

Relatório de Pesquisa IPR RP – 026

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO
DA UMIDADE DE SOLOS EMPREGADOS
EM SUBLEITOS DA DUPLICAÇÃO DA BR
116/RS POR INTERMÉDIO DO *SOFTWARE*
MeDiNa**

BRASÍLIA/DF

JULHO/2026

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa IPR RP – 026

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA UMIDADE DE SOLOS EMPREGADOS EM SUBLEITOS DA DUPLICAÇÃO DA BR 116/RS POR INTERMÉDIO DO SOFTWARE MeDiNa

Elaboração: Laboratório de Infraestrutura – INFRALAB/UnB

Termo de Execução Descentralizada - 352/2020 TED /IPR/DPP/DNIT SEDE

Processo: 50600.039998/2025-16

DOI: 10.70859/IPR-RP-026/2026

Brasília - DF

Julho/2026

EQUIPE TÉCNICA:

Enzo Borin Souza, graduando em engenharia civil – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Artur Garlet Baratto, graduando em engenharia civil – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Eng.^a Paula Taiane Pascoal, DsC. – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Eng.^o Magno Baroni, DsC. – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Eng.^o Luciano Pivoto Specht, DsC. – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Eng.^o Márcio Muniz de Farias, PhD. – Universidade Federal de Brasília – UnB
Eng.^a Andrea Cardona Pérez, DsC. – Universidade Federal de Brasília – UnB
Eng.^a Letícia Nunes Lopes, DsC. – Universidade Federal de Brasília – UnB

REVISÃO DE EDITORAÇÃO:

Eng.^o Luiz Heleno Albuquerque Filho, DsC. – IPR
Eng.^a Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT
Eng.^o Marcos Felipe Veverka Faria – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa.
Instituto de Pesquisas em Transportes.

Avaliação do Efeito da Variação da Umidade de Solos
Empregados em Subleitos da Duplicação da BR116/RS por
Intermédio do *Software* MeDiNa.

50p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 026)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

RESUMO

Este documento apresenta os resultados das atividades desenvolvidas no âmbito da “Avaliação do efeito da variação da umidade de solos empregados em subleitos da duplicação da BR-116/RS por intermédio do software MeDiNa”, financiado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) por meio do Termo de Execução Descentralizada – TED nº 352/2020 (TED/IPR/DPP/DNIT Sede). A execução do projeto é coordenada pela Universidade de Brasília (UnB), por intermédio do Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB), contando com a participação de instituições parceiras, entre elas a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). As atividades desenvolvidas integram o conjunto de estudos destinados ao aprimoramento das bases experimentais que subsidiam a aplicação do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) no contexto da infraestrutura rodoviária brasileira. O estudo tem como objetivo avaliar a influência das variações de umidade no comportamento mecânico de solos empregados como subleito na duplicação da BR116/RS, analisando seus efeitos sobre parâmetros fundamentais utilizados em análises mecanístico-empíricas de pavimentos. Para isso, foi desenvolvido um programa experimental envolvendo a caracterização geotécnica dos materiais, a execução de ensaios de compactação e a moldagem de corpos de prova em condições controladas de umidade e densidade. Foram definidas trajetórias de umedecimento e secagem pós-compactação, com reduções e acréscimos controlados do teor de umidade em relação à condição ótima, visando simular em laboratório variações higrométricas que podem ocorrer nas camadas de subleito ao longo da vida de serviço do pavimento. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios triaxiais de cargas repetidas, permitindo a determinação dos parâmetros de módulo de resiliência e deformação permanente, fundamentais para a caracterização mecânica do comportamento dos solos sob carregamentos cíclicos representativos do tráfego. Com base nos parâmetros obtidos experimentalmente, foram realizadas modelagens estruturais no programa MeDiNa, possibilitando avaliar os efeitos das variações de umidade nas previsões de desempenho de estruturas de pavimento. Os resultados contribuem para ampliar a compreensão do comportamento mecânico de solos de subleito submetidos a variações higrométricas e fornecem subsídios técnicos para o aprimoramento do uso do MeDiNa em análises de dimensionamento e avaliação estrutural de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: módulo de resiliência; deformação permanente; ensaio triaxial de cargas repetidas; trajetórias de umedecimento e secagem; MeDiNa.

ABSTRACT

This document presents part of the results of the activities developed within the project entitled “Evaluation of the effect of moisture variation on soils used in subgrades of the BR-116/RS duplication through the MeDiNa software,” funded by the Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) through Decentralized Execution Agreement No. 352/2020 (TED/IPR/DPP/DNIT Headquarters). The project is coordinated by the Universidade de Brasília (UnB), through the Infrastructure Laboratory (INFRALAB), with the participation of partner institutions, including the Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). The activities developed are part of a set of studies aimed at improving the experimental basis that supports the application of the National Pavement Design Method (MeDiNa) in the context of Brazilian road infrastructure. The study aims to evaluate the influence of moisture variations on the mechanical behavior of soils used as subgrade in the duplication of BR-116/RS, analyzing their effects on fundamental parameters used in mechanistic-empirical pavement analyses. To this end, an experimental program was developed involving geotechnical characterization of the materials, execution of compaction tests, and molding of specimens under controlled moisture and density conditions. Wetting and drying paths after compaction were defined, with controlled reductions and increases in moisture content relative to the optimum condition, aiming to simulate in the laboratory hygrometric variations that may occur in subgrade layers throughout the pavement service life. The specimens were subjected to repeated load triaxial tests, allowing the determination of resilient modulus and permanent deformation parameters, which are essential for the mechanistic characterization of soil behavior under cyclic loading representative of traffic. Based on the experimentally obtained parameters, structural modeling was performed using the MeDiNa software, making it possible to evaluate the effects of moisture variations on the performance predictions of pavement structures. The results contribute to improving the understanding of the mechanical behavior of subgrade soils subjected to hygrometric variations and provide technical support for enhancing the use of MeDiNa in pavement design and structural evaluation analyses.

Keywords: Resilient modulus; permanent deformation; repeated load triaxial test; wetting and drying paths; MeDiNa.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas

CC – Canteiro Central

CL – Pela classificação unificada, trata-se de uma argila pouco plástica.

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

DNIT– Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DP – Deformação Permanente

DPP – Diretoria de Planejamento e Pesquisa

GC – Grau de Compactação

INFRALAB – Laboratório de Infraestrutura

IPR – Instituto de Pesquisas em Transportes

LG' – Solo Argiloso de Comportamento Laterítico, pela classificação MCT

ME – Método de Ensaio

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional

MEAS – Massa Específica Aparente Seca Máxima

MEAU – Massa Específica Aparente Úmida

MO – Matéria Orgânica

MR – Módulo de Resiliência

N – Número de Repetições de Carga

NBR – Norma Brasileira

PAV – Subleito da Faixa Interna do Pavimento

R² – Coeficiente de Determinação

TED – Termo de Execução Descentralizada

UFES – Universidade Federal de Santa Maria

UnB – Universidade de Brasília

W_{ót} – Umidade Ótima

Wót -2 % – Teor de umidade com variação de 2 % em relação à Wót após trajetória de secagem pós-compactação

Wót -4 % – Teor de umidade com variação de 4 % em relação à Wót após trajetória de secagem pós-compactação

Wót +2 % – Teor de umidade com variação de 2 % em relação à Wót após trajetória de umedecimento pós-compactação

Wót +4 % – Teor de umidade com variação de 4 % em relação à Wót após trajetória de umedecimento pós-compactação

σ_3 – tensão confinante

σ_d – tensão de desvio

θ – primeiro invariante de tensões (somatório das tensões principais)

k_1, k_2, k_3 e k_4 – parâmetros dos modelos, determinados no ensaio

ϵ_p (%) – deformação específica permanente

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ – parâmetros de regressão

ρ_0 – tensão de referência

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva granulométrica do solo com e sem uso de defloculante.....	15
Figura 2 – Curva de compactação.....	20
Figura 3 – Esboço dos pontos de coleta no corte transversal da rodovia, sentido Sul-Norte	20
Figura 4 – Abertura da trincheira: (a) Corte no revestimento asfáltico; (b) Retroescavadeira retirando as camadas superiores (PAV); (c) Posicionamento dos cilindros metálicos; (d) Concha da retroescavadeira na cravação dos cilindros no subleito	21
Figura 5 – Amostra CC no (a) processo de extração, (b) preparo com papel filme para transporte, (c) aplicação da parafina e (d) armazenamento	21
Figura 6 – Amostra CC esculpida para ensaio triaxial de cargas repetidas.....	22
Figura 7 – Equipamento triaxial de cargas repetidas e molde tripartido	24
Figura 8 – Deformação permanente específica para o solo na umidade ótima (a), com trajetória pós-compactação de secagem (b) e umedecimento (c)	29
Figura 9 – Pesquisa da ocorrência de <i>shakedown</i> para umidade ótima (a), com trajetória pós-compactação de secagem (b) e umedecimento (c)	32
Figura 10 – Módulos de Resiliência para cada par de tensões das amostras moldadas e com trajetórias de variação de umidade	34
Figura 11 – MR para os 12 pares de tensão entre as cinco condições.....	39
Figura 12 – Conjunto de análises para $N: 5,0 \times 10^6$ (a) estrutura do pavimento e constituintes; (b) contribuição de cada camada no ATR; (c) ATR ao longo do período de projeto; (d) evolução da área trincada conforme as solicitações	41
Figura 13 – Distribuição de tensões x profundidade para $N: 5,0 \times 10^6$ em toda estrutura do pavimento	44
Figura 14 – Distribuição de tensões x profundidade para $N: 5,0 \times 10^6$ no subleito	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo dos parâmetros físicos pré-ensaio triaxial das amostras indeformadas e moldadas em laboratório.....	22
Tabela 2 – Pares de tensões utilizados para determinação da deformação permanente dos solos de subleito	24
Tabela 3 – Parâmetros de regressão para os modelos considerando as cinco condições de umidade	33
Tabela 4 – Módulos de resiliência médios em MPa para as amostras moldadas.....	33
Tabela 5 – Parâmetros de regressão para os modelos considerando os dois pontos de coleta de indeformadas.....	37
Tabela 6 – Módulos de resiliência médios em MPa para as amostras indeformadas	38
Tabela 7 – Comparativo dos valores de MR entre CC, PAV e Wót	38
Tabela 8 – Valores máximos, médios e mínimos de MR entre as 5 condições	40
Tabela 9 – Análise de DP para N: $5,0 \times 10^6$ em diferentes estados de tensões para as três condições de variação de umidade	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Caracterização física, classificação e parâmetros de compactação	16
Quadro 2 – Caracterização química do solo.....	17
Quadro 3 – Síntese dos procedimentos de preparo, condicionamento e coleta do solo de subleito quadro	18
Quadro 4 – Influência da umidade na deformação permanente (DP) do solo.....	26
Quadro 5 – Critérios de classificação do comportamento do material quanto ao <i>shakedown</i>	30
Quadro 6 – Influência da variação de umidade pós-compactação no módulo de resiliência (MR) do solo.....	35
Quadro 7 – Simulação realizadas para avaliação do efeito da umidade do subleito	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	DESENVOLVIMENTO	14
2.1	ETAPA LABORATORIAL	15
2.1.1	ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGAS REPETIDAS	22
2.2	DEFORMAÇÃO PERMANENTE: IMPACTO DA UMIDADE NO DESEMPENHO PLÁSTICO DO SOLO	25
2.2.1.	<i>SHAKEDOWN</i>	29
2.3	MÓDULO DE RESILIÊNCIA: ANÁLISE DO IMPACTO DA UMIDADE NA DEFORMABILIDADE E COMPARATIVO COM AMOSTRAS INDEFORMADAS	32
2.3.1	VARIAÇÃO DA UMIDADE PÓS-COMPACTAÇÃO	32
2.3.2	AMOSTRAS INDEFORMADAS	37
2.4	SIMULAÇÃO DE ÁREA TRINCADA E AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA NO MEDINA.....	41
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

A consolidação do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), como ferramenta oficial de análise mecânica-empírica no Brasil, representou um avanço significativo na forma de projetar e avaliar estruturas de pavimento. Ao substituir abordagens puramente empíricas por modelagens baseadas em estados de tensão, deformação e funções de transferência calibradas com dados de campo, o método passou a demandar caracterizações mais representativas dos materiais constituintes.

O desempenho estrutural de pavimentos asfálticos está diretamente condicionado à resposta mecânica dos constituintes que compõem o sistema multicamadas, sendo o subleito o elemento de fundação responsável por absorver e redistribuir as tensões induzidas pelo tráfego (Bernucci *et al.*, 2022).

Em abordagens mecânicas-empíricas, a rigidez atribuída ao subleito influencia significativamente os estados de tensão e deformação nas camadas superiores, repercutindo na previsão de defeitos como afundamento de trilha de roda e trincamento por fadiga. Em termos estruturais, pequenas variações na rigidez do subleito podem alterar de forma relevante a magnitude das deformações verticais acumuladas e a vida útil estimada do pavimento.

Nesse contexto, a confiabilidade das previsões estruturais está diretamente vinculada à qualidade dos parâmetros de entrada, especialmente no que se refere ao módulo de resiliência dos materiais de suporte estrutural.

O solo de subleito apresenta um comportamento não linear que está associado a diversos fatores como: natureza do solo e composição granulométrica, estado físico, condição de carregamento, histórico e estado de tensões, número de repetições da tensão desvio, grau de saturação, densidade e umidade de compactação, método de compactação, umidade de equilíbrio, entre outros (Li e Seling, 1994; Guimarães *et al.*, 2001; Lekarp e Dawson, 1998; Werkmeister *et al.*, 2003; Buttanaporamakul *et al.*, 2014; Razouki e Ibrahim, 2017; Lima *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2019; Chu, 2020).

Conforme apontado por Khoury *et al.* (2003), o teor de umidade do subleito tende a variar ao longo do tempo em resposta às mudanças nas condições ambientais. Além disso, a deficiência ou o mau funcionamento dos sistemas de drenagem pode intensificar esse problema, favorecendo a acumulação de água nas camadas inferiores do pavimento.

Dessa forma, o teor de umidade do subleito pode não permanecer constante, estando sujeito às variações climáticas e hidrológicas, situando-se normalmente dentro de uma faixa denominada umidade de equilíbrio.

Pascoal (2024) observou, ao longo de quatro anos, variações expressivas na umidade de subleito rodoviário, com teores de umidade pós-compactação superiores à umidade ótima. A partir dessas conclusões, indicou que a realização de ensaios em teores de umidade diferentes da umidade ótima, como $W_{ót} \pm 2\%$ e $W_{ót} \pm 4\%$, é fundamental para avaliar o comportamento do solo em condições mais próximas da realidade de campo.

Sob o ponto de vista mecânico, variações relativamente pequenas no teor de água podem resultar em modificações expressivas no módulo de resiliência e na suscetibilidade à deformação permanente dos solos compactados. Santos (2020) investigou a influência da variação da umidade de compactação, das condições de umidade pós-compactação e da variação da energia de três solos empregados como subleito.

Em relação à variação da umidade de compactação, observou-se que, apesar de a compactação realizada abaixo da umidade ótima favorecer inicialmente o aumento da rigidez do solo, essa condição torna o material mais suscetível à infiltração de água e a processos de expansão, além de provocar redução significativa da rigidez quando ocorre o umedecimento.

Adicionalmente, verificou-se que teores de umidade iniciais de compactação mais elevados tendem a resultar em pior desempenho resiliente do material, além de favorecerem maior acúmulo de deformações permanentes ao longo da aplicação de carregamentos repetidos.

Diante do exposto, o presente relatório de pesquisa tem como objetivo a avaliação do efeito da variação da umidade pós-compactação de um solo de subleito da duplicação da BR-116/RS.

Para tal, uma etapa laboratorial foi realizada para obtenção de diferentes parâmetros necessários para simulações e modelagens utilizando o MeDiNa. Buscou-se analisar, de maneira estruturada, a sensibilidade das previsões de desempenho frente às alterações nos parâmetros resilientes e plásticos decorrentes de variações de umidade pós-compactação, discutindo as implicações dessas variações na confiabilidade das análises estruturais e no uso do método como ferramenta de apoio à tomada de decisão técnica.

Desta forma, o estudo buscou investigar a influência das condições de umidade no comportamento mecânico dos materiais de subleito a partir da determinação experimental do módulo de resiliência e da avaliação da suscetibilidade à deformação permanente sob carregamentos cíclicos.

Adicionalmente, procurou-se comparar o comportamento obtido em corpos de prova moldados em laboratório com amostras indeformadas coletadas em campo, de modo a avaliar a representatividade dos parâmetros laboratoriais frente às condições reais de serviço do pavimento.

Com isso, objetivou-se contribuir para uma melhor compreensão da variabilidade dos parâmetros resilientes associados ao subleito e de seus reflexos nas análises mecanístico-empíricas realizadas no âmbito do MeDiNa.

2 DESENVOLVIMENTO

No desenvolvimento das atividades previstas, foram conduzidos os seguintes procedimentos:

- **Caracterização experimental inicial**

Realização de procedimentos experimentais para caracterização do comportamento mecânico do solo de subleito, com foco na influência das condições de umidade pós-compactação, visando à obtenção dos parâmetros necessários para as análises mecanístico-empíricas.

- **Preparação das amostras e ensaios de compactação**

Execução do preparo das amostras e dos ensaios de compactação em laboratório para definição das condições de moldagem dos corpos de prova.

- **Imposição de trajetórias de umedecimento e secagem**

Aplicação de diferentes trajetórias para simular estados distintos de umidade após a compactação e avaliar seus efeitos no comportamento mecânico dos solos.

- **Coleta e preparação de amostras indeformadas**

Coleta de amostras em campo para comparação entre o comportamento mecânico do solo em condições naturais e aquele obtido em amostras moldadas em laboratório.

- **Ensaio triaxiais de cargas repetidas**

Realização de ensaios triaxiais de cargas repetidas para simulação das solicitações de tráfego e avaliação da deformabilidade dos materiais sob condições representativas de carregamento.

- **Simulações estruturais no MeDiNa**

Execução de simulações mecanístico-empíricas no *software* MeDiNa, a partir dos parâmetros laboratoriais e dos dados de tráfego. Esta etapa foi dividida em duas frentes:

- **Frente 1: Previsão do desempenho estrutural do pavimento**

Avaliação da evolução dos principais mecanismos de deterioração ao longo do período de projeto, com ênfase no afundamento de trilha de roda (deformação permanente) e no trincamento por fadiga.

- **Frente 2: Análise dos estados de tensões e deformações**

Determinação das tensões e deformações nas camadas do pavimento por meio da Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) implementada no MeDiNa, com estimativa iterativa do módulo de resiliência e da deformação permanente.

Os critérios de desempenho adotados seguiram as recomendações para o Sistema Arterial Principal, considerando limites de 30 % de área trincada, 10 mm de deformação permanente total e 5 mm de deformação no subleito, com confiabilidade de 95 %.

Para o subleito, foram consideradas cinco condições distintas de umidade para o solo ($W_{ót}$, $W_{ót} \pm 2\%$ e $W_{ót} \pm 4\%$) para verificação da sensibilidade do comportamento deformacional às variações higrométricas.

Dessa forma, as simulações permitiram avaliar a resposta estrutural das diferentes configurações de pavimento sob condições de tráfego e umidade previamente definidas, fornecendo subsídios para a interpretação do comportamento mecânico das camadas analisadas.

2.1 ETAPA LABORATORIAL

O material analisado nesta pesquisa foi extraído do subleito da BR-116/RS, nas proximidades do município de Pelotas. A caracterização física do material foi realizada de acordo com as normativas vigentes da ABNT e do DNIT. Na Figura 1 é apresentada a composição granulométrica do material.

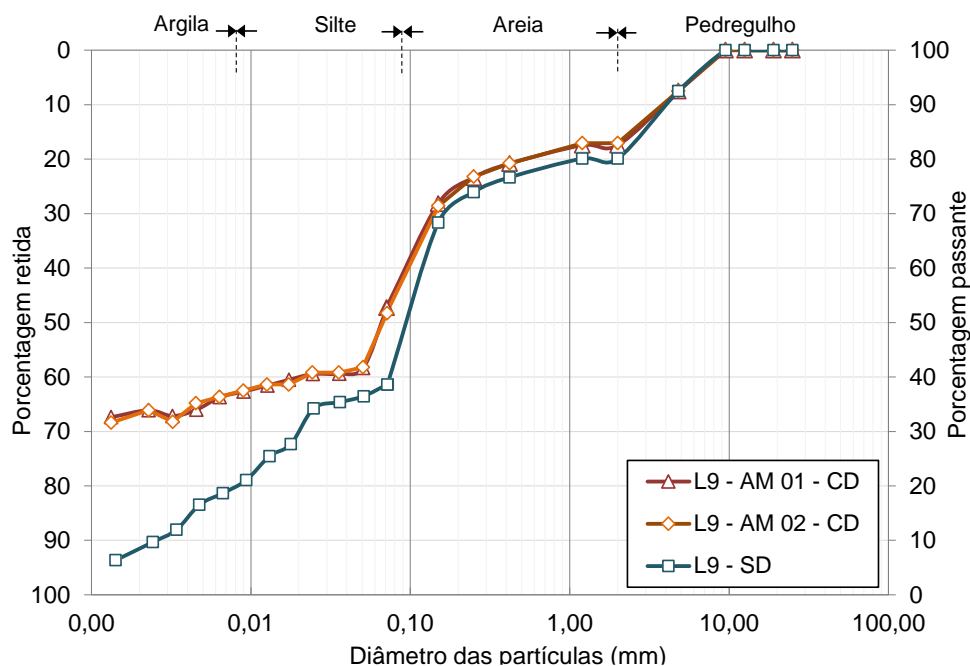


Figura 1 – Curva granulométrica do solo com e sem uso de defloculante

Fonte: Pascoal (2024)

Destacam-se como principais características:

- **Massa específica dos sólidos e composição granulométrica**
 - 2,75 g/cm³, 55 % de silte e argila, 37 % de areia em diferentes granulometrias e 8 % de pedregulho.

- **Classificação do solo**
 - Classificação unificada: Argila pouco plástica (CL).
 - Classificação da AASHTO: A-7-6 (solos argilosos).
- **Caracterização química do solo**
 - 1,1 % de matéria orgânica (MO), indicando que o solo pode ter sido coletado em um horizonte mais próximo à superfície.
- **Capacidade de troca catiônica (CTC) e composição química**
 - CTC de 9,2 cmolc/dm³, com maior presença de cálcio e magnésio. O pH indica tratar-se de um solo ácido.

Os resultados complementares são demonstrados nos Quadro 1 e Quadro 2.

Quadro 1 – Caracterização física, classificação e parâmetros de compactação

Ensaio/classificação e normativa		Resultados
% pedregulho (2,0 - 4,0 mm)	Análise granulométrica ABNT NBR 7181/2016	8/8*
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)		10/12*
% areia média (0,2 - 0,6 mm)		8/9*
% areia fina (0,06 - 0,2 mm)		18/21*
% silte (2 µm - 0,06 mm)		20/42*
% argila (>2 µm)		36/8*
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	ABNT NBR 6458/2016	2,75
Limite de liquidez (%)	ABNT NBR 6459/2016	46
Limite de plasticidade (%)	ABNT NBR 7180/2016	26
Índice de plasticidade (%)	-	20
Expansibilidade LNEC (%)	DNIT 160/2012 – ME	8,4
Classificação AASHTO (IG)	-	A-7-6 (3)
Classificação SUCS	-	CL
Classificação MCT	DNIT 228/2023 – ME	LG'
	DNER ME 256/1994	
Classificação MCT-M	Vertamatti (1988)	LG'
* Ensaio sem uso de defloculante		

Fonte: Pascoal (2024)

Quadro 2 – Caracterização química do solo

% MO	pH água	CTC cmol _c dm ³	Acidez potencial		Saturação		Cátions Básicos		
			Al	H+Al	Al	Bases	Ca	Mg	K
			cmol _c dm ³						
1,1	4,5	9,2	4,8	17,3	52,2	20,3	2,3	2	0,1

Fonte: Pascoal (2024)

Os procedimentos laboratoriais, que foram divididos nas etapas de preparo, condicionamento e coleta da amostra de solo, estão sintetizados na Quadro 3.

Quadro 3 – Síntese dos procedimentos de preparo, condicionamento e coleta do solo de subleito quadro (continua)

Descrição técnica	Preparo de amostras e ensaio de compactação	Condicionamento: trajetórias de umedecimento e secagem	Coleta: amostras indeformadas
Objetivo da etapa	Construir a curva de compactação e obter a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima (MEAS) seguindo a normativa DNIT 443/2023.	Conduzir os ensaios de módulo de resiliência sob distintas condições de umidade pós-compactação, para representar em laboratório as possíveis variações de teor que ocorrem em campo em função do ingresso ou da perda de umidade na camada.	Compreender o comportamento do material nas condições de campo
Configuração inicial e procedimento	A moldagem foi realizada em molde tripartido com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, utilizando energia intermediária. A compactação foi executada em 10 camadas e aplicação de 27 golpes por camada em altura de queda de 30,5 cm, com soquete pesando 2,5 kg, conforme especificado em norma.	Inicialmente, as amostras foram moldadas conforme o procedimento de compactação previamente descrito e, após a verificação e validação dos parâmetros de compactação, pelo menos três corpos de prova foram ensaiados na condição considerada ideal, correspondente à umidade ótima de compactação.	As amostras foram extraídas no canteiro central (CC) e no subleito da faixa interna do pavimento (PAV), como esboçado na Figura 3. Para otimizar o processo de extração de amostras indeformadas, foram utilizados cilindros metálicos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, cravados com auxílio de uma retroescavadeira (Figura 4).
Resultados ou condição de referência	Umidade ótima de 20,1 % e massa específica aparente seca máxima de 1685 kg/m ³ . Para essa condição de compactação, o material apresentou grau de saturação de aproximadamente 89,7 % na umidade ótima. É possível visualizar o resultado da curva de compactação na Figura 2.	A consideração das trajetórias de secagem e umedecimento em torno da umidade ótima possibilita uma análise mais representativa do comportamento resiliente e da suscetibilidade à deformação permanente do material.	O processo de extração foi realizado <i>in loco</i> com auxílio de macaco hidráulico, embalagem com papel filme e aplicação de parafina (Figura 5) para preservação da umidade.

Quadro 3 – Síntese dos procedimentos de preparo, condicionamento e coleta do solo de subleito quadro (continuação)

Descrição técnica	Preparo de amostras e ensaio de compactação	Condicionamento: trajetórias de umedecimento e secagem	Coleta: amostras indeformadas
Procedimentos complementares	Moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios triaxiais de cargas repetidas, conforme os procedimentos estabelecidos na norma DNIT 443/2023.	Partindo da condição inicial de umidade ótima, seis amostras compactadas validadas foram submetidas a processo de secagem até reduções de -2 % e -4 %, com monitoramento por meio da massa e dimensões dos corpos de prova.	Sob controle da temperatura do ambiente, as amostras foram esculpidas até as dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (Figura 6), sendo realizadas aferições de umidade em todo o processo (Quadro 3). Ao todo foram esculpidas seis amostras, sendo três de cada condição de extração.
Controle e validação	Controle da massa por camada e verificação das dimensões dos corpos de prova. O critério de aceitação foi a variação de $\pm 0,7$ % na umidade ótima e $\pm 1,0$ % na massa específica aparente seca. Os ensaios foram realizados em triplicata.	Para a trajetória de umedecimento, seis amostras foram submetidas ao acréscimo gradual de água por borrifador e conta-gotas até acréscimos de +2 % e +4 %. Após isso, foram acondicionadas por sete dias para homogeneização da umidade.	A massa específica aparente seca foi obtida para obter a massa específica aparente úmida (MEAU). Foram calculados os graus de compactação para as condições pela relação da MEAS de CC e PAV com a massa específica aparente seca máxima, atingida na condição $W_{ót}$.
Condições analisadas	Esses parâmetros serviram como referência para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais, permitindo estabelecer uma condição padrão de comparação.	Ensaio de deformação permanente foram consideradas três condições ($W_{ót}$, $W_{ót} - 2$ % e $W_{ót} + 2$ %). Ensaio de módulo de resiliência foram realizados em cinco condições de umidade.	Os valores de MEAS, teor de umidade e grau de compactação das condições CC e PAV estão apresentados na Tabela 1, juntamente com os valores da condição $W_{ót}$ e das trajetórias de umedecimento.

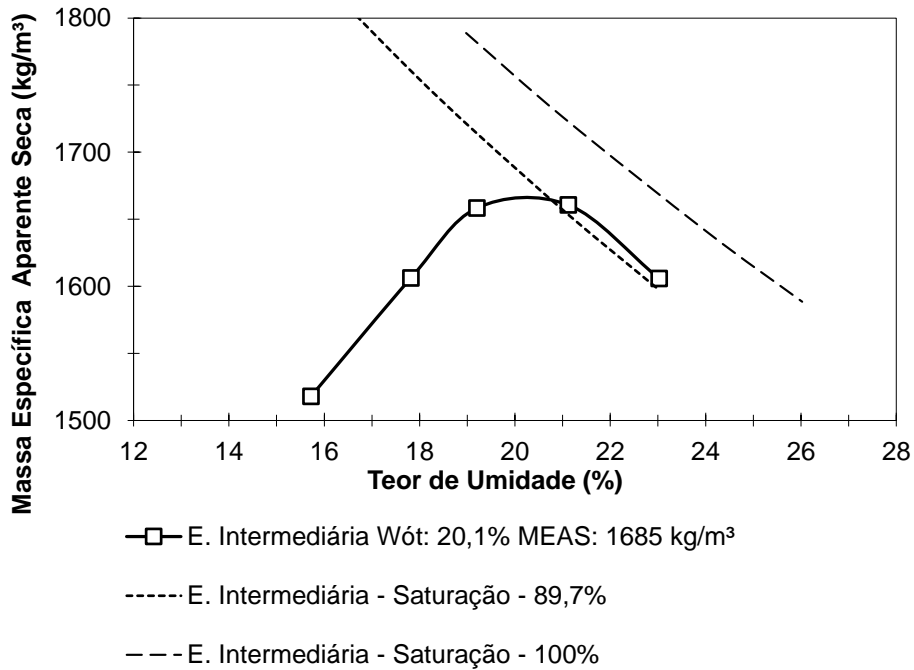


Figura 2 – Curva de compactação

Fonte: Pascoal (2024)

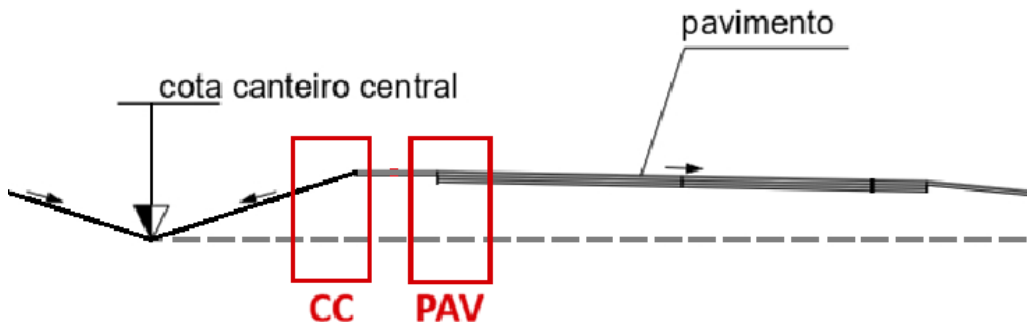


Figura 3 – Esboço dos pontos de coleta no corte transversal da rodovia, sentido Sul-Norte



Figura 4 – Abertura da trincheira: (a) Corte no revestimento asfáltico; (b) Retroescavadeira retirando as camadas superiores (PAV); (c) Posicionamento dos cilindros metálicos; (d) Concha da retroescavadeira na cravação dos cilindros no subleito

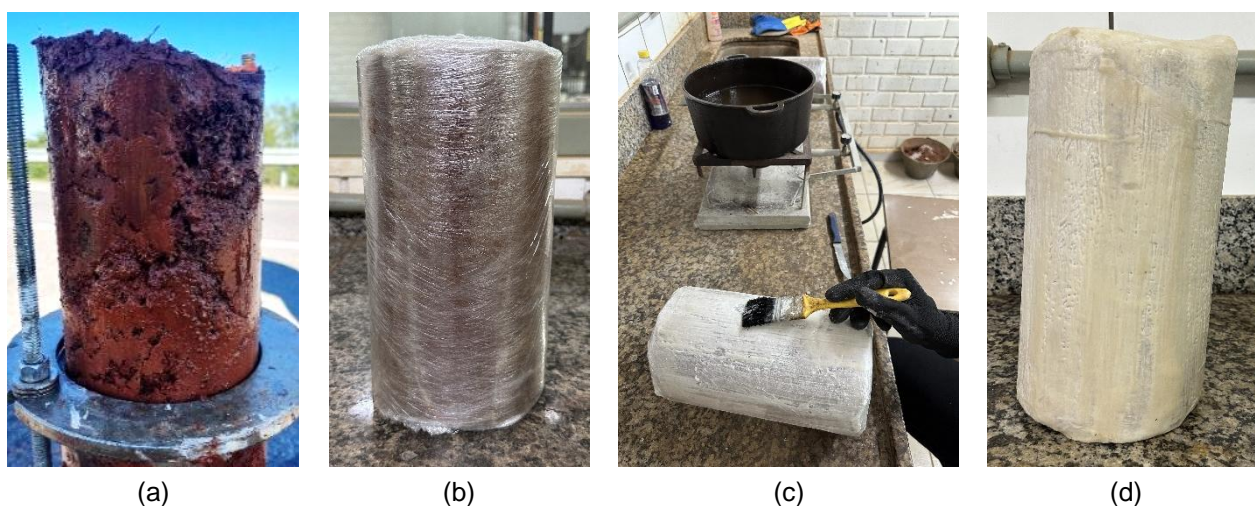


Figura 5 – Amostra CC no (a) processo de extração, (b) preparo com papel filme para transporte, (c) aplicação da parafina e (d) armazenamento



Figura 6 – Amostra CC esculpida para ensaio triaxial de cargas repetidas

Tabela 1 – Comparativo dos parâmetros físicos pré-ensaio triaxial das amostras indeformadas e moldadas em laboratório

Parâmetros	CC	PAV	Wót	Wót +2 %	Wót +4 %
MEAS (g/cm ³)	1,56	1,612	1,68	1,62	1,61
Umidade (%)	24,4	23,5	20,1	22,2*	23,6*
GC (%)	92,52	95,96	100	96,24	95,57

*Umidade após trajetória de umedecimento

2.1.1 Ensaios triaxiais de cargas repetidas

Ensaios triaxiais de cargas repetidas foram realizados para avaliar a deformabilidade do solo em diferentes condições. Os ensaios foram conduzidos segundo as normas DNIT 134/2018 e DNIT 179/2018 para obtenção do módulo resiliente e da deformação permanente, respectivamente.

Assim como a curva de compactação, a compactação das amostras submetidas a ensaios triaxiais de cargas repetidas foi realizada em um molde tripartido metálico com 10 cm de diâmetro e 20 cm altura (Figura 7).

Em síntese, foram adotados os seguintes procedimentos:

- **Condicionamento inicial**

Aplicação de 500 ciclos com tensão confinante de 0,07 MPa e tensão desvio de 0,07 MPa para estabilização do material.

- **Ensaio de módulo de resiliência**

Aplicação de 12 pares de tensões com 100 ciclos cada, frequência de 1 Hz, pulso de 0,1 s e repouso de 0,9 s. O módulo foi obtido a partir da média das deformações das cinco últimas repetições.

- **Ensaio de deformação permanente**

Aplicação mínima de 150.000 ciclos de um determinado par de tensão confinante e tensão desvio por ensaio. A norma estabelece nove combinações de tensões, dentre estas, seis pares foram selecionados conforme estudo de Lima *et al.* (2019), apresentado na Tabela 2.

- **Condições de ensaio**

Frequência adotada de 2 Hz para os ensaios de deformação permanente, resultando em aproximadamente 21 horas por ensaio.

Os resultados de módulo de resiliência triaxial foram expressos pelo modelo composto (Equação 1), enquanto a deformação permanente, também oriunda de resultados de ensaios triaxiais, foi modelada conforme Guimarães (2009), presente na Equação 2.

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

$$\varepsilon_p (\%) = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (2)$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência;

σ_3 é a tensão confinante;

σ_d é a tensão de desvio;

θ é o primeiro invariante de tensões (somatório das tensões principais);

k_1, k_2, k_3 e k_4 são os parâmetros dos modelos, determinados no ensaio;

ε_p (%) é a deformação específica permanente;

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ são os parâmetros de regressão;

ρ_0 é a tensão de referência (pressão atmosférica, considerada igual a 1 kgf/cm²);

N é o número de ciclos de aplicação de carga.



Figura 7 – Equipamento triaxial de cargas repetidas e molde tripartido

Fonte: Pascoal (2024)

Tabela 2 – Pares de tensões utilizados para determinação da deformação permanente dos solos de subleito

Fase	Par nº	Tensão confinante σ_3 (MPa)	Tensão desvio σ_d (MPa)	Número repetições
Inicial	-	0,030	0,030	50
Ensaio	1*	0,040	0,040	Mínimo 150.000
	2		0,080	
	3*		0,120	
	4*	0,080	0,080	
	5		0,160	
	6*		0,240	
	7	0,120	0,120	
	8*		0,240	
	9*		0,360	

Nota: * Pares de tensões selecionados para realização do ensaio.

Fonte: Adaptado de DNIT (2018b)

2.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE: IMPACTO DA UMIDADE NO DESEMPENHO PLÁSTICO DO SOLO

A parcela de deformação que não é recuperada após a aplicação de carregamentos externos ao longo da vida de serviço do pavimento é denominada deformação plástica ou deformação permanente (DP). Esse tipo de deformação resulta principalmente da combinação entre as deformações cisalhantes geradas pela aplicação repetida de cargas e o processo de densificação do material, caracterizado pela redução do volume do solo ao longo do tempo (Yoder e Witczak, 1975).

Quando essas deformações atingem magnitudes elevadas, podem comprometer o desempenho estrutural e funcional do pavimento, levando à ocorrência de um dos defeitos mais característicos dos pavimentos flexíveis, conhecido como afundamento de trilha de roda (ATR). Esse tipo de patologia é indesejável, pois pode acarretar diversas consequências negativas para a operação da rodovia, tais como:

- Acúmulo de água nas trilhas de roda;
- Aumento do risco de saturação das camadas inferiores do pavimento;
- Redução da aderência entre pneu e superfície;
- Maior consumo de combustível pelos veículos e dificuldades na condução ao longo da via.

Em razão desses fatores, o controle da deformação permanente é considerado um aspecto fundamental para garantir segurança, conforto e durabilidade das estruturas de pavimento.

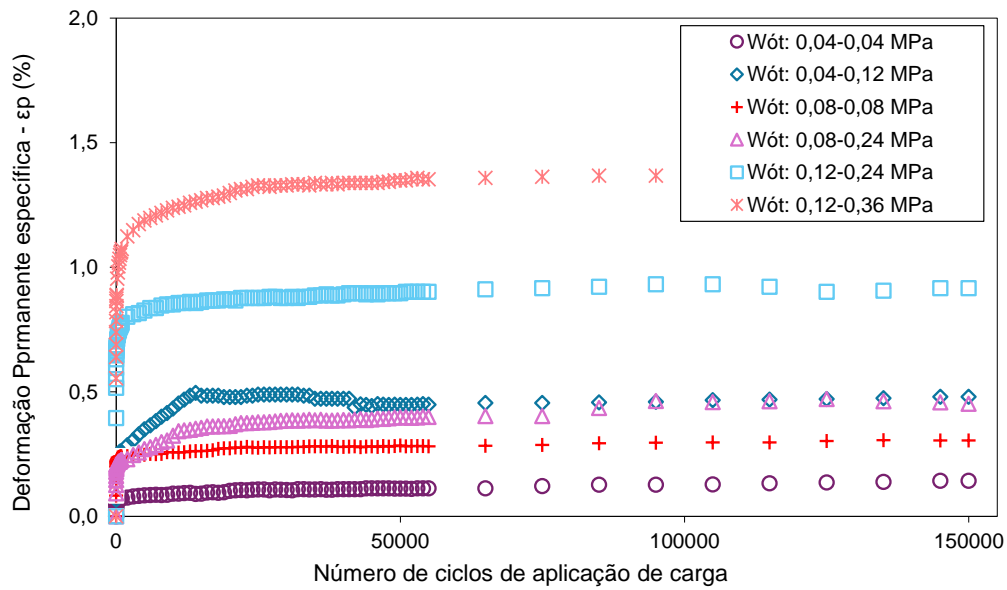
O Quadro 4 apresenta os resultados da influência da umidade na deformação permanente do solo estudado.

Quadro 4 – Influência da umidade na deformação permanente (DP) do solo (continua)

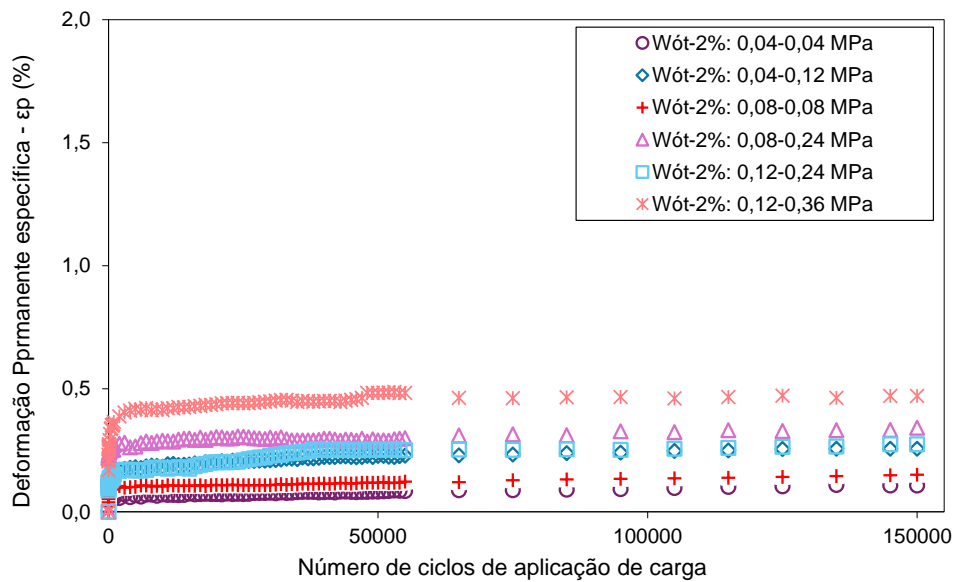
Característica	Wót -2 % (trajetória de secagem)	Wót (umidade ótima)	Wót +2 % (trajetória de umedecimento)
DP específica máxima (%)	Redução entre 24,4 % e 66,2 % em relação à condição Wót	1,39	3,99 (par de tensões 0,08 e 0,24 MPa)
DP acumulada máxima (mm)	0,93	2,79 (par de tensões 0,12 e 0,36 MPa)	8,06
Par de tensões crítico	0,12 e 0,36 MPa	0,12 e 0,36 MPa	0,08 e 0,24 MPa
Comportamento observado no ensaio	Menores deformações permanentes e comportamento mais estável do material	Comportamento intermediário com aumento das deformações em maiores níveis de tensão	Não foi possível finalizar o ensaio no par 0,12 e 0,36 MPa devido ao excesso de deformações no início do ensaio
Limitações experimentais	—	—	Curso do medidor de deslocamento insuficiente para registrar as deformações devido à elevada deformabilidade do material
Comparação entre condições	Apresentou menores deformações entre as três condições	Condição intermediária	DP 783,4 % superior à Wót para o mesmo par de tensões e 186,4 % superior à maior DP específica da condição ideal
Evolução da deformação com número de ciclos	Crescimento mais moderado ao longo dos ciclos	Crescimento progressivo até 150.000 ciclos	Crescimento expressivo principalmente nas maiores tensões
Comportamento nos ciclos iniciais	Menores valores de DP nos primeiros ciclos (100 e 1000)	Mesmo comportamento observado	Mesmo comportamento observado, porém com crescimento mais acelerado

Quadro 4 – Influência da umidade na deformação permanente (DP) do solo (continuação)

Característica	W_{ót} -2 % (trajetória de secagem)	W_{ót} (umidade ótima)	W_{ót} +2 % (trajetória de umedecimento)
Influência do estado de tensões	Aumento da tensão desviadora resulta em aumento da DP	Aumento da razão σ_d/σ_3 aumenta significativamente a DP	Elevadas razões de tensão resultam em deformações excessivas
Influência da razão σ_d/σ_3	Comportamento menos sensível devido à maior rigidez	Aumento da DP quando σ_d/σ_3 aumenta de 1 para 3	Elevada suscetibilidade à deformação sob maiores razões de tensão
Influência da umidade no comportamento mecânico	Maior rigidez associada à sucção matricial em solos parcialmente saturados	Comportamento intermediário entre rigidez e deformabilidade	Perda significativa de rigidez com aumento da deformação permanente
Comportamento geral do material	Comportamento mais estável com menor suscetibilidade à deformação	Comportamento controlado para tensões menos severas	Maior suscetibilidade à deformação acumulada
Interpretação mecânica	Maior sucção matricial aumenta a resistência às deformações	Redução da sucção em relação à condição seca	Aumento da umidade reduz a rigidez e aumenta a deformabilidade
Referência gráfica	Figura 8b	Figura 8a	Figura 8c



(a)



(b)

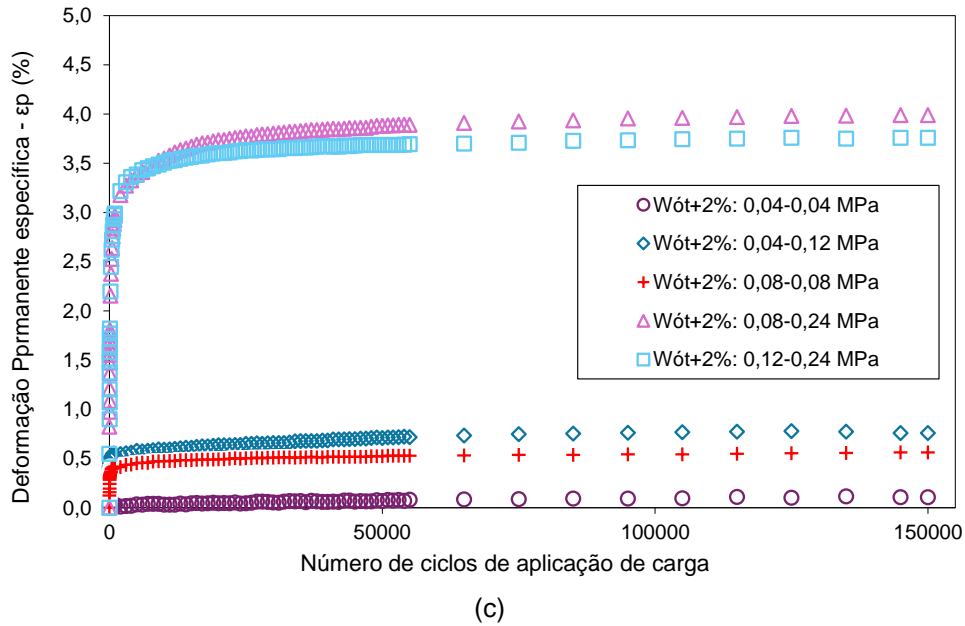


Figura 8 – Deformação permanente específica para o solo na umidade ótima (a), com trajetória pós-compactação de secagem (b) e umedecimento (c)

Fonte: Pascoal (2024)

2.2.1. *Shakedown*

O fenômeno de *shakedown* ocorre quando um material inicialmente sofre pequenas deformações plásticas durante os primeiros ciclos de carregamento, mas posteriormente passa a responder apenas de forma elástica, estabilizando seu comportamento. Ou seja, após um certo número de repetições de carga, não ocorre mais acúmulo significativo de deformação permanente.

No estudo de pavimentos, o conceito de *shakedown* é utilizado para avaliar se o material de base/sub-base/subleito é capaz de suportar carregamentos repetidos sem desenvolver deformações permanentes excessivas. Materiais que atingem o regime de *shakedown* apresentam melhor desempenho estrutural, pois se estabilizam após os primeiros ciclos de carregamento.

- Na presente pesquisa, foi verificada a ocorrência de *shakedown*, classificando-os nos níveis A, AB, B e C, que correspondem às classes de comportamento do material em ensaios de deformação permanente sob cargas repetidas.
- O solo terá seu comportamento classificado como A ou AB quando atingir uma taxa de deformação da ordem de $10^{-7} \times 10^{-3}$ metros por ciclo de aplicação de carga. Por sua vez, o comportamento B caracteriza o material que não alcança a taxa de 10^{-7} , apresentando uma tendência de comportamento paralela ao eixo da deformação permanente vertical acumulada.

O Quadro 5 apresenta os critérios de classificação do comportamento do material quanto ao *shakedown*, segundo Lima (2020).

Quadro 5 – Critérios de classificação do comportamento do material quanto ao *shakedown*

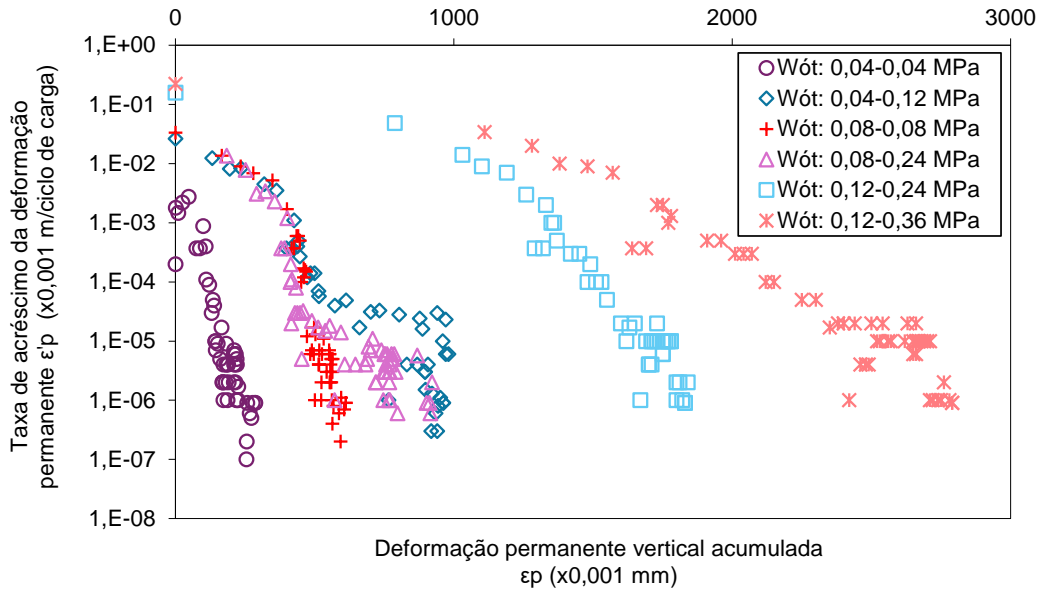
Classificação	Critério da forma da curva	Taxa de acréscimo de deformação	Interpretação técnica
Tipo A	Curva paralela ao eixo das ordenadas	Atinge taxa da ordem de $10^{-6} \times 10^{-3}$	Material apresenta comportamento estável com tendência ao <i>shakedown</i>
Tipo AB	Curva com formato característico do comportamento AB	Atinge taxa da ordem de $10^{-6} \times 10^{-3}$	Material apresenta comportamento intermediário com tendência à estabilização
Tipo B	Curva paralela ao eixo ϵ_p	Não atinge taxa de $10^{-6} \times 10^{-3}$	Material apresenta comportamento que exige atenção em aplicação
Tipo C	Curva com tendência de paralelismo ao eixo das abscissas	Não atinge taxa de $10^{-4} \times 10^{-3}$	Material não recomendado para aplicação devido à elevada deformabilidade

Fonte: Lima (2020)

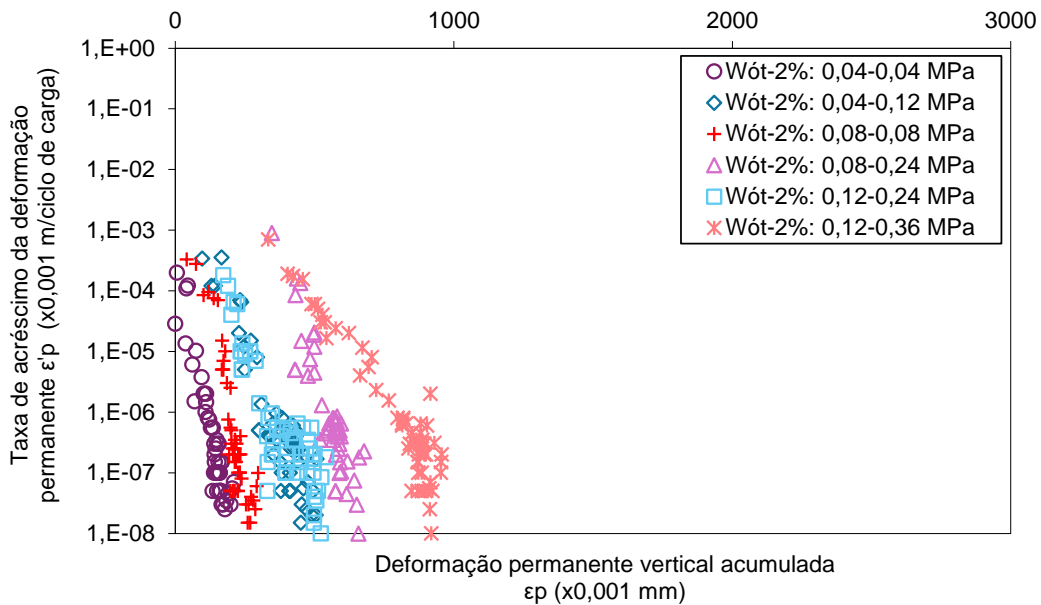
Conforme Lima (2020), materiais classificados como tipo A e AB apresentam melhor desempenho mecânico, enquanto materiais do tipo B demandam cautela em sua aplicação e materiais do tipo C não são recomendados para uso em pavimentação.

Em suma do exposto, na Figura 9 estão apresentados os resultados para a ocorrência do *shakedown* do solo em diferentes condições de umidade. Nas condições $W_{ót}$ e na $W_{ót} - 2\%$, todas as amostras podem ser consideradas tipo A ou AB, com pequena variação na taxa de acréscimo da deformação permanente, indicando tendência ao estado de *shakedown*. Na condição $W_{ót} + 2\%$, para as maiores razões entre tensões e nos pares mais elevados, o comportamento demonstrado exige uma atenção, pois é pequena a possibilidade de estabilização das deformações, visto que a deformação permanente acumulada continua a aumentar, mesmo que com uma taxa extremamente lenta.

A análise do comportamento dos materiais terrosos compactados é relevante e indispensável quando eles estão aplicados em pavimentos com camadas delgadas, em caso de elevados níveis de tensões ou quando essas camadas estão propensas a variações acentuadas de umidade. Isso se deve ao fato de, nesses casos, a deformação permanente ocasionar danos impactantes na estrutura, prejudicando a vida útil e a utilização da via com segurança.



(a)



(b)

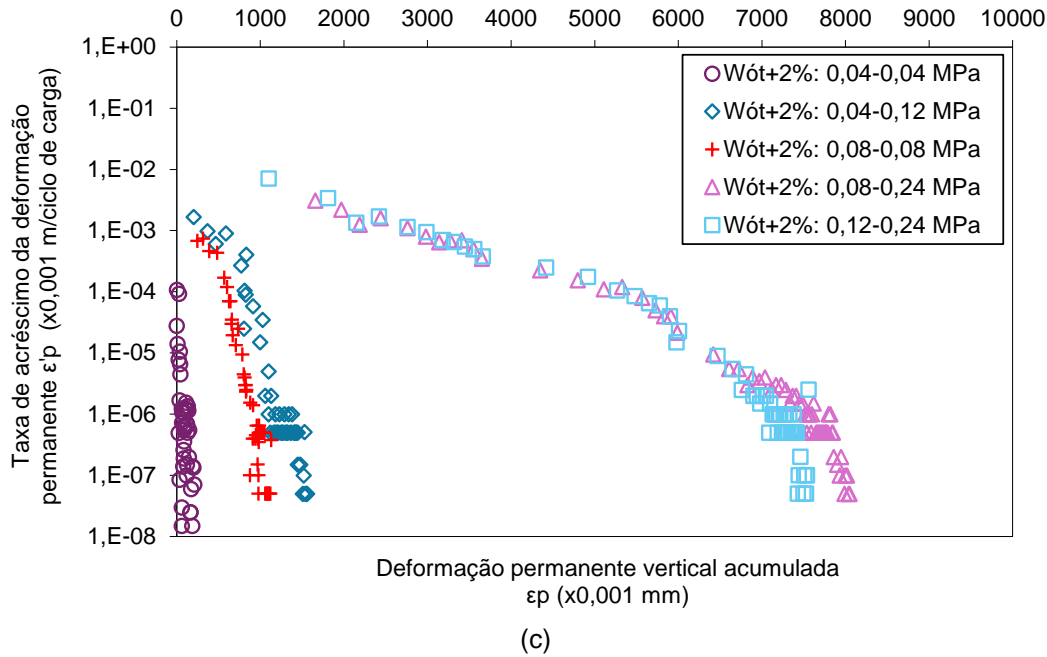


Figura 9 – Pesquisa da ocorrência de *shakedown* para umidade ótima (a), com trajetória pós-compactação de secagem (b) e umedecimento (c)

Fonte: Pascoal (2024)

2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA: ANÁLISE DO IMPACTO DA UMIDADE NA DEFORMABILIDADE E COMPARATIVO COM AMOSTRAS INDEFORMADAS

Resiliência é a capacidade de um material em retornar ao seu estado original sem deformações após cessadas as cargas dinâmicas, mensurada por meio do módulo de resiliência. A compreensão do comportamento elástico de um material que constitui uma camada de um pavimento é relevante, pois está associada à rigidez e à capacidade de suporte do solo, que resulta na resposta estrutural da camada e do pavimento como um todo.

As análises a seguir estão divididas em um comparativo da umidade ótima com variações de umidade de compactação, seguido de um tópico em que são apresentadas análises das amostras indeformadas confrontando-as com as amostras moldadas em laboratório.

2.3.1 Variação da umidade pós-compactação

A partir dos resultados obtidos na etapa laboratorial para o módulo de resiliência nas condições de umidade ótima de compactação e condições de variação de umidade pós-compactação, foi realizada a obtenção dos parâmetros do modelo composto utilizando regressão múltipla não linear, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de regressão para os modelos considerando as cinco condições de umidade

Modelo de previsão		Solo compactado na energia intermediária				
		Wót -4 %	Wót -2 %	Wót	Wót +2 %	Wót +4 %
Modelo Composto	k1	2999,69	824,192	817	234,39	254,6
	k2	0,539	0,321	0,53	0,533	0,58
	k3	0,164	0,073	-0,11	-0,319	-0,25
	R ²	0,91	0,75	0,88	0,76	0,85

Em posse dos parâmetros do modelo composto, foram obtidos módulo de resiliência médio a partir da consideração dos pares de tensões confinante e desvio para solos aplicados em subleito, conforme preconiza a norma de determinação do módulo de resiliência DNIT 134/2018. Os valores dos módulos de resiliência médios para cada par de tensões entre as condições de variação de umidade estão discretizados na Tabela 4 e relacionados com os pares de tensões na Figura 10.

Tabela 4 – Módulos de resiliência médios em MPa para as amostras moldadas

Confinante x Desvio (MPa)	Wót -4 %	Wót -2 %	Wót	Wót +2 %	Wót +4 %
0,02 x 0,02	192	176	159	101	71
0,02 x 0,04	215	186	147	81	60
0,02 x 0,06	230	191	141	71	54
0,035 x 0,035	284	220	201	114	85
0,035 x 0,070	318	231	186	92	71
0,035 x 0,105	340	238	178	80	64
0,05 x 0,05	365	253	233	123	96
0,05 x 0,10	409	266	216	99	80
0,05 x 0,15	437	274	207	87	72
0,07 x 0,07	463	289	269	133	107
0,07 x 0,14	518	304	249	106	90
0,07 x 0,21	554	313	238	93	81

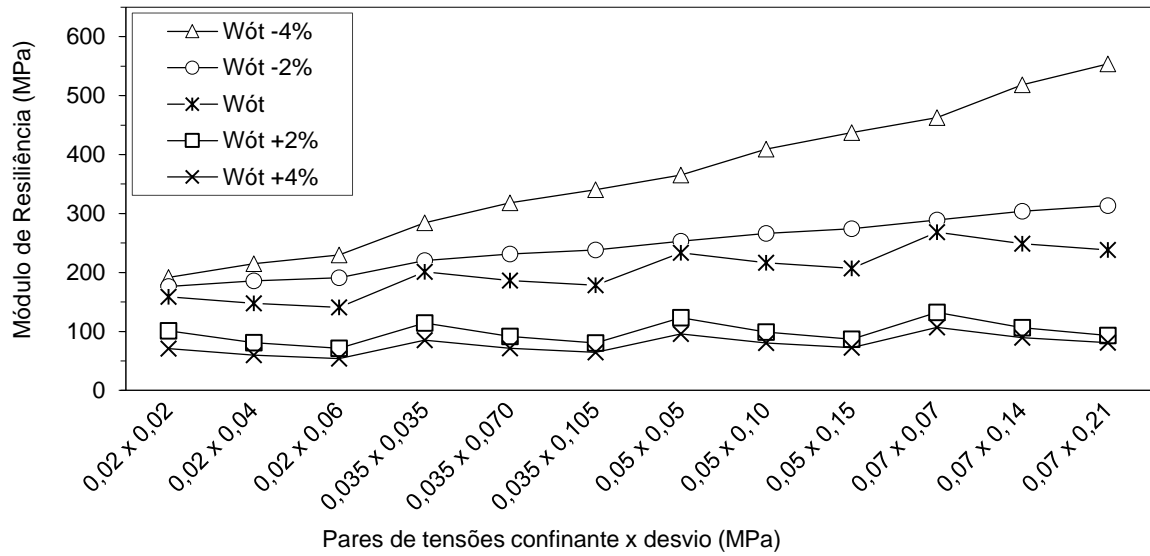


Figura 10 – Módulos de Resiliência para cada par de tensões das amostras moldadas e com trajetórias de variação de umidade

Fonte: Pascoal (2024)

Quadro 6 – Influência da variação de umidade pós-compactação no módulo de resiliência (MR) do solo (continua)

Característica	Condições de secagem ($W_{ót} -2\%$ e $W_{ót} -4\%$)	Umidade ótima ($W_{ót}$)	Condições de umedecimento ($W_{ót} +2\%$ e $W_{ót} +4\%$)
Desempenho geral	Comportamento satisfatório com melhora do MR	Condição de referência	Desempenho inferior em relação à $W_{ót}$
Comportamento do MR com aumento da tensão desvio	Aumento do MR com o aumento da tensão desvio	Decréscimo do MR com o aumento da tensão desvio	Decréscimo do MR com o aumento da tensão desvio
Comportamento do MR com aumento da tensão confinante	Aumento do MR com o aumento da tensão confinante	Pequeno acréscimo do MR	Pequeno acréscimo do MR
Variação entre condições de umedecimento	—	—	Pequena variação entre $W_{ót}$, $W_{ót} +2\%$ e $W_{ót} +4\%$, possivelmente devido à proximidade do grau de saturação de 100 %
Comparação entre pares de tensões	$W_{ót} -4\%$ apresentou aumento de 189 % do MR entre o primeiro e o último par de tensões; $W_{ót} -2\%$ % apresentou aumento de 78 %	—	—
Influência da umidade na rigidez	A perda de umidade resultou em aumento da rigidez do solo	Rigidez intermediária	Perda de rigidez do material
Redução média do MR	—	—	Redução média de 51 % para $W_{ót} +2\%$ e 62 % para $W_{ót} +4\%$ em relação à $W_{ót}$

Quadro 6 – Influência da variação de umidade pós-compactação no módulo de resiliência (MR) do solo (continuação)

Característica	Condições de secagem ($W_{ót} -2\%$ e $W_{ót} -4\%$)	Umidade ótima ($W_{ót}$)	Condições de umedecimento ($W_{ót} +2\%$ e $W_{ót} +4\%$)
Influência geral das tensões	Melhora do MR com aumento das tensões confinante e desvio	Comportamento intermediário	Melhora com aumento da tensão confinante, porém decréscimo com aumento da tensão desvio
Tendência geral do comportamento	Melhor desempenho mecânico	Condição intermediária	Maior suscetibilidade à perda de rigidez
Interpretação mecânica	A redução da umidade aumenta a rigidez dos solos	Condição de equilíbrio entre rigidez e deformabilidade	O aumento da umidade diminui a rigidez e aumenta a suscetibilidade a deformações plásticas
Comparação com a literatura	Resultados coerentes com Santos (2020), Freitas (2020) e Lima (2020), que observaram aumento do MR com redução da umidade	—	Resultados coerentes com Freitas (2020) e Lima (2020), que observaram redução do MR com aumento da umidade
Conclusão técnica	Secagem pós-compactação melhora o desempenho resiliente	Condição de referência	Umedecimento pós-compactação reduz o desempenho resiliente

2.3.2 Amostras indeformadas

Como forma de compreender as reais condições nas quais o subleito se encontra em campo, e se as condições de umedecimento e secagem avaliadas em laboratório eram representativas, amostras indeformadas foram ensaiadas e comparadas com as variações de umidade condicionadas em laboratório. A Tabela 5 apresenta os parâmetros de regressão do Modelo Composto para os dois pontos de coleta de indeformadas.

Tabela 5 – Parâmetros de regressão para os modelos considerando os dois pontos de coleta de indeformadas

Modelo de previsão		Indeformadas	
		CC	PAV
Modelo Composto	k1	53,52	62,56
	k2	0,313	0,239
	k3	-0,331	-0,473
	R ²	0,50	0,90

A Tabela 6 apresenta os valores de MR a partir do modelo composto para os doze pares de tensões, enquanto os valores máximos, médios e mínimos de MR das amostras indeformadas junto às da condição *Wót* estão dispostos na Tabela 7.

As análises realizadas sempre têm como referência a condição de umidade ótima. Observa-se que os valores médios do MR das amostras indeformadas do CC foram aproximadamente 72 % inferiores aos obtidos na *Wót*, enquanto para o PAV, a redução foi da ordem de 51 %, ambos em comparação à condição ideal.

Essas variações entre as condições são compatíveis com o elevado teor de umidade verificado nas amostras de CC e PAV, considerando que materiais terrosos tendem a apresentar redução de rigidez com o aumento da umidade.

Tabela 6 – Módulos de resiliência médios em MPa para as amostras indeformadas

Confinante x Desvio (MPa)	CC	PAV
0,02 x 0,02	57	156
0,02 x 0,04	46	112
0,02 x 0,06	40	93
0,035 x 0,035	57	137
0,035 x 0,070	45	99
0,035 x 0,105	40	81
0,05 x 0,05	56	126
0,05 x 0,10	45	91
0,05 x 0,15	39	75
0,07 x 0,07	56	116
0,07 x 0,14	45	84
0,07 x 0,21	39	69

Tabela 7 – Comparativo dos valores de MR entre CC, PAV e Wót

Módulo Resiliente (MR)	CC	PAV	Wót	Varição entre Wót e CC	Varição entre Wót e PAV
MR mínimo (MPa)	39	69	141	-72 %	-51 %
MR médio (MPa)	47	103	202	-77 %	-49 %
MR máximo (MPa)	57	156	269	-79 %	-42 %

Em razão da expressiva diferença de umidade das amostras indeformadas em relação à Wót, optou-se por compará-las com as condições submetidas às trajetórias de umedecimento pós-compactação. Assim, foram avaliadas amostras compactadas em laboratório com teores de umidade representativos das condições de campo. A Figura 11 apresenta os valores de MR para as condições analisadas, considerando os 12 pares de tensões confinante e desvio.

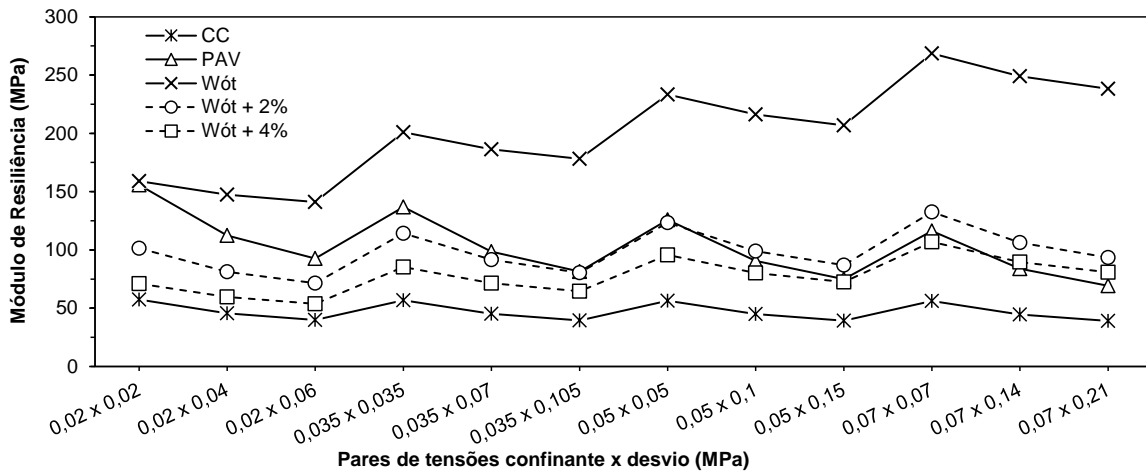


Figura 11 – MR para os 12 pares de tensão entre as cinco condições

Uma característica que pode ser atribuída a este material é que o aumento da tensão desvio, para valores fixados de tensão confinante, resulta na diminuição do MR para as condições avaliadas. Para a condição Wót, o aumento da tensão confinante foi positivo para o comportamento resiliente, pois o MR aumentou em 103 MPa considerando o MR médio do primeiro par em comparação ao último par de tensões.

A Tabela 8 apresenta os valores de MR mínimo, médio e máximo para as amostras indeformadas CC e PAV, bem como para as amostras moldadas e ensaiadas na Wót e com variações de umidade pós-compactação acima da ótima. As amostras que passaram por trajetórias de secagem não são utilizadas nesse comparativo, em vista da umidade expressivamente superior à ótima verificada nas indeformadas.

As condições que passaram por umedecimento pós-compactação (Wót +2 % e Wót +4 %) apresentaram comportamento semelhante entre elas, assim como para Wót, porém as amostras umedecidas tiveram valores iniciais de MR médios significativamente menores que a condição Wót, sendo 58 MPa para Wót +2 % e 88 MPa para Wót +4 %.

Tabela 8 – Valores máximos, médios e mínimos de MR entre as 5 condições

Módulo Resiliente (MR)	CC	PAV	Wót	Wót +2 %	Wót +4 %
MR mínimo (MPa)	39	69	141	71	54
MR médio (MPa)	47	103	202	98	78
MR máximo (MPa)	57	156	269	133	107

As condições de campo apresentaram comportamentos distintos, porém negativos para ambas quando comparados à Wót. Para as amostras do PAV, o MR apresentou decréscimo tanto para o aumento da tensão desvio quanto para o acréscimo da confinante. Mesmo com valores maiores que CC, o material extraído do subleito da rodovia (PAV) apresentou variações representativas com a troca dos pares de tensões. Quando considerada a mesma tensão confinante, o MR apresentou decréscimo de cerca de 54 MPa. Já para as amostras indeformadas CC, houve variação quase nula, porém, os valores foram os menores entre todas as condições.

Em suma, foi possível considerar a semelhança de comportamento entre as amostras umedecidas e as amostras indeformadas, assim como exposto na Tabela 8, em que os valores mínimos, médios e máximos das cinco condições estão listados, sendo possível associar estes resultados às variações de umidade pós-compactação bem próximas entre estas condições.

Esta análise ressalta a importância do controle de umidade nas rodovias, principalmente voltada à manutenção de dispositivos de drenagem. A variação da umidade pós-compactação é inevitável frente às condições adversas a que as rodovias podem estar expostas, porém mesmo tolerando certa variação, deve ter uma tolerância mais rígida. Como visto, quando a variação chega à Wót +2 % para o material compactado na Wót, o MR reduz pela metade, e em campo vai ocasionar prejuízos estruturais.

2.4 SIMULAÇÃO DE ÁREA TRINCADA E AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA NO MEDINA

Para avaliar os impactos da variação do teor de umidade provocada na estrutura dos pavimentos, foram realizadas duas análises voltadas à verificação do efeito direto no subleito. O Quadro 7 apresenta as informações sobre as simulações realizadas.

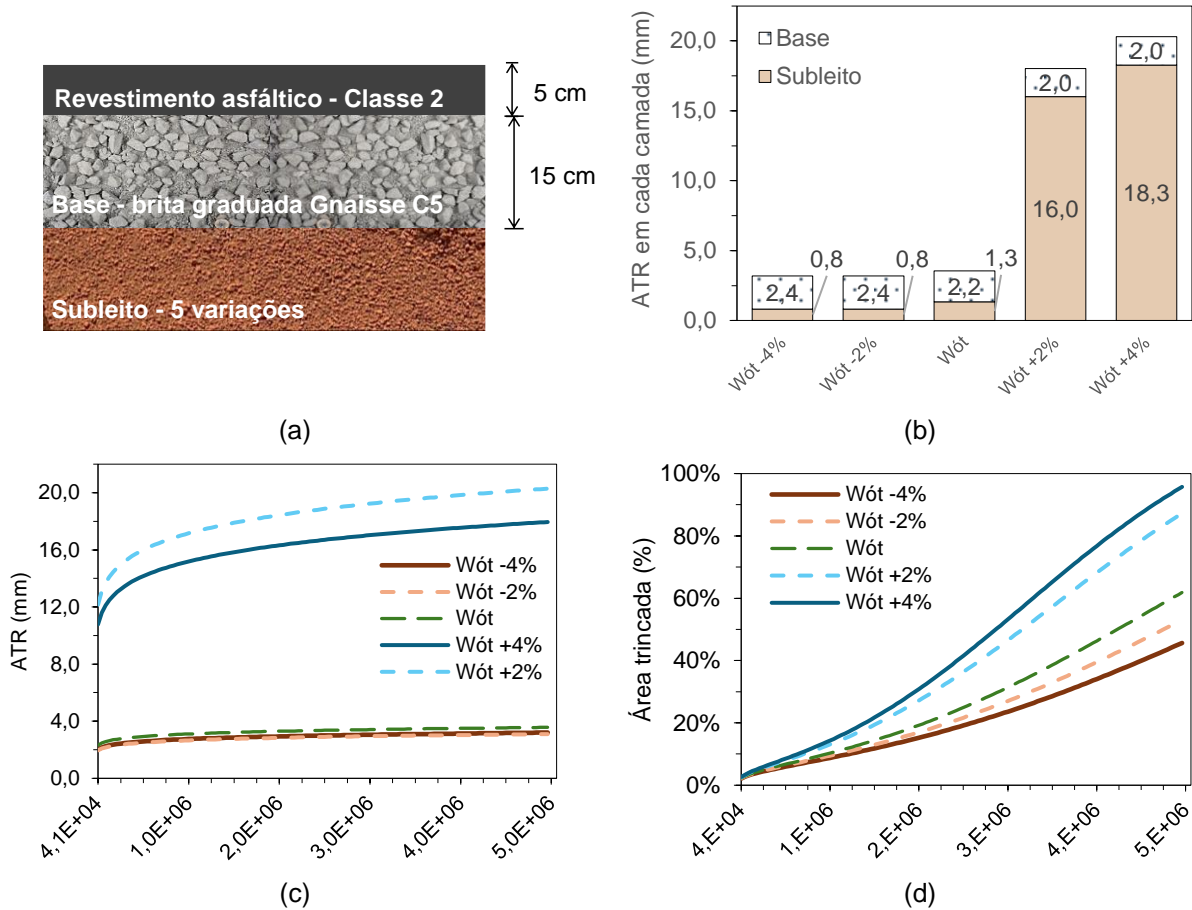


Figura 12 – Conjunto de análises para $N: 5,0 \times 10^6$ (a) estrutura do pavimento e constituintes; (b) contribuição de cada camada no ATR; (c) ATR ao longo do período de projeto; (d) evolução da área trincada conforme as solicitações

Quadro 7 – Simulação realizadas para avaliação do efeito da umidade do subleito (continua)

Descrição	Etapa 1 – Simulação estrutural no MeDiNa (ATR e área trincada)	Etapa 2 – Simulação mecanicista no AEMC (tensões e deformações)
Objetivo da análise	Avaliar os impactos da variação do teor de umidade na estrutura dos pavimentos, considerando o efeito direto no subleito.	Verificar as distribuições das tensões atuantes no subleito para as diferentes condições de umidade avaliadas.
Condições analisadas	Foram consideradas cinco condições de umidade do subleito ($Wót$ -4 %, $Wót$ -2 %, $Wót$, $Wót$ +2 % e $Wót$ +4 %), mantendo a estrutura com espessura, constituintes e solicitação de tráfego fixos.	Foram analisadas as mesmas cinco condições de umidade do subleito para o N de $5,0 \times 10^6$.
Estrutura considerada	Revestimento asfáltico Classe 2 (5,0 cm) e base granular Gnaisse C5 (15,0 cm), ambas do <i>default</i> do MeDiNa.	Estrutura equivalente à analisada no MeDiNa, considerando as tensões incrementais oriundas das solicitações de tráfego.
Parâmetro de tráfego	Simulações realizadas para $N = 5,0 \times 10^6$.	Simulações realizadas para $N = 5,0 \times 10^6$.
Resultados avaliados	Avaliação do ATR, evolução da área trincada e contribuição das camadas, conforme apresentado na Figura 12.	A Figura 13 demonstra as tensões desvio e confinante resultantes em toda estrutura do pavimento e a Figura 14, apenas para os 50,0 cm iniciais do subleito, espessura de subleito adotada pelo software MeDiNa para o cálculo de tensões.
Principais resultados observados	O ATR aumentou com o crescimento das solicitações. Condições $Wót$, $Wót$ -2 % e $Wót$ -4 % apresentaram tendência de acomodamento da deformação, enquanto condições acima da umidade ótima apresentaram crescimento contínuo das deformações.	A camada de revestimento absorveu a maior parcela das tensões, seguida por uma distribuição semelhante entre a base e o subleito. Condições de umedecimento reduziram a rigidez do subleito e aumentaram a solicitação nas camadas superiores.

Quadro 7 – Simulação realizadas para avaliação do efeito da umidade do subleito (continuação)

Influência da umidade	O aumento da umidade pós-compactação intensificou os danos estruturais. Condições $W_{ót} +2\%$ e $W_{ót} +4\%$ apresentaram ATR significativamente superiores.	Condições de secagem apresentaram maior rigidez e melhor distribuição de tensões, enquanto condições de umedecimento apresentaram menores tensões suportadas pelo subleito.
Comportamento do subleito	O ATR foi de 0,80 mm ($W_{ót} -2\%$) e 1,30 mm ($W_{ót}$), sendo considerados similares. Nas condições $W_{ót} +2\%$ e $W_{ót} +4\%$ os valores foram 16,0 mm e 18,3 mm.	As condições de secagem apresentaram maiores tensões ao longo do subleito, enquanto condições úmidas apresentaram menores tensões e maior deformabilidade.
Análises complementares	Comparação com resultados de Vestena (2021) e Kern (2022), que também observaram aumento significativo do ATR em condições de maior umidade.	Avaliação das tensões atuantes para posterior análise da deformação permanente conforme modelo de Guimarães (2009). Outros estudos como o de Santos (2024) e Lima (2020), constataram que a deformação permanente aumenta à medida que cresce a umidade de compactação.
Conclusões das simulações	O aumento da umidade acima da ótima resultou em aumento significativo do ATR e maior suscetibilidade à deformação permanente.	A maior rigidez do subleito em condições secas proporcionou melhor distribuição de tensões e menor solitação das camadas superiores.

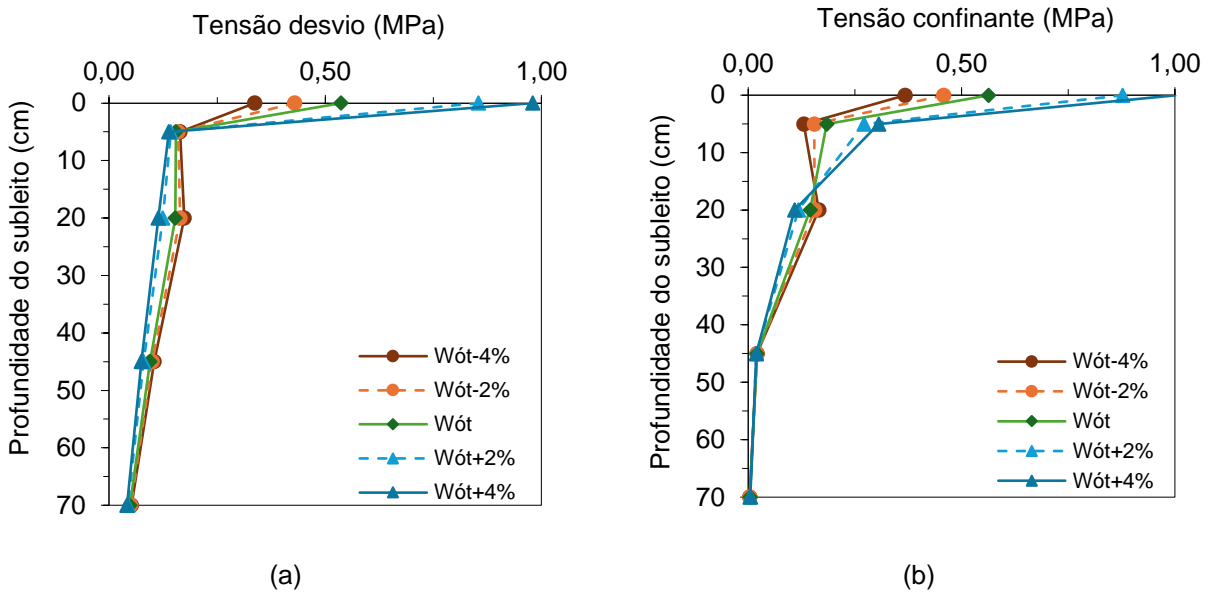


Figura 13 – Distribuição de tensões x profundidade para $N: 5,0 \times 10^6$ em toda estrutura do pavimento

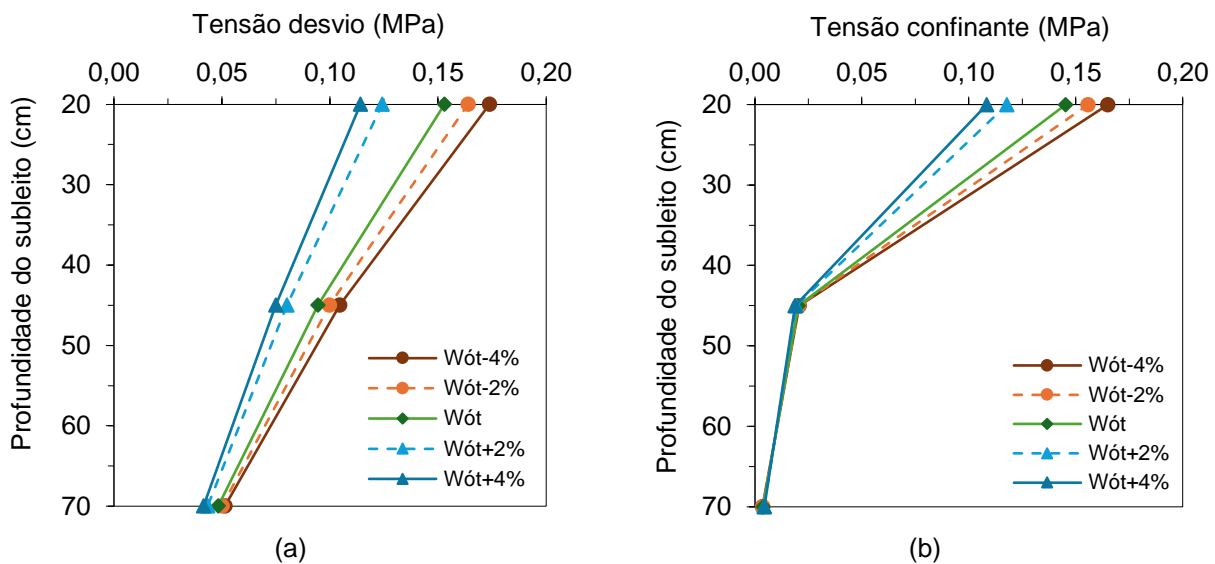


Figura 14 – Distribuição de tensões x profundidade para $N: 5,0 \times 10^6$ no subleito

Pelo fato de o MeDiNa considerar a equação de Guimarães (2009) para previsão do comportamento quanto à deformação permanente, foram realizadas análises no âmbito das tensões e deformações, pois as tensões que atuam na camada do subleito e o N possuem expoentes ψ , que são determinados após regressão múltipla dos dados oriundos do ensaio laboratorial de deformação permanente. O objetivo dessas análises foi comparar o resultado da deformação permanente das três condições de umidade para diferentes tensões confinantes e desvio, oriundas das tensões resultantes das estruturas avaliadas e das tensões consideradas na norma DNIT 179/2018 – IE.

Considerando o N de $5,0 \times 10^6$, os parâmetros de DP das três condições de ensaio e os nove pares de tensões confinante e desvio que constam na normativa, a Tabela 9 demonstra os resultados das análises.

Tabela 9 – Análise de DP para N: $5,0 \times 10^6$ em diferentes estados de tensões para as três condições de variação de umidade

	Parâmetros de regressão	Wót – 2 %	Wót	Wót + 2 %
Parâmetros Guimarães (2009)	Ψ_1	0,009	0,179	0,17
	Ψ_2	-0,629	1,074	-1,021
	Ψ_3	1,228	0,739	2,233
	Ψ_4	0,097	0,076	0,108
R²	-	0,95	0,86	0,98
Deformação permanente (%) para os pares de tensão confinante - tensão desvio (MPa)	0,04-0,04	0,02	0,11	0,30
	0,04-0,08	0,05	0,18	1,39
	0,04-0,12	0,09	0,25	3,44
	0,08-0,08	0,04	0,39	0,69
	0,08-0,16	0,08	0,64	3,23
	0,08-0,24	0,14	0,87	7,98
	0,12-0,12	0,04	0,80	1,12
	0,12-0,24	0,10	1,34	5,27
	0,12-0,36	0,17	1,81	13,04

Conclui-se que é fundamental avaliar o comportamento do material sob diferentes estados de tensão após a obtenção dos parâmetros de deformação permanente pelo modelo de Guimarães (2009).

De modo geral, o aumento das tensões e da umidade acima da ótima tende a elevar as deformações, enquanto a redução da umidade aumenta o módulo de resiliência e reduz a deformação permanente. Além disso, maiores energias de compactação tendem a melhorar o desempenho do material, resultando em menores deformações permanentes e maiores módulos de resiliência.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de análises do comportamento mecânico entre condições de variações de umidade pós-compactação de amostras compactadas e indeformadas, o presente relatório buscou avaliar e quantificar, com ensaios laboratoriais e simulações no MeDiNa os impactos gerados pela umidade e sua variação na estrutura do pavimento.

Entre as avaliações, conclui-se que as condições de subleito com umidade acima do teor ótimo tiveram valores insatisfatórios de módulo de resiliência e deformação permanente quando comparadas aos resultados da condição ótima.

Assim como os resultados de MR, quando realizada a simulação no MeDiNa com os materiais caracterizados laboratorialmente, os valores obtidos para ATR das amostras com umedecimento pós-compactação atingiram valores críticos passando de 15 cm de deformação do subleito.

Já as condições que passaram pelo processo de secagem pós-compactação apresentaram melhora considerável na rigidez e valores de ATR inferiores à base adotada, constituída de materiais granulares. Esses resultados demonstram bom desempenho a curto prazo, porém Santos (2020) afirma que embora a condição abaixo da umidade ótima aumente inicialmente a rigidez do solo, essa condição torna o material mais suscetível à infiltração de água e à redução da rigidez quando ocorre umedecimento.

Os resultados indicam que as amostras indeformadas apresentaram valores médios de módulo de resiliência significativamente inferiores aos obtidos na condição de umidade ótima, com reduções de aproximadamente 72 % para o CC e 51 % para o PAV. Este comportamento está associado ao elevado teor de umidade observado em campo, que se assemelhou aos teores das amostras umedecidas em laboratório. De modo geral, verificou-se que o aumento da umidade reduz a rigidez do material, sendo que as amostras submetidas ao umedecimento pós-compactação apresentaram comportamento semelhante às amostras indeformadas.

Entre as análises feitas para o ATR, a partir da análise de múltiplas camadas, indica que o aumento da umidade pós-compactação intensifica significativamente os danos estruturais do pavimento. Enquanto a camada de base apresentou pouca variação em sua contribuição para a deformação permanente, as diferenças observadas estão principalmente associadas ao comportamento do subleito e à forma como as tensões são distribuídas na estrutura. De modo geral, condições de umidade acima da ótima provocam aumento expressivo da deformação permanente da estrutura, evidenciando a elevada sensibilidade do desempenho do pavimento às variações de umidade do subleito.

Além disso, com as análises de tensões, foi possível concluir que nas condições de umedecimento pós-compactação, a menor rigidez do subleito levou a uma maior concentração de tensões no revestimento e maior sollicitação da base. Em contraste, nas condições de secagem, a maior rigidez do subleito favoreceu uma distribuição mais eficiente das tensões entre as camadas, reduzindo a sobrecarga nas camadas superiores e contribuindo para um comportamento estrutural mais equilibrado do pavimento.

Assim, destaca-se que o controle das variações de umidade do subleito é fundamental para a longevidade da estrutura do pavimento, demonstrando a importância de sistemas eficientes de drenagem para que isto seja possível.

Estruturas que não passam por processos de umedecimento do subleito tendem a apresentar melhor distribuição de tensões, evitando a sobrecarga das camadas de base e do revestimento asfáltico e, conseqüentemente, reduzindo a ocorrência de deformações permanentes e outras patologias.

Nesse contexto, os resultados evidenciam a forte influência da umidade no comportamento resiliente do subleito, indicando que variações de apenas +2 % em relação à umidade ótima podem reduzir significativamente o módulo de resiliência e comprometer o desempenho estrutural do pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457: Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 8 p., 2016.

_____. ABNT NBR 6458: Grãos de Pedregulho retidos na peneira de abertura de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 10p., 2016.

_____. ABNT NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 5 p., 2016.

_____. ABNT NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p., 2016.

_____. ABNT NBR 7181: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 16 p., 2016.

_____. ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 9 p., 2016.

BERNUCCI, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A, P., Soares, J. B., Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros, Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 759p., 2022.

BUTTANAPORAMAKUL, P.; ROUT, R. K., PEDARLA, A. Resilient behaviors of compacted and unsaturated subgrade materials. Geo-Congress. Technical Papers: Geo-Characterizations and Modeling for Sustainability, 234, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134/2018 – ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 18p., 2018a.

_____. DNIT 179/2018 – IE: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 20p., 2018b.

_____. DNIT 443/2023 – ME: Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moles tripartidos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 12p., 2023.

FREITAS, J. B.; REZENDE, L. R.; GITIRANA JR., G. F. N. Prediction of the resiliente modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. Engineering Geology, 270, 2020.

GUIMARÃES, A. C. R., MOTTA, L. M. G., MEDINA, J. de. Estudo de deformação permanente em solo típico de subleito de rodovia brasileira. Anais da 33ª RAPV - Reunião Anual e Pavimentação. Florianópolis, 36-354, 2001.

GUIMARÃES, A.C.R. Um método mecanístico empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009

KERN, C. Efeito da variação de umidade e sucção no comportamento mecânico e em simulações de desempenho de dois solos utilizados em pavimentos rodoviários. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

KHOURY, N. N.; Zaman M., Nevels J. B., and Mann J. Effect of soil suction on resilient modulus of subgrade soil using the filter paper technique. In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 82, 2003, Washington, D.C. Proceedings Washington, D.C.: TRB, 2003.

LEKARP, F., DAWSON, A. Modelling permanent deformation behavior of unbound granular materials. Construction and Building Materials, 12, N. 1, 9-18, Elsevier Science Ltd, 1998.

LI, D., SELING, E. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 120, N. 6, 939-957, 1994.

Lima, C.D.A., Motta, L.M.G., Guimarães, A.C.R., Aragão, F.T.S. Contribution to the study of Brazilian tropical soils as pavement materials. In Proceedings of the 13th Conference on Asphalt Pavements, ISAP Fortaleza, Ceará, 2018.

LIMA, C.D.A., MOTTA, L.M.G; ARAGÃO, F. T. S. Análise das tensões aplicadas nos ensaios de deformação permanente de solos e britas para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos. 33º ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Balneário Camboriú, Santa Catarina, 2019.

LIMA, C. D. A. Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2020.

PASCOAL, P. T. Deformabilidade de subleitos de trechos monitorados da BR 116/RS considerando variações de umidade em laboratório e campo. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2024.

RAZOUKI, S.S., IBRAHIM, A. N. Improving the resilient modulus of a gypsum sand roadbed soil by increased compaction, *International Journal of Pavement Engineering*, 2017.

SANTOS, T. A.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B.; CERATTI, J. A. P.; BRITO, L. A. T., Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. *Transportes (Rio de Janeiro)*, 27 (1), 48-64, 2019.

SANTOS, T. A. dos. A influência da sucção na deformabilidade de subleitos rodoviários: efeitos da variação de umidade, método de compactação e gênese dos solos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2020.

SOUZA, E. B. Influência da Umidade no Módulo de Resiliência do Subleito de Trecho Experimental da BR-116/RS comparando amostras indeformadas e variações de umidade pós-compactação. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Maria.

VESTENA, P. M. Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAFlex, HIMA e 55/75-E (SBS): caracterização avançada e monitoramento. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Pavement design for unbound granular materials. *Journal of Transportation Engineering*, 130, No. 5, 665- 674, 2003.

YODER, E. J., WITCZAK, M. W. *Principles of Pavement Design*. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 711p., 1975.