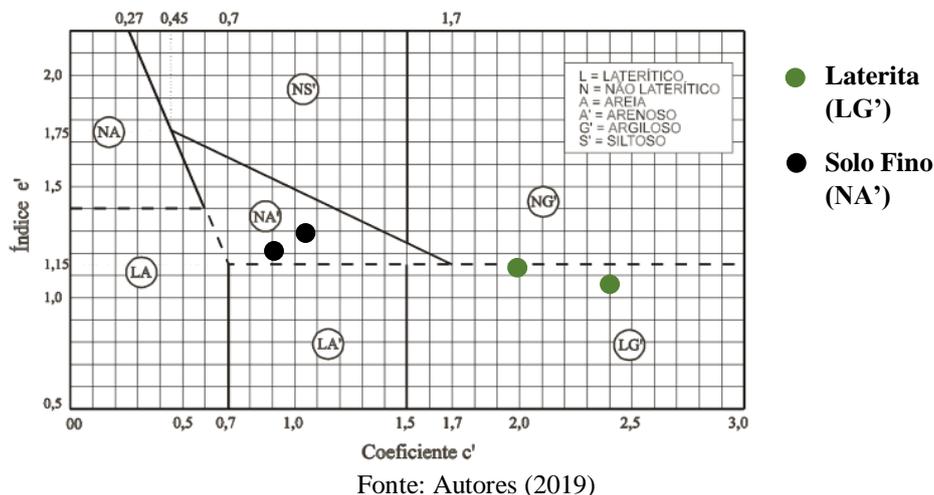
2.2 CLASSIFICAÇÃO MCT

A classificação MCT (DNER-CLA 259/96) baseia-se em índices obtidos a partir de ensaios em corpos de prova – CPs de dimensões reduzidas. Os principais ensaios para a determinação dos referidos índices são o ensaio de compactação mini-MCV (DNER-ME 258/94) e o ensaio de perda de massa por imersão em água (DNER-ME 256/94). A compactação pelo método mini-MCV (*Mosturie Condition Valour*), conforme Nogami e Villibor (1995) adaptado do procedimento de *Parsons* fornece uma família de curvas de compactação, onde é possível obter os índices relacionados à granulometria do material (índice c') e relativo à inclinação do ramo seco da curva de compactação referente a 12 golpes (índice d'). Com os índices anteriores e com o resultado da perda de massa por imersão (Pi) é possível classificar os solos em estudo conforme a região que se encontra os índices determinados em ábaco de classificação padrão. A classificação MCT separa os solos em dois grandes grupos, os solos de comportamento laterítico, indicando a classe “L”; e os solos de comportamento não lateríticos, representados pela classe “N”, conforme descritos por Nogami e Villibor (1995).

O procedimento de ensaio de compactação mini-MCV, prescrito na norma rodoviária DNER-ME 258/94, consiste basicamente em compactar a fração do solo passante na peneira granulométrica de abertura 2,0 mm, conforme o número de golpes (n) previsto na referida norma, interrompendo este procedimento de compactação até que a diferença entre altura do corpo de prova compactado com

“4n” golpes e a correspondente altura para “n” golpes, seja menor que 2,0 mm. Ao fim do ensaio serão obtidas famílias de curvas de compactação e curvas denominadas Mini-MCV, de onde será possível extrair os dados para realizar o procedimento de classificação. Para o ensaio de perda de massa por imersão em água, a norma DNER-ME 256/94, descreve que esse parâmetro será obtido após a quantificação da massa desprendida do corpo de prova compactado anteriormente, quando o mesmo é submerso em água por no mínimo 20 horas, na posição horizontal com seu topo saliente em 1,0 cm para fora do molde metálico de compactação. O valor de “Pi” também será usado para fins de classificação MCT. A Figura 1 apresenta a classificação MCT obtida para as amostras selecionadas, com repetibilidade do ensaio. Nesse ábaco de classificação MCT há indicação que as amostras do solo denominado como laterita, foram classificadas como solo argiloso laterítico (LG’); enquanto que as amostras do solo fino, classificadas como solo arenoso não laterítico (NA’).

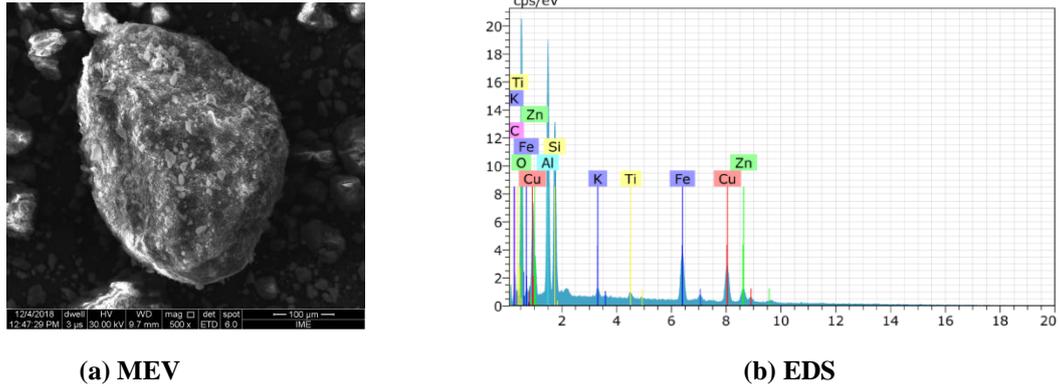
Figura 1. Classificação MCT das amostras



2.3 VERIFICAÇÃO MINERALÓGICA E ESTRUTURA MICROSCÓPICA

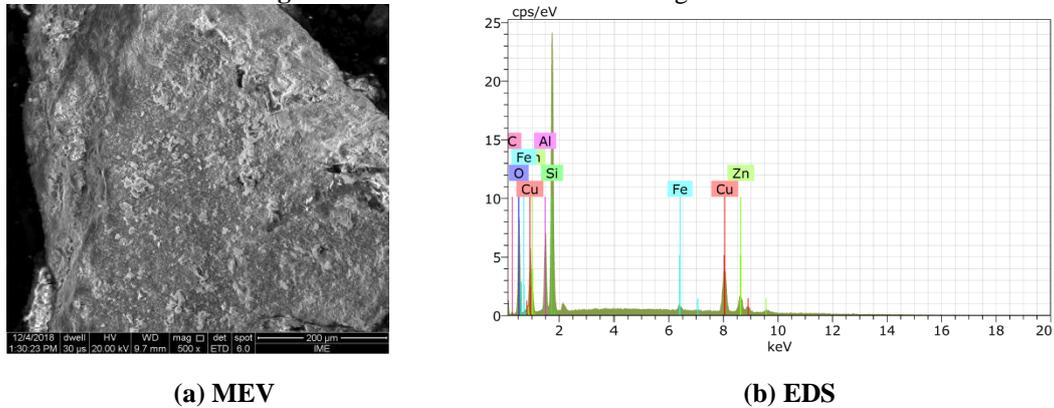
Foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de raios X por dispersão em energia (EDS) para a visualização física do arranjo estrutural das partículas e qualitativa quanto aos componentes químicos presentes. Os testes foram realizados no laboratório de ciências dos materiais do IME, com ampliações de imagem em 100, 500, 1000 e 1500 vezes.

Figura 2. MEV e EDS da laterita magnitude 500x



Fonte: Autores (2019)

Figura 3. MEV e EDS do solo fino magnitude 500x



Fonte: Autores (2019)

A partir da visualização das Figura 2a e b, correspondentes às amostras de laterita, visualiza-se que entre os componentes químicos encontrados confirmam a presença de ferro, alumínio, sílica, predominantes nesses solos lateríticos. Para as amostras de solos finos (Figuras 3a e b), há predominância de sílica, alumínio e cobre. Ressalta-se e esse solo fino apesar de ser classificado como NA', ficou bastante próximo de ser classificado como LA', no ábaco de classificação MCT.

A verificação quantitativa das composições químicas das amostras, através dos ensaios de difração de Raios-X (DRX) e de espectrometria de Fluorescência de Raios X por dispersão em energia (EDS), possibilita a obtenção da relação sílica-sesquióxido de ferro e alumínio (Kr) e sílica-alumina (Ki), que segundo proposto por Gidigasu (1976), podem ser utilizados para fins de caracterização dos solos como lateríticos ou não.

Para a laterita obteve-se os valores de 0,79 e 1,43, para as relações sílica-sesquióxido de ferro e alumínio, e sílica-alumina, respectivamente. Para o solo fino, os valores dessas relações, foram, respectivamente, 4,21 e 4,28 conforme Tabela 2. Para Gidigasu (1976), os solos com relação sílica-sesquióxido de ferro e alumínio menor que 2 são classificados como lateríticos, caso contrário são denominados como não lateríticos. Assim como, os solos com relação sílica-alumina menor que 2,

são ditos muito intemperizados, sendo pouco intemperizados, caso essa relação seja maior que esse limite.

Tabela 2. Análise química da laterita e solo fino

Parâmetro	Laterita	Solo Fino
% Al ₂ O ₃	26,50	21,38
% Fe ₂ O ₃	33,76	2,94
% SiO ₂	24,70	62,36
Kr	0,79	4,21
Ki	1,43	4,58
Classificação	Laterítico	Não laterítico
Intemperismo	Muito	Pouco

Fonte: Autores (2019)

Assim a laterita foi classificada como solo laterítico enquanto que o solo fino, de acordo com a sílica-sesquióxido, foi caracterizado como solo não laterítico.

2.4 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de determinação do módulo de resiliência (MR), descrito na norma DNIT-ME 134/2018 consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico a carregamentos cíclicos, com aplicação controlada das tensões principais verticais (σ_1) e de horizontais de confinamento (σ_3), com a correspondente medição, através de transdutores do tipo LVDT, das deformações provocadas ao corpo de prova. Para obtenção do módulo (EQ.1), utilizam-se pares de tensões, conforme especificado na referida norma, formados pela tensão confinante (σ_3) e tensão desvio ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) e a deformação específica resiliente (ϵ_r). A primeira fase de carregamentos consiste no condicionamento das amostras para eliminar as primeiras deformações permanentes que podem ocorrer nas aplicações iniciais da tensão desvio, essa fase também busca minimizar o efeito da história de tensões a que o solo esteve submetido. Após essa fase, inicia-se a obtenção do módulo com aplicação de dezoito pares de tensões com mínimo de dez ciclos de carga em cada. Assim serão obtidos os MR's para cada par de tensões, procedendo-se a verificação de melhor enquadramento possível nos modelo do tipo arenoso (EQ.2), argiloso (EQ.3) ou composto (EQ.4), conforme descrição de Medina e Motta (2015); com a correspondente determinação de coeficientes de regressão k1, k2 e k3 e verificação do comportamento dependente do MR em função da tensão desvio (solos finos) ou tensão confinante (solos grossos).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (\text{EQ. 1})$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (\text{EQ. 2})$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (\text{EQ. 3})$$

$$MR = k_1^{-1} \sigma_3^{-k_2} \cdot \sigma_d^{1-k_3} \quad (\text{EQ. 4})$$

Considerando esses aspectos, foram ensaiadas as amostras selecionadas de ambos os materiais, moldadas em moldes tripartidos de dimensões 100 x 200 mm (diâmetro e altura), compactadas, na energia intermediária (10 golpes para cada uma das 10 camadas) por se tratar de material para sub-base. Procedeu-se a fase de condicionamento com aplicação de três pares de tensões, com 500 ciclos para cada par e na sequência os carregamentos para determinação dos MR's.

2.5 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

O ensaio de deformação permanente (DP), descrito na norma DNIT 179/2018-IE, assim como o ensaio de módulo resiliente, consiste também em submeter o corpo de prova a carregamentos repetidos, aplicando pares de tensões desvio (σ_d) e de confinamento (σ_3), com a correspondente medição, através de transdutores do tipo LVDT, das deformações provocadas ao corpo de prova. Para obtenção da deformação permanente são aplicados inicialmente 50 ciclos com pares de tensões de 30 kPa para garantir contato entre o pistão e o cabeçote sobre o corpo de prova. Na sequência são aplicados no mínimo 150.000 ciclos de um par de tensões escolhidos entre os pares típicos constantes na referida norma. A partir dos valores de deslocamentos plásticos lidos ao longo da aplicação dos ciclos, será determinada a deformação específica permanente através do quociente entre o deslocamento plástico e a altura de referência do medidor de deslocamento. Assim será possível obter a contribuição percentual de deformação acumulada para cada camada do pavimento.

O modelo de deformação permanente em solos brasileiros (EQ. 5) desenvolvido por Guimarães (2009) tem apresentado parâmetros de regressão com bons ajustes aos dados experimentais. Esse modelo serviu de base para a elaboração da norma técnica rodoviária de determinação da deformação permanente de solos, a instrução de ensaio DNIT-IE 179/2018, bem como já se encontra na base de dados de modelos do Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis – MeDiNa, desenvolvido no País. Nesse modelo, a deformação permanente

(ε_p) é uma taxa percentual. Os coeficientes ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , ψ_4 são parâmetros de regressão não-linear; σ_3 e σ_d corresponde ao estado de tensões, ρ_0 é a pressão de referência (atmosférica) e N o número de ciclos de repetição de carga.

$$\varepsilon_p = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (\text{EQ. 5})$$

Para os ensaios de deformação permanente em equipamento triaxial de carga repetida foram utilizados pares de tensões mais próximos dos possíveis estados de tensão a serem submetidos aos solos estudados quando aplicados em campo. Esses pares referem-se a materiais a serem aplicados em sub-base rodoviária, considerando tráfego moderado e pesado. Essa situação representaria a rodovia BR-163/PA localizada na região da qual foram estudados os solos.

Assim foram utilizados os pares de tensões da norma DNIT 179/2018-IE: $\sigma_3=80$ kPa/ $\sigma_1=160$ kPa; e $\sigma_3=120$ kPa/ $\sigma_1=240$ kPa. Para cada material buscou-se determinar a deformação permanente e verificar o efeito do acomodamento das deformações plásticas.

Para a pesquisa do efeito *Shakedown* ou acomodamento das deformações plásticas, a norma DNIT 179/2018-IE indica quatro modelos de acomodamento: modelo “A” quando ocorre acomodamento plástico e não haverá problemas de afundamento no pavimento (possui curva próxima de uma vertical); modelos “B” e “C” quando ocorre escoamento plástico e conseqüente contribuição para a deformação permanente (possui curva próxima de uma assíntota ou curva horizontal); modelo “AB” quando ocorrem significativas deformações iniciais seguidas de acomodamento plástico (possui curva ondulada com decaimento próximo de uma vertical).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS SOLOS

Foram ensaiadas as amostras de lateria e do solo fino, moldadas em moldes tripartidos de dimensões 100 x 200 mm (diâmetro e altura), compactadas, na energia intermediária (10 golpes para cada uma das 10 camadas) por se tratar de material para sub-base. O ensaio de determinação do módulo de resiliência se iniciou com a fase de condicionamento. Nessa fase, utilizou-se três pares de tensões, com 500 repetições da tensão desvio, mantendo a tensão confinante constante. A sequência de carregamentos da fase de acondicionamento utilizada na pesquisa consta na Tabela 3.

Tabela 3. Tensões de condicionamento

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1 / σ_3
0,070	0,070	2
0,070	0,210	4
0,105	0,315	4

Fonte: Autores (2019)

Para a determinação do módulo de resiliência se utilizou todos os dezoito pares tensões indicados na norma DNIT-ME 134/2018. Para cada par de tensões foram aplicados no mínimo dez repetições de carga com a frequência de 2Hz.

A partir dos resultados dos ensaios de módulo, para o solo fino, verificou-se que o melhor enquadramento seria pelo modelo argiloso (Figura 4a), visto que o MR tornou-se depende da tensão desvio, como verificado pelo valor de $R^2=0,950$ em contraposição ao R^2 do modelo arenoso (Figura 4b). Assim obtêm-se os coeficientes de regressão para o modelo adotado $k_1 = 186$ e $k_2 = -0,361$; para consequente previsão do módulo para os níveis de tensão a serem submetidos o material. Essa hipótese de dependência do MR confirma-se pela natureza do solo, considerado fino, de granulometria com fração passante maior que 50% na peneira granulométrica de abertura 0,075 mm. A Tabela 4 apresenta os resultados de MR médio das amostras de solo fino.

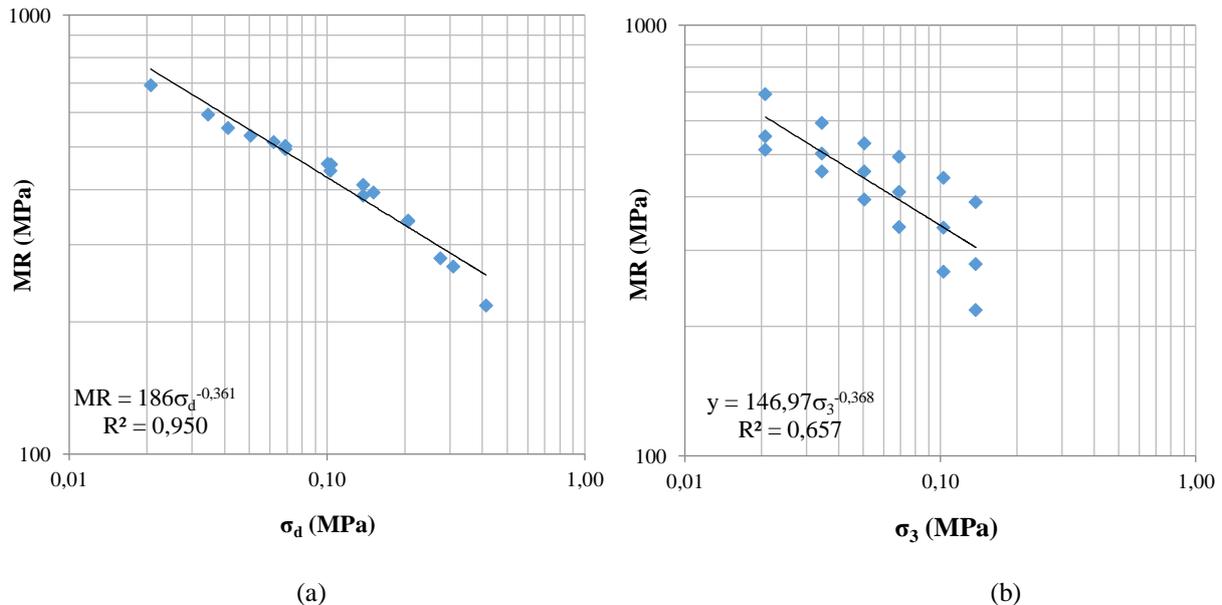
Tabela 4. Valores de MR médios do solo fino

Ensaio	MR (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_d (MPa)
1	693	0,021	0,021
2	553	0,021	0,041
3	515	0,021	0,062
4	594	0,035	0,035
5	504	0,035	0,069
6	458	0,035	0,104
7	532	0,050	0,050
8	458	0,050	0,101
9	395	0,050	0,151
10	495	0,069	0,069
11	411	0,069	0,138
12	340	0,069	0,207
13	443	0,103	0,103
14	340	0,103	0,206

15	268	0,103	0,309
16	389	0,138	0,138
17	279	0,138	0,276
18	219	0,138	0,414

Fonte: Autores (2019)

Figura 4. Enquadramento em modelo linear para obtenção de MR do solo fino



Fonte: Autores (2019)

Observa-se a variação do MR entre os valores 219 e 693 compatíveis para uso em pavimentação, indicando uma característica dos solos finos lateríticos, valores esses superiores aos determinados por Bernucci (1995) para uma brita graduada simples. Entretanto vale ressaltar que apesar desse solo ser classificado, segundo a metodologia MCT, como um solo de comportamento não laterítico, seu coeficiente de erodibilidade tem valor próximo de um solo fino laterítico, constatação que se verificou no posicionamento desse solo no ábaco de classificação MCT.

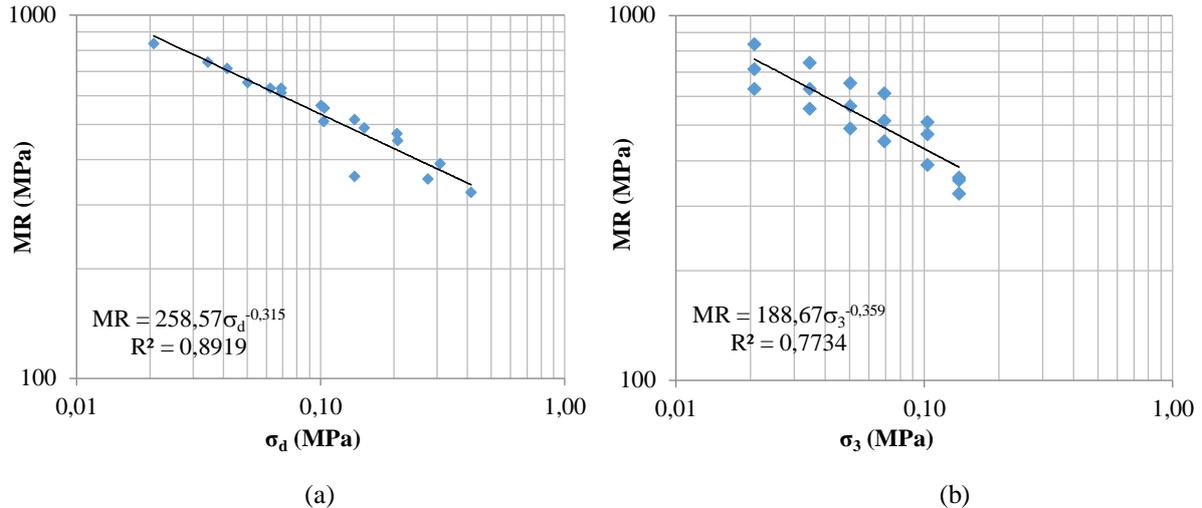
Para a laterita, os valores médios de MR também alcançaram compatibilidade com descritos em literatura, variando de 325 a 836 MPa, para as tensões do ensaio (Tabela 5). Entretanto, os modelos de enquadramento esperado do tipo linear (Figura 5a e b) não foram os que apresentaram o melhor R^2 , isso pode ser atribuído ao grande percentual de finos presentes nesse material e pelo fato de possuir uma graduação descontínua, provocando um melhor enquadramento para o modelo composto, alcançando $R^2 = 0,927$ (Figura 6). Dessa forma obtêm-se os coeficientes de regressão para o modelo adotado $k_1 = 215,959$; $k_2 = -0,133$ e $k_3 = -0,226$, para a previsão do módulo resiliente de acordo com os níveis de tensão a serem submetidos o material.

Tabela 5. Valores de MR médios da laterita

Ensaio	MR (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_d (MPa)
1	836	0,021	0,021
2	715	0,021	0,041
3	630	0,021	0,062
4	742	0,035	0,035
5	630	0,035	0,069
6	556	0,035	0,104
7	653	0,050	0,050
8	565	0,050	0,101
9	491	0,050	0,151
10	612	0,069	0,069
11	516	0,069	0,138
12	452	0,069	0,207
13	511	0,103	0,103
14	473	0,103	0,206
15	390	0,103	0,309
16	360	0,138	0,138
17	354	0,138	0,276
18	325	0,138	0,414

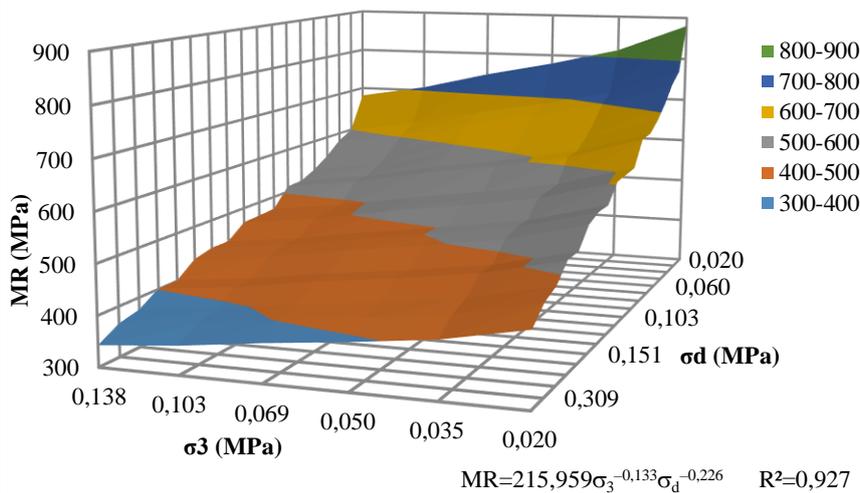
Fonte: Autores (2019)

Figura 4. Enquadramento em modelo linear para obtenção de MR da laterita



Fonte: Autores (2019)

Figura 5. Enquadramento em modelo composto para obtenção de MR da laterita



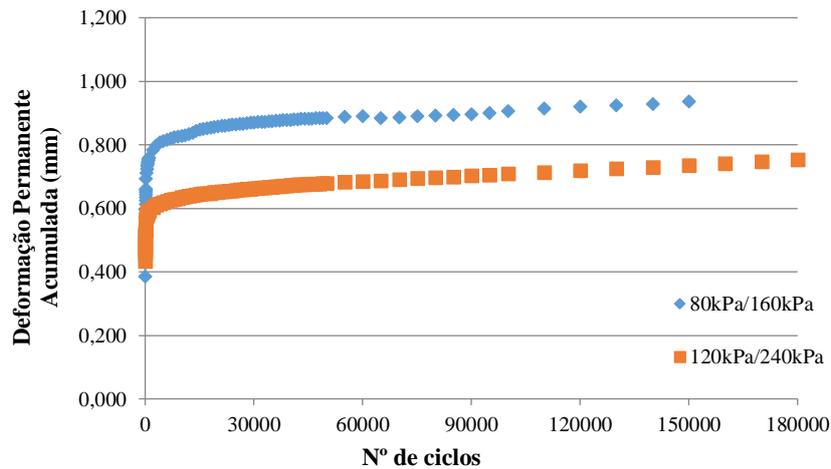
Fonte: Autores (2019)

3.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A deformação permanente acumulada do solo fino indicou que esse material, para o estado de tensões a que foi submetido, deforma-se gradativamente com o aumento do número de ciclos.

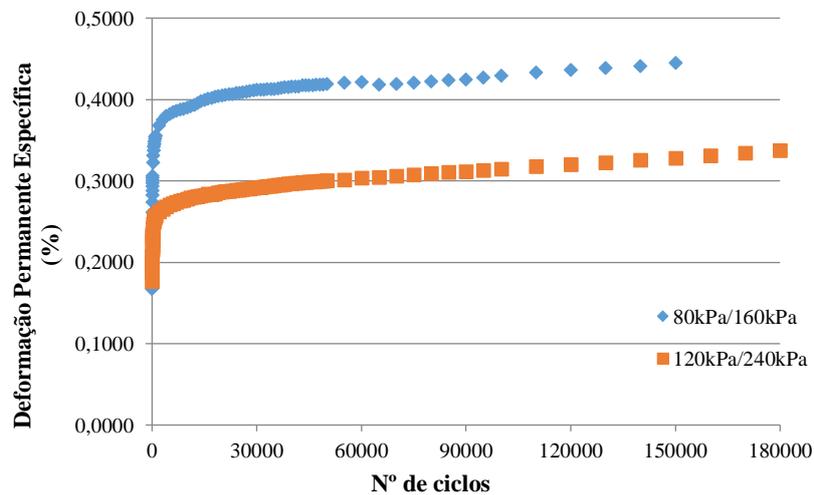
Assim possui menores deformações para baixas repetições de carga e para maiores repetições, torna-se mais deformável, sem apresentar um patamar definido de acomodamento das deformações aos 150.000 ciclos de carga. As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados de deformação permanente do solo fino, considerando os estados de tensão atuantes.

Figura 6. Deformação permanente acumulada do solo fino



Fonte: Autores (2019)

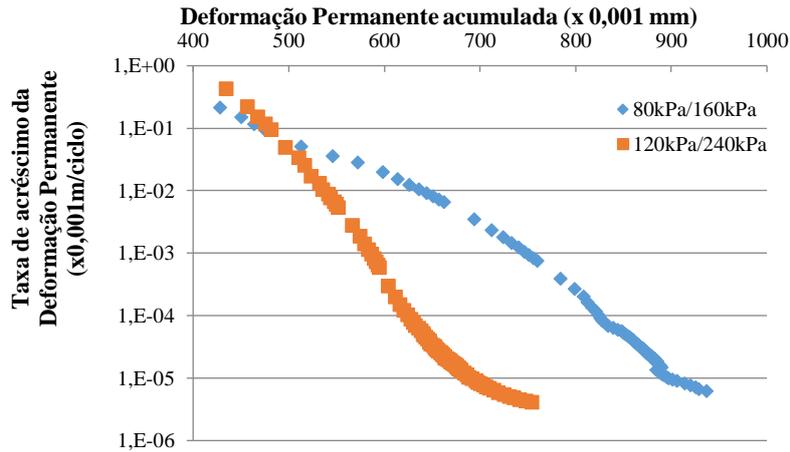
Figura 7. Deformação permanente específica do solo fino



Fonte: Autores (2019)

A pesquisa de acomodamento das deformações plásticas indicou um limite do *Shakedown* com taxa de acréscimo das deformações atingindo valores entre 10^{-5} a 10^{-6} mm/ciclo. Os modelos de acomodamento foram: modelo AB para as tensões 80 kPa/160kPa; e modelo B para as tensões maiores 120 kPa/240 kPa, conforme Figura 8.

Figura 8. Pesquisa do acomodamento das deformações plásticas do solo fino

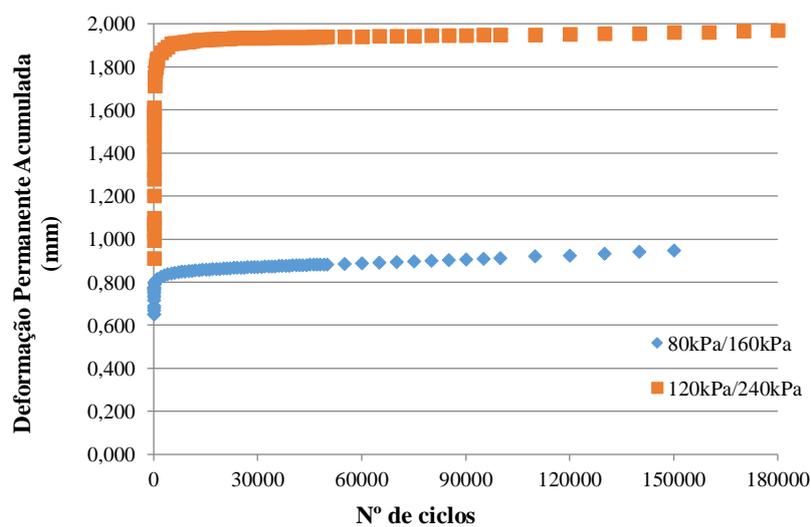


Fonte: Autores (2019)

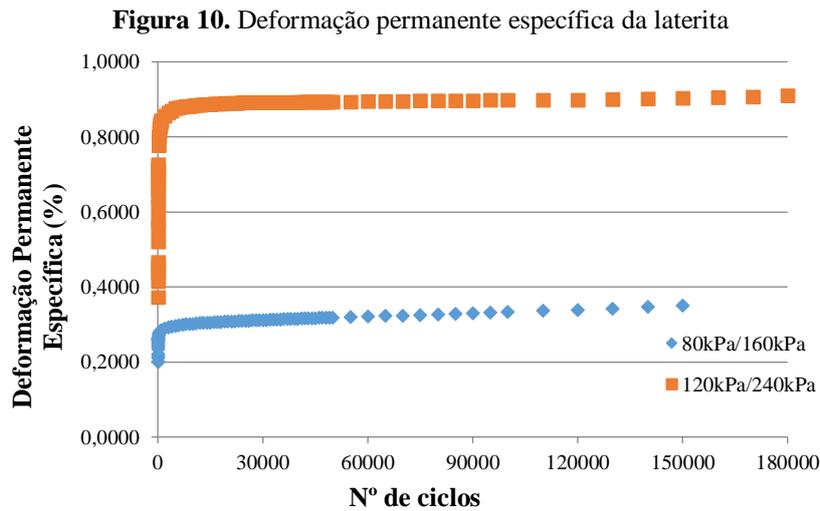
A deformação permanente acumulada da laterita indicou que esse material, para o estado de tensões a que foi submetido, deforma-se mais para os primeiros números de ciclos, permanecendo com o aumento não muito significativo para maiores repetições de carga.

Assim possui maiores deformações para baixas repetições de carga, e para maiores repetições, torna-se menos deformável, apresentando um patamar bem definido de acomodamento das deformações aos 150.000 ciclos de carga. As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados de deformação permanente da laterita, considerando os estados de tensão atuantes.

Figura 9. Deformação permanente acumulada da laterita



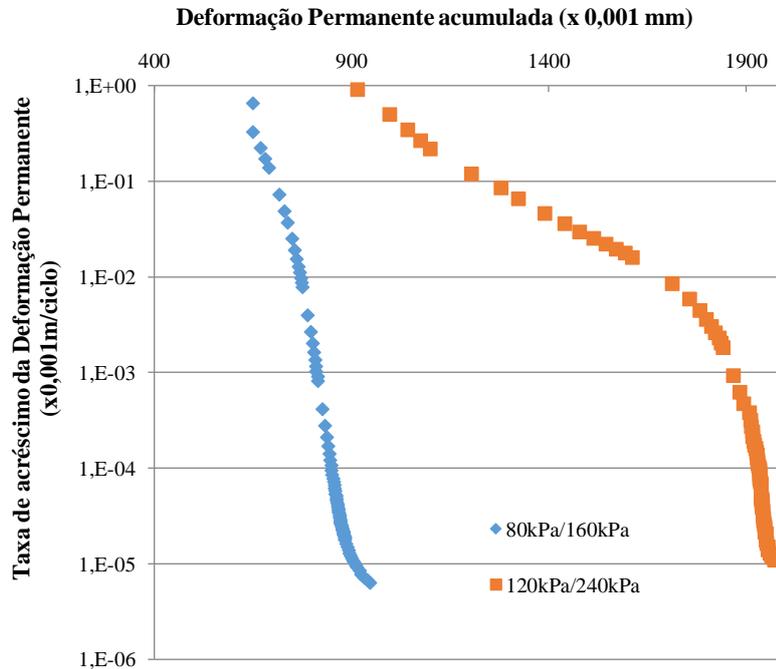
Fonte: Autores (2019)



Fonte: Autores (2019)

A pesquisa de acomodamento das deformações plásticas, para a laterita, indicou um limite do *Shakedown* com taxa de acréscimo das deformações atingindo valores entre 10^{-5} a 10^{-6} mm/ciclo. Os modelos de acomodamento identificados foram: modelo tipo A para as tensões 80 kPa/160kPa; e modelo AB para as tensões maiores 120 kPa/240 kPa, conforme Figura 11.

Figura 11. Pesquisa do acomodamento das deformações plásticas da laterita



Fonte: Autores (2019)

A partir dos ensaios dos resultados dos ensaios de deformação permanente, determinaram-se os parâmetros ou coeficientes de deformação permanente do modelo de Guimarães (2009).

Utilizando a técnica de regressão não linear múltipla, buscou-se a correlação entre o número de ciclos de repetição de carga e as tensões desvio e confinantes atuantes no corpo de prova. Esses coeficientes permitirão estimar a deformação permanente dos solos tropicais constituintes de pavimentos. Na Tabela 6 estão indicados os parâmetros de deformação permanente, obtidos a partir dos ensaios de deformação permanente em compactador triaxial de cargas repetidas.

Tabela 6. Parâmetros de Deformação Permanente do Modelo de Guimarães (2009)

Solo	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R^2
Laterita	0,338832	1,063702	-0,448616	0,036600	0,959471
Solo fino	0,246221	0,994152	-0,514583	0,043881	0,983460

Fonte: Autores (2019)

Observa-se um enquadramento de melhor acurácia do solo fino em relação à laterita. Isso se verifica pelo valor obtido do coeficiente de determinação R^2 do solo fino (0,983) comparado ao da laterita (0,959). Isso pode ser devido à sensibilidade na variação de umidade dos CPs de laterita. Porém o enquadramento no modelo proposto por Guimarães (2009), para ambos os materiais, reafirma a adequada aplicabilidade da formulação com objetivo de estimar a deformação permanente de solos tropicais constituintes de pavimentos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa buscou analisar o comportamento físico e mecânico de solos para sub-base rodoviária sob seus aspectos resilientes e de deformação. Os resultados da caracterização mostraram que os dois solos possuem alta plasticidade, em virtude da grande quantidade de fração de argila presente, mas isso não foi um fator que afetou seu comportamento a testes cíclicos para baixas cargas, mesmo com o aumento do número de ciclos. Entretanto, o mesmo não pôde ser afirmado quando do aumento da carga até mesmo para baixos números de repetições. A caracterização física demonstrou que os dois solos possuem uma graduação descontínua revelada pela análise granulométrica. Na laterita, isso é verificado pelos altos percentuais de pedregulho e de argila. No solo fino, os maiores percentuais são de argila e de areia média. Essa composição granulométrica afeta o melhor entrosamento entre os grãos ocasionando mais porosidade quando da mistura com água, bem como a sua plasticidade. Com essas características, esses dois solos seriam tratados como muito deformáveis para uso em pavimentação, assim não seriam uma primeira opção para uso nas camadas do pavimento, segundo as metodologias clássicas.

As classificações tradicionais SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) e HRB (*Highway Research Board*), indicaram que a laterita é recomendável para uso na pavimentação.

Porém, o solo fino foi considerado impróprio para utilização em pavimentos rodoviários. Atenção se deve a classificação unificada que apresentou a laterita com uma classificação transicional entre pedregulho argiloso e pedregulho siltoso. O solo fino foi classificado como silte altamente compressível. Explicação pode ser dada pela atividade da argila presente ativa não ser elevada mesmo com um percentual considerado de fração de argila nesses materiais.

A visualização da microscopia confirmou o comportamento laterítico esperado dos solos quando de sua classificação MCT, com uma ressalva ao solo fino que apresentou enquadramento próximo de um solo arenoso fino laterítico.

Os ensaios de MR demonstraram boa aplicabilidade de ambos os solos para camadas de sub-base, em virtude de seus valores estarem na faixa de MR's de solos lateríticos, conforme apresenta a literatura. Para a laterita, como forma de melhoramento de seu comportamento resiliente, é possível indicar a estabilização com acréscimo de fração de areia média a grossa, pois essas amostras apresentaram uma graduação descontínua, o que provocou uma eminente falta de resistência ainda na fase de condicionamento no ensaio de MR. Há de se chamar atenção que essa fase utiliza os mesmos níveis de tensões para camadas de base e sub-base. Os melhores enquadramentos em modelos de regressão linear ratificaram a grande influência da tensão desvio no valor do MR em ensaios com solos com grande fração fina, o que se constatava tanto no solo fino como na laterita.

Verificou-se que ambos os solos analisados apresentaram bom enquadramento para uso nos níveis de tensão indicados, até para altos números de repetições. A laterita demonstrou uma tendência de acomodação das deformações totais, características típicas desses tipos de solos, como demonstrado por Guimarães (2009). Entretanto, o solo fino não alcançou um patamar definido de acomodamento das deformações permanentes, o que não o indicaria de início seu uso em camadas constituintes de pavimentos.

Considerando essas observações do comportamento resiliente e deformável dos solos analisados, é possível indicar a possibilidade do uso da laterita, com correção de fração de areia, para camada da sub-base, caso não haja aumento significativo no atual volume de tráfego da rodovia e se adequadamente compactada para condicionar as altas deformações iniciais que pode apresentar. Ressalva-se que o solo fino, para baixo tráfego e utilizando adequados sistemas de contenção e drenagem, poderiam ser indicados para camadas inferiores não nobres do pavimento.

Assim, verificou-se que uma análise do comportamento resiliente e deformável dos solos, em conjunto com os parâmetros de caracterização são de fundamental importância na indicação de solos para o dimensionamento de pavimentos asfálticos como previsto no Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Flexíveis - MeDiNa.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, V. H. R. **Estudo de Solos do Acre na Produção de Agregados Calcinados e Misturas para Bases em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2017.
- BERNUCCI, L. B, et.al. . **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás - ADEBA, 2010.
- BERNUCCI, L. B. **Considerações sobre o Dimensionamento de Pavimentos Utilizando Solos Lateríticos para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego**. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica/USP, 1995.
- CASTRO, B. A. C. **Caracterização Geotécnica de Solos da Região Central de Minas Gerais para aplicação em Obras Rodoviárias**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2002.
- CHAGAS, L. C. M. **Estudos do comportamento mecanístico de solos da Região Amazônica e seu inter-relacionamento com as suas propriedades físicas e mecânicas**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia: Rio de Janeiro, 2004.
- COSTA, M. L. **Aspectos Geológicos dos Lateritos da Amazônia**. Revista Brasileira de Geociências, volume 21,1991. p.146-160.
- DELGADO, B. G. **Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Estrada de Ferro Carajás**. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: UFOP, 2012.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 179/2018–IE – **Pavimentação – Solos – Determinação da Deformação Permanente – Instrução de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 134/2018 – **Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 172/2016 – **Solos – Determinação do Índice Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 164/2013 – **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-CLA 259/1996 – **Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura - Classificação**. Rio de Janeiro: IPR, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-PRO 003/1994 – **Coleta de amostras deformadas de solos - Procedimento**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 051/1994 – **Solos – análise granulométrica – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 082/1994 – **Solos – determinação do limite de plasticidade – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093/1994 – **Solos – determinação da densidade real – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 122/1994 – **Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 256/1994 – **Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 258/1994 – **Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DER OSTEN, F. B. V. **Avaliação de Solos Tropicais para Sublastro da Estrada de Ferro Carajás**. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2012.

DIAS, I. M. **Estudo de solos Tropicais para uso em Pavimentação a partir de Ensaios Triaxiais Estáticos**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: USP, 2007.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecanístico-empírico de Pavimentos Asfálticos - SisPav**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007.

GIDIGASU, M. D. **Laterite Soil Engineering – Developments in Geotechnical Engineering**. Vol. 9. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company; 1976. p. 554.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2009.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MEDRADO, W. A. **Caracterização Geotécnica de Solo da Região Norte de Minas Gerais para Aplicação em Obras Rodoviárias**. Dissertação de mestrado. Ouro Preto: UFOP, 2009.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Villibor: São Paulo, 1995.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova classificação de Solos para finalidade rodoviária**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1981.

SOUSA, A. F. M.; COELHO, J. A. **Comparison of soil compaction performed by manual and mechanized compactor**. Brazilian Journal of Development. Curitiba, v. 6, n. 7, p. 42827-42840, jul. 2020. ISSN 2525-8761

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologias MCT e Resiliente**. Tese de Doutorado. São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1988.