



INFLUÊNCIA DA UMIDADE SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS CARACTERÍSTICOS DE SUBLEITOS FERROVIÁRIOS

Fábio da Silva Martino Fonte

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador(es): Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Rio de Janeiro

Março de 2022

INFLUÊNCIA DA UMIDADE SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
SOLOS TROPICAIS CARACTERÍSTICOS DE SUBLEITOS FERROVIÁRIOS

Fábio da Silva Martino Fonte

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva, D. Sc.

Aprovado por: Prof. Marcelino Aurelio Vieira da Silva, D. Sc.

Prof. Hostilio Xavier Ratton Neto, D. Sc.

Prof^a. Sandra Oda, D. Sc.

Prof. Filipe Almeida Corrêa do Nascimento, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2022

Fonte, Fábio da Silva Martino

Influência da umidade sobre o comportamento mecânico de solos tropicais característicos de subleitos ferroviários / Fábio da Silva Martino Fonte. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XXII, 129 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 103-109.

1. Infraestrutura ferroviária. 2. Solos tropicais. 3. Teor de umidade. 4. Comportamento mecânico. I. Silva, Marcelino Aurelio Vieira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela sabedoria e saúde em todos os dias da minha vida.

À minha mãe, Dalvani, meus irmãos, Daiane e Paulo Henrique, além do restante da família pelo apoio e incentivo aos estudos.

Aos meus amigos e padrinhos, Alessandro, Beth e família por terem me dado apoio emocional, espiritual, atenção e carinho, no período de estadia em Goiânia.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelino Aurelio, que me ajudou com as suas precisas e incisivas pontuações, análise do banco de dados e disciplinas no decorrer do mestrado.

À equipe do LESFER/COPPE que compartilharam os seus conhecimentos, experiências, atenção e sorrisos, destacando a amizade realizada. Em especial, Marina Donato, Bruno Guida, Filipe Ribeiro, Marcus Cardoso, Filipe Nascimento.

Aos meus colegas da Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos - CMTC, em destaque: Simone Soares, Jander Filho, Rafael Oliveira e Lucas Queiroz, por terem me aguentando durante o tempo de trabalho, brincadeiras, risos e apoio nos estudos.

Aproveito para também para agradecer a empresa ELGAYER e o IME, na pessoa do Prof. Dr. Antônio Guimarães e Gabriel Nascimento, pelo acesso ao software SysTrain.

A CAPES, por ter me concedido uma bolsa de estudos sem a qual minha formação não seria possível. E a todos os que contribuíram indiretamente na minha formação e para a realização dessa dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INFLUÊNCIA DA UMIDADE SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS CARACTERÍSTICOS DE SUBLEITOS FERROVIÁRIOS

Fábio da Silva Martino Fonte

Março/2022

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Programa: Engenharia de Transportes

Um dos principais problemas enfrentados pelos gestores de infraestrutura ferroviária é a variação da umidade no subleito, característico de alguns solos tropicais e ocasionado pela falta de drenagem no pavimento. Diante disso, o principal objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico dos solos tropicais característicos de subleito ferroviário, sob a ótica da variação da umidade e o uso da simulação numérica de tensão e deflexão aplicáveis no dimensionamento da infraestrutura ferroviária. Foram realizados uma série de ensaios laboratoriais e de modelagem computacional, dentre estes ensaios, destaca-se a caracterização e classificação dos solos tropicais mediante a metodologia MCT - (Mini, Compactado e Tropical), ensaio triaxial de cargas repetidas sobre a umidade ótima, seca e saturada, e também foi analisado seu comportamento das tensões-deflexão com o *software* SysTrain. Foram realizadas 51 amostras de solos de subleito retiradas de um dos principais trechos ferroviários brasileiro, que possui grande movimentação de minério e *commodities*, ligando os estados de São Paulo e Minas Gerais. Com base nos resultados, verificou-se que o comportamento mecânico dos solos lateríticos não foram tão superiores aos dos solos não lateríticos frente a variação da umidade, mesmo assim, o M_R no ramo seco ($W_{ot} - 2\%$) apresentou melhores resultados em ambos os solos. Um outro ponto visto neste estudo, foram as várias amostras que não obtiveram admissibilidade de tensão vertical no topo do subleito, além de valores preocupantes quanto ao número do ciclo de cargas “N”, podendo assim impactar diretamente na resistência da infraestrutura ferroviária.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INFLUENCE OF MOISTURE ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF TROPICAL SOILS CHARACTERISTIC OF RAILWAY SUBGRADE

Fábio da Silva Martino Fonte

March/2022

Advisor: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Department: Transportation Engineering

One of the main problems faced by railway infrastructure managers is the variation of moisture in the subgrade, characteristic of some tropical soils and caused by the lack of drainage in the sidewalk. In view of this, the main objective of this work is to evaluate the mechanical behavior of tropical soils characteristic of railway subgrade, from the perspective of moisture variation and the use of numerical simulation of stress and deflection applicable in the design of railway infrastructure. A series of laboratory tests and computational modeling were performed, among these tests, the characterization and classification of tropical soils by means of the MCT - (Mini, Compacted and Tropical) methodology, triaxial test of repeated loads on the optimum moisture, dry and saturated, and their stress-deflection behavior was also analyzed with the SysTrain software. A total of 51 subgrade soil samples were taken from one of the main railway stretches in Brazil, which has great movement of ore and commodities, connecting the states of São Paulo and Minas Gerais. Based on the results, it was found that the mechanical behavior of laterite soils were not so superior to non-laterite soils facing moisture variation, even so, the MR in the dry branch (Wot -2%) showed better results in both soils. Another point seen in this study were the several samples that did not obtain admissibility of vertical tension at the top of the subgrade, in addition to worrying values regarding the number of cycle loads "N", and thus may directly impact the strength of the railway infrastructure.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Considerações iniciais.....	1
1.2.	Objetivos da pesquisa	2
1.3.	Justificativa	3
1.4.	Estrutura da dissertação	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	Infraestrutura e superestrutura ferroviária	4
2.2.	Influência da umidade no pavimento ferroviário.....	6
2.3.	Solos tropicais.....	10
2.3.1.	Classificação dos solos	12
2.3.2.	Principais impactos causados pela umidade no pavimento	15
2.4.	Módulo de Resiliência dos Solos.....	19
2.5.	Modelagem computacional no pavimento ferroviário.....	22
2.5.1.	SysTrain.....	23
2.5.2.	Estudos e correlações de modelagem computacional na literatura.....	30
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1.	Local do estudo	32
3.1.1.	Clima, hidrogeológico e pedologia.....	33
3.2.	Programa experimental	36
3.3.	Ensaio em laboratório.....	40
3.3.1.	Ensaio de Caracterização, compactação e MCT	41
3.3.2.	Triaxial de cargas repetidas	41
3.4.	Modelagem computacional com o SysTrain.....	45
3.4.1.	Dados de entrada.....	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1.	Resultados dos ensaios de caracterização dos solos.....	48
4.2.	Classificação MCT das amostras	53
4.3.	Coeficientes resultantes do ensaio triaxial de cargas repetidas	56
4.4.	Modelagem computacional.....	60
4.5.	Deflexão total do pavimento.....	71
4.6.	Tensão verticais no topo do subleito.....	75

4.7.	Número de ciclo de carga simulado “N Calc”	86
4.8.	Correlação dos resultados com outras literaturas.....	97
5.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	99
5.1.	Conclusões	100
5.2.	Recomendações futuras	101
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
7.	ANEXOS.....	110
7.1.	Anexo 1: Arquivos do software SysTrain – Relatório e Simulação	110
7.2.	Anexo 2: Arquivos do software SysTrain – Visualização 3D do pavimento	111
7.2.1.	Cenário I	112
7.2.2.	Cenário II	113
7.2.3.	Cenário III.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema ilustrativo da infraestrutura e superestrutura (Adaptado de SELIG e WATER, 1994).....	5
Figura 2.2 – Número de ciclos relativo ao carregamento consecutivo e carregamento intermitente de 1000 s: (a) $W_{opt} = 11,8\%$, $\sigma_3 = 60$ kPa, CSR = 2,0; (b) $W_{sat} = 19,75\%$, $\sigma_3 = 60$ kPa, CSR = 1,0 (CHEN et al., 2021).....	8
Figura 2.3 - Camada dos solos em regiões tropicais (NOGAMI e VILLIBOR, 1995)..	10
Figura 2.4 – Fotografia de microscopia eletrônica de um solo laterítico (NOGAMI e VILLIBOR, (1995).....	11
Figura 2.5 – Fotografia de microscopia eletrônica de um solo saprolítico (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).....	11
Figura 2.6 – Localização dos solos arenosos e argilosos no Brasil (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).	12
Figura 2.7 - Medição do nível de intrusão de partículas finas do solo do subleito na amostra de lastro (Koohmishi & Azarhoosh, 2020).....	16
Figura 2.8 - Resultado de varredura do radar de penetração do solo e mapa de interface de bombeamento de finos para seção de k25+200 ao longo da linha Neiwan – Taiwan. (Adaptado de KUO et al., 2017).....	18
Figura 2.9 - Efeito potencial da água acumulada em um lado da ferrovia, (a) representação esquemática em 3D, (b) irregularidades da via férrea induzidos por umedecimento e secagem de solos que contrai e expande, (c) assentamento lateral dos materiais do pavimento (Adaptado de SÁNCHEZ et al., 2014).	19
Figura 2.10 - Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas, (a) equipamento triaxial de carga repetidas (b) Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio triaxial cíclico. Adaptado de BERNUCCI et al. (2008).	21
Figura 2.11 - (a) pavimento ferroviário e (b) MEF do pavimento (Adaptado de PROFILLIDIS, 2014).....	23
Figura 2.12 - Estrutura do SysTrain (Adaptado de SILVA FILHO, 2018).....	24
Figura 2.13 - Interface dos resultados do SysTrain.....	25
Figura 2.14 - Fluxograma simplificado do procedimento de cálculo pelo MEF que consta do SysTrain	28

Figura 3.1- Trecho do local de estudo e a localização dos pontos de investigação na FCA.	33
Figura 3.2- Precipitação x Temperatura - INMET – Estação Valinhos-SP.	34
Figura 3.3 - Precipitação x Temperatura - INMET – Estação Uberaba-MG.	34
Figura 3.4 - Mapa Hidrogeológico do trecho estudado.	35
Figura 3.5 - Mapa pedológico do trecho estudado.	36
Figura 3.6 - Programa experimental elaborado para este estudo.	37
Figura 3.7 - Terceira fase do programa experimental.	40
Figura 4.1 - Gráfico da classificação MCT	55
Figura 4.2 – Massa específica aparente seca x umidade ótima	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Ensaio da Sistemática MCT - (VILLIBOR e ALVES, 2019)	14
Tabela 2.2 - Modelos de comportamento resiliente no ensaio triaxial de cargas repetidas	22
Tabela 2.3 - Critério de deflexão no pavimento	29
Tabela 2.4 - Número de ciclos de cargas "N" em grupos da RFFSA (Stopatto, 1987)..	29
Tabela 3.1 - Sequência de Tensões para fase de condicionamento – DNIT 134-2010 ..	42
Tabela 3.2 - Sequência dos pares de tensões para obtenção do M_R - DNIT 134 -2010.	43
Tabela 3.3 - Modelos de comportamento resiliente em ensaios triaxiais de cargas repetidas.....	44
Tabela 3.4 - Dados geométricos do trilho TR-68	45
Tabela 3.5 - Dados geométricos do dormente de concreto.....	46
Tabela 3.6 - Dados geométricos do lastro	46
Tabela 3.7 - Detalhes do carregamento no SysTrain (Vagões/Composição/Posicionamento).....	47
Tabela 4.1 - Resultado do ensaio de granulometria, compactação, limites de Atterberg e classificação (Continua)	49
Tabela 4.2 – Parâmetros de regressão do Triaxial de Cargas Repetidas - W_{ot} , $W_{ot} -2\%$ e $W_{ot} +2\%$ - Solos Lateríticos	57
Tabela 4.3 - Coeficientes do Triaxial de Cargas Repetidas - W_{ot} , $W_{ot} -2\%$ e $W_{ot} +2\%$ - Solos Não Lateríticos	58
Tabela 4.4 - Resultados do SysTrain - Solos Lateríticos - Cenário I	61
Tabela 4.5 - Resultados do SysTrain - Solos Não Lateríticos - Cenário I.....	62
Tabela 4.6 - Resultados do SysTrain - Solos Lateríticos - Cenário II.....	64
Tabela 4.7 - Resultados do SysTrain - Solos Não Lateríticos - Cenário II	65
Tabela 4.8 - Resultados do SysTrain - Solos Lateríticos - Cenário III.....	67
Tabela 4.9 - Resultados do SysTrain - Solos Não Lateríticos - Cenário III	68
Tabela 4.10 - Resultados da deflexão total do pavimento - Solos Lateríticos.....	72
Tabela 4.11- Resultados da deflexão total do pavimento - Solos Não Lateríticos.....	73
Tabela 4.12 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Lateríticos - Cenário I.....	76

Tabela 4.13 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Não Lateríticos - Cenário I	77
Tabela 4.14 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Lateríticos - Cenário II.....	79
Tabela 4.15 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Não Lateríticos - Cenário II.....	80
Tabela 4.16 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Lateríticos - Cenário III	82
Tabela 4.17 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Não Lateríticos – Cenário III.....	83
Tabela 4.18 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Lateríticos - Cenário I.....	87
Tabela 4.19 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Não Lateríticos – Cenário I.....	88
Tabela 4.20 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Lateríticos – Cenário II	90
Tabela 4.21 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Não Lateríticos - Cenário II.....	91
Tabela 4.22 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Lateríticos – Cenário III	93
Tabela 4.23 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Não Lateríticos - Cenário III.....	94
Tabela 4.24 - Resumo das tensões verticais total no pavimento – Literatura Nacional .	97
Tabela 4.25 - Resumo das tensões verticais máxima - SysTrain.	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CSR	Cyclic Stress Ratio
IP	Índice de Plasticidade
k1, k2 e k3	Coefficientes da regressão do modelo
MEAS	Massa específica aparente seca máxima
MEF	Método dos elementos finitos
M _R	Módulo Resiliente
LA	Laterítico com presença de areia
LA'	Laterítico Arenoso
LG'	Laterítico Argiloso
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
N	Número de ciclo de cargas
NA	Não Laterítico com presença de areia
NA'	Não Laterítico arenoso
NG'	Não Laterítico Argiloso
NS'	Não Laterítico Siltoso
OMC	Optimum Moisture Content
SAFL	Solo arenoso fino laterítico
W _{ot}	Umidade Ótima
W _{ot} -2%	Ramo Seco
W _{ot} +2%	Ramo Saturado
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
σ_v	Tensão vertical
σ_{adm}	Tensão admissível
ε_r	Deformação específica resiliente axial ou específica
θ_b	Tensão volumétrica
τ_{oct}	Tensão cisalhante octaédrica

P_a	Pressão atmosférica
δ	Deflexão do pavimento
S_{xx}	Tensão confinante - SysTrain
S_{zz}	Tensão vertical – SysTrain

LISTA DE SIGLAS

AREMA	American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
ASSHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CBR	California Bearing Ratio
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FCA	Ferrovias Centro-Atlântica
GRP	Ground Penetrating Radar
HRB	Highway Research Board
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IME	Instituto Militar de Engenharia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISF	Instrução de Serviço Ferroviário
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MRS	MRS Logística S.A.
LESFER	Espaço Tecnológico Professor Amaranato Lopes Pereira
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A.
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UP	Union Pacific
VLI	VLI Logística S.A.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O aumento no transporte de cargas no modo de transporte ferroviário trouxe a relevância no cenário nacional, transportando grandes volumes em longas distância, de modo seguro e econômico demonstrando a importância de investimentos para esta área na matriz brasileira de transporte.

Uma das maiores preocupações para os responsáveis quanto à infraestrutura ferroviária é a variação da umidade no subleito, sendo alguns solos submetidos à absorção da água da chuva e, quando associados com a falta de drenagem, geram impactos diretamente ligados à geometria da via, postergando a redução na velocidade comercial e ganho operacional.

A variação da umidade está ligada aos fatores climáticos, temperatura, lençóis freáticos, inexistência de drenagem ou pela qualidade do solo, visto que poderão influenciar diretamente no módulo de resiliência e deformação permanente do solo, principalmente em solos nos quais existam uma grande concentração de vazios e são preenchidos por ar ou água.

Dentre alguns impactos resultantes da variação da umidade, podemos citar a contaminação do lastro com materiais finos oriundos do subleito. INDRARATNA *et al.* (2011) citam que a contaminação do lastro pode ser originada por materiais finos e é uma das principais razões para a deterioração da geometria da via. A falta de drenagem pode comprometer a qualidade geométrica da via, levando a perda de instabilidade, restrição de velocidade e desgastes nos componentes da via permanente.

Para STOPATTO (1987), a falta de drenagem é evidenciada com a aparição de bolsões de lama na superfície da via, pois, mesmo após as renovações é possível observar, pouco tempo depois, como a ação das chamadas bolsas de lama começa a contaminar o lastro, desnivelando a linha.

Nota-se, assim, a fundamental importância de analisar o número de ciclos das cargas e verificar as tensões-deformações dos solos mediante ao uso da modelagem computacional. A maioria das modelagens possui como linguagem o método de elementos finitos (MEF), proporcionado dados intuitivos, de fácil leitura e praticidade

no manuseio dos dados, na literatura nacional destacam-se os *softwares* Ferrovia 3.0 e o SysTrain.

Optou-se pela utilização do *software* SysTrain neste estudo, devido ao seu acesso livre, com o download no site da empresa Elgayer, visto que possui uma interface amigável, banco de dados com definições técnicas de alguns materiais, além de apresentar resultados de fácil leitura. Com isto, a modelagem computacional torna-se viável para analisar as reações da estrutura sob diferentes tipos de geometria, materiais e carregamento.

Mediante a isto, este estudo traz como relevante a análise de diferentes tipos de variações da umidade em solos tropicais, além de verificar a admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito, as tensões-deformações e o número de ciclos de cargas “N” em três diferentes tipos de estruturas de pavimentos, sendo estas detalhadas na metodologia desta dissertação.

1.2. Objetivos da pesquisa

O trabalho possui como objetivo principal em avaliar o comportamento mecânico dos solos tropicais característicos de subleito ferroviário, sob a ótica da variação da umidade e o uso da simulação numérica de tensão e deflexão aplicáveis no dimensionamento da infraestrutura ferroviária

Perante o objetivo principal, escolheu-se as seguintes hipóteses para que fossem formadas as etapas deste trabalho, sendo elas: caracterização dos solos tropicais (Lateríticos e Não Lateríticos) de um subleito ferroviário; avaliar o impacto da variação da umidade em solos tropicais classificados como lateríticos e não lateríticos, verificando se existe perturbação nos resultados do Módulo de Resiliência (M_R) em diferentes condições de umidade (saturada, ótima e após secagem); explorar os possíveis comportamentos desta variação da umidade nos solos tropicais no pavimento ferroviário; analisar as tensões-deslocamentos que atuam nos solos tropicais por meio da modelagem computacional e os efeitos das variações da umidade em diferentes tipos de estrutura de pavimentos; por fim, contribuir com as futuras pesquisas de alta relevância na seleção de solos tropicais após a verificação da admissibilidade da tensão-

deformação e do número de ciclo de cargas “N”, sendo um dos requisitos para seleção dos materiais no dimensionamento do pavimento ferroviário.

1.3. Justificativa

Uma das maiores preocupações de gestores em infraestrutura ferroviária tem sido as restrições de velocidades operacionais da via sendo ocasionadas pela piora da péssima qualidade geométrica da via, podendo resultar em acidentes com grandes proporções, perdas operacionais e financeiras. Um dos possíveis fatores ligados à qualidade da geometria da via é a resistência do solo que, quando submetido às variações da umidade, pode impactar diretamente no M_R (LAMAS-LOPEZ, 2016; SU *et al.*, 2021). INDRARATNA *et al.* (2020) comentam sobre a fragilidade das camadas do pavimento ferroviário quanto ao teor de umidade, além do fato de que estejam ligadas ao aumento contínuo da passagem dos trens.

Outra motivação foi estudar o comportamento dos solos das regiões tropicais frente à variação da umidade, visto que possuem características diferentes quando comparados com os solos de regiões de clima temperado ou frio (GUIMARÃES *et al.*, 2018; FREITAS *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021). O solo tropical tem como uma de suas características a presença do clima úmido, visto que, reúne as condições de abundância de água e altas temperaturas ao longo do ano, apresentando perfis de solo mais desenvolvidos em termos de diferenciação em horizontes, sendo mais intemperizados e lixiviados quando comparados com os solos de regiões de clima frio e temperado (Coelho, 2016).

Por fim, os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais realizados nesta dissertação e a modelagem computacional podem servir para a compreensão do efeito da variação da umidade no comportamento mecânico dos solos tropicais característicos de subleito ferroviário.

1.4. Estrutura da dissertação

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

Capítulo 01: o capítulo de introdução aborda a influência da umidade no pavimento. Em seguida, são evidenciados o objetivo do trabalho, a justificativa e a estrutura da dissertação.

Capítulo 02: revisão bibliográfica dos trabalhos que destacam a influência da umidade no pavimento ferroviário, as características dos solos tropicais e as possíveis causas que a umidade pode ocasionar.

Capítulo 03: dedicado a detalhar a etapas realizadas e os procedimentos metodologia aplicados para a realização dos ensaios nos laboratórios e por modelagem computacional.

Capítulo 04: são apresentados os resultados dos ensaios previstos no programa experimental. Neste capítulo, constam os possíveis resultados de tensão-deformação dos solos tropicais mediante a modelagem computacional e sua admissibilidade com normas técnicas, além do cálculo de número de ciclos de cargas do pavimento frente à variação da umidade e em três cenários distintos.

Capítulo 05: são detalhadas as conclusões dos principais resultados, relatadas as principais críticas do trabalho e recomendações para investigações futuras sobre o tema.

Por fim, são citadas as referências bibliográficas e anexados os arquivos do *software* SysTrain no formato de *QR Code* ou em Link direcionado à pasta no Google Drive, com arquivos acessíveis pelo *software* SysTrain. Ademais, são evidenciadas todas as informações para facilidade de acesso, bem como demonstradas as visualizações em 3D das simulações realizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Infraestrutura e superestrutura ferroviária

Na literatura ferroviária, os termos “Infraestrutura e superestrutura” é bastante discutido quanto a sua composição, sendo mais comum na infraestrutura os componentes abaixo da base dos dormentes (SELIG e WATERS, 1994; INDRARATNA *et al.*, 2011).

A superestrutura ferroviária é composta pelos trilhos, dormentes, acessórios. Fixações, lastro, e, eventualmente o sublastro. A infraestrutura ferroviária se compõe da

camada de final de terraplenagem e as obras de terra a ela subjacentes (corpo dos aterros ou plataforma acabada dos cortes). Creio que o mais adequado seria descrever a superestrutura ferroviária constituída da grade (trilhos, dormentes, acessórios e fixações) e seria admissível que lastro e sublastro fossem chamados de pavimento ferroviário. O termo subleito não é ferroviário, mas pode ser admitido como infraestrutura desse pavimento (sem caracterização de rodoviário ou ferroviário), como visto na figura 2.1.

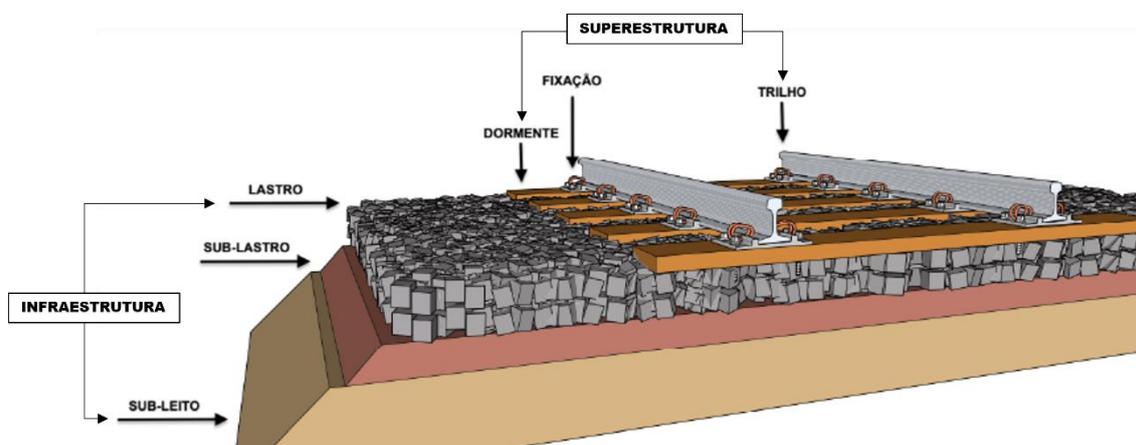


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo da infraestrutura e superestrutura (Adaptado de SELIG e WATER, 1994).

O pavimento ferroviário compara-se ao pavimento tradicional rodoviário porque ambos são estruturas em camadas que se apoiam no solo de fundação e se destinam a distribuir a carga dos veículos (Spada, 2003). O autor diferencia o pavimento ferroviário de outros pavimentos como a camada de revestimento que, no rodoviário, está sempre em contato com a camada subjacente, já o mesmo não ocorre no pavimento ferroviário. Outra distinção entre os pavimentos está no fato de que na ferrovia existe uma única trilha para o veículo enquanto na rodovia a trilha de passagem do veículo é variável.

De acordo com MUNIZ DA SILVA (2002), o sistema de pavimento ferroviário se destina a receber adequadamente as cargas oriundas das passagens dos trens, ao qual, as solicitações devem ser não só resistidas no sentido de não haver ruptura global ou localizada, mas também de manter as deformações em um nível conveniente.

Quanto à resposta das propagações de tensões nas camadas da infraestrutura, conforme SELIG e WATERS (1994) a influência das tensões induzidas pelas cargas de tráfego podem propagar-se a uma profundidade de até cinco metros abaixo dos

dormentes. Os autores alegam que a resiliência do subleito influencia decisivamente a velocidade de deterioração do lastro, dormente e trilho, sendo a principal fonte de recalque diferencial da via.

Uma outra questão relativa à resiliência do solo seria a rigidez do material a ser empregado no pavimento. Para MAZARI *et al.* (2014), existem dois tipos de materiais sendo do tipo granular e fina. O primeiro geralmente exibe um comportamento de endurecimento por tensão à medida que sua rigidez aumenta com a elevação da tensão. Os solos de granulação fina, geralmente, apresentam uma diminuição do módulo com o aumento da tensão, pois são definidos com a tensão-amolecimento.

Para LIU *et al.* (2016), as propriedades do solo do subleito, como densidade seca, teor de umidade, graduação e forma das partículas do solo, teor de finos e estado de tensão, têm um grau relativamente alto de impacto no comportamento resiliente.

2.2. Influência da umidade no pavimento ferroviário

Na revisão bibliométrica, constatou-se a preocupação quanto à influência da umidade no M_R do subleito. Dentre eles podemos destacar (CHEN *et al.*, 2020; GALLAGE *et al.*, 2016; MAZARI *et al.*, 2014; SU *et al.*, 2021). Tais autores realizaram ensaios geotécnicos para avaliar o comportamento da umidade em solos das suas regiões, de clima temperado ou frio, não abrangendo solos de regiões tropicais.

CHEN *et al.* (2020) abordaram o comportamento mecânico dos materiais granulares com alto teor de finos em relação à variação do teor de umidade, sendo realizados ensaios cíclicos e determinado o número de ciclos razoável para se chegar a um valor estável para o M_R estabilizado. Os resultados indicaram que o valor do M_R inicialmente é reduzido com o aumento do número de ciclos de cargas e, depois, aumenta gradualmente em função da quantidade do teor de umidade no corpo de prova.

GALLAGE *et al.* (2016) analisaram o efeito do teor da umidade no subleito ferroviário. Os autores alegam que umidade é influenciada pela infiltração, variação sazonal do lençol freático e mudanças climáticas. Diante disso, os resultados da pesquisa demonstraram que a presença de água na amostra com areia afeta significativamente a deformação plástica cíclica do subleito das vias férreas. A variação do teor de água do subleito combinada com a rotação do eixo de tensão principal

aumenta ainda mais o acúmulo da deformação plástica cíclica do subleito sob cargas de rodas em movimento.

MAZARI *et al.* (2014) realizaram ensaios com material de solo granular fino em três diferentes teores de umidade (OMC, 120 % OMC e 80 % OMC) e compactados com o método de energia constante. A redução do M_R realizada no laboratório demonstrou a influência do teor de umidade em solos de granulação fina. Destaca-se que o solo SC (Areia argilosa) teve a maior redução de 119 MPa (OMC) para 28 MPa (1,2 OMC%), ou seja, 76,5 de redução.

SU *et al.* (2021) relatam que, sob o efeito da chuva/evaporação, o teor de água na camada do solo pode afetar as propriedades dinâmicas como M_R e a razão de amortecimento. Os autores constataram que a graduação dos grãos e o teor de umidade, podem diminuir o valor de M_R .

Em contrapartida, CHEN *et al.* (2021) realizaram alguns ensaios triaxiais dinâmico e, após um grande número de aplicações de carga, foi verificado um aumento no M_R com a elevação do teor de umidade. Foram estudadas as variações do módulo de resiliência com ciclos de carregamento (intermitente e consecutivo), amplitudes dinâmicas de tensão e o teor de umidade. Uma crítica referente a este estudo partindo do pressuposto de que a comparação dos resultados fosse realizada com o mesmo valor de taxa de tensão cíclica (*Cyclic Stress Ratio* - CSR). Neste caso, não foi visto isto, pois os autores aplicaram valores para umidade ótima (W_{opt}) um CSR de 2,0, enquanto na umidade saturada (W_{sat}) o valor de CSR foi 1,0. A figura 2.2 exibe os resultados obtidos por cargas intermitentes e consecutivas no triaxial de cargas repetidas, sendo apresentados realizados na umidade ótima e saturada.

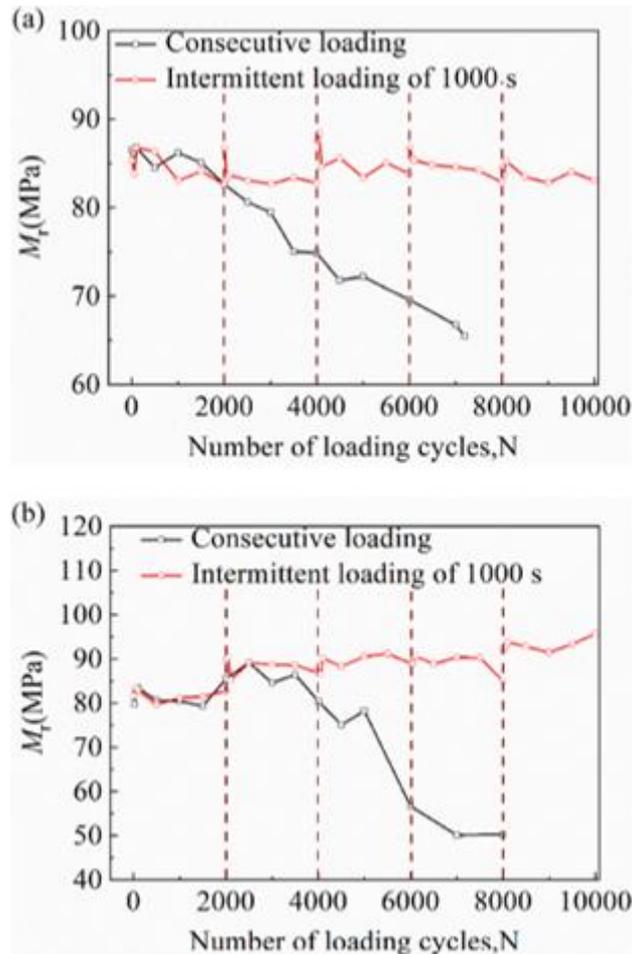


Figura 2.2 – Número de ciclos relativo ao carregamento consecutivo e carregamento intermitente de 1000 s: (a) $W_{opt} = 11,8\%$, $\sigma_3 = 60$ kPa, $CSR = 2,0$; (b) $W_{sat} = 19,75\%$, $\sigma_3 = 60$ kPa, $CSR = 1,0$ (CHEN *et al.*, 2021)

A sucção dos solos tem um papel muito importante durante a variação da umidade. No estudo apresentado por HASNAYN *et al.* (2017), foi mostrado que o comportamento do subleito é influenciado por mudanças no teor de água e quando associado com a sucção do solo particularmente quando molhado a partir de um estado seco, além de verificar que a compactação é menos eficaz na presença de solo de subleito úmido de baixa rigidez.

SCHULZ-POBLETE *et al.* (2019) utilizaram caixa-teste de materiais de subleito e sublastro em diferentes teores de umidade com o intuito de demonstrar o comportamento de sucção de dois materiais, um para o subleito e outro para sublastro. Os autores destacam que quando um solo está saturado todos os poros são preenchidos com água, isso leva a um comportamento bastante previsível em termos de um estresse

bem quantificado. Quando o solo seca, a água sai dos poros começando pelos poros sucessivamente menores à medida que a secagem continua. Os solos não saturados têm melhor resistência ao cisalhamento que suas contrapartes saturadas.

Na busca por informações na literatura nacional sobre a influência da umidade em solos tropicais impactando diretamente no comportamento mecânico do subleito ferroviário, encontram-se os estudos de (CRUZ 2019; MENEZES, 2018; TAKEDA, 2006; VARGAS, 2020). A infiltração da água no pavimento é oriunda de diversos fatores, entre um deles a precipitação de chuvas como um dos mais recorrente em regiões tropicais, que, quando associada à falta de drenagem tem se mostrado preocupante para a instabilidade de qualquer pavimento.

Para CRUZ (2019), nos países do hemisfério norte essa preocupação é comum em razão do clima temperado e frio. No entanto, no Brasil existe também a mesma preocupação em relação ao clima, visto que por se tratar de uma região tropical, a umidade e o tipo de solo influenciam no M_R .

MENEZES (2018) relata que a deterioração da plataforma ferroviária devido às ações ambientais é causada por mudanças de pressão da água dos poros e forças de infiltração pelas quais diferentes mecanismos hidráulicos podem ser responsáveis, principalmente relacionados com a perda de sucção do solo. Também aborda o impacto das precipitações de chuva, podendo influenciar no comportamento mecânico dos solos, uma vez que ocasiona a variação de umidade e, por conseguinte, afeta sua resiliência, bem como seu M_R .

De acordo com TAKEDA (2006), a variação da umidade na infraestrutura ferroviária é decorrente das condições ambientais sazonais, tais como a infiltração da precipitação pelos poros do lastro e sublastro, bem como a oscilação do lençol freático e gradiente de temperatura, que promove a movimentação de água na camada na forma de vapor.

VARGAS (2020) ressalta que os elevados teores de umidade de equilíbrio das camadas do pavimento e a ausência do correto sistema de drenagem, eventualmente durante épocas de chuvas, podem favorecer uma saturação parcial ou total das camadas em alguns dias durante o ano, fazendo necessário estudar e entender melhor o comportamento dos solos não saturados e sua influência na estrutura do pavimento.

2.3. Solos tropicais

A nomenclatura dos solos tropicais está voltada para as localizações abrangentes entre os trópicos de câncer e de capricórnio. Este tipo de solo pode ser encontrado em boa parte do continente Africano e da América do Sul, além de alguns países como o México, Índia, Austrália, Indonésia e algumas ilhas dos oceanos Pacífico, Atlântico e Índico.

NOGAMI e VILLIBOR (1981) destacam as diferenças de propriedades geotécnicas entre os vários tipos de solos que ocorrem nas regiões tropicais, em especial os solos lateríticos e os solos saprolíticos, além das condições climáticas a que estão submetidos, conforme Figura 2.3 a seguir.



Figura 2.3 - Camada dos solos em regiões tropicais (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Segundo CAMPOS (2019), para que o solo possa ser considerado como tropical, deve-se apresentar as características e peculiaridades geotécnicas atribuídas ao processo de formação, e não estar apenas localizado nas regiões intertropicais.

Os solos lateríticos possuem composição mineralógica de frações de areia, fina e grossa, constituídas geralmente por quartzo, sendo a porcentagem dessa fração responsável pela ocorrência de solos, desde arenosos até argilosos. Possuem aspecto uniforme, uma estrutura porosa e colorações típicas em razão dos óxidos presentes, como vermelho, amarelo, marrom e alaranjado (VILLIBOR e ALVES, 2019). Este tipo de solo tem aspecto de “pipoca”, conforme Figura 2.4.



Figura 2.4 – Fotografia de microscopia eletrônica de um solo laterítico (NOGAMI e VILLIBOR, (1995).

Quanto aos solos saprolíticos, são resultados da desagregação/decomposição *in situ* da rocha matriz, mantendo a estrutura herdada. Este tipo de solo apresenta uma microestrutura com uma constituição mineralógica muito variada, com argilo-minerais individualizados de coloração cinzenta ou esbranquiçada, além de ser constituída com a presença de silte e areia. Na Figura 2.5 são apresentadas microscopicamente sua estrutura.

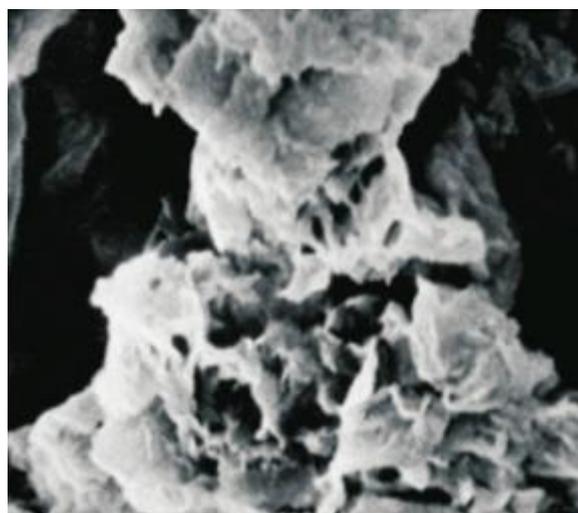


Figura 2.5 – Fotografia de microscopia eletrônica de um solo saprolítico (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Conforme BERNUCCI *et al.* (2008) e VILLIBOR e ALVES (2019), os solos finos lateríticos têm uma granulometria passante 100% na peneira de 2,0 mm. Já os solos lateríticos que passam < 50% na peneira 2,0 mm, denominados como lateritas, têm sido utilizados como camada de base para pavimentação de estradas no Brasil, pois não há possibilidade de atender às normas tradicionais.

Na Figura 2.6, observa-se a predominância dos solos argilosos de comportamento laterítico no território brasileiro. Vale destacar que os solos argilosos são característicos de solos finos ou com mais de 50% passando na peneira de nº 200. Trata-se de um tipo de solo pouco permeável, ou seja, que tende a reter mais água em sua estrutura e está mais suscetível à instabilidade e deslizamento (Bento, 2006).

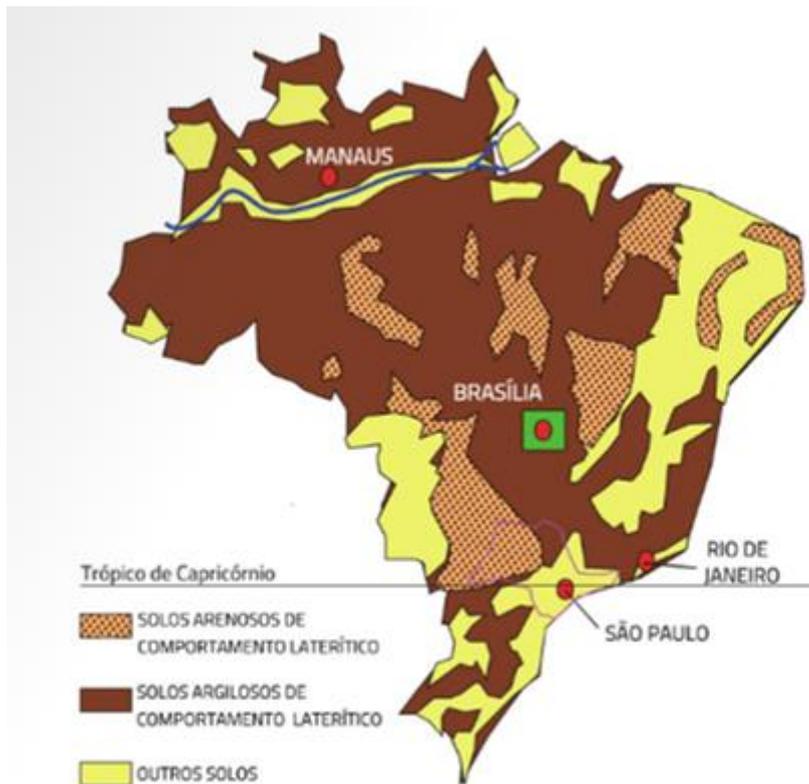


Figura 2.6 – Localização dos solos arenosos e argilosos no Brasil (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

2.3.1. Classificação dos solos

Muitas normas, ensaios e especificações são idênticas entre a infraestrutura rodoviária e ferroviária. SILVA-FILHO (2018) ressalva que os critérios para a

infraestrutura férrea advêm das técnicas e premissas contidas nos manuais do DNIT para projetos rodoviários, tais como granulometria, limites físicos, índice de grupos etc.

No Brasil, são utilizadas as classificações de solos tradicionais, importadas de normas americanas, como o *Unified Soil Classification System* – USCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS) desenvolvido por Arthur Casagrande na Universidade de Harvard na década de 40, e o sistema *Highway Research Board* – HRB, este sendo realizado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* - AASHTO. Tais normas utilizam a granulometria e os limites de Atterberg (LL e IP) para realização das classificações.

Com a utilização dos métodos tradicionais oriundos de solos temperados, alguns solos tropicais são rejeitados para a pavimentação, mesmo apresentando um ótimo comportamento mecânico. NOGAMI e VILLIBOR (1981) ressaltam que tais tipos de ensaios não têm sido satisfatórios quando aplicados aos solos tropicais, pois, com a frequência, as recomendações indicadas não coincidem com comportamento dos solos encontrados no Brasil, muito pela diferença existente entre a fração de argila e de areia de regiões tropicais e de regiões temperadas. Em outra publicação, os autores NOGAMI e VILLIBOR (2009) reforçam que, ao adotar as metodologias tradicionais, muitos solos tropicais não atendem aos critérios de especificação, não sendo representativo, muitas vezes, o desempenho mecânico apresentado por esses materiais.

NOGAMI e VILLIBOR (1995) apresentam os fundamentos dos solos tropicais e os ensaios da sistemática MCT (Miniatura, Compactado e Tropical). Cada ensaio da sistemática MCT é detalhado por VILLIBOR e ALVES (2019) na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Ensaio da Sistemática MCT - (VILLIBOR e ALVES, 2019)

Ensaio	Métodos	Associação com as propriedades físicas da camada	Principais aplicações
Compactação Mini-Proctor Mini-MCV	(M1) (M5)	Aumento da massa específica por compactação mecânica (densificação) para melhoria de suas propriedades.	Avaliação da densificação da camada pelo grau de compactação GC. Preparo de corpos de prova para ensaios de laboratório. Determinação de dados para a classificação MCT e G-MCT
Mini-CBR	(M2)	Capacidade de suporte	Dimensionamento de pavimentos.
Expansão		Aumento de volume com o teor de umidade	Seleção de solos para subleito, bases e acostamento.
Contração	(M3)	Contração da camada de solo por perda de umidade ao ar	Seleção de solos para bases e sub-bases.
Infiltrabilidade	(M4)	Velocidade de penetração da frente de umidade e quantidade de água associada à penetração, em solos não saturado.	Seleção de solos para aterros, subleitos, acostamentos e bases.
Permeabilidade		Percolação da água em meio saturado	
Penetração da Imprimadura Betuminosa	(M6)	Espessura e quantidade de material betuminoso penetrado.	Determinação da taxa de betume necessária para proteção da base.
Mini-CBR em campo	(M7)	Capacidade suporte real da camada	Avaliação e controle da capacidade de suporte de bases e subleitos.
Perda de Massa por Imersão	(M8)	Suscetibilidade da perda de massa por imersão de solo compactados	Determinação de dados para classificação MCT e G-MCT Índice para avaliar a necessidade de grama para proteção dos taludes
Método Expedito da Pastilha	(M9)	Contratação e perda de resistência por sucção de água	Determinação de dados para classificação expedita da MCT

2.3.2. Principais impactos causados pela umidade no pavimento

A umidade tem um fator de impacto muito relevante em qualquer tipo de solo, prejudicando diretamente na qualidade da infraestrutura, com uma das possíveis causas sendo o fenômeno chamado de bombeamento de finos oriundos do subleito. INDRARATNA (2011) especifica que o bombeamento do subleito pode ocorrer por três fatores:

- a) Infiltração do subleito carregando partículas sólidas;
- b) Bombeamento hidráulico de lama a partir do atrito com o subleito; e
- c) Bombeamento de finos por meio de trinca e/ou fissuras no subleito.

De acordo com WANG *et al.* (2020), a umidade mostrou-se crucial para a migração de finos, que deu origem ao bombeamento de lama como massa unitária seca mais alta que poderia mitigar o acúmulo por pressão.

KOOHMISHI e AZARHOOSH (2020) investigaram a influência do tipo de subleito (silte e argila) com o nível de compactação, graduação do material do sublastro e distribuição granulométrica do agregado de lastro na realização da filtração do sublastro que funciona como camada filtrante (Figura 2.7). Os autores concluíram que o efeito da graduação do sublastro juntamente com o coeficiente de uniformidade geraram melhorias no desempenho da filtração.

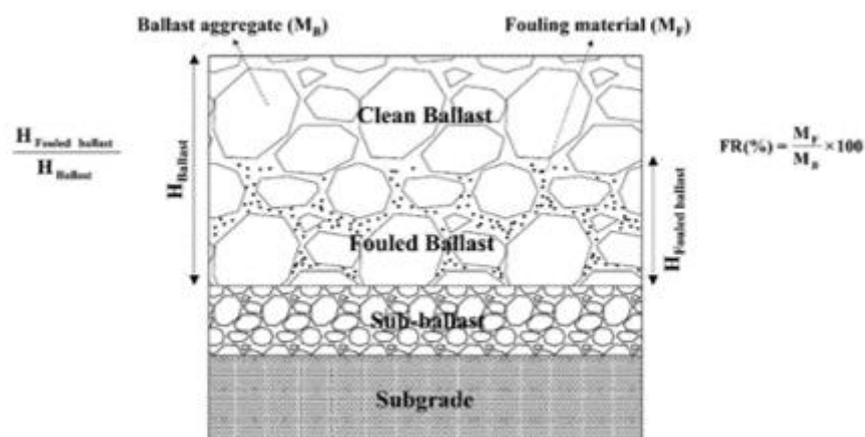


Figura 2.7 - Medição do nível de intrusão de partículas finas do solo do subleito na amostra de lastro (Koohmishi & Azarhoosh, 2020)

INDRARATNA *et al.* (2020) proferem que a cravação e degradação dos materiais da subestrutura podem impedir a capacidade de drenagem livre do lastro. Os autores estudaram a ocorrência de bombeamento de finos do subleito sob carregamento cíclico submetido a uma baixa pressão de confinamento imitando as condições típicas da via.

KUO (2021) relata que as causas para o bombeamento de finos envolvem fatores geotécnicos, graduação do lastro, rigidez da camada do lastro, invasão da água de superfície e águas subterrâneas, erosão hídrica e encharcamento da estrutura do subleito, sistema de drenagem inadequado, velocidade do trem e irregularidades na via.

Para WANG *et al.* (2014), a má qualidade do solo é a principal causa interna de danos para o bombeamento de finos, o solo de granulação grossa é improvável de causar bombeamento, geralmente, o solo de granulação fina permite subir e preservar um certo nível de força e saturação. O autor relata que o solo que experimenta o bombeamento de finos é altamente absorvente de água quando está seco. Após absorver a umidade, o solo torna-se plástico, viscoso, inchado e impermeável, e sua resistência à compressão diminui substancialmente.

NI *et al.* (2007) alegaram que o bombeamento de finos oriundo do subleito é um processo causado pela interação umidade-solo. As partículas finas de argila carregam cargas elétricas, causando troca de íon na água e formando uma camada de difusão ao redor dos solos granulares. Os solos granulares são pequenos e a difusão camada é maior do que a área da superfície. Portanto, a troca iônica da granulação fina de argila incha o solo, facilita a desintegração, reduz a permeabilidade à água e aumenta a

plasticidade. Ao contrário da umidade, a temperatura é uma das causas indiretas e influencia diretamente na mudança do corpo d'água e na migração de partículas finas para as demais camadas.

A movimentação de trens também figura como um dos causadores para o bombeamento de finos. Este tipo de movimento é capaz de produzir tensões horizontais e verticais aplicadas nas camadas do pavimento. De acordo com HUANG *et al.* (2008), o volume de transporte está correlacionado com o crescimento da lama. Com isso, caso este volume exceda um determinado nível de estresse, as ocorrências consecutivas de metamorfismo do contato com solos de tipo argilosos podem piorar com o bombeamento de finos.

A identificação deste tipo de fenômeno é por inspeção visual ou até mesmo por inspeção do carro controle, com dados da geometria da via. Os métodos tradicionais indicariam a realização de uma inspeção visual, mas alguns autores estão apresentando estudos utilizando tecnologias para examinar a integridade estrutural da ferrovia, dentre elas o Radar de Penetração do Solo (*Ground Penetration Radar – GPR*). Este método pode identificar as partes da distribuição do bombeamento de finos que não podem ser vistas a olho nu. De acordo com KUO (2021), o uso do radar de penetração do solo permite identificar a presença de lama no pavimento, demonstrando assim, sinais de péssima qualidade do solo. Por interpretação, a subinterface para sinais fortes e fracos foi usada como a provável interface do bombeamento de finos, como exposto na figura 2.8.

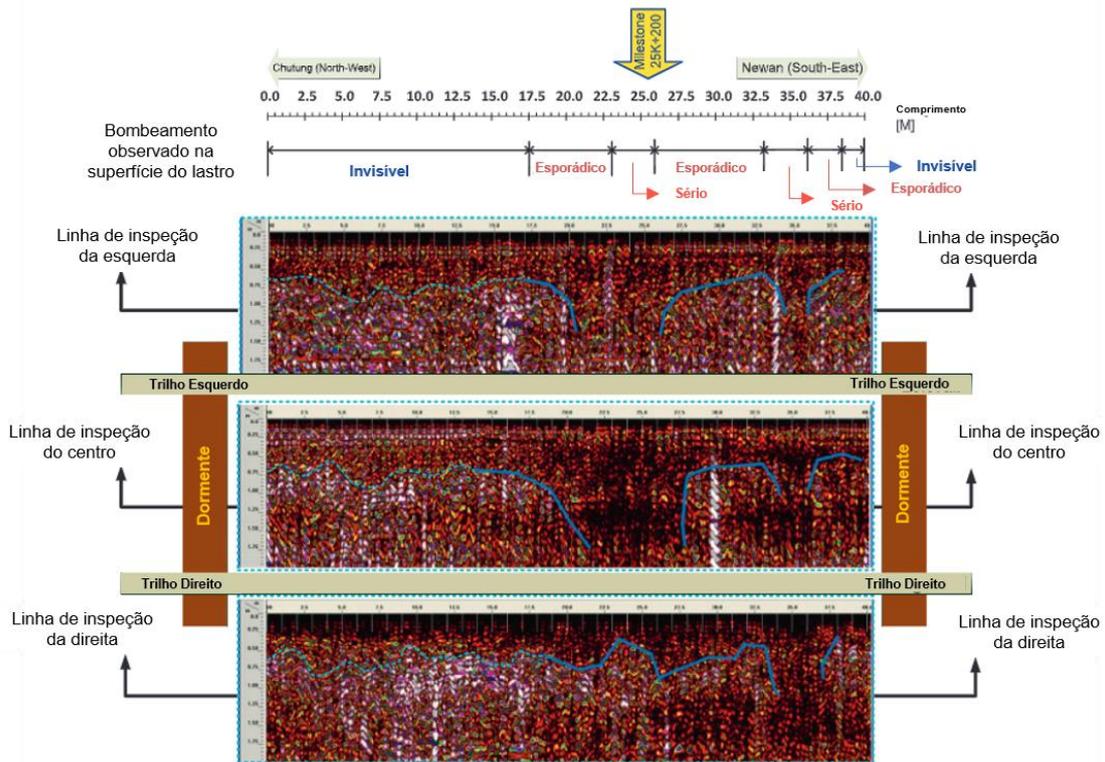


Figura 2.8 - Resultado de varredura do radar de penetração do solo e mapa de interface de bombeamento de finos para seção de k25+200 ao longo da linha Neiwán – Taiwan. (Adaptado de KUO *et al.*, 2017).

A precipitação de chuvas associada com a falta de drenagem no pavimento também pode ocasionar a instabilidade geométrica da via, além da perda de materiais do pavimento. SÁNCHEZ *et al.* (2014) mencionam que a ferrovia atua como uma barreira artificial para o escoamento da água. Apesar do projeto adequado de bueiros e drenos, é bastante comum observar após a chuva intensos empoçamentos de água na lateral do aterro. Esta água acumulada tende a infiltrar no pavimento, molhando os solos naturais e os taludes, induzindo a expansão de um determinado solo. Na outra parte do aterro (onde a água não está acumulada), será exposta à secagem e, portanto, os solos encolherão, e em casos extremos pode ser visto a perda dos materiais do pavimento (Figura 2.9).

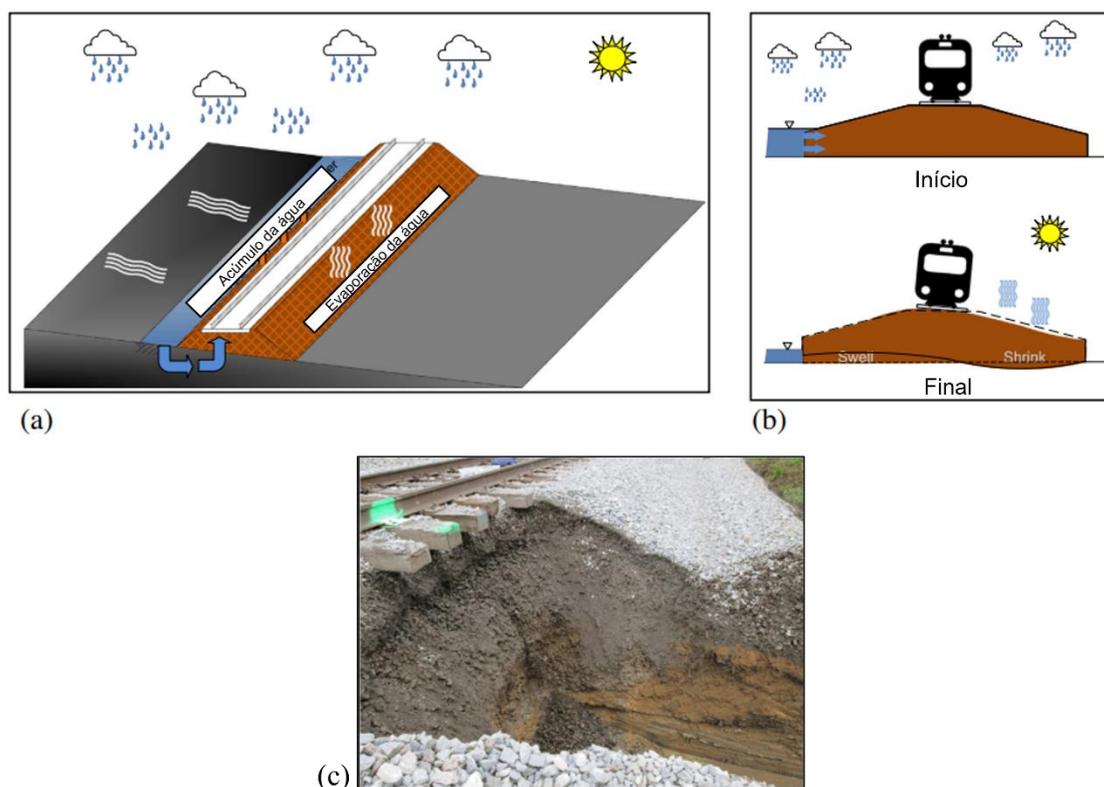


Figura 2.9 - Efeito potencial da água acumulada em um lado da ferrovia, (a) representação esquemática em 3D, (b) irregularidades da via férrea induzidos por umedecimento e secagem de solos que contrai e expande, (c) assentamento lateral dos materiais do pavimento (Adaptado de SÁNCHEZ *et al.*, 2014).

Outra consequência da precipitação de chuvas na infraestrutura ferroviária está em torno da redução de velocidade operacional, causando fortes impactos de perdas nas movimentações de cargas na ferrovia. SÁNCHEZ *et al.* (2014) registraram a velocidade e a precipitação da chuva em um trecho da ferrovia *Union Pacific* (UP) localizada no Texas-EUA. Em dias sem chuva, a velocidade chega a 110 km/h, mas em áreas com registro de chuva a velocidade chegou a 65 km/h, ou seja, uma redução em torno de 42,9%.

2.4. Módulo de Resiliência dos Solos

A deformabilidade dos pavimentos surgiu com estudos do engenheiro FRANCIS HVEEN na década de 1930. O estudo de HVEEN cita que as medidas de deflexões do pavimento submetido ao tráfego de diversos tipos de veículos, por meio da instalação de sensores mecano-eletromagnéticos no próprio pavimento de forma aferir as

deformações máximas verticais. Para MEDINA e MOTTA (2015), HVEEN preferiu usar o termo de “resiliência” em vez de deformação elástica porque as deformações nos pavimentos são muito maiores que as de outros sólidos elásticos, como o concreto ou aço.

O M_R é obtido pelo ensaio triaxial de cargas repetidas, que tem a seguinte estrutura: uma prensa com cilindros sendo acoplados de pressão de ar comprimido com pistão de carga, além de LVDT's para medir a deformação do corpo de prova. No programa experimental é melhor detalhado o funcionamento deste aparelho mediante a norma brasileira 134/2010. O M_R pode ser expresso na equação 1.

$$M_R = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (1)$$

Onde:

M_R = Módulo resiliente (MPa ou kgf/cm²);

σ_d = tensão desvio (MPa ou kgf/cm²); e

ε_r = deformação específica axial resiliente (recuperável), mm/mm.

BERNUCCI *et al.* (2008) evidenciam que o tempo de duração de aplicação da carga é de 0,1 segundos e o repouso de 0,9 segundos, quando são utilizadas diferentes tensões de confinamento σ_3 , dada por pressão de ar dentro da célula, e tensões solicitantes σ_1 , aplicadas por células de carga, o equipamento, a localização das tensões no corpo de prova e a aplicação de cargas durante o ensaio, conforme apresentando na Figura 2.10.

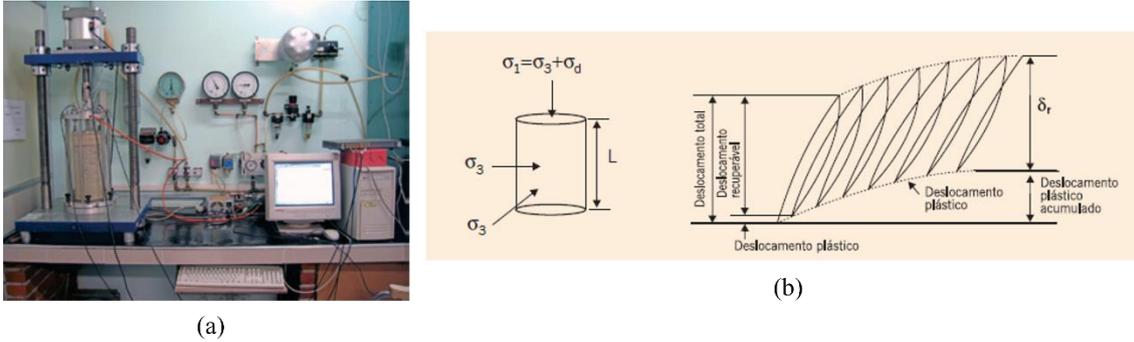


Figura 2.10 - Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas, (a) equipamento triaxial de carga repetidas (b) Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio triaxial cíclico.

Adaptado de BERNUCCI *et al.* (2008).

Alguns autores têm trabalhado com a variação de ciclos de cargas aplicadas ao corpo de prova durante ensaio de cargas repetidas, dentre eles, destaca-se (GALLAGE *et al.*, 2016 ; CHEN *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2021). CHEN *et al.* (2021) relatam que a carga dinâmica em um subleito ferroviário é composta pelas vibrações periódicas geradas quando o trem passa e no período intermitente quando não há passagem. Outro ponto destacado pelos autores que as cargas cíclicas consecutivas ampliam os efeitos das cargas dos trens e subestimam a capacidade de carga dinâmica dos solos do subleito.

MEDINA e MOTTA (2015) destacam que em cada solo o M_R pode ser expresso como uma função dos estados das tensões aplicados durante o ensaio. Os modelos mais utilizados no meio acadêmico brasileiro para determinar o M_R estão apresentados na Tabela 2.2, a qualidade destes modelos também foi considerada com base no coeficiente de determinação (R^2), sendo os dois primeiros encontrados na tese de Hicks (1970), o terceiro aborda a utilização da tensão desvio por SVENSON (1980), o quarto apresenta o modelo composto com relação entre a tensão desvio e confinante elaborada por MACÊDO (1996) e, por fim, o modelo universal da AASHTO (NCHRP 1-37A, 2004).

Tabela 2.2 - Modelos de comportamento resiliente no ensaio triaxial de cargas repetidas

ID	Referência	Variáveis	Equações
1	Hicks (1970)	θ_b	$M_R = k_1 \theta_b^{k_2}$ (2)
2	Hicks (1970)	σ_3	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2}$ (3)
3	Svenson (1980)	σ_d	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2}$ (4)
4	Macêdo (1996)	$\sigma_3; \sigma_d$	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$ (5)
5	NCHRP (2004)	$\theta_b; \tau_{oct}$	$M_R = k_1 P_a (\sigma_d / P_a)^{k_2} (\tau_{oct} / P_a)^{k_3}$ (6)

Fonte: Medina e Motta (2015).

Onde:

θ_b = tensão volumétrica;

σ_3 = tensão confinante;

σ_d = tensão desvio;

P_a = pressão atmosférica (101.325 kPa);

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica; e

k_1, k_2 e k_3 = constantes de regressão do modelo.

Na comparação de modelos existentes realizada por Viana (2007), o terceiro e quarto modelo expressos pelas equações (4) e (5) da Tabela 3.3, respectivamente, apresentaram melhores resultados quanto à variação do módulo com as tensões atuantes no solo, em razão do fato de que ambos levem em conta a tensão de confinamento (σ_3) acerca da tensão de desvio (σ_d). Sabe-se que tensão de desvio é responsável pelas deformações angulares no material, enquanto a tensão de confinamento é responsável pelas deformações volumétricas no material.

2.5. Modelagem computacional no pavimento ferroviário

Nos últimos anos, tem surgido um número crescente de aplicações de modelagem computacional em pavimentos. Neste caso, o método de elementos finitos - MEF tem surgido com o intuito de averiguar o comportamento mecânico e analisar o estado de tensão/deformação de alguns solos e propor algumas alternativas para futuras

obras de manutenção e projeto. Para PROFILLIDIS (2014), o MEF permite estudar o sistema físico real do pavimento sem simplificações extremas, levando em conta condições precisas, ou seja, as condições que conferem as tensões ou deformações específicas, conforme Figura 2.11.

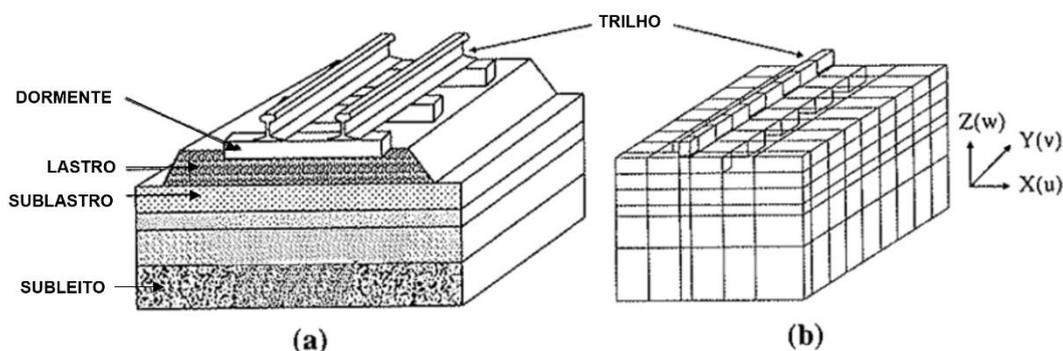


Figura 2.11 - (a) pavimento ferroviário e (b) MEF do pavimento (Adaptado de PROFILLIDIS, 2014).

SILVA (2016) profere que o MEF é um método numérico utilizado para resolução de problemas, na questão de engenharia, ao qual transforma o problema contínuo em soma de elementos discretos através da divisão do respectivo domínio em pequenas partes denominadas de elementos finitos.

RANGEL (2017) complementa que a maioria destes programas utiliza o MEF em uma época onde o avanço tecnológico restringia a geração de uma malha mais complexa. A não procura de alguns *softwares* existentes ocorre em razão do desuso de grande parte, além da incompatibilidade dos sistemas operacionais atuais e ultrapassados, a ausência de atualizações ou manuais específicos, falta de suporte técnico para solucionar dúvidas poderiam ser resolvidas.

Dentre os *softwares* existentes no mercado, destaca-se Illitrack, Geotrack, Kentrac, Ansys, Abaqus, Ferrovia 3.0 e SysTrain.

2.5.1. SysTrain

A origem do *software* é fruto da parceria entre as empresas VALE, ELGAYER e o Instituto Militar de Engenharia (IME) em 2016, sendo representadas pelas pessoas de José Carlos Silva Filho, Gabriel de Carvalho Nascimento e Antônio Carlos Rodrigues

Guimarães, respectivamente. O referido *software* foi designado como de uso restrito ao público (Rangel, 2017). O download do *software* está disponível no site da ELGAYER.

SILVA FILHO (2018) especifica que o MEF tem elevada robustez nas análises estruturais em geral, sendo capaz de considerar, simultaneamente, todos os componentes do pavimento ferroviário, com suas distintas características mecânicas. O autor detalha os cálculos realizados no *software* e relata que a interface é amigável ao usuário, com saídas gráficas que pudessem facilitar o entendimento dos fenômenos que ocorram acerca da propagação das tensões, seja pelos deslocamentos horizontais, transversais ou verticais, mediante inputs de todos os elementos da via, conforme apresentado na Figura 2.12.

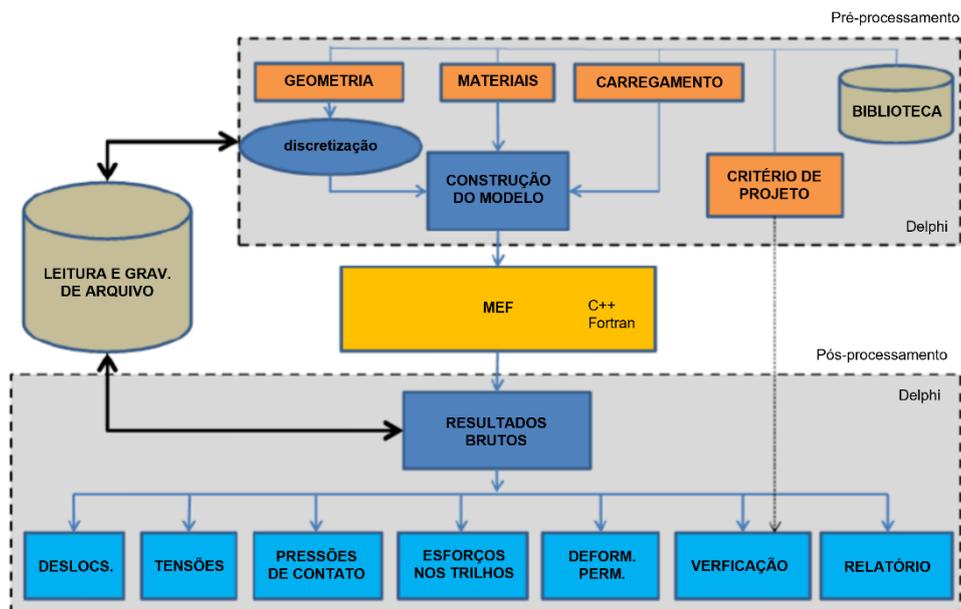


Figura 2.12 - Estrutura do SysTrain (Adaptado de SILVA FILHO, 2018).

Realizando uma pequena comparação entre a interface do Ferrovias 3.0 e do SysTrain, o último *software* possui resultados mais visíveis, além de ter um histórico no seu banco de dados com valores designados a alguns materiais do pavimento. Os resultados de saída estão no formato de gráficos XY e tridimensionais com valores de deformação e deslocamento das camadas do pavimento (Figura 2.13).

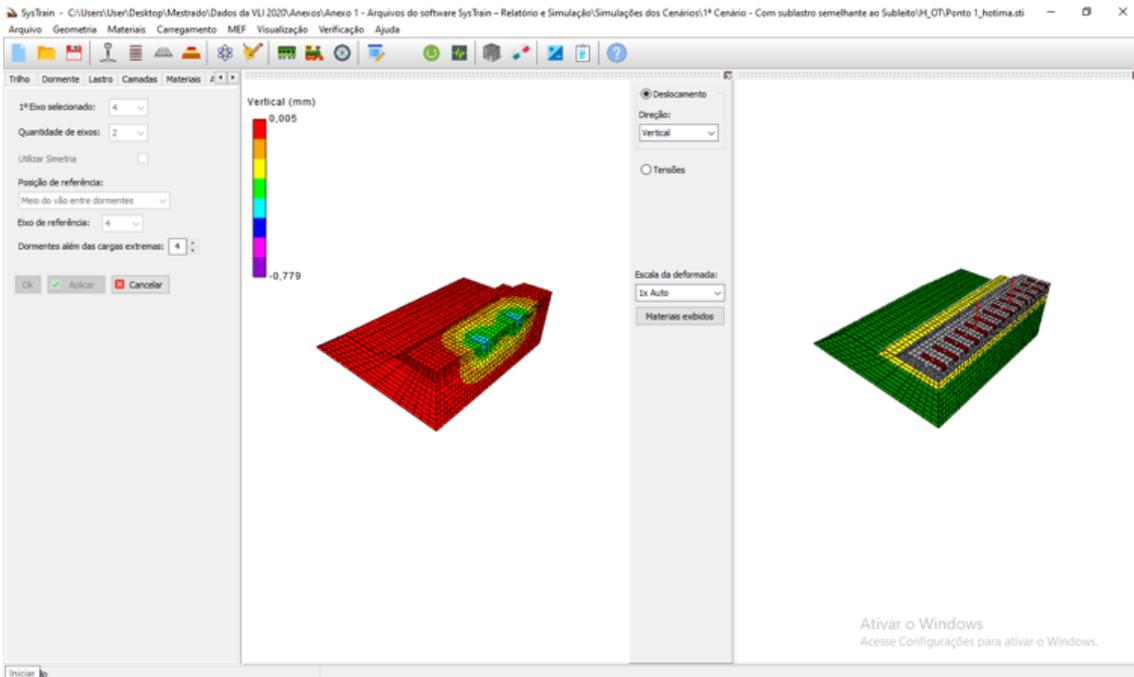


Figura 2.13 - Interface dos resultados do SysTrain.

RANGEL (2017) destaca alguns pontos positivos sobre as funcionalidades do *software* VALETrack antecessor do SysTrain, dentre eles:

- a) biblioteca editável com vários tipos de trilhos pré-definidos;
- b) o sistema de fixação é simulado por intermédio de molas, sendo possível definir diferentes magnitudes de rigidez para a tração e a compressão no sentido vertical, além da rigidez nos sentidos longitudinal e transversal;
- c) oportunidade da edição de propriedades geométricas do dormente, bitola e o espaçamento entre unidades;
- d) probabilidade da definição do comprimento da ombreira de lastro, a inclinação do talude de lastro e a declividade do sublastro;
- e) possibilidade da utilização de múltiplas camadas;
- f) para cada tipo de material que compõe as camadas do pavimento, é possível escolher entre os modelos elástico linear, resiliente argiloso, granular, coesivo, combinado ou composto;
- g) chance de escolha da distância entre engates de vagões, distância entre eixos de um mesmo truque e distância entre truques, o que facilita a aplicação de carregamentos. É também possível formar uma biblioteca com diferentes tipos de vagões;

- h) possibilidade de definir a posição do carregamento, seja entre os dormentes ou sobre o eixo dos dormentes, além da quantidade de dormentes após as cargas de extremidade;
- i) oportunidade de alterar a malha de elementos finitos, aumentando ou diminuindo a quantidade de elementos de cada camada do pavimento;
- j) para a convergência da simulação, é possível definir a tolerância de deslocamento vertical do pavimento, força ou momento, além do número máximo de iterações; e
- k) como resultado, o programa fornece relatório resumido com os principais esforços e deslocamentos, além de um output em 3D que apresenta diferentes deslocamentos e tensões. Fornece também diversos gráficos em 2D com informações de esforços e deslocamentos em trilhos, reações nas fixações e tensões normais no lastro sob diversos dormentes.

RANGEL (2017) também destaca alguns pontos que devem ser melhorados no *software*, dentre estes:

- a) impossibilidade de detalhamento do sistema de fixação, ficando este restrito aos coeficientes de rigidez de mola;
- b) limitação na utilização de dormentes biblocos;
- c) os cálculos parecem ser efetuados para o pavimento simétrico, a fim de reduzir o número de equações. No entanto, para bitolas estreitas e dependendo da magnitude do carregamento, o bulbo de tensões poderá sofrer a influência de ambos os carregamentos em conjunto. Tal limitação não chega a ser um problema, mas poderia haver opção de não considerar a simetria;
- d) ausência de critérios e modelos que considerem o número de ciclos de carga ou o histórico de tensões; e
- e) impossibilidade de definir tensões limites ou acoplar diferentes modelos além daqueles que já vêm inseridos no programa, como os de Drucker-Pracker e GUIMARÃES (2009).

SILVA FILHO (2018) descreve os elementos básicos para o *software* SysTrain, ao qual destacam-se as equações 4.2 a 4.9 de sua tese. A equação 7, por exemplo,

demonstra uma reformulação realizada pelo autor, sendo oriunda do Princípio do Trabalho Virtual (PTV) de OÑATE (2009).

$$\left(\iiint_V B^T D B dV \right) \alpha^{(e)} = \iiint_V N^T \vec{b} dV + \iint_A N^T \vec{t} dA + \sum_i \vec{p}_i \quad (7)$$

Onde:

B = matriz de deformação do elemento

D = matriz constitutiva;

$\alpha^{(e)}$ = Vetor do deslocamento dos nós pertencentes ao elemento

$\vec{b} = \{b_x, b_y, b_z\}^T$ é o vetor da força de campo aplicada em todo o volume (e.g.:

força peso);

$\vec{t} = \{t_x, t_y, t_z\}^T$ é o vetor de deslocamento do i-ésimo nó nas três direções; e

\vec{p}_i é o vetor de carga aplicada no i-ésimo nó.

Na figura 2.14 é demonstrado por Silva-Filho (2018) um fluxograma simplificado do procedimento de cálculo pelo MEF descrito, desde a entrada de dados até os resultados imediatos. O mesmo informa, que esta representação é simplificada, omitindo alguns procedimentos mais avançados requeridos pela não linearidade do problema em questão e o comportamento diferenciado dos solos.

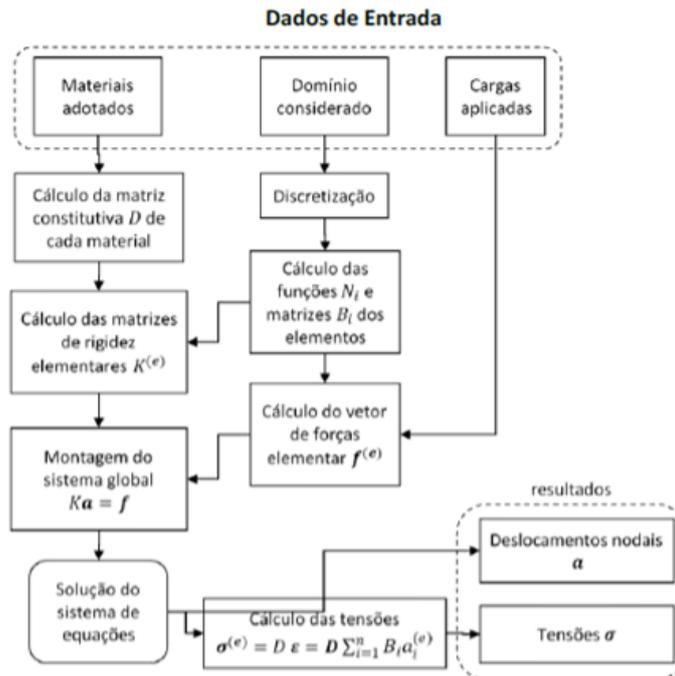


Figura 2.14 - Fluxograma simplificado do procedimento de cálculo pelo MEF que consta do SysTrain

Na tese de doutorado de SPADA (2003) e RANGEL (2017), foram mencionados alguns estudos de outros autores com diferentes materiais, resultando em valores limites para a deflexão de cada material. LUNDGREN *et al.* (1970) relatam que não existe um valor universal para a deflexão do trilho e, por outro lado, sabe-se que a deflexão depende da carga. No mesmo estudo, os autores apresentam algumas deflexões permitidas e o tipo de comportamento esperado na via (Tabela 2.3). Dentre as normas técnicas relativas à deflexão no topo do trilho, a AREMA (2013) estipula um limite de deflexão entre 3,175 a 6,35 mm, alguns estudos da literatura brasileira utilizam estas normas, dentre eles (CRUZ, 2019; ROSA, 2020; TEIXERA, 2020).

Tabela 2.3 - Critério de deflexão no pavimento

Tipo	Comportamento da via	Deflexão (mm)
A	Vias com durabilidade indefinida.	0-5,1
B	Pavimentos de carga pesada, combinação de rigidez e flexibilidade. Intervalo definido pela AREMA (2013).	3,41-6,35
C	Pavimentos com trilhos inferiores a 50kg/m (TR-50)	9,12
D	Vias com baixo nível de manutenção, apresentando algum problema e que ocorrerá a deterioração rapidamente.	>10,16

Uma maneira de estimar a tensão admissível do subleito é descrita pela equação (8) de HEUKELON e KLOMP (1962). Para STOPATTO (1987), na falta de parâmetros mais adequados é sugerida a utilização desta equação para estimativa da tensão admissível.

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 \cdot M_R}{1 + 0,7 \cdot \log N} \quad (8)$$

Onde:

M_R = módulo resiliente da camada do subleito; e

N = número de ciclo de cargas.

Quanto ao número de ciclo de cargas “N”, foram utilizadas as recomendações da RFFSA - STOPATTO (1987), sendo detalhadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Número de ciclos de cargas "N" em grupos da RFFSA (Stopatto, 1987).

Grupo	N
1	$2,2 \cdot 10^6$
2 e 3	$1,6 \cdot 10^6$
4,5 e 6	$1,0 \cdot 10^6$
7,8 e 9	$0,6 \cdot 10^6$

Os dados de entrada do *software* serão apresentados no próximo capítulo do programa experimental, visto que é necessário um maior detalhamento quanto aos três cenários simulados sob os três diferentes tipos de variação de umidade.

2.5.2. Estudos e correlações de modelagem computacional na literatura

O *software* SysTrain tem sido uma grande ferramenta para a análise de deformação-tensão do pavimento. Sendo assim, destacam-se alguns estudos acadêmicos na literatura nacional como: CRUZ, 2019, GOMES, 2018, GONÇALVES, 2021, LOPES, 2017, ROSA, 2020, SILVA FILHO, 2018, TEIXERA, 2020.

No estudo desenvolvido por CRUZ (2019), foi destacada a simulação de 10 (dez) amostras oriundas do Corredor Centro Sudeste Paulista, entre a estação Boa Vista Nova e estação de Cravinhos, ambas localizadas no estado de São Paulo. A autora apresenta os resultados das tensões e deformações no topo do trilho, lastro, *interlayer* e subleito. Tais resultados serão mais detalhados no capítulo 4 desta dissertação com a correlação de outros resultados.

GOMES (2018) salientou o resultado da simulação de duas amostras de característica laterítico argiloso - LG' coletadas na Estrada de Ferro Carajás – EFC. A autora detalha a amostra CAD 4 após os resultados de deslocamentos totais como competente tecnicamente para ser aplicada como camada de sublastro, com características mecânicas compatíveis com o projeto de pavimentação ferroviária. Em outra simulação, a amostra CAD5 atende ao critério de validação da estrutura como camada de sublastro, com os valores de deflexão inferiores ao limite máximo aceitável de 6,53 mm.

GONÇALVES (2021) realizou a modelagem computacional em alguns *softwares*, dentre eles o SysTrain. As quatro amostras estão localizadas no município de Arantina, em Minas Gerais, pertencente a concessionária MRS Logística, em um campo experimental de dormente polimérico. No total, foram realizados seis cenários de diferentes valores de cargas com o dormente de madeira e monobloco de concreto, visto que o programa não admite a utilização de dormente do tipo bibloco. Durante a dissertação, foi realizada uma comparação com os resultados do deslocamento vertical total do pavimento, tensão vertical de contato na interface dormente-lastro e as tensões geradas nas camadas de sublastro e subleito. Em uma das conclusões da autora, o MEF

não representa bem o comportamento do lastro devido à continuidade entre elementos assumida na análise em MEF, que não é real no caso das partículas dos solos e especialmente do lastro, mas o programa tem aptidão para fazer parte da prática ferroviária de projetos, levando em consideração algumas pontuações evidenciadas.

LOPES (2017) utilizou na simulação no SysTrain em 4 (quatro) tipos de solos arenosos (LA', LA, NA' e Laterita), visto que estudou a deflexão no trilho e a tensão total na camada de sublastro. A autora destaca que as camadas compostas por solo, sublastro e o subleito, são as que geram mais influência nos valores de deflexão máxima do pavimento ferroviário, em média de 74% do valor total. Além disso, em função do material utilizado, a contribuição do sublastro para a deflexão total da estrutura pode variar de 3 a 24%. Por fim, recomenda a utilização desta ferramenta para simulação do comportamento mecânico, sendo necessárias apenas algumas adaptações finais.

ROSA (2020) estudou 15 amostras do Corredor Centro-Sudeste da Ferrovia Centro-Atlântica, todas localizadas no estado de São Paulo. A pesquisa trouxe informações relevantes da deflexão total da estrutura e a tensão vertical total máxima no subleito. Todos os solos simulados tiveram a admissibilidade da deflexão sendo recomendada pela AREMA (2013). Já na admissibilidade da tensão vertical total máxima do subleito aplicado sobre a equação de HEUKELON e KLOMP (1962), quatro pontos apresentaram a inadmissibilidade das tensões. Percebe-se que o *software* trouxe bons resultados para comparação com os valores encontrados nos ensaios de laboratório, mesmo o autor não detalhando qual foi a umidade utilizada na simulação do SysTrain, está dúvida surge devido à utilização de três umidades diferentes no Triaxial de Cargas Repetidas.

SILVA FILHO (2018) demonstra a funcionalidade do *software* salientando a discretização do domínio utilizado no SysTrain, além dos cálculos vetoriais, parametrização dos elementos e integração numérica, bem como os elementos de cada material a fim de representar satisfatoriamente o comportamento mecânico do pavimento ferroviário e os layouts de interface ao usuário. O autor realizou a simulação de um solo arenoso fino laterítico – SAFL com amostras ao longo da Estrada de Ferro Carajás – EFC. Com a posse dos resultados laboratoriais e experimentais, o autor recomenda a utilização do SAFL como camada de sublastro, além de ressaltar que os materiais laterizados respondem melhor frente à variação da umidade. No entanto, a

longo prazo e caso não sejam sanados os problemas de drenagem, poderão ser verificadas irregularidades na via.

Por fim, TEIXEIRA (2020) estudou 10 pontos ao longo do Corredor Centro-Sudeste da FCA. O autor faz modificações de vários cenários em que alguns valores da estrutura são modificados, sendo no total 55 simulações para cada amostra, totalizando 550 simulações. Tais modificações estão voltadas para espessura do lastro, espessura do lastro degradado, módulo de elasticidade dinâmica do lastro, módulo de elasticidade dinâmica do lastro degradado e, por fim, o carregamento total. No decorrer da dissertação, são apresentados os resultados da deflexão total da estrutura, além da tensão vertical total no subleito e a pressão de contato sobre o lastro. O autor conclui que o *software* figurou como uma importante ferramenta computacional de auxílio para a análise e o dimensionamento ferroviário.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se uma breve descrição do Corredor Centro-Sudeste da Ferrovia Centro-Atlântica - FCA e das características climáticas, hidrogeológicas e pedológicas no trajeto desta ferrovia, bem como o programa experimental aplicado neste estudo, dividindo-se em cinco fases, dentre delas os procedimentos realizados para a execução dos ensaios, como a caracterização dos solos, classificação MCT, comportamento mecânico dos solos tropicais e a modelagem computacional utilizando o *software* SysTrain em três cenários diferentes. Com isto, espera-se verificar a influência da umidade no comportamento mecânico em solos tropicais oriundos de subleito ferroviários.

3.1. Local do estudo

A Ferrovia Centro-Atlântica possui 7.220 quilômetros de extensão, percorrendo um total de 300 municípios e estando presente em sete estados brasileiros: Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Goiás, Bahia e Sergipe. O local do estudo encontra-se entre os Km 275+600 em Paulínia-SP e o Km 599+500 em Uberaba-MG da malha ferroviária pertencente à empresa VLI, abrangendo 24 municípios e dois estados brasileiros (São Paulo e Minas Gerais), conforme mostrado na Figura 3.1.

Inicialmente, foram escolhidos 52 locais no trecho estudado para realização dos ensaios, mas em razão das condições climáticas, não foi possível recolher as amostras do ponto 9. As 51 amostras foram encaminhadas para o laboratório de solos do LESFER/COPPE e do Instituto Militar de Engenharia -IME.

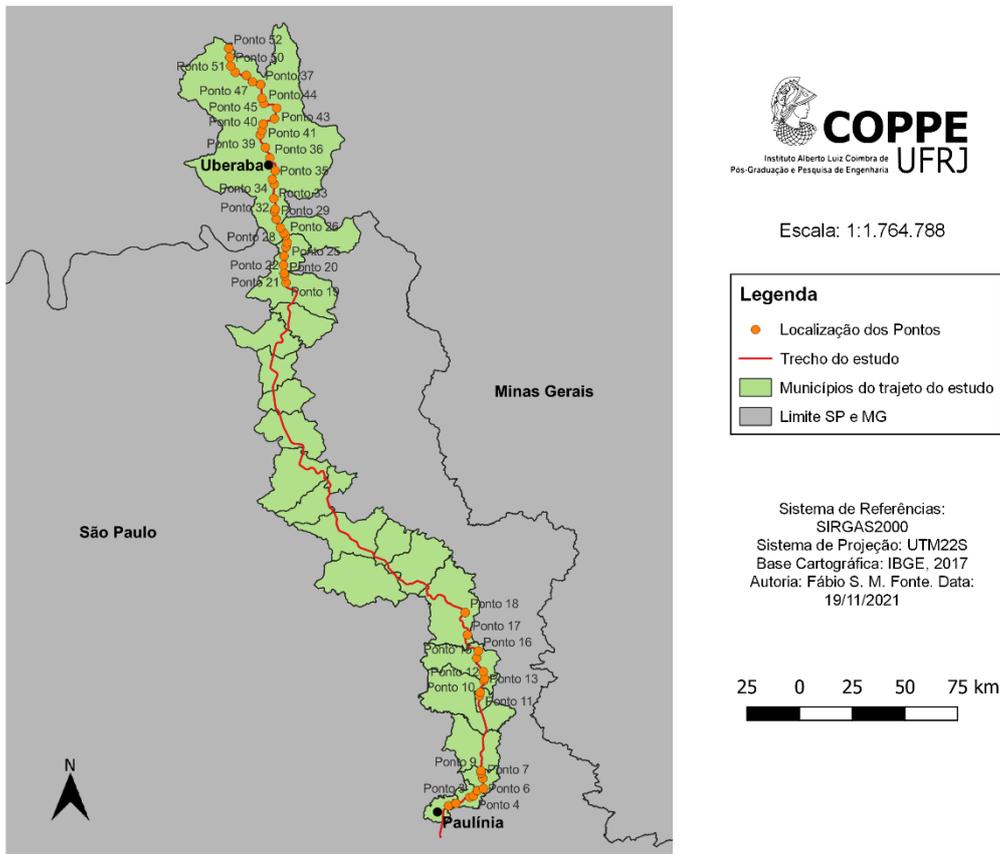


Figura 3.1- Trecho do local de estudo e a localização dos pontos de investigação na FCA.

3.1.1. Clima, hidrogeológico e pedologia

O clima local da região estudada foi diagnosticado a fim de demonstrar os dados de precipitação de chuva e temperatura. Utilizou-se o sistema do balanço hídrico mensal do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo coletadas as variações de precipitação e de temperatura por um período de 30 anos (1981-2010). A estação meteorológica mais próxima do primeiro ponto de investigação está localizada no município de Valinhos-SP com o código W47S23 (E). Na Figura 3.2, são apresentados

os valores de precipitação de chuva *versus* a temperatura, demonstrando uma grande concentração de chuva nos primeiros e últimos meses do ano, chegando a alcançar o pico no mês de janeiro com o valor de 291.64 mm.

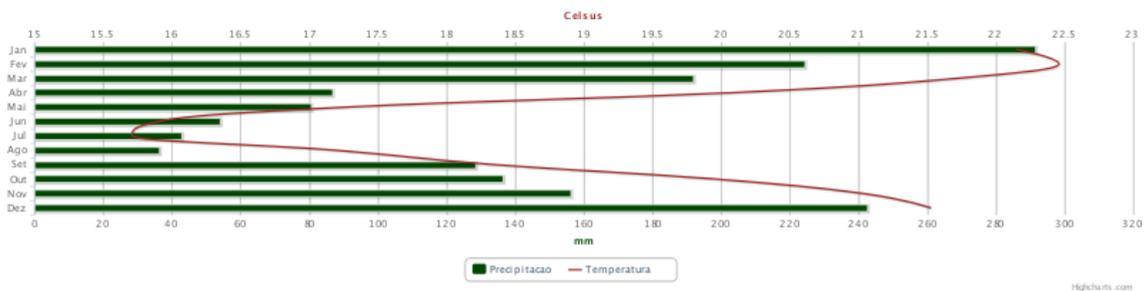


Figura 3.2- Precipitação x Temperatura - INMET – Estação Valinhos-SP.

Na Figura 3.3, visualizamos a precipitação de chuva da estação em Uberaba-MG, chegando ao valor máximo de 359 mm, maior que na região de Paulínia-SP. Uma curiosidade entre as duas regiões estudadas estaria em torno da queda de temperatura na mesma época do ano, demonstrando característica de regiões tropicais.

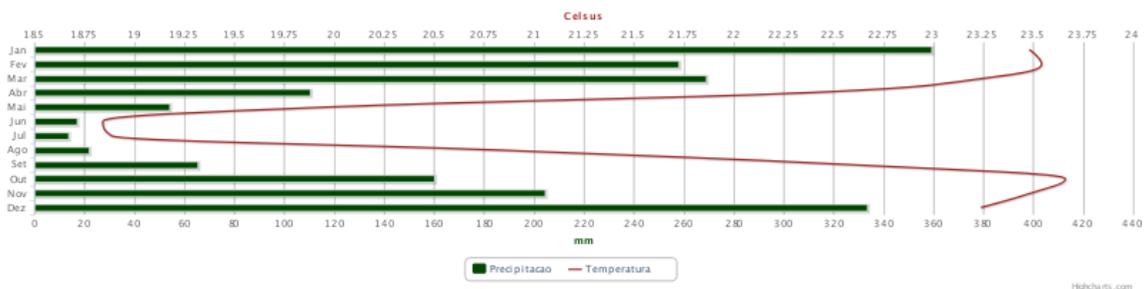


Figura 3.3 - Precipitação x Temperatura - INMET – Estação Uberaba-MG.

O mapa hidrogeológico obtido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) apresenta o conhecimento sobre a ocorrência, movimento, quantidade e qualidade das águas subterrâneas. DINIZ *et al.* (2014) ressaltam que os mapas hidrogeológicos ou mapas de águas subterrâneas formam a base do desenvolvimento, planejamento, engenharia e gestão econômica, podendo diferir muito em conteúdo e na forma de representação, de acordo com seus objetivos. As cores utilizadas para identificação dos aquíferos podem ser definidas pelo azul com variações na tonalidade para aquíferos

porosos, verde com tonalidade (aquíferos fraturados) e marrom com tonalidades (aquíferos intergranulares ou fraturados de baixa produtividade).

Os aquíferos porosos armazenam água nos espaços entre os grãos da rocha ou solo, algumas rochas sedimentares e sedimentos não consolidados fazendo parte da sua composição: arenitos, siltitos, areias, cascalho, dentre outros. Já nos aquíferos fraturados, a água fica armazenada nas fraturas interconectadas da rocha como, por exemplo, em rochas maciças e compactas: granito e quartzito. Por fim, os aquíferos Cárstico, a água armazenada nos condutos e os canais da rocha carbonáticas como, por exemplo, rochas de calcário.

A Figura 3.4 demonstra os aquíferos identificados no trecho estudado, sendo definidos pela produtividade de cada aquífero e enumerados de acordo com o total de evasão. A nomenclatura é dividida como: GR (Granular), FR (Fraturado) e K (Cárstico).

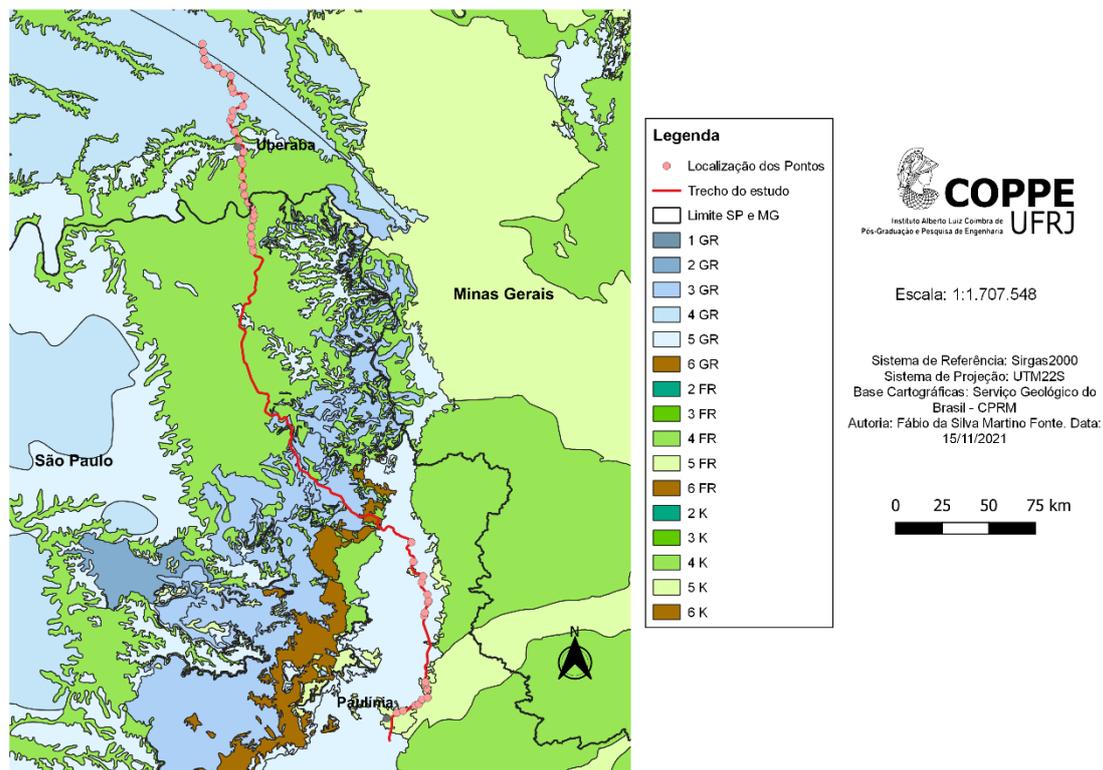


Figura 3.4 - Mapa Hidrogeológico do trecho estudado.

Quanto ao mapa pedológico da região de estudo, obtido pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS *et al.*, 2018), observa-se a predominância da camada de latossolo, como apresentado na Figura 3.5. De acordo com autores estes tipos de solo possuem avançado estágio de intemperização, muito evoluídos como

resultado de energéticas transformações no material constitutivo. Os autores alegam que esses solos podem variar de fortemente a bem drenados, de drenagem moderada ou até mesmo imperfeitamente drenada, o que é indicativo de formação em condições atuais ou pretéritas com um certo grau de gleização. Por fim, esses solos são típicos das regiões equatoriais e tropicais, ocorrendo também em zonas subtropicais.

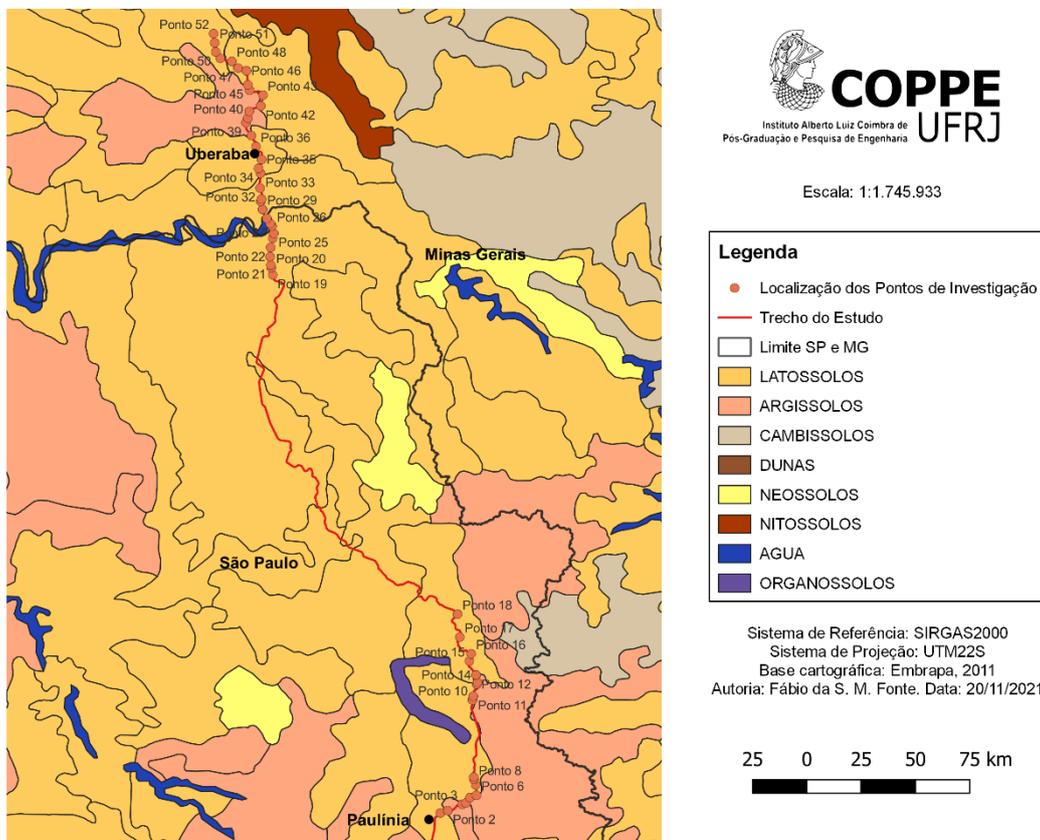


Figura 3.5 - Mapa pedológico do trecho estudado.

3.2. Programa experimental

Com base nos objetivos traçados nesta dissertação, desenvolveu-se um programa experimental dividido em cinco fases, com intuito de demonstrar clareza à luz do conteúdo programático, sendo apresentados na Figura 3.6.

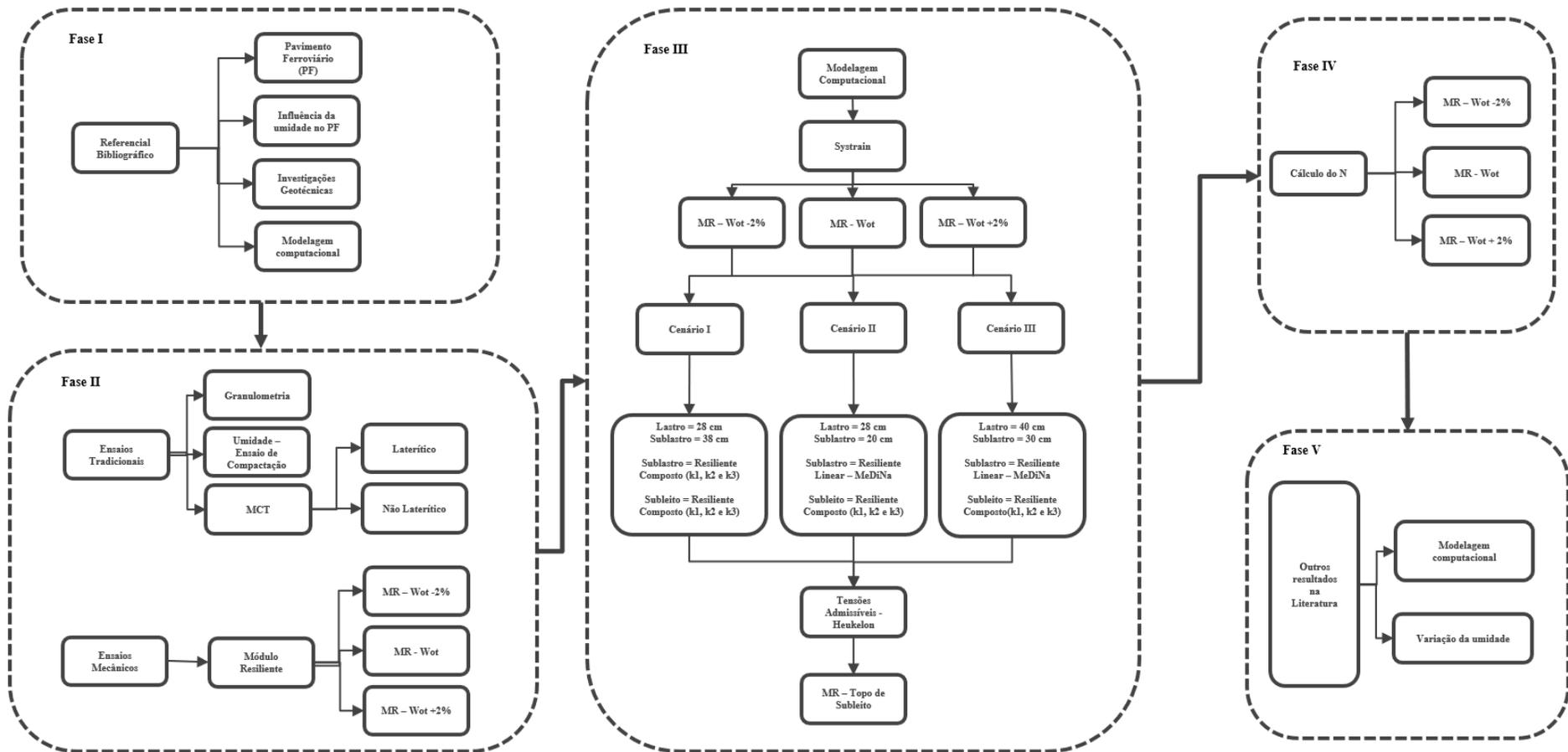


Figura 3.6 - Programa experimental elaborado para este estudo.

Nesta primeira fase, realizou-se uma análise bibliométrica nas principais revistas internacionais e nacionais quanto ao M_R e seu comportamento em diferentes variações de umidade, sendo aplicadas para solos tropicais, além de analisar o comportamento mecânico destes solos. Ademais, verificou-se a aplicação da modelagem MEF com foco em visualizar diferentes cenários de estrutura e tensões admissível para os pavimentos.

Na segunda fase, constituiu-se a realização dos ensaios ocorridos no laboratório como: Granulometria, umidade ótima, densidade máxima e MCT, além do ensaio mecânico a fim de encontrar o módulo resiliente dos solos pesquisados.

Na terceira fase, elaborou-se a modelagem computacional utilizando o *software* SysTrain, ao qual, são realizadas a análise variação da umidade e três cenários com diferentes estruturas, dentre elas, a altura do lastro e sublastro e o tipo de modelo de M_R para a camada do sublastro e subleito, visto na figura 3.7.

- Cenário I possui características de altura das camadas muito semelhantes aos dos pontos de coleta das amostras, modelo resiliente composto e com o uso dos coeficientes do ensaio Triaxial de cargas repetidas (k_1 , k_2 e k_3) sendo aplicadas tanto no subleito como no sublastro;
- Cenário II representa uma altura intermediária, no ISF (2012), ao qual, recomendam a altura do lastro de 15 cm em trechos com velocidade máxima de 30 km/h, o modelo aplicado no sublastro é o resiliente linear com o coeficiente (k_1) sendo retirado do banco de dados do *software* MeDiNa, já no subleito é aplicado o modelo composto com coeficientes do ensaio Triaxial de cargas repetidas (k_1 , k_2 e k_3); e
- Cenário III, tem como altura a recomendação do ISF - 212 (DNIT, 2015), de 40 cm de lastro e 30 cm para sublastro, semelhante ao cenário II, o modelo aplicado no sublastro é o resiliente linear com o coeficiente (k_1) sendo retirado do banco de dados do *software* MeDiNa, já no subleito é aplicado o modelo composto com coeficientes do ensaio Triaxial de cargas repetidas (k_1 , k_2 e k_3).

Uma das saídas do *software* SysTrain são os valores de tensões verticais no subleito e de deflexões no pavimento. O primeiro é utilizado para verificar a admissibilidade das tensões verticais no topo do subleito mediante a equação de HEUKELON e KLOMP (1962). Quanto a deflexão total do pavimento, é comparado

com as recomendações da AREMA (2013) entre 3,3 mm a 6,35 mm, sendo que estes valores são determinado pelo tipo de suporte do trilho. De acordo com ROSA (2020) o primeiro está relativo a fundação do suporte muito rígido, que pode deformar ou fadigar o trilho no contato roda/trilho e acelerar a taxa de desgaste de dormentes e lastro, sendo a deflexão vertical mínima desejável no trilho de 1/8 polegadas (3,18 mm), já a fundação do suporte do trilho muito elástica, que pode deformar ou fadigar o trilho em flexão e desestabilizar o lastro, ou seja, a deflexão vertical no trilho não deve ser superior ao ¼ de polegadas (6,35 mm). Importante destacar que o suporte do trilho simulado no SysTrain é de característica elástica, ou seja, os valores poderão chegar até o limite de 6,35 mm.

Vale ressaltar que, no total, foram desenvolvidas 459 simulações no SysTrain, constituídas por três cenários diferentes, mediante 51 solos, dentre eles os lateríticos e não lateríticos, além da variação de três umidades no pavimento.

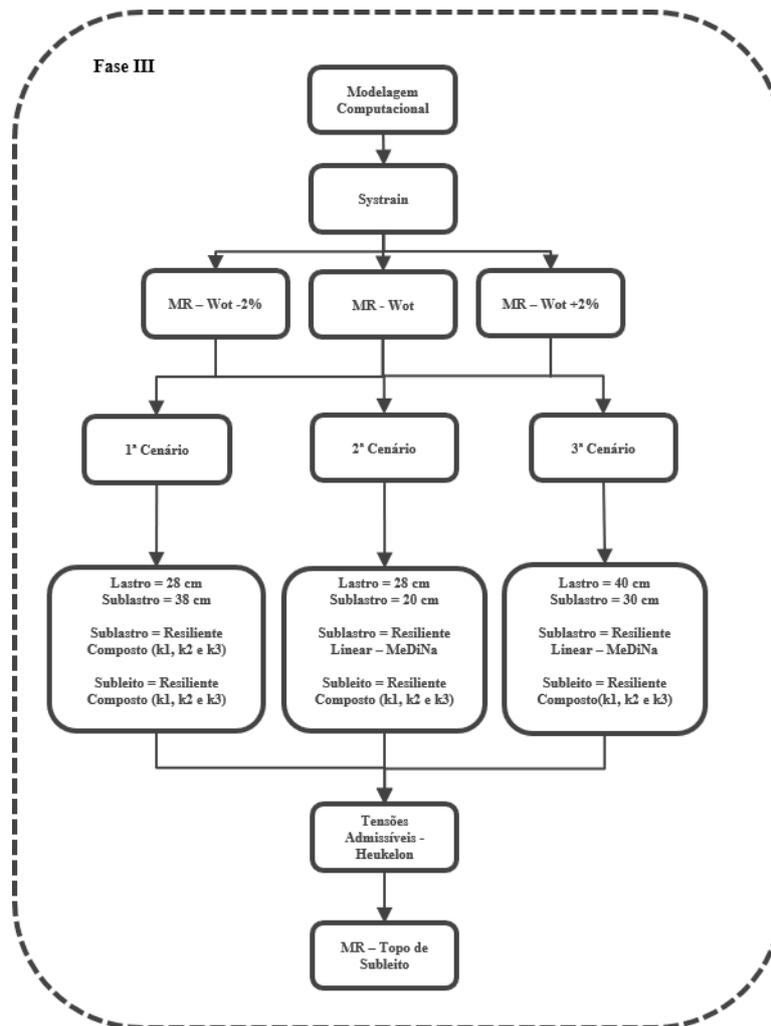


Figura 3.7 - Terceira fase do programa experimental.

Logo após a realização dos ensaios no laboratório e de modelagem computacional, procedeu-se para a quarta fase, com as possíveis análises dos valores para o número de ciclos de cargas “N” e associação aos solos tropicais e a variação da umidade. Por fim, a quinta etapa consistiu na verificação por meio da literatura existente de outros resultados para comparar e validar os resultados obtidos nesta pesquisa.

3.3. Ensaios em laboratório

Foram realizados ensaios tradicionais como a caracterização física dos solos que englobam a análise de granulometria, compactação e MCT. Logo após, são apresentados os ensaios mecânicos, sendo utilizado o aparelho triaxial de cargas

repetidas. Todos os ensaios foram realizados com normas técnicas brasileiras do DNER e DNIT.

3.3.1. Ensaios de Caracterização, compactação e MCT

Os ensaios de caracterização proporcionam identificar as propriedades dos solos do subleito. No total, foram analisadas 51 amostras de subleito, sendo o ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação, conforme a norma DNER-ME 080/94 (1994a), densidade real dos grãos pelo método do picnômetro, segundo a DNER-ME 093/94 (1994b), ensaio de limite de liquidez (LL) - DNER-ME 122/94 e limite de plasticidade (LP) - DNER-ME 082/94, ensaio de compactação para determinar a umidade ótima, massa específica aparente seca máxima (MEAS) com base na norma DNER-ME 162/94 (1994c).

Dentro dos ensaios existentes na metodologia MCT, destaca-se o uso dos seguintes ensaios nesta dissertação: ensaios da perda de massa por imersão na norma DNER ME 256/94 (1994d), as normas de procedimento Mini-MCV de acordo com DNER – ME 258/94 (1994e) e ao ensaio de classificação MCT, segundo a norma DNER CLA 259/96 (1996).

3.3.2. Triaxial de cargas repetidas

O ensaio triaxial de cargas repetidas foi realizado no laboratório do IME-RJ, adotando a norma DNIT 134/2010 (2010), com a intenção de encontrar os valores de módulos resilientes dos solos tropicais.

As amostras foram talhadas mediante a moldagem manual e foram realizadas em três umidades diferentes, sendo umidade ótima - W_{ot} , a umidade seca - $W_{ot} - 2\%$ e a umidade saturada - $W_{ot} + 2\%$. Esta variação é usada também por outros autores como: LIMA, *et al.*, 2019; ROSA, 2020; SILVA, *et al.*, 2021. De acordo com LIMA *et al.* (2019), que a prática brasileira de admitir a variação de 2% na umidade, independente da natureza do solo, a consideração deve ser dada a importância de adotar a umidade correta conteúdo no equipamento triaxial de cargas repetidas para reproduzir com precisão, para similar com o comportamento do material em campo. As umidades são obtidas com os seguintes processos:

- Ótima: armazenada os corpos de provas na câmara úmida;
- Seca: sendo exposta à secagem em temperatura ambiente; e
- Saturada: saturada pelo processo de indução por capilaridade.

Na montagem do ensaio, são colocados os cabeçotes sobre o corpo de prova, devidamente envolvidos pela borracha. Logo após, são inseridos os transdutores do tipo LVDT (*linear variable transducers*) preso ao cabeçote superior e apoiado em uma haste guia, que irá medir o deslocamento do corpo de prova.

Em conformidade com a norma técnica do DNIT 134/2010 (2010), a fase do condicionamento tem como finalidade eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão-desvio e de reduzir o efeito da história de tensões no valor do M_R . A frequência utilizada neste ensaio foi de 1 Hz (60 ciclos por minuto) e a duração 1 segundo por ciclo, sendo 0,10 de aplicação e 0,9 de repouso.

A norma orienta uma aplicação de 500 repetições para cada tensão-desvio, na sequência apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Sequência de Tensões para fase de condicionamento – DNIT 134-2010

Tensão Confinante	Tensão Desvio	Razão de tensões
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: DNIT (2010).

Após a fase de condicionamento, deve ser iniciado o ensaio para a determinação do M_R , com a aplicação da sequência de 18 pares das tensões com 10 ciclos cada, sendo visualizadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Sequência dos pares de tensões para obtenção do M_R - DNIT 134 -2010.

Tensão Confinante σ_3 (MPa)	Tensão Desvio σ_d (MPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
0,021	0,021	2
	0,041	3
	0,062	4
0,034	0,034	2
	0,069	3
	0,103	4
0,051	0,051	2
	0,103	3
	0,154	4
0,069	0,069	2
	0,137	3
	0,206	4
0,103	0,103	2
	0,206	3
	0,309	4
0,137	0,137	2
	0,275	3
	0,412	4

Fonte: DNIT (2010)

Durante a realização deste ensaio, notou-se que, em algumas amostras, sendo a maioria da umidade saturada, ocorreu o rompimento do corpo de prova antes de todas as aplicações dos pares de tensões.

MEDINA e MOTTA (2015) destacam que, para cada solo, o M_R pode ser expresso como uma função dos estados das tensões aplicados durante o ensaio. Os modelos mais utilizados no meio acadêmico brasileiro para determinar o M_R estão apresentados na tabela 3.3, a qualidade destes modelos também foram considerado de acordo com o coeficiente de determinação (R^2), sendo os dois primeiros encontrados na tese de HICKS (1970), o terceiro aborda a utilização da tensão desvio por SVENSON

(1980), o quarto apresenta o modelo composto com relação entre a tensão desvio e confinante elaborado por MACÊDO (1996) e por fim o modelo universal da AASHTO (NCHRP 1-37A, 2004).

Tabela 3.3 - Modelos de comportamento resiliente em ensaios triaxiais de cargas repetidas

ID	Referência	Variáveis	Equações
1	Hicks (1970)	θ_b	$M_R = k_1 \theta_b^{k_2}$ (2)
2	Hicks (1970)	σ_3	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2}$ (3)
3	Svenson (1980)	σ_d	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2}$ (4)
4	Macêdo (1996)	$\sigma_3; \sigma_d$	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$ (5)
5	NCHRP (2004)	$\theta_b; \tau_{oct}$	$M_R = k_1 P_a (\sigma_d / P_a)^{k_2} (\tau_{oct} / P_a)^{k_3}$ (6)

Fonte: Medina e Motta (2015).

Na comparação de modelos existentes realizada por Viana (2007), o terceiro e quarto modelo, expressos pelas equações (4) e (5) da Tabela 3.3, respectivamente, apresentaram melhores resultados no tocante à variação do módulo com as tensões atuantes no solo, em razão de ambos considerarem a tensão de confinamento (σ_3) em relação à tensão de desvio (σ_d). Sabe-se que tensão de desvio é responsável pelas deformações angulares no material, enquanto a tensão de confinamento é responsável pelas deformações volumétricas no material.

Ressalta-se que é comum na literatura a utilização da média dos 18 pares de tensão para determinar o M_R e em alguns casos não são detalhados nem o cálculo deste valor. Com isso, surge a crítica de que a média poderia influenciar nos valores de cada par de tensão, existindo uma disparidade entre cada par de tensão. Por conta de tal fato, optou-se por utilizar os pares de tensões σ_d e σ_3 mais próximos dos valores obtidos na simulação numérica do *software* SysTrain (abordado no programa experimental) para estrutura do pavimento do topo do subleito ferroviário.

3.4. Modelagem computacional com o SysTrain

Neste capítulo, serão detalhados os dados de entrada do *software* de elementos finitos, os cenários que serão simulados e, por fim, os resultados que servirão como cálculo de tensão admissível e, conseqüentemente, o número de ciclos de cargas para o pavimento.

3.4.1. Dados de entrada

Os inputs no *software* SysTrain estão divididos entre geometria, materiais e carregamento. Os valores do M_R aplicados no *software* são oriundos do ensaio triaxial de cargas repetidas e de informações obtidas no trecho.

3.4.1.1. Geometria

Em relação à geometria da via utilizada no *software*, são aplicadas diferentes altura nos três cenários, com a intenção de verificar o comportamento das tensões-deflexões de cada pavimento. A seguir, tem-se a geometria de cada cenário.

- Cenário I - Lastro 29 cm, Sublastro 35 e Subleito 200 cm;
- Cenário II - Lastro 20 cm, Sublastro 20 e Subleito 200 cm; e
- Cenário III - Lastro 40 cm, Sublastro 30 e Subleito 200 cm.

3.4.1.2. Materiais

O trilho utilizado é de classificação TR-68, aço carbono com comprimento soldado de 384 m e a bitola utilizada de 1,00 m, sendo aplicado em todos nos cenários. Tal componente foi utilizado em todos os cenários e suas características podem ser vistas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados geométricos do trilho TR-68

Nome do Material	Aço Trilho
Altura	18,57 cm

Largura	15,24 cm
Massa específica	7850 kg/m ²
Módulo de elasticidade do aço	2100000 kgf/cm ²
Coefficiente de Poisson	0,3

O dormente utilizado é do tipo monobloco de concreto com fixação *pandrol fast clip*, sendo utilizado em todas as amostras e cenários simulados. As características estão presentes na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Dados geométricos do dormente de concreto

Espaçamento	60 cm
Comprimento	2 m
Largura inferior	22 cm
Largura superior	22 cm
Altura	16 cm
Massa específica	2400 kg/m ³
Módulo de elasticidade do concreto	32 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3

A altura do lastro corresponde a 29, 20 e 40 cm, respectivamente para os três cenários simulados, quanto à base do lastro pode ser definida com as seguintes características geométricas para todas as amostras, tal como mostra a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Dados geométricos do lastro

Tipo	Cenário I	Cenário II	Cenário II
	Resiliente Elástico Linear		
Ombreira	40 cm	40 cm	30 cm
Declividade Talude (H:V)	1,5	1,5	1,5
Declividade fundo	3%	3%	3%
Massa específica	2000	2000	2000
k1 (MPa)	37,1	37,1	37,1
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3	0,3

A base do sublastro utilizado em todas as amostras e todos os cenários apresenta a ombreira de 0,5 m, talude de 1,2 (H:V) e fundo de 1%. Destaca-se que o modelo

empregado no cenário I é diferente dos demais, sendo aplicado o modelo composto no sublastro com os mesmos coeficientes do subleito (k_1 , k_2 e k_3). Já nos cenários II e III, utiliza-se no sublastro o modelo linear, com a massa específica de 2.223 kgf/cm^3 , coeficiente k_1 de 381 MPa e coeficiente de Poisson de $0,3$.

Quanto ao subleito, a ombreira utilizou $2,0 \text{ m}$, talude de $1,5 \text{ (H:V)}$ e fundo de 1% . Em relação às características do solo, empregou-se em todas as amostras a massa específica de 1.900 kg/m^3 . Os coeficientes do M_R foram aplicados de acordo com o ensaio triaxial de cada amostra.

3.4.1.3. Carregamento

Para todas as amostras e cenários, foram adotadas as seguintes características vistas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Detalhes do carregamento no SysTrain
(Vagões/Composição/Posicionamento)

Vagão	Hopper
Quant. Truques	2
Distância do engate ao eixo	1,21 m
Distância entre eixos	1,7 m
Distância entre os truques	13,945 m
Quantidade de membros	2
Carga por membro	100 ton.
Primeiro eixo selecionado	4
Quantidade de eixos	2
Utilizar a simetria?	Não
Posição de referência	Meio
Eixo de referência	1
Dormentes além da carga externa	4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao analisar os ensaios de laboratório e de modelagem computacional, os resultados serão exibidos a partir de cada etapa prevista no programa experimental, sendo a primeira fase prescrita anteriormente no capítulo 2 e por meio da segunda fase sendo descrita neste capítulo.

4.1. Resultados dos ensaios de caracterização dos solos

No que tange ao ensaio de caracterização dos solos, foram realizados os ensaios de 52 (cinquenta e dois) solos segundo as normas técnicas brasileiras citadas na metodologia. O ensaio de granulometria é um processo importante para determinação da percentagem em peso das partículas, assim sendo fundamental como “*input*” para classificação HRB (*Highway Research Board*) e USCS (*Unified Soil Classification System*), além de estimar outros parâmetros como, por exemplo, filtros, bases estabilizadas, permeabilidade, capilaridade etc. Na tabela 4.1, é exibido um breve resumo da caracterização dos solos, constando os valores das frações da granulometria, limite de Atterberg, valores da massa específica aparente seca (MEAS) e o teor de umidade ótima obtido pelo ensaio de compactação, por fim, a classificação HRB e USCS.

Tabela 4.1 - Resultado do ensaio de granulometria, compactação, limites de Atterberg e classificação (Continua)

Ponto	Granulometria (%)						Compactação		Limites de Atterberg			Classificação	
	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	W _{ot} (%)	MEAS (g/cm ³)	LL	LP	IP	HRB	USCS
01	1,23	3,1	21,74	41,13	9,67	23,12	14,36	1,90	41,2	19,4	21,8	A-7-6	SC
02	1,23	3,1	21,82	41,05	9,67	23,12	14,37	1,90	41,6	19,4	22,2	A-7-6	SC
03	3,4	0,85	26,00	39,46	12,98	17,31	27,07	1,69	33,6	15,4	18,1	A-6	SC
04	0	0	4,59	33,83	23,45	38,14	27,07	1,69	41,6	24,7	16,8	A-7-6	CL
05	0	0	20,52	41,55	25,71	12,22	18,66	1,72	NP	NP	0	A-4	ML
06	0	0	11,43	19,31	25,31	43,94	19,58	1,70	46,5	22,7	23,7	A-7-6	CL
07	0	2,32	12,22	40,00	13,72	31,74	16,70	1,80	32,6	18,3	14,3	A-6	CL
08	0	0	4,05	51,34	19,12	25,50	23,07	1,75	34,4	18,3	16,0	A-6	CL
10	0	0	9,64	36,46	11,11	42,80	16,31	1,74	32,7	12,4	20,3	A-6	CL
11	17,32	25,51	6,90	42,29	5,54	2,43	10,26	1,95	NP	NP	0	A-2-4	SM
12	17,32	25,51	6,90	42,20	4,24	3,83	10,27	2,15	NP	NP	0	A-2-4	SM
13	0	0	33,89	39,62	0,24	26,25	14,37	1,90	NP	NP	0	A-2-4	SM
14	0	0	9,42	75,53	5,35	9,69	11,85	2,14	NP	NP	0	A-2-4	SM
15	0	0	12,21	69,83	10,67	7,29	13,54	1,93	NP	NP	0	A-2-4	SM
16	0	0	1,62	80,28	7,10	11,00	10,10	1,98	NP	NP	0	A-4	SM

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de granulometria, compactação, limites de Atterberg e classificação (Continua)

Ponto	Granulometria (%)						Compactação		Limites de Atterberg			Classificação	
	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	W _{ot} (%)	MEAS (g/cm ³)	LL	LP	IP	HRB	USCS
17	0	0	5,39	76,68	2,86	15,07	17,12	1,66	NP	NP	0	A-4	ML
18	0	0	5,39	76,22	2,93	15,46	8,34	1,94	21,1	11,8	9,38	A-4	CL
19	19,56	5,22	5,03	31,91	16,40	21,87	18,44	1,85	39,7	19,6	20,0	A-6	CL
20	0,58	1,00	2,32	31,57	23,58	40,95	23,11	1,66	34,2	24,0	10,2	A-6	ML
21	40,64	26,24	1,37	9,57	7,22	14,97	18,08	1,72	36,7	20,3	16,3	A-2-6	SC
22	7,36	5,37	5,50	23,63	22,67	35,47	18,07	1,72	39,3	25,6	13,6	A-6	ML
23	0	0	5,87	89,43	2,72	1,98	8,83	2,15	NP	NP	0	A-2-4	SM
24	0	0	5,35	75,56	0,24	18,84	23,59	1,81	NP	NP	0	A-2-4	SM
25	0	0	3,34	62,79	5,12	28,75	14,79	1,98	25,2	10,9	14,2	A-6	CL
26	0,59	0,33	3,62	44,34	13,79	37,32	23,71	1,68	47,9	25,0	22,9	A-7-6	CL
27	0	0	3,43	17,04	17,70	61,83	17,77	1,75	31,1	17,3	13,7	A-6	CL
28	0,01	3,35	15,52	61,35	12,76	7,01	16,78	1,81	37,6	19,8	17,7	A-6	CL
29	5,06	0,33	14,06	20,22	15,35	44,97	27,74	1,64	37,6	19,8	17,7	A-6	CL
30	0	0	6,33	72,11	16,65	4,91	22,89	1,63	NP	NP	0	A-4	ML
31	0	0	0,74	63,58	30,70	4,98	30,53	1,37	NP	NP	0	A-4	ML

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de granulometria, compactação, limites de Atterberg e classificação (Continua)

Ponto	Granulometria (%)						Compactação		Limites de Atterberg			Classificação	
	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	W _{ot} (%)	MEAS (g/cm ³)	LL	LP	IP	HRB	USCS
32	0	0	3,01	11,52	40,31	45,17	31,64	1,45	NP	NP	0	A-4	ML
33	0	0	13,69	23,74	29,06	33,51	34,01	1,43	38,7	16,0	22,7	A-6	CL
34	0	0	13,69	21,88	29,92	34,50	34,01	1,43	38,7	22,7	16	A-6	CL
35	19,42	14,57	6,51	35,29	9,91	14,30	16,65	1,68	NP	NP	0	A-2-4	SM
36	27,07	18,23	6,00	31,48	10,28	6,95	15,90	1,95	NP	NP	0	A-2-4	SM
37	0	0	3,85	63,23	20,67	12,25	20,64	1,62	NP	NP	0	A-4	ML
38	0	0	3,09	76,35	10,67	9,89	14,05	1,86	22,8	13,2	9,6	A-4	CL
39	0	0	4,71	51,89	22,11	21,29	16,07	1,74	36,2	20,1	16,1	A-6	CL
40	0,85	0,12	7,10	68,79	5,46	17,68	17,7	1,71	25,7	19,3	6,3	A-4	ML-CL
41	2,25	1,37	9,16	34,58	15,00	37,64	17,7	1,64	37,1	17,9	19,2	A-6	CL
42	0	0	10,87	57,95	8,29	22,89	26,98	1,44	NP	NP	0	A-4	ML
43	0	0	13,78	46,35	10,60	29,27	29,29	1,44	NP	NP	0	A-4	SM
44	0	0	12,62	17,95	26,64	42,79	28,20	1,42	NP	NP	0	A-4	ML
45	0	0	12,91	4,13	27,99	54,97	31,23	1,36	NP	NP	0	A-4	ML
46	0	0	2,27	59,95	15,38	22,40	26,62	1,42	37,6	23,2	14,3	A-6	CL

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de granulometria, compactação, limites de Atterberg e classificação (finaliza)

Ponto	Granulometria (%)						Compactação		Limites de Atterberg			Classificação	
	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	W _{ot} (%)	MEAS (g/cm ³)	LL	LP	IP	HRB	USCS
47	0	0	5,00	58,54	4,94	31,52	21,69	1,53	38,0	22,5	15,5	A-6	CL
48	0	0	5,41	65,13	11,69	17,78	25,92	1,49	38,1	24,6	13,5	A-6	CL
49	0	0	3,00	60,82	6,77	29,41	25,46	1,55	43,5	23,5	19,9	A-7-6	CL
50	0	0	10,56	63,24	16,64	9,55	29,15	1,39	NP	NP	0	A-4	ML
51	0	0	3,34	75,21	10,14	11,31	31,57	1,37	NP	NP	0	A-4	ML
52	19,55	14,61	3,79	46,31	5,78	9,96	30,60	1,43	NP	NP	0	A-4	SM

4.2. Classificação MCT das amostras

Em todos os solos deste estudo, foram aplicados o ensaio MCT, ensaio de procedimento Mini-MCV e ensaio de perda de massa por imersão. Além disso, vale destacar que, mesmo sendo contrário à norma do ensaio MCT, restringindo apenas os solos que passam 100% de material na peneira de nº10 (2mm), utilizou-se os ensaios em todas as amostras com a real intenção de observar o comportamento mecânico dos solos que seriam descartados nesta etapa. A seguir, na Tabela 4.2, são exibidos os parâmetros do ensaio em cada amostra, como os valores de c' e e' oriundos do ensaio Mini-MCV e perda por imersão.

Tabela 4.2 – Parâmetros e Classificação MCT (Continua)

Ponto	c'	e'	MCT	% passante #10 (2,0mm)
01	1,80	1,17	NG'	95,66
02	1,80	1,16	NG'	95,66
03	0,90	1,35	NA'	95,74
04	1,35	1,20	NA'	100
05	0,66	1,68	NS'	100
06	1,33	1,33	NA'-NS'	100
07	2,01	0,85	LG'	97,67
08	1,33	0,88	LA'	100
10	1,80	1,22	NG'	100
11	0,25	1,22	LA	57,16
12	0,50	1,16	LA	57,16
13	0,50	1,17	LA	100
14	0,90	1,00	LA'	100
15	1,29	1,28	NA'	100
16	0,33	1,25	LA	100
17	0,50	1,08	LA	100
18	1,33	1,01	LA'	100
19	1,51	1,02	LG'/LA'	75,21
20	1,51	1,15	NA'/LG'	98,41
21	1,15	1,00	LA'	33,12
22	1,53	1,18	NA'	87,26
23	0,40	1,11	LA	100

Tabela 4.2 – Parâmetros e Classificação MCT (finaliza)

Ponto	c'	e'	MCT	% passante #10 (2,0mm)
24	0,19	1,11	LA	100
25	0,57	0,88	LA	100
26	1,51	1,22	NA'	99,07
27	1,53	1,10	LG'	100
28	1,51	1,30	NG'/NS'	96,64
29	1,14	0,97	LA'	94,60
30	1,51	1,27	NG'/NS'	100
31	0,57	1,38	LA	100
32	2,66	1,47	NG'	100
33	1,51	1,19	NA'	100
34	1,51	1,19	NA'	100
35	0,86	1,63	NS'	66,01
36	0,57	1,69	NA'/NS'	54,70
37	0,76	1,08	LA'	100
38	1,53	1,28	NG'	100
39	1,51	1,19	NA'	100
40	1,01	1,39	NA'	99,02
41	1,35	1,15	NA'/LA'	96,37
42	1,15	1,11	LA'	100
43	1,99	0,93	LG'	100
44	1,33	1,86	NS'	100
45	1,51	1,29	NG'/NS'	100
46	1,51	1,10	LG'/LA'	100
47	1,51	1,20	NA'	100
48	1,51	1,20	NA'	100
49	1,33	1,08	LA'	100
50	0,57	1,05	LA	100
51	1,80	1,27	NG'	100
52	1,51	1,04	LG'/LA'	65,84

Observou-se a predominância de solos arenosos, sendo destes, 10 solos de classificação LA (laterítico com presença de areia), 8 solos apresentaram classificação

LA' (laterítico arenoso), 11 solos de classificação NA' (não laterítico arenoso). No tocante aos solos argilosos, 3 foram classificados como LG' (laterítico argiloso), 6 solos sendo classificados como NG' (não laterítico argiloso), além de 3 solos considerados NS' (não laterítico siltoso). Vale destacar a existência de solos que estão no limite com outros solos na classificação MCT. Nesse sentido, 3 solos LG'/LA', 3 solos NG'/NS', 3 solos NA'/NS', 1 solo NA'/LG' e 1 classificado como NA'/LA'.

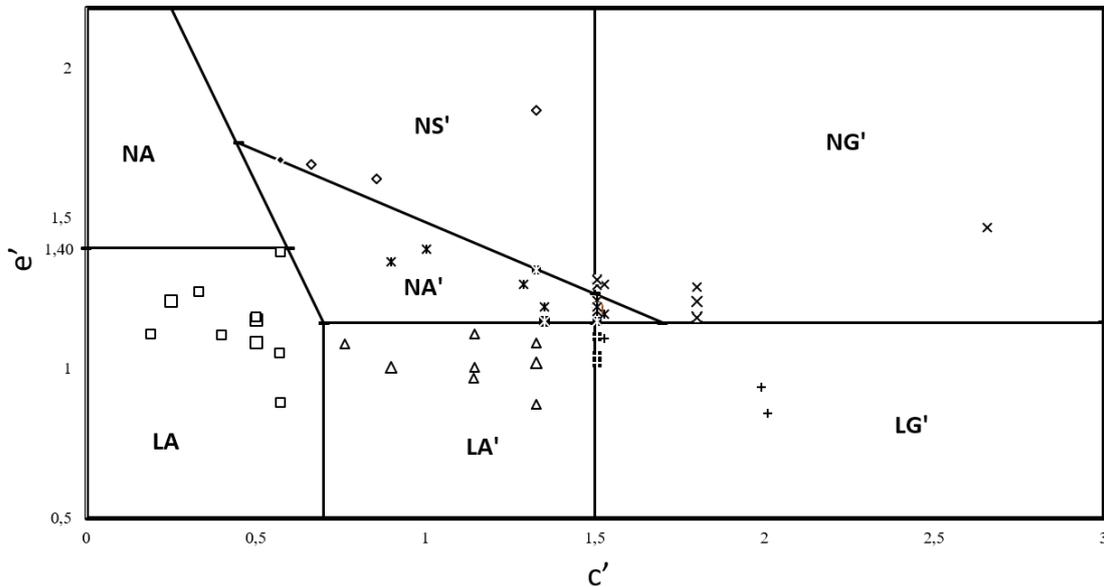


Figura 4.1 - Gráfico da classificação MCT

Na figura 4.2, observa-se que quanto maior for a variação do teor de umidade menor será a massa específica. Uma possível explicação para este fato reside na quantidade de água adicionada que impede da aproximação dos grãos, levando à separação e, conseqüentemente, causando o decréscimo do peso específico.

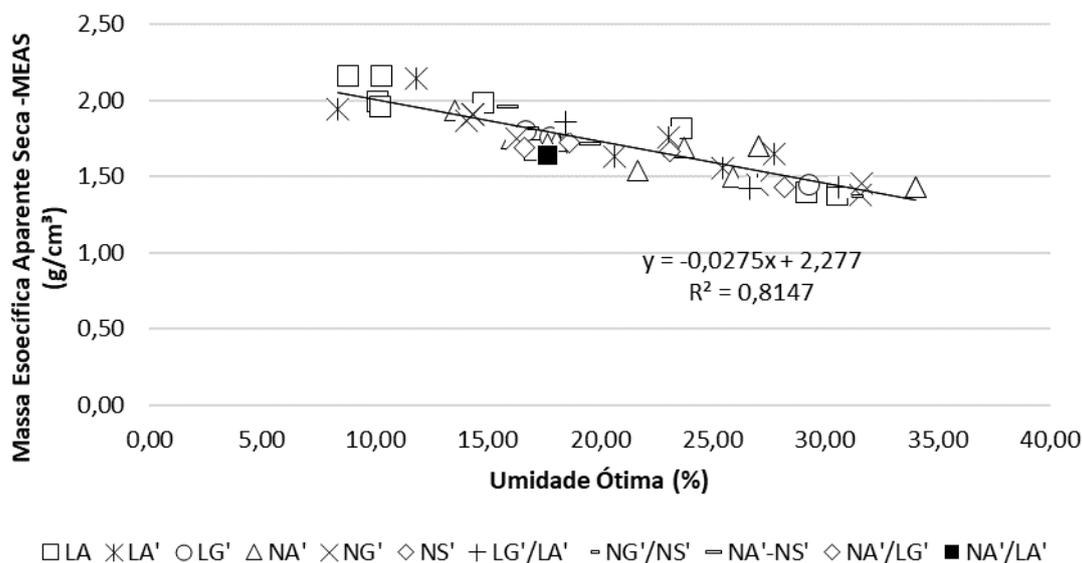


Figura 4.2 – Massa específica aparente seca x umidade ótima

4.3. Coeficientes resultantes do ensaio triaxial de cargas repetidas

Os resultados do triaxial de cargas repetidas e da modelagem computacional, pertencentes às fases 2 e 3 do programa experimental, respectivamente, são mais detalhados neste capítulo, visto que foram subdivididos por solos lateríticos e não lateríticos.

Na fase 2, os coeficientes do comportamento mecânico de cada solo do trecho do estudo são detalhadas, mediante as três condições diferentes de teores de umidade (W_{ot} , $W_{ot} - 2\%$ e $W_{ot} + 2\%$). É importante destacar a utilização do modelo composto proposto por MACÊDO (1996) que tende a afirmar um alto valor de R^2 , bem como por ser um dos modelos mais utilizados na literatura nacional. Os resultados dos parâmetros de regressão do M_R são mais detalhados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2 – Parâmetros de regressão do Triaxial de Cargas Repetidas - W_{ot} , $W_{ot} -2\%$ e $W_{ot} +2\%$ - Solos Lateríticos

Ponto	MCT	Coeficientes - W_{ot} (Umidade Ótima)				Coeficientes - $W_{ot} -2\%$ (Ramo Seco)				Coeficientes - $W_{ot} +2\%$ (Ramo Saturado)			
		k1	k2	k3	R ²	k1	k2	k3	R ²	k1	k2	k3	R ²
7	LG'	380,14	0,57	-0,17	0,98	339,62	0,27	-0,15	0,81	130,32	0,38	-0,10	0,72
27	LG'	820,30	0,64	-0,12	0,94	772,97	0,64	-0,12	0,94	52,66	0,29	-0,49	0,47
43	LG'	284,74	0,53	-0,17	0,96	378,87	0,50	-0,14	0,21	61,85	0,22	-0,25	0,62
23	LA	564,97	0,21	-0,39	0,27	476,73	0,41	-0,35	0,40	1696,71	0,00	0,98	0,89
16	LA	1071,64	0,56	-0,04	0,99	1234,85	0,56	-0,04	0,99	214,33	0,56	-0,04	0,99
11	LA	401,74	0,23	-0,29	0,44	417,82	0,22	-0,16	0,13	402,09	0,64	-0,04	0,86
12	LA	57,45	-0,01	-0,67	0,76	47,18	-0,01	-0,67	0,76	11,49	-0,01	-0,67	0,76
25	LA	375,33	0,25	-0,03	0,52	146,73	0,42	-0,74	0,68	1693,28	1,44	-0,48	0,91
17	LA	482,60	0,76	0,04	0,93	621,32	0,64	-0,09	0,95	65,87	0,25	-0,08	0,34
24	LA	1046,66	0,66	-0,05	0,99	1184,93	0,66	-0,05	0,99	239,69	0,49	0,10	0,88
50	LA	254,50	0,50	-0,15	0,93	326,57	0,39	-0,18	0,91	31,04	0,03	0,11	0,88
31	LA	79,69	0,44	-0,04	0,76	129,50	0,33	-0,17	0,70	67,35	0,44	-0,04	0,76
18	LA'	600,87	0,71	-0,40	0,15	371,29	0,30	-0,45	0,55	736,57	0,52	0,32	0,94
14	LA'	476,73	0,41	-0,35	0,40	333,49	0,19	-0,37	0,45	71,51	0,41	-0,35	0,40
21	LA'	600,87	0,71	-0,40	0,15	606,36	0,41	-0,11	0,96	374,66	0,49	-0,13	0,91
37	LA'	133,88	0,55	-0,10	0,83	193,18	0,40	-0,16	0,92	14,51	-0,01	-0,07	0,16
8	LA'	186,99	-0,04	0,04	0,02	266,10	-0,04	0,04	0,02	90,98	0,41	-0,24	0,84
49	LA'	228,71	0,48	-0,23	0,94	287,98	0,33	-0,23	0,76	62,08	0,21	-0,30	0,71
42	LA'	889,78	0,78	0,06	0,99	526,56	0,44	-0,10	0,95	64,08	0,04	0,09	0,18
29	LA'	189,25	0,30	-0,57	0,52	57,45	-0,01	-0,67	0,76	46,22	0,00	0,02	0,00
19	LG'/LA'	263,28	0,29	-0,49	0,47	297,51	0,29	-0,49	0,47	220,70	0,49	-0,19	0,63
46	LG'/LA'	79,15	0,27	-0,20	0,70	129,41	0,24	-0,14	0,67	61,86	0,22	-0,26	0,62
52	LG'/LA'	264,90	0,58	0,12	0,93	409,12	0,64	-0,02	0,95	58,83	0,16	-0,12	0,22

Tabela 4.3 - Coeficientes do Triaxial de Cargas Repetidas - W_{ot} , $W_{ot} - 2\%$ e $W_{ot} + 2\%$ - Solos Não Lateríticos

Ponto	MCT	Coeficientes - W_{ot} (Umidade Ótima)				Coeficientes - $W_{ot} - 2\%$ (Ramo Seco)				Coeficientes - $W_{ot} + 2\%$ (Ramo Saturado)			
		k1	k2	k3	R ²	k1	k2	k3	R ²	k1	k2	k3	R ²
1	NG'	475,34	0,22	-0,07	0,62	616,22	0,46	-0,09	0,99	174,13	0,43	-0,05	0,79
38	NG'	719,95	0,62	-0,11	0,96	746,54	0,44	-0,10	0,92	103,38	0,35	-0,12	0,61
2	NG'	491,73	0,22	-0,07	0,62	772,29	0,44	-0,10	0,92	106,94	0,35	-0,12	0,61
10	NG'	71,74	0,02	-0,52	0,90	327,46	0,30	-0,23	0,94	12,20	0,02	-0,52	0,90
51	NG'	156,69	0,55	-0,07	0,86	264,28	0,52	-0,12	0,93	21,45	-0,01	0,02	0,02
32	NG'	34,09	0,13	-0,37	0,88	58,02	0,06	-0,21	0,64	24,78	0,18	-0,51	0,98
15	NA'	146,73	0,42	-0,74	0,68	252,24	0,06	-0,06	0,01	24,97	0,01	-0,23	0,50
39	NA'	50,10	0,19	-0,33	0,83	135,94	0,23	-0,30	0,26	18,67	0,16	-0,47	0,88
40	NA'	441,14	0,42	-0,10	0,76	518,43	0,43	-0,12	0,74	25,02	-0,45	0,12	0,79
22	NA'	187,82	0,30	-0,63	0,58	203,61	0,30	-0,63	0,58	37,56	0,30	-0,63	0,58
47	NA'	368,57	0,53	-0,16	0,98	499,20	0,53	-0,16	0,98	204,79	0,53	-0,16	0,98
26	NA'	88,20	0,24	-0,38	0,82	164,40	0,12	-0,18	0,48	21,36	0,12	-0,36	0,91
48	NA'	667,86	0,75	-0,04	0,97	439,11	-0,15	0,41	0,95	121,09	0,36	-0,07	0,69
3	NA'	566,70	0,34	-0,18	0,94	534,01	0,34	-0,18	0,94	86,71	0,34	-0,18	0,94
4	NA'	52,17	0,17	-0,82	0,79	105,07	0,15	-0,58	0,74	47,71	0,23	-0,33	0,67
33	NA'	110,99	0,38	-0,19	0,78	256,58	0,28	-0,21	0,72	25,02	0,05	-0,25	0,73
34	NA'	108,32	0,38	-0,19	0,78	250,40	0,28	-0,21	0,72	24,41	0,05	-0,25	0,73
35	NS'	314,09	0,54	-0,05	0,95	333,73	0,42	-0,24	0,90	44,68	0,08	-0,05	0,04
5	NS'	39,64	0,27	-0,85	0,82	137,51	0,23	-0,27	0,81	22,61	0,39	-0,40	0,92
44	NS'	308,90	0,60	0,09	0,96	87,67	0,41	-0,02	0,66	28,21	0,07	-0,18	0,48
28	NG'/NS'	332,12	0,20	0,21	0,79	575,24	0,59	-0,19	0,97	215,01	0,48	-0,12	0,47
30	NG'/NS'	546,00	0,55	0,23	0,98	377,98	0,57	0,01	0,99	97,84	0,12	0,21	0,84
45	NG'/NS'	153,47	0,55	0,04	0,90	279,29	0,63	-0,16	0,83	21,92	-0,02	0,01	0,01
36	NA'-NS'	354,93	0,61	-0,05	0,88	479,15	0,61	-0,05	0,88	110,43	0,38	-0,20	0,81
6	NA'-NS'	33,27	0,24	-0,45	0,92	981,04	0,53	-0,25	0,92	11,95	0,24	-0,44	0,94

41	NA/LA'	48,81	0,22	-0,43	0,70	69,38	0,22	-0,43	0,70	42,02	0,24	-0,53	0,95
20	NA/LG'	98,06	0,19	-0,35	0,81	254,95	0,22	-0,17	0,63	49,83	0,21	-0,45	0,82

4.4. Modelagem computacional

Uns dos resultados previstos na fase 3 do programa experimental, a modelagem computacional utilizando o *software* SysTrain, utiliza coeficientes resultantes do modelo composto do triaxial de cargas repetidas, com isto gerando valores de tensões admissíveis para cada pavimento simulado, sendo detalhados nas Tabelas 4.4 a 4.9. Os valores representados pela nomenclatura “Sxx” e “Szz” do relatório de saída do *software* proporcionam o cálculo do M_R de cada solo, além dos cálculos de verificação da admissibilidade da tensão vertical e do número de ciclos de cargas “N”.

Tabela 4.4 - Resultados do SysTrain - Solos Lateríticos - Cenário I

Ponto	MCT	Módulo Resiliente W_{ot} - (Umidade Ótima)						Módulo Resiliente $W_{ot} -2\%$ - (Ramo seco)						Módulo Resiliente $W_{ot} +2\%$ - (Saturado)					
		Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)
7	LG'	-90,9	-378,9	0,09	0,37	0,28	119,99	-88,3	-305,4	0,08	0,30	0,21	222,69	-81,8	-286,1	0,08	0,28	0,20	58,31
27	LG'	-88,4	-349,9	0,08	0,34	0,26	206,28	-93,9	-381,2	0,09	0,38	0,28	199,66	-82,2	-292,1	0,08	0,29	0,20	54,68
43	LG'	-96	-352,9	0,09	0,35	0,25	103,36	-86,1	-291,9	0,08	0,29	0,20	138,43	-78,5	-250,6	0,07	0,25	0,17	29,30
23	LA	-75,7	-238	0,07	0,23	0,16	667,58	-86,2	-357,5	0,08	0,35	0,27	279,97						
16	LA	-83,3	-292	0,08	0,29	0,20	283,26	-94,2	-471,5	0,09	0,47	0,37	341,55	-81	-279,4	0,08	0,27	0,19	55,88
11	LA	-78,4	-283,5	0,07	0,28	0,20	352,60	-79,9	-236,0	0,07	0,23	0,15	323,25	-92,8	-338,9	0,09	0,33	0,24	93,88
12	LA	-76	-231,9	0,07	0,23	0,15	205,92	-75,5	-230,1	0,07	0,23	0,15	170,09	-76,4	-233,4	0,07	0,23	0,15	40,99
25	LA	-78,4	-264,8	0,07	0,26	0,18	208,74	-85,7	-321	0,08	0,32	0,23	153,75	-76,9	-231,9	0,07	0,23	0,15	103,05
17	LA	-76,6	-231,3	0,07	0,23	0,15	63,42	-90,7	-325,8	0,09	0,32	0,23	153,85	-76,3	-231,4	0,07	0,23	0,15	39,80
24	LA	-99,9	-471,6	0,09	0,47	0,37	242,65	-86,6	-335,5	0,08	0,33	0,24	255,61	-76,3	-231,6	0,07	0,23	0,15	55,56
50	LA	-91,7	-388	0,09	0,38	0,29	92,30	-83	-330,3	0,08	0,33	0,24	159,60	-76,1	-230,3	0,07	0,23	0,15	23,54
31	LA	-91,7	-361,5	0,09	0,36	0,26	29,12	-85,4	-342,1	0,08	0,34	0,25	73,05	-91,1	-386,3	0,09	0,38	0,29	24,46
18	LA'	-76,6	-232	0,07	0,23	0,15	203,30	-83,5	-260,9	0,08	0,26	0,17	382,39	-81,9	-244,7	0,08	0,24	0,16	112,16
14	LA'	-76,2	-253,4	0,07	0,25	0,17	309,70	-77,6	-249,4	0,07	0,24	0,17	398,41	-76,5	-231,3	0,07	0,23	0,15	48,81
21	LA'	-90,5	-294,4	0,09	0,29	0,20	205,37	-88,8	-340,7	0,08	0,34	0,25	259,18	-87,9	-298,6	0,08	0,29	0,21	139,44
37	LA'	-93,3	-295,1	0,09	0,29	0,20	42,24	-86	-325,5	0,08	0,32	0,23	90,78	-76	-229,7	0,07	0,22	0,15	16,81
8	LA'	-76,2	-234,3	0,07	0,23	0,15	189,23	-76	-234,4	0,07	0,23	0,15	269,34	-93,9	-324,5	0,09	0,32	0,23	48,81
49	LA'	-90,9	-351,9	0,09	0,35	0,26	99,28	-88,9	-309,3	0,08	0,30	0,22	183,54	-78,6	-255	0,07	0,25	0,17	60,77
42	LA'	-115,9	-381,6	0,11	0,38	0,26	152,06	-89,5	-318	0,08	0,31	0,22	210,75	-76,2	-232,9	0,07	0,23	0,15	48,15
29	LA'	-82,1	-300,2	0,08	0,30	0,21	210,48	-76	-234,3	0,07	0,23	0,15	203,83	-76,2	-232,2	0,07	0,23	0,15	44,82
19	LG'/LA'	-75,9	-234,6	0,07	0,23	0,15	306,49	-86,9	-301,4	0,08	0,30	0,21	310,68	-86	-296,6	0,08	0,29	0,21	89,77
46	LG'/LA'	-113,3	-568,8	0,11	0,56	0,45	51,82	-101,8	-375,3	0,10	0,37	0,27	90,35	-96,7	-438,6	0,09	0,43	0,34	48,38
52	LG'/LA'	-90,6	-361,5	0,09	0,36	0,27	55,54	-76,3	-239,6	0,07	0,23	0,16	82,26	-76,6	-237	0,076	0,23	0,16	48,61

Tabela 4.5 - Resultados do SysTrain - Solos Não Lateríticos - Cenário I

Ponto	MCT	Módulo Resiliente W_{ot} - (Umidade Ótima)						Módulo Resiliente W_{ot} -2% - (Ramo seco)						Módulo Resiliente W_{ot} +2% - (Saturado)					
		Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)
1	NG'	-75,9	-234,0	0,08	0,23	0,16	306,71	-74,8	-232,8	0,07	0,23	0,16	219,24	-86,4	-273,4	0,09	0,27	0,19	66,38
38	NG'	-103,1	-419,8	0,10	0,42	0,32	200,24	-84,6	-300,4	0,08	0,30	0,22	291,63	-86,2	-319,5	0,09	0,32	0,23	52,20
2	NG'	-75,8	-232,3	0,08	0,23	0,16	318,99	-74,8	-232,7	0,07	0,23	0,16	294,47	-81,8	-259,4	0,08	0,26	0,18	54,83
10	NG'	-76,0	-234,0	0,08	0,23	0,16	175,79	-77,5	-259,1	0,08	0,26	0,18	228,18	-76,2	-232,9	0,08	0,23	0,16	30,01
51	NG'	-94,9	-361,2	0,09	0,36	0,27	46,84	-75,1	-232,5	0,08	0,23	0,16	85,99	-76,0	-230,3	0,08	0,23	0,15	20,99
32	NG'	-76,3	-231,6	0,08	0,23	0,16	48,27	-76,8	-241,8	0,08	0,24	0,17	72,41	-77,3	-248,8	0,08	0,25	0,17	38,21
15	NA'	-75,9	-233,2	0,08	0,23	0,16	197,20	-76,5	-235,0	0,08	0,24	0,16	243,46	-76,3	-231,5	0,08	0,23	0,16	36,69
39	NA'	-82,4	-270,7	0,08	0,27	0,19	54,78	-79,7	-268,7	0,08	0,27	0,19	126,43	-76,4	-246,1	0,08	0,25	0,17	28,32
40	NA'	-88,2	-326,9	0,09	0,33	0,24	181,01	-86,2	-367,9	0,09	0,37	0,28	211,50	-84,0	-264,9	0,08	0,26	0,18	62,60
22	NA'	-82,7	-330,1	0,08	0,33	0,25	216,58	-83,4	-299,3	0,08	0,30	0,22	256,56	-82,9	-291,6	0,08	0,29	0,21	48,27
47	NA'	-92,3	-377,6	0,09	0,38	0,29	129,10	-91,6	-387,4	0,09	0,39	0,30	172,84	-78,2	-289,1	0,08	0,29	0,21	68,88
26	NA'	-81,5	-282,9	0,08	0,28	0,20	88,77	-77,5	-232,9	0,08	0,23	0,16	169,01	-76,3	-232,5	0,08	0,23	0,16	30,39
48	NA'	-96,9	-353,3	0,10	0,35	0,26	123,30	-78,0	-244,6	0,08	0,24	0,17	309,74	-83,2	-272,7	0,08	0,27	0,19	55,76
3	NA'	-75,9	-234,0	0,08	0,23	0,16	322,23	-80,6	-259,6	0,08	0,26	0,18	303,30	-88,2	-320,6	0,09	0,32	0,23	48,53
4	NA'	-76,4	-233,5	0,08	0,23	0,16	152,97	-76,0	-230,4	0,08	0,23	0,15	211,76	-79,3	-268,9	0,08	0,27	0,19	46,28
33	NA'	-89,1	-344,6	0,09	0,34	0,26	57,44	-86,7	-286,6	0,09	0,29	0,20	182,28	-76,5	-236,0	0,08	0,24	0,16	34,64
34	NA'	-91,2	-292,5	0,09	0,29	0,20	59,15	-79,3	-253,4	0,08	0,25	0,17	178,59	-76,1	-236,0	0,08	0,24	0,16	33,78
35	NS'	-84,4	-310,7	0,08	0,31	0,23	88,34	-85,8	-333,6	0,09	0,33	0,25	165,01	-76,3	-231,7	0,08	0,23	0,16	40,22
5	NS'	-75,9	-229,5	0,08	0,23	0,15	96,30	-78,9	-251,1	0,08	0,25	0,17	123,46	-87,6	-294,5	0,09	0,29	0,21	16,62
44	NS'	-96,9	-393,4	0,10	0,39	0,30	68,22	-96,3	-302,4	0,10	0,30	0,21	34,34	-78,4	-242,0	0,08	0,24	0,16	32,19
28	NG'/NS'	-80,3	-270,8	0,08	0,27	0,19	140,56	-96,6	-353,0	0,10	0,35	0,26	185,06	-87,4	-301,0	0,09	0,30	0,21	80,08
30	NG'/NS'	-80,0	-269,4	0,08	0,27	0,19	91,47	-84,1	-299,8	0,08	0,30	0,22	89,75	-78,6	-236,5	0,08	0,24	0,16	48,71
45	NG'/NS'	-92,8	-354,7	0,09	0,35	0,26	39,22	-99,3	-395,7	0,10	0,40	0,30	79,65	-76,1	-231,1	0,08	0,23	0,16	22,87

36	NA'-NS'	-95,7	-415,1	0,10	0,42	0,32	90,82	-96,5	-404,5	0,10	0,40	0,31	123,47	-84,5	-272,5	0,08	0,27	0,19	60,89
6	NA'-NS'	-84,7	-291,0	0,08	0,29	0,21	37,79	-84,1	-288,1	0,08	0,29	0,20	394,95	-80,5	-260,0	0,08	0,26	0,18	14,04
41	NA'/LA'	-115,9	-381,6	0,12	0,38	0,27	53,23	-77,2	-247,9	0,08	0,25	0,17	83,47	-76,8	-233,7	0,08	0,23	0,16	61,21
20	NA'/LG'	-80,0	-256,0	0,08	0,26	0,18	111,47	-77,7	-250,7	0,08	0,25	0,17	193,59	-76,2	-259,3	0,08	0,26	0,18	61,45

Tabela 4.6 - Resultados do SysTrain - Solos Lateríticos - Cenário II

Ponto	MCT	Módulo Resiliente W_{ot} - (Umidade Ótima)						Módulo Resiliente W_{ot} -2% - (Ramo seco)						Módulo Resiliente W_{ot} +2% - (Saturado)					
		Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)
7	LG'	-91,5	-280,7	0,0915	0,2807	0,1892	129,62	-88,4	-311,7	0,0884	0,3117	0,2233	221,83	-81,0	-268,9	0,081	0,2689	0,1879	58,57
27	LG'	-86,4	-300,4	0,0864	0,3004	0,214	208,42	-91	-295,5	0,091	0,2955	0,2045	204,15	-75,4	-228,8	0,0754	0,2288	0,1534	62,21
43	LG'	-93	-355	0,093	0,355	0,262	101,31	-86,7	-320,9	0,0867	0,3209	0,2342	136,35	-75,4	-244,6	0,0754	0,2446	0,1692	29,09
23	LA	-71,4	-219,3	0,0714	0,2193	0,1479	213,48	-81,3	-256,9	0,0813	0,2569	0,1756	318,97	-76,5	-222,2	0,0765	0,2222	0,1457	103,81
16	LA	-71,9	-237,3	0,0719	0,2373	0,1654	655,61	-88	-291,7	0,088	0,2917	0,2037	336,93	-88,6	-332,9	0,0886	0,3329	0,2443	58,28
11	LA	-83,2	-313,5	0,0832	0,3135	0,2303	281,97	-82,9	-278,5	0,0829	0,2785	0,1956	314,02	-92,5	-324,1	0,0925	0,3241	0,2316	93,93
12	LA	-81,1	-269,3	0,0811	0,2693	0,1882	364,20	-71,6	-217,6	0,0716	0,2176	0,146	176,85	-76	-278,3	0,076	0,2783	0,2023	393,95
25	LA	-75,7	-258,4	0,0757	0,2584	0,1827	207,04	-85,1	-338	0,0851	0,338	0,2529	145,28	-111,4	-617,7	0,111	0,61	0,50	99,55
17	LA	-96,1	-424,1	0,0961	0,4241	0,328	77,74	-89,3	-278,2	0,0893	0,2782	0,1889	155,37	-75,4	-220,5	0,0754	0,2205	0,1451	54,85
24	LA	-84	-320,3	0,084	0,3203	0,2363	221,93	-96,5	-420,2	0,0965	0,4202	0,3237	270,56	-75,3	-218,5	0,0753	0,2185	0,1432	23,34
50	LA	-87,1	-318,9	0,0871	0,3189	0,2318	93,32	-85,1	-325,4	0,0851	0,3254	0,2403	161,97	-93,2	-313,7	0,0932	0,3137	0,2205	24,96
31	LA	-74,9	-219,1	0,0749	0,2191	0,1442	27,23	-82,2	-308,2	0,0822	0,3082	0,226	73,71	-81	-252,3	0,081	0,2523	0,1713	118,06
18	LA'	-96,4	-359,3	0,0964	0,3593	0,2629	194,09	-77,8	-280,1	0,0778	0,2801	0,2023	353,09	-82,1	-250,9	0,082	0,2509	0,1688	113,61
14	LA'	-79,2	-256,2	0,0792	0,2562	0,177	314,72	-76,3	-250,8	0,0763	0,2508	0,1745	394,84	-82,1	-287,3	0,0821	0,2873	0,2052	45,46
21	LA'	-89,5	-287,7	0,0895	0,2877	0,1982	206,08	-84,8	-253	0,0848	0,253	0,1682	265,62	-84,3	-274,1	0,0843	0,2741	0,1898	138,43
37	LA'	-91,9	-352,5	0,0919	0,3525	0,2606	40,84	-86,9	-257,8	0,0869	0,2578	0,1709	96,38	-74,9	-216,9	0,0749	0,2169	0,142	16,90
8	LA'	-73,8	-223,9	0,0738	0,2239	0,1501	189,02	-73	-224,8	0,073	0,2248	0,1518	269,23	-86,1	-298,1	0,0861	0,2981	0,212	48,06
49	LA'	-90	-344,7	0,09	0,3447	0,2547	99,37	-78	-291,6	0,078	0,2916	0,2136	177,03	-76,9	-245,3	0,0769	0,2453	0,1684	61,34
42	LA'	-125,9	-574,4	0,1259	0,5744	0,4485	167,31	-82,3	-308,4	0,0823	0,3084	0,2261	203,31	-74,9	-225	0,0749	0,225	0,1501	47,92
29	LA'	-80,8	-257,6	0,0808	0,2576	0,1768	236,08	-72,5	-222,7	0,0725	0,2227	0,1502	211,24	-75	-220,8	0,075	0,2208	0,1458	44,77
19	LG'/LA'	-78,3	-266,2	0,0783	0,2662	0,1879	284,64	-74,1	-246,5	0,0741	0,2465	0,1724	330,19	-77,4	-271,5	0,0774	0,2715	0,1941	86,61
46	LG'/LA'	-105,3	-461,6	0,1053	0,4616	0,3563	53,32	-104,8	-397,6	0,1048	0,3976	0,2928	90,10	-97	-343,1	0,097	0,3431	0,2461	52,71
52	LG'/LA'	-90,4	-338,3	0,0904	0,3383	0,2479	54,88	-89,3	-315,1	0,0893	0,3151	0,2258	90,31	-76	-238	0,076	0,238	0,162	48,49

Tabela 4.7 - Resultados do SysTrain - Solos Não Lateríticos - Cenário II

Ponto	MCT	Módulo Resiliente W_{ot} - (Umidade Ótima)						Módulo Resiliente $W_{ot} - 2\%$ - (Ramo seco)						Módulo Resiliente $W_{ot} + 2\%$ - (Saturado)					
		Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)
1	NG'	-71,70	-219,40	0,07	0,22	0,15	304,34	-72,10	-221,20	0,07	0,22	0,15	216,70	-87,20	-259,60	0,09	0,26	0,17	66,94
38	NG'	-90,00	-388,20	0,09	0,39	0,30	185,32	-83,70	-294,40	0,08	0,29	0,21	290,93	-82,90	-275,80	0,08	0,28	0,19	52,71
2	NG'	-72,50	-222,20	0,07	0,22	0,15	316,91	-72,10	-221,90	0,07	0,22	0,15	291,21	-82,20	-249,20	0,08	0,25	0,17	55,35
10	NG'	-72,80	-222,20	0,07	0,22	0,15	180,76	-77,90	-247,40	0,08	0,25	0,17	232,19	-74,90	-221,80	0,07	0,22	0,15	31,02
51	NG'	-93,40	-353,20	0,09	0,35	0,26	46,51	-73,80	-221,90	0,07	0,22	0,15	85,83	-75,00	-218,00	0,08	0,22	0,14	20,95
32	NG'	-75,10	-231,50	0,08	0,23	0,16	48,04	-74,90	-226,10	0,07	0,23	0,15	73,64	-75,30	-240,20	0,08	0,24	0,16	38,80
15	NA'	-77,50	-272,10	0,08	0,27	0,19	169,79	-73,90	-227,40	0,07	0,23	0,15	243,45	-74,90	-220,70	0,07	0,22	0,15	37,21
39	NA'	-77,70	-233,50	0,08	0,23	0,16	57,70	-77,60	-247,70	0,08	0,25	0,17	129,75	-77,10	-235,90	0,08	0,24	0,16	29,26
40	NA'	-82,10	-356,00	0,08	0,36	0,27	173,30	-81,20	-260,40	0,08	0,26	0,18	217,45	-74,10	-222,40	0,07	0,22	0,15	64,73
22	NA'	-75,00	-260,20	0,08	0,26	0,19	252,67	-76,70	-248,10	0,08	0,25	0,17	289,59	-79,50	-272,90	0,08	0,27	0,19	50,03
47	NA'	-88,10	-346,70	0,09	0,35	0,26	128,00	-94,70	-359,60	0,09	0,36	0,26	179,02	-86,70	-319,80	0,09	0,32	0,23	71,56
26	NA'	-76,40	-244,70	0,08	0,24	0,17	93,52	-74,80	-233,70	0,07	0,23	0,16	167,63	-75,30	-219,90	0,08	0,22	0,14	31,20
48	NA'	-99,50	-342,50	0,10	0,34	0,24	126,06	-76,30	-231,90	0,08	0,23	0,16	302,17	-84,70	-260,20	0,08	0,26	0,18	56,40
3	NA'	-72,10	-219,40	0,07	0,22	0,15	320,53	-81,70	-296,50	0,08	0,30	0,21	295,11	-85,20	-297,30	0,09	0,30	0,21	48,73
4	NA'	-75,10	-224,60	0,08	0,22	0,15	158,83	-75,30	-229,80	0,08	0,23	0,15	211,39	-77,90	-249,50	0,08	0,25	0,17	47,62
33	NA'	-79,80	-259,40	0,08	0,26	0,18	58,87	-85,30	-272,50	0,09	0,27	0,19	183,94	-80,40	-233,60	0,08	0,23	0,15	35,08
34	NA'	-92,00	-312,60	0,09	0,31	0,22	58,33	-76,80	-250,00	0,08	0,25	0,17	177,21	-75,00	-222,50	0,08	0,22	0,15	34,43
35	NS'	-97,80	-365,00	0,10	0,37	0,27	94,94	-85,00	-317,20	0,09	0,32	0,23	166,91	-74,80	-228,30	0,07	0,23	0,15	40,18
5	NS'	-76,30	-232,80	0,08	0,23	0,16	94,93	-80,00	-244,50	0,08	0,24	0,16	125,40	-81,90	-260,10	0,08	0,26	0,18	17,20
44	NS'	-93,30	-358,10	0,09	0,36	0,26	65,99	-83,30	-273,30	0,08	0,27	0,19	32,40	-75,10	-219,90	0,08	0,22	0,14	32,78
28	NG'/NS'	-78,40	-253,30	0,08	0,25	0,17	137,41	-84,00	-293,80	0,08	0,29	0,21	176,82	-84,10	-264,70	0,08	0,26	0,18	80,25
30	NG'/NS'	-100,30	-393,80	0,10	0,39	0,29	114,80	-85,20	-279,80	0,09	0,28	0,19	90,31	-77,20	-219,90	0,08	0,22	0,14	47,59
45	NG'/NS'	-84,50	-366,10	0,08	0,37	0,28	37,38	-107,50	-359,40	0,11	0,36	0,25	85,87	-75,20	-218,70	0,08	0,22	0,14	22,86
36	NA'-NS'	-74,90	-221,80	0,07	0,22	0,15	42,79	-80,80	-282,50	0,08	0,28	0,20	387,81	-81,80	-238,70	0,08	0,24	0,16	14,95
6	NA'-NS'	-87,70	-387,90	0,09	0,39	0,30	86,42	-90,90	-303,40	0,09	0,30	0,21	121,47	-80,00	-275,30	0,08	0,28	0,20	59,19

41	NA/LA'	-77,80	-250,00	0,08	0,25	0,17	58,61	-76,10	-266,70	0,08	0,27	0,19	79,39	-79,50	-242,70	0,08	0,24	0,16	60,44
20	NA/LG'	-76,30	-220,50	0,08	0,22	0,14	118,43	-76,90	-247,20	0,08	0,25	0,17	193,66	-77,60	-239,40	0,08	0,24	0,16	65,21

Tabela 4.8 - Resultados do SysTrain - Solos Lateríticos - Cenário III

Ponto	MCT	Módulo Resiliente W_{oi} - (Umidade Ótima)						Módulo Resiliente W_{oi} -2% - (Ramo seco)						Módulo Resiliente W_{oi} +2% - (Saturado)					
		Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)
7	LG'	-105,6	-345,6	0,11	0,35	0,24	134,96	-81,4	-266,3	0,08	0,27	0,18	223,15	-88,0	-310,2	0,09	0,31	0,22	59,48
27	LG'	-99,4	-355,7	0,10	0,36	0,26	222,86	-89,6	-334,0	0,09	0,33	0,24	197,71	-89,4	-305,3	0,09	0,31	0,22	55,27
43	LG'	-83,4	-255,4	0,08	0,26	0,17	102,53	-103,0	-379,2	0,10	0,38	0,28	145,21	-82,9	-272,9	0,08	0,27	0,19	29,27
23	LA	-79,0	-249,7	0,08	0,25	0,17	660,49	-86,0	-287,5	0,09	0,29	0,20	310,80	-74,6	-237,0	0,07	0,24	0,16	285,36
16	LA	-89,8	-338,5	0,09	0,34	0,25	293,39	-89,7	-305,9	0,09	0,31	0,22	339,75	-81,0	-236,3	0,08	0,24	0,16	56,43
11	LA	-83,3	-305,5	0,08	0,31	0,22	349,44	-80,5	-247,3	0,08	0,25	0,17	320,27	-100,0	-347,9	0,10	0,35	0,25	98,42
12	LA	-76,3	-237,6	0,08	0,24	0,16	201,27	-76,5	-237,5	0,08	0,24	0,16	165,51	-80,3	-240,1	0,08	0,24	0,16	40,48
25	LA	-88,0	-297,5	0,09	0,30	0,21	214,14	-89,3	-336,9	0,09	0,34	0,25	150,60	-81,9	-239,9	0,08	0,29	0,21	95,47
17	LA	-105,2	-473,3	0,11	0,47	0,37	83,67	-107,7	-374,0	0,11	0,37	0,27	169,70	-80,7	-236,4	0,08	0,24	0,16	40,36
24	LA	-103,1	-518,9	0,10	0,52	0,42	246,22	-99,5	-565,6	0,10	0,57	0,47	270,61	-92,2	-296,9	0,09	0,30	0,20	62,78
50	LA	-98,9	-368,2	0,10	0,37	0,27	97,24	-87,9	-319,5	0,09	0,32	0,23	165,08	-80,4	-232,4	0,08	0,23	0,15	23,54
31	LA	-108,6	-381,7	0,11	0,38	0,27	31,36	-95,1	-348,2	0,10	0,35	0,25	75,83	-89,6	-324,9	0,09	0,32	0,24	24,48
18	LA'	-79,5	-245,3	0,08	0,25	0,17	203,41	-85,0	-316,7	0,09	0,32	0,23	341,26	-90,8	-267,0	0,08	0,24	0,16	109,86
14	LA'	-86,7	-305,5	0,09	0,31	0,22	302,86	-76,9	-238,8	0,08	0,24	0,16	406,66	-80,4	-239,0	0,08	0,24	0,16	49,38
21	LA'	-92,8	-362,9	0,09	0,36	0,27	186,88	-79,3	-244,9	0,08	0,24	0,17	258,81	-89,6	-314,4	0,09	0,31	0,22	139,61
37	LA'	-107,9	-374,9	0,11	0,37	0,27	44,52	-91,9	-333,3	0,09	0,33	0,24	93,12	-80,2	-231,0	0,08	0,23	0,15	16,83
8	LA'	-78,9	-243,8	0,08	0,24	0,16	189,34	-78,2	-242,2	0,08	0,24	0,16	269,47	-94,0	-331,8	0,09	0,33	0,24	48,46
49	LA'	-92,3	-349,8	0,09	0,35	0,26	100,33	-86,0	-299,9	0,09	0,30	0,21	182,80	-85,6	-270,9	0,09	0,27	0,19	60,98
42	LA'	-119,9	-462,4	0,12	0,46	0,34	158,50	-93,5	-344,7	0,09	0,34	0,25	212,81	-81,6	-236,6	0,08	0,24	0,16	48,25
29	LA'	-84,1	-292,7	0,08	0,29	0,21	217,48	-77,7	-242,1	0,08	0,24	0,16	198,68	-80,5	-237,3	0,08	0,24	0,16	44,83
19	LG'/LA'	-84,0	-276,5	0,08	0,28	0,19	287,11	-86,2	-298,4	0,09	0,30	0,21	311,60	-82,8	-283,3	0,08	0,28	0,20	88,95
46	LG'/LA'	132,3	-462,8	0,13	0,46	0,33	57,49	-129,7	-469,4	0,13	0,47	0,34	92,81	-130,0	-418,3	0,13	0,42	0,29	54,03
52	LG'/LA'	-113,9	-470,6	0,11	0,47	0,36	65,65	-99,1	-408,6	0,10	0,41	0,31	95,86	-84,2	-269,2	0,08	0,27	0,19	48,51

Tabela 4.9 - Resultados do SysTrain - Solos Não Lateríticos - Cenário III

Ponto	MCT	Módulo Resiliente W_{ot} - (Umidade Ótima)						Módulo Resiliente W_{ot} -2% - (Ramo seco)						Módulo Resiliente W_{ot} +2% - (Saturado)					
		Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)	Sxx (kPa)	Szz (kPa)	σ_3 (MPa)	σ_v (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)
1	NG'	-77,8	-241,7	0,08	0,24	0,16	307,61	-77,2	-240,8	0,08	0,24	0,16	221,77	-92,8	-286,2	0,09	0,29	0,19	68,33
38	NG'	-97,9	-380,1	0,10	0,38	0,28	196,35	-98,8	-371,0	0,10	0,37	0,27	305,36	-100,0	-316,8	0,10	0,32	0,22	55,50
2	NG'	-77,7	-241,7	0,08	0,24	0,16	319,64	-77,1	-240,8	0,08	0,24	0,16	297,39	-89,6	-285,1	0,09	0,29	0,20	55,95
10	NG'	-78,1	-241,9	0,08	0,24	0,16	172,65	-78,5	-241,0	0,08	0,24	0,16	235,00	-80,7	-242,6	0,08	0,24	0,16	29,55
51	NG'	-99,9	-368,9	0,10	0,37	0,27	48,16	-79,2	-241,2	0,08	0,24	0,16	88,09	-80,3	-232,0	0,08	0,23	0,15	20,97
32	NG'	-83,6	-256,2	0,08	0,26	0,17	46,98	-81,7	-241,2	0,08	0,24	0,16	73,21	-80,1	-239,3	0,08	0,24	0,16	39,94
15	NA'	-87,8	-298,8	0,09	0,30	0,21	168,45	-78,4	-241,5	0,08	0,24	0,16	243,38	-80,4	-239,0	0,08	0,24	0,16	36,54
39	NA'	-91,1	-284,1	0,09	0,28	0,19	55,36	-83,5	-272,6	0,08	0,27	0,19	127,76	-80,8	-258,8	0,08	0,26	0,18	27,94
40	NA'	-91,3	-293,4	0,09	0,29	0,20	186,64	-93,0	-345,3	0,09	0,35	0,25	221,31	-83,5	-258,0	0,08	0,26	0,17	62,51
22	NA'	-87,3	-313,5	0,09	0,31	0,23	232,92	-80,1	-294,1	0,08	0,29	0,21	254,92	-84,6	-310,1	0,08	0,31	0,23	46,24
47	NA'	-95,0	-345,0	0,10	0,35	0,25	133,91	-89,7	-328,9	0,09	0,33	0,24	176,85	-100,3	-383,8	0,10	0,38	0,28	74,87
26	NA'	-83,5	-267,3	0,08	0,27	0,18	92,40	-79,5	-243,7	0,08	0,24	0,16	167,86	-81,9	-250,7	0,08	0,25	0,17	29,81
48	NA'	-81,0	-244,7	0,08	0,24	0,16	109,88	-81,3	-259,8	0,08	0,26	0,18	316,65	-80,8	-237,7	0,08	0,24	0,16	55,87
3	NA'	-77,5	-241,6	0,08	0,24	0,16	322,43	-81,9	-270,5	0,08	0,27	0,19	302,19	-96,7	-344,9	0,10	0,34	0,25	49,51
4	NA'	-77,5	-250,3	0,08	0,25	0,17	141,85	-77,5	-238,1	0,08	0,24	0,16	207,57	-86,3	-265,1	0,09	0,27	0,18	48,08
33	NA'	-96,3	-340,1	0,10	0,34	0,24	59,68	-87,4	-276,4	0,09	0,28	0,19	184,81	-80,5	-238,1	0,08	0,24	0,16	34,83
34	NA'	-98,0	-383,5	0,10	0,38	0,29	56,91	-89,1	-298,0	0,09	0,30	0,21	177,61	-80,2	-240,4	0,08	0,24	0,16	33,85
35	NS'	-110,6	-442,4	0,11	0,44	0,33	100,46	-93,5	-328,3	0,09	0,33	0,23	173,29	-83,8	-238,2	0,08	0,24	0,15	40,53
5	NS'	-78,6	-257,5	0,08	0,26	0,18	85,45	-81,4	-277,8	0,08	0,28	0,20	120,00	-87,7	-287,9	0,09	0,29	0,20	16,85
44	NS'	-120,4	-444,1	0,12	0,44	0,32	78,33	-101,1	-345,5	0,10	0,35	0,24	34,94	-81,2	-238,0	0,08	0,24	0,16	32,51
28	NG'/NS'	-82,7	-283,4	0,08	0,28	0,20	142,96	-97,5	-460,4	0,10	0,46	0,36	174,38	-95,9	-288,7	0,10	0,29	0,19	84,82
30	NG'/NS'	-92,6	-311,2	0,09	0,31	0,22	102,56	-104,6	-421,9	0,10	0,42	0,32	102,19	-84,3	-252,8	0,08	0,25	0,17	49,80
45	NG'/NS'	-103,6	-397,3	0,10	0,40	0,29	41,88	-105,0	-400,5	0,11	0,40	0,30	82,52	-80,4	-232,9	0,08	0,23	0,15	22,84
36	NA'-NS'	-105,5	-474,5	0,11	0,47	0,37	95,61	-80,4	-243,5	0,08	0,24	0,16	114,36	-84,0	-306,0	0,08	0,31	0,22	58,75

6	NA'-NS'	-87,3	-313,5	0,09	0,31	0,23	36,51	-81,4	-266,3	0,08	0,27	0,18	397,72	-84,6	-264,3	0,08	0,26	0,18	14,20
41	NA'/LA'	-79,1	-272,6	0,08	0,27	0,19	107,61	-83,7	-287,6	0,08	0,29	0,20	78,79	-85,8	-260,9	0,09	0,26	0,18	59,28
20	NA'/LG'	-86,9	-264,5	0,09	0,26	0,18	59,28	-78,8	-241,2	0,08	0,24	0,16	196,29	-80,0	-266,1	0,08	0,27	0,19	61,64

Analisando os resultados de módulo resiliente obtidos pela modelagem computacional, observa-se a sensibilidade do solo quando exposto à variação da umidade. Os solos lateríticos e não lateríticos com presença de areia e arenosos possuíram melhores valores de M_R , ao contrário dos solos argilosos e siltosos que foram inferiores aos demais. BERNUCCI *et al.* (2008) descrevem que materiais de comportamento laterítico LA, LA' ou ainda LG' têm apresentado módulos de resiliência com cerca de 100 MPa a 500MPa, ou até mesmo superiores, dependendo do tipo de solo laterítico, sendo que os mais argilosos tendem a mostrar módulos menores que os mais arenosos.

No cenário I, os solos arenosos laterítico (LA') apresentaram nas amostras de ramo saturado o M_R entre 16 a 139 MPa; na umidade ótima entre 42 a 309 MPa e no ramo seco entre 90 a 398 MPa. Com isto, a variação utilizando os valores máximos de M_R entre solo saturado e a umidade ótima é de aproximadamente de 55%. Já quando comparado com o ramo saturado e ramo seco, a redução foi de 65%. Nos cenários II e III, os valores das umidades foram muito semelhantes aos do primeiro.

Para solos com presença de areia (LA), as amostras de ramo saturado apresentaram M_R entre 23 a 103 MPa, na umidade ótima 29 a 667 MPa e no ramo seco entre 73 a 341 MPa. A variação da umidade dos valores máximos do ramo saturado *versus* a umidade ótima, ao contrário do solo anterior, apresentou o valor de 84,6% de redução, ao mesmo tempo que entre o ramo saturado e o ramo seco, o valor chega a 69,8%. No cenário II, estas variações com o ramo saturado diminuem para 82,7% (W_{ot}) e 66,3% ($W_{ot} - 2\%$). Já no cenário III, houve um aumento de 85,1% (W_{ot}) e 71,0% ($W_{ot} - 2\%$).

Quanto aos solos não lateríticos arenosos (NA'), o ramo saturado apresentou valores de M_R entre 28 a 68 MPa, na umidade ótima 54 a 322 MPa e no ramo seco entre 126 a 309 MPa. A variação da umidade dos valores máximos entre o ramo saturado e a umidade ótima, ao contrário do solo anterior, apresentou o valor de 78,6% de redução, a comparação do ramo saturado contra o ramo seco, o valor chega a 77,8%. Semelhantemente como o LA', os demais cenários tiveram variações semelhantes às do cenário I.

Em solos lateríticos argilosos (LG'), as amostras saturadas tiveram pouca variação entre o M_R , chegando a valores aproximados de 57 MPa, na umidade ótima entre 103 a 206 MPa e no ramo seco entre 138 a 222 MPa. A variação dos valores

máximos de M_R entre os solos na umidade saturada e solos na umidade ótima chega a 71,7%, enquanto na umidade seca chega a 73,8%. No cenário II, o percentual da $W_{ot} - 2\%$ com W_{ot} sobe para 78,9% e quando comparado com $W_{ot} - 2\%$ chega a 77,8% de redução. O cenário III apresentou valores de variação muito semelhantes ao cenário II.

Nos solos não lateríticos argilosos (NG'), as amostras saturadas demonstraram valores de M_R entre 20 a 66 MPa, na umidade ótima entre 72 a 294 MPa e, por fim, na umidade seca entre 46 a 318 MPa. A variação da umidade dos valores máximos entre o ramo saturado e a umidade ótima, ao contrário do solo anterior, apresentou o valor de 79,2% de redução. Na comparação do ramo saturado contra o ramo seco, o valor chega a 77,5%. Em relação ao LA', os demais cenários tiveram variações semelhantes às do cenário I.

4.5. Deflexão total do pavimento

Os resultados da deflexão total do pavimento são mostrados nas Tabelas 4.10 a 4.11, de todos os pavimentos simulados previstos no programa experimental. Utilizou-se como limite de critério a AREMA (2013) como base para verificação de admissibilidade de 6,35 mm.

Tabela 4.10 - Resultados da deflexão total do pavimento - Solos Lateríticos

Ponto	MCT	Deflexão total – W_{ot}			Deflexão total - W_{ot} -2%			Deflexão total - W_{ot} +2%		
		δ (mm) - Cenário I	δ (mm) - Cenário II	δ (mm) - Cenário III	δ (mm) - Cenário I	δ (mm) - Cenário II	δ (mm) - Cenário III	δ (mm) - Cenário I	δ (mm) - Cenário II	δ (mm) - Cenário III
7	LG'	1,55	1,28	1,25	0,94	1,37	0,88	2,28	1,96	1,72
27	LG'	1,26	1,15	1,08	1,30	1,19	1,12	1,69	1,50	1,35
43	LG'	1,66	1,47	1,44	1,40	1,27	1,18	1,72	1,54	1,39
23	LA	0,62	0,62	0,66	0,77	0,76	0,76	3,30	1,75	0,57
16	LA	1,11	1,04	0,99	1,04	0,98	0,95	3,04	2,52	2,07
11	LA	0,70	0,70	0,71	0,80	0,78	0,78	2,62	2,28	1,71
12	LA	0,65	0,65	0,67	0,68	0,68	0,69	1,72	1,56	1,44
25	LA	1,06	1,00	0,97	0,89	0,85	0,85	2,40	2,11	1,89
17	LA	3,43	2,77	2,27	1,61	1,43	1,31	2,76	2,36	2,03
24	LA	1,31	1,20	1,12	1,23	1,13	1,06	3,30	2,73	2,30
50	LA	1,73	1,54	1,38	1,12	1,05	1,00	4,48	3,77	3,13
31	LA	4,43	3,97	2,90	1,58	1,53	1,39	5,02	4,02	3,21
18	LA'	1,04	0,97	0,92	0,66	0,66	0,68	2,97	2,49	2,13
14	LA'	0,77	0,75	0,76	0,66	0,66	0,68	1,99	2,28	1,51
21	LA'	1,04	0,97	0,93	0,97	0,92	0,91	1,40	1,28	1,18
37	LA'	3,45	2,86	2,35	1,61	1,44	1,32	4,28	3,62	3,01
8	LA'	1,00	0,95	0,94	0,86	0,83	0,83	2,23	1,92	1,65
49	LA'	1,49	1,34	1,22	0,99	0,93	0,91	1,53	1,39	1,27
42	LA'	2,47	2,08	1,79	1,12	1,04	1,00	2,55	2,23	1,97
29	LA'	0,72	0,67	0,71	0,77	0,75	0,77	2,42	2,12	1,89
19	LG'/LA'	0,69	0,69	0,70	0,67	0,67	0,69	1,35	1,23	1,13
46	LG'/LA'	2,02	1,70	1,46	1,59	1,38	1,26	3,38	2,74	2,22
52	LG'/LA'	4,14	3,37	2,72	2,43	2,06	1,77	2,14	1,88	1,67

Tabela 4.11- Resultados da deflexão total do pavimento - Solos Não Lateríticos

Ponto	MCT	Deflexão total – W_{ot}			Deflexão total - W_{ot} -2%			Deflexão total - W_{ot} +2%		
		δ (mm) - Cenário I	δ (mm) - Cenário II	δ (mm) - Cenário III	δ (mm) - Cenário I	δ (mm) - Cenário II	δ (mm) - Cenário III	δ (mm) - Cenário I	δ (mm) - Cenário II	δ (mm) - Cenário III
1	NG'	0,78	0,92	0,78	0,77	0,70	0,72	2,34	2,02	0,72
38	NG'	1,33	1,22	1,12	1,10	1,03	0,99	2,39	2,06	0,99
2	NG'	0,72	0,75	0,77	0,76	0,70	0,72	2,29	1,98	0,72
10	NG'	0,83	0,81	0,81	0,89	0,85	0,84	2,19	1,94	0,84
51	NG'	3,34	2,76	2,28	1,30	1,06	1,02	4,11	3,49	1,02
32	NG'	1,58	1,43	1,31	1,40	1,29	1,20	1,57	1,42	1,20
15	NA'	0,73	0,72	0,72	0,88	0,85	0,85	2,00	1,78	0,85
39	NA'	1,56	1,41	1,29	1,05	0,99	0,95	1,95	1,73	0,95
40	NA'	1,18	1,10	1,04	1,07	1,00	0,97	1,57	1,45	0,97
22	NA'	0,69	0,67	0,68	0,66	0,66	0,68	1,25	1,15	0,68
47	NA'	1,45	1,31	1,21	1,23	1,13	1,07	2,08	1,82	1,07
26	NA'	1,15	1,07	1,02	0,97	0,92	0,91	2,12	1,87	0,91
48	NA'	2,15	1,85	1,82	1,03	0,98	0,98	2,45	2,10	0,98
3	NA'	0,75	0,72	0,75	0,84	0,81	0,81	2,25	1,94	0,81
4	NA'	0,74	0,72	0,73	0,71	0,70	0,71	1,76	1,57	0,71
33	NA'	2,02	1,77	1,57	0,99	0,94	0,91	2,11	1,72	0,91
34	NA'	1,86	1,61	1,44	1,00	0,94	0,92	2,14	1,89	0,92
35	NS'	2,10	1,81	1,60	1,06	1,00	0,96	2,54	2,21	0,96
5	NS'	0,82	0,79	0,78	1,10	1,03	0,99	3,63	3,01	0,99
44	NS'	3,58	2,94	2,40	4,02	3,29	2,70	2,52	2,13	2,70
28	NG'/NS'	1,73	1,55	1,44	1,20	1,11	1,05	1,97	1,72	1,05
30	NG'/NS'	3,01	2,51	2,13	2,32	1,98	1,73	3,20	2,74	1,73
45	NG'/NS'	4,56	3,65	2,93	2,16	1,86	1,61	3,79	3,22	1,61

36	NA'-NS'	2,32	1,97	1,71	1,89	1,65	1,58	1,98	1,73	1,58
6	NA'-NS'	1,72	1,53	1,37	0,79	0,77	0,77	3,49	2,92	0,77
41	NA'/LA'	2,47	1,23	1,14	1,12	1,05	0,99	1,41	1,33	0,99
20	NA'/LG'	1,05	0,99	0,95	0,95	0,91	0,89	1,28	1,18	0,89

Observa-se que todos os pontos obtiveram admissibilidade acerca da deflexão total do pavimento recomendada pela AREMA, independente dos cenários e das condições de umidade. O cenário III exibiu a maior quantidade de solos com menor deflexão sobre os demais pontos, indicando que esta estrutura de pavimento possui mais resistência ao tráfego imposto na simulação.

4.6. Tensão verticais no topo do subleito

A seguir são expressos os resultados das tensões admissíveis no topo do subleito utilizando a modelagem computacional e os dados previstos no programa experimental desta dissertação. Vale salientar que os dados do M_R do solo e o “N” utilizaram o valor máximo da orientação da RFFSA, sendo aplicada a equação (7) de HEUKELON e KLOMP (1962). Logo após, é possível verificar o valor da tensão admissível no topo do subleito e confrontar com a tensão do projeto.

As Tabelas 4.12 a 4.17 exibem a admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito mediante a três cenários, sobre três diferentes tipos de variações de umidade e sendo apresentadas por laterítico e não laterítico.

Tabela 4.12 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Lateríticos - Cenário I

Pon- to	MCT	Tensão Vertical Admissível – W_{ot}					Tensão Vertical Admissível – $W_{ot} -2\%$					Tensão Vertical Admissível – $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação
7	LG'	378,9	119,99	2,20E+06	132,35	não ok	305,4	222,69	2,20E+06	245,63	não ok	286,1	58,31	2,20E+06	64,32	não ok
27	LG'	349,9	206,28	2,20E+06	227,53	não ok	381,2	199,66	2,20E+06	220,23	não ok	292,1	54,68	2,20E+06	60,31	não ok
43	LG'	352,9	103,36	2,20E+06	114,00	não ok	291,9	138,43	2,20E+06	152,69	não ok	250,6	55,14	2,20E+06	60,82	não ok
23	LA	238	667,58	2,20E+06	736,34	ok	357,5	279,97	2,20E+06	308,81	não ok	231,9	101,96	2,20E+06	112,46	não ok
16	LA	292	283,26	2,20E+06	312,44	ok	471,5	341,55	2,20E+06	376,73	não ok	279,4	55,88	2,20E+06	61,64	não ok
11	LA	283,5	352,60	2,20E+06	388,92	ok	236	323,25	2,20E+06	356,55	ok	338,9	93,88	2,20E+06	103,55	não ok
12	LA	231,9	205,92	2,20E+06	227,13	não ok	230,1	170,09	2,20E+06	187,61	não ok	233,4	40,99	2,20E+06	45,21	não ok
25	LA	264,8	208,74	2,20E+06	230,24	não ok	321	153,75	2,20E+06	169,59	não ok	231,9	103,05	2,20E+06	113,66	não ok
17	LA	231,3	63,42	2,20E+06	69,95	não ok	325,8	153,85	2,20E+06	169,70	não ok	231,4	39,80	2,20E+06	43,90	não ok
24	LA	471,6	242,65	2,20E+06	267,65	não ok	335,5	255,61	2,20E+06	281,94	não ok	231,6	55,56	2,20E+06	61,28	não ok
50	LA	388	92,30	2,20E+06	101,81	não ok	330,3	159,60	2,20E+06	176,04	não ok	230,3	23,54	2,20E+06	25,97	não ok
31	LA	361,5	29,12	2,20E+06	32,11	não ok	342,1	73,05	2,20E+06	80,57	não ok	386,3	24,46	2,20E+06	26,98	não ok
18	LA'	232	203,30	2,20E+06	224,24	não ok	260,9	382,39	2,20E+06	421,78	ok	244,7	112,16	2,20E+06	123,72	não ok
14	LA'	253,4	309,70	2,20E+06	341,60	ok	249,4	398,41	2,20E+06	439,45	ok	231,3	48,81	2,20E+06	53,84	não ok
21	LA'	294,4	205,37	2,20E+06	226,53	não ok	340,7	259,18	2,20E+06	285,88	não ok	298,6	139,44	2,20E+06	153,80	não ok
37	LA'	295,1	42,24	2,20E+06	46,59	não ok	325,5	90,78	2,20E+06	100,13	não ok	229,7	16,81	2,20E+06	18,54	não ok
8	LA'	234,3	189,23	2,20E+06	208,72	não ok	234,4	269,34	2,20E+06	297,08	ok	324,5	48,81	2,20E+06	53,83	não ok
49	LA'	351,9	99,28	2,20E+06	109,51	não ok	309,3	183,54	2,20E+06	202,44	não ok	255	60,77	2,20E+06	67,03	não ok
42	LA'	381,6	152,06	2,20E+06	167,72	não ok	318	210,75	2,20E+06	232,46	não ok	232,9	48,15	2,20E+06	53,11	não ok
29	LA'	300,2	210,48	2,20E+06	232,16	não ok	234,3	203,83	2,20E+06	224,82	não ok	232,2	44,82	2,20E+06	49,44	não ok
19	LG'/LA'	234,6	306,49	2,20E+06	338,06	ok	301,4	310,68	2,20E+06	342,68	ok	296,6	89,77	2,20E+06	99,01	não ok
46	LG'/LA'	568,8	51,82	2,20E+06	57,15	não ok	375,3	90,35	2,20E+06	99,65	não ok	438,6	48,38	2,20E+06	53,37	não ok
52	LG'/LA'	361,5	55,54	2,20E+06	61,27	não ok	239,6	82,26	2,20E+06	90,73	não ok	237	48,61	2,20E+06	53,61	não ok

Tabela 4.13 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Não Lateríticos - Cenário I

Ponto	MCT	Tensão Vertical Admissível - W_{ot}					Tensão Vertical Admissível - $W_{ot} -2\%$					Tensão Vertical Admissível - $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação
1	NG'	234	306,71	2,20E+06	338,31	ok	232,8	219,24	2,20E+06	241,83	ok	273,4	66,38	2,20E+06	73,22	não ok
38	NG'	419,8	200,24	2,20E+06	220,87	não ok	300,4	291,63	2,20E+06	321,67	ok	319,5	52,20	2,20E+06	57,57	não ok
2	NG'	232,3	318,99	2,20E+06	351,85	ok	232,7	294,47	2,20E+06	324,80	ok	259,4	54,83	2,20E+06	60,48	não ok
10	NG'	234	175,79	2,20E+06	193,89	não ok	259,1	228,18	2,20E+06	251,68	não ok	232,9	30,01	2,20E+06	33,10	não ok
51	NG'	361,2	46,84	2,20E+06	51,66	não ok	232,5	85,99	2,20E+06	94,85	não ok	230,3	20,99	2,20E+06	23,15	não ok
32	NG'	231,6	48,27	2,20E+06	53,24	não ok	241,8	72,41	2,20E+06	79,87	não ok	248,8	38,21	2,20E+06	42,15	não ok
15	NA'	233,2	197,20	2,20E+06	217,52	não ok	235	243,46	2,20E+06	268,54	ok	231,5	36,69	2,20E+06	40,47	não ok
39	NA'	270,7	54,78	2,20E+06	60,43	não ok	268,7	126,43	2,20E+06	139,45	não ok	246,1	28,32	2,20E+06	31,24	não ok
40	NA'	326,9	181,01	2,20E+06	199,66	não ok	367,9	211,50	2,20E+06	233,28	não ok	264,9	62,60	2,20E+06	69,05	não ok
22	NA'	330,1	216,58	2,20E+06	238,89	não ok	299,3	256,56	2,20E+06	282,98	não ok	291,6	48,27	2,20E+06	53,24	não ok
47	NA'	377,6	129,10	2,20E+06	142,40	não ok	387,4	172,84	2,20E+06	190,64	não ok	289,1	68,88	2,20E+06	75,98	não ok
26	NA'	282,9	88,77	2,20E+06	97,91	não ok	232,9	169,01	2,20E+06	186,42	não ok	232,5	30,39	2,20E+06	33,52	não ok
48	NA'	353,3	123,30	2,20E+06	136,00	não ok	244,6	309,74	2,20E+06	341,64	ok	272,7	55,76	2,20E+06	61,50	não ok
3	NA'	234	322,23	2,20E+06	355,42	ok	259,6	303,30	2,20E+06	334,54	ok	320,6	48,53	2,20E+06	53,52	não ok
4	NA'	233,5	152,97	2,20E+06	168,72	não ok	230,4	211,76	2,20E+06	233,57	ok	268,9	46,28	2,20E+06	51,05	não ok
33	NA'	344,6	57,44	2,20E+06	63,36	não ok	286,6	182,28	2,20E+06	201,06	não ok	236	34,64	2,20E+06	38,21	não ok
34	NA'	292,5	59,15	2,20E+06	65,24	não ok	253,4	178,59	2,20E+06	196,98	não ok	236	33,78	2,20E+06	37,26	não ok
35	NS'	310,7	88,34	2,20E+06	97,44	não ok	333,6	165,01	2,20E+06	182,01	não ok	231,7	40,22	2,20E+06	44,36	não ok
5	NS'	229,5	96,30	2,20E+06	106,22	não ok	251,1	123,46	2,20E+06	136,18	não ok	294,5	16,62	2,20E+06	18,33	não ok
44	NS'	393,4	68,22	2,20E+06	75,25	não ok	302,4	34,34	2,20E+06	37,88	não ok	242	32,19	2,20E+06	35,50	não ok
28	NG'/NS'	270,8	140,56	2,20E+06	155,04	não ok	353	185,06	2,20E+06	204,12	não ok	301	80,08	2,20E+06	88,32	não ok
30	NG'/NS'	269,4	91,47	2,20E+06	100,90	não ok	299,8	89,75	2,20E+06	99,00	não ok	236,5	48,71	2,20E+06	53,72	não ok
45	NG'/NS'	354,7	39,22	2,20E+06	43,26	não ok	395,7	79,65	2,20E+06	87,86	não ok	231,1	22,87	2,20E+06	25,23	não ok

36	NA'-NS'	415,1	90,82	2,20E+06	100,17	não ok	404,5	123,47	2,20E+06	136,19	não ok	272,5	60,89	2,20E+06	67,16	não ok
6	NA'-NS'	291	37,79	2,20E+06	41,68	não ok	288,1	394,95	2,20E+06	435,63	ok	260	14,04	2,20E+06	15,48	não ok
41	NA'/LA'	381,6	53,23	2,20E+06	58,71	não ok	247,9	83,47	2,20E+06	92,07	não ok	233,7	61,21	2,20E+06	67,52	não ok
20	NA'/LG'	256	111,47	2,20E+06	122,95	não ok	250,7	193,59	2,20E+06	213,53	não ok	259,3	61,45	2,20E+06	67,77	não ok

Tabela 4.14 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Lateríticos - Cenário II

Ponto	MCT	Tensão Vertical Admissível - W_{ot}					Tensão Vertical Admissível - $W_{ot} -2\%$					Tensão Vertical Admissível - $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação
7	LG'	280,7	129,62	2,20E+06	142,97	não ok	311,7	221,83	2,20E+06	244,68	não ok	268,9	58,57	2,20E+06	64,60	não ok
27	LG'	300,4	208,42	2,20E+06	229,89	não ok	295,5	204,15	2,20E+06	225,18	não ok	228,8	62,21	2,20E+06	68,62	não ok
43	LG'	355	101,31	2,20E+06	111,74	não ok	320,9	136,35	2,20E+06	150,39	não ok	244,6	54,89	2,20E+06	60,54	não ok
23	LA	219,3	213,48	2,20E+06	235,47	ok	217,6	176,85	2,20E+06	195,06	não ok	222,4	42,71	2,20E+06	47,11	não ok
16	LA	237,3	655,61	2,20E+06	723,14	ok	256,9	318,97	2,20E+06	351,83	ok	222,2	103,81	2,20E+06	114,51	não ok
11	LA	313,5	281,97	2,20E+06	311,01	não ok	291,7	336,93	2,20E+06	371,63	ok	332,9	58,28	2,20E+06	64,28	não ok
12	LA	269,3	364,20	2,20E+06	401,71	ok	278,5	314,02	2,20E+06	346,37	ok	324,1	93,93	2,20E+06	103,60	não ok
25	LA	258,4	207,04	2,20E+06	228,37	não ok	338	145,28	2,20E+06	160,25	não ok	617,7	99,55	2,20E+06	109,81	não ok
17	LA	424,1	77,74	2,20E+06	85,74	não ok	278,2	155,37	2,20E+06	171,37	não ok	252,3	39,91	2,20E+06	44,02	não ok
24	LA	320,3	221,93	2,20E+06	244,79	não ok	420,2	270,56	2,20E+06	298,43	não ok	220,5	54,85	2,20E+06	60,49	não ok
50	LA	318,9	93,32	2,20E+06	102,93	não ok	325,4	161,97	2,20E+06	178,66	não ok	218,5	23,34	2,20E+06	25,75	não ok
31	LA	219,1	27,23	2,20E+06	30,04	não ok	308,2	73,71	2,20E+06	81,30	não ok	313,7	24,96	2,20E+06	27,54	não ok
18	LA'	359,3	194,09	2,20E+06	214,08	não ok	280,1	353,09	2,20E+06	389,46	ok	250,9	113,61	2,20E+06	125,32	não ok
14	LA'	256,2	314,72	2,20E+06	347,13	ok	250,8	394,84	2,20E+06	435,51	ok	287,3	45,46	2,20E+06	50,14	não ok
21	LA'	287,7	206,08	2,20E+06	227,30	não ok	253	265,62	2,20E+06	292,98	ok	274,1	138,43	2,20E+06	152,68	não ok
37	LA'	352,5	40,84	2,20E+06	45,04	não ok	257,8	96,38	2,20E+06	106,30	não ok	216,9	16,90	2,20E+06	18,65	não ok
8	LA'	223,9	189,02	2,20E+06	208,49	não ok	224,8	269,23	2,20E+06	296,96	ok	298,1	48,06	2,20E+06	53,01	não ok
49	LA'	344,7	99,37	2,20E+06	109,61	não ok	291,6	177,03	2,20E+06	195,27	não ok	245,3	61,34	2,20E+06	67,65	não ok
42	LA'	574,4	167,31	2,20E+06	184,55	não ok	308,4	203,31	2,20E+06	224,25	não ok	225	47,92	2,20E+06	52,86	não ok
29	LA'	257,6	236,08	2,20E+06	260,40	ok	222,7	211,24	2,20E+06	233,00	ok	220,8	44,77	2,20E+06	49,38	não ok
19	LG'/LA'	266,2	284,64	2,20E+06	313,96	ok	246,5	330,19	2,20E+06	364,20	ok	271,5	86,61	2,20E+06	95,53	não ok
46	LG'/LA'	461,6	53,32	2,20E+06	58,82	não ok	397,6	90,10	2,20E+06	99,38	não ok	343,1	52,71	2,20E+06	58,14	não ok
52	LG'/LA'	338,3	54,88	2,20E+06	60,53	não ok	315,1	90,31	2,20E+06	99,62	não ok	238	48,49	2,20E+06	53,48	não ok

Tabela 4.15 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Não Lateríticos - Cenário II

Ponto	MCT	Tensão Vertical Admissível - W_{ot}					Tensão Vertical Admissível - $W_{ot} -2\%$					Tensão Vertical Admissível - $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação
1	NG'	219,4	304,34	2,20E+06	335,69	ok	221,2	216,70	2,20E+06	239,02	ok	259,6	66,94	2,20E+06	73,84	não ok
38	NG'	388,2	185,32	2,20E+06	204,40	não ok	294,4	290,93	2,20E+06	320,89	ok	275,8	52,71	2,20E+06	58,14	não ok
2	NG'	222,2	316,91	2,20E+06	349,55	ok	221,9	291,21	2,20E+06	321,21	ok	249,2	55,35	2,20E+06	61,05	não ok
10	NG'	222,2	180,76	2,20E+06	199,38	não ok	247,4	232,19	2,20E+06	256,11	ok	221,8	31,02	2,20E+06	34,21	não ok
51	NG'	353,2	46,51	2,20E+06	51,30	não ok	221,9	85,83	2,20E+06	94,67	não ok	218	20,95	2,20E+06	23,11	não ok
32	NG'	231,5	48,04	2,20E+06	52,99	não ok	226,1	73,64	2,20E+06	81,23	não ok	240,2	38,80	2,20E+06	42,79	não ok
15	NA'	272,1	169,79	2,20E+06	187,28	não ok	227,4	243,45	2,20E+06	268,53	ok	220,7	37,21	2,20E+06	41,04	não ok
39	NA'	233,5	57,70	2,20E+06	63,65	não ok	247,7	129,75	2,20E+06	143,11	não ok	235,9	29,26	2,20E+06	32,28	não ok
40	NA'	356	173,30	2,20E+06	191,15	não ok	260,4	217,45	2,20E+06	239,84	não ok	222,4	64,73	2,20E+06	71,40	não ok
22	NA'	260,2	252,67	2,20E+06	278,69	ok	248,1	289,59	2,20E+06	319,42	ok	272,9	50,03	2,20E+06	55,18	não ok
47	NA'	346,7	128,00	2,20E+06	141,19	não ok	359,6	179,02	2,20E+06	197,46	não ok	319,8	71,56	2,20E+06	78,93	não ok
26	NA'	244,7	93,52	2,20E+06	103,15	não ok	233,7	167,63	2,20E+06	184,90	não ok	219,9	31,20	2,20E+06	34,42	não ok
48	NA'	342,5	126,06	2,20E+06	139,04	não ok	231,9	302,17	2,20E+06	333,29	ok	260,2	56,40	2,20E+06	62,21	não ok
3	NA'	219,4	320,53	2,20E+06	353,55	ok	296,5	295,11	2,20E+06	325,50	ok	297,3	48,73	2,20E+06	53,75	não ok
4	NA'	224,6	158,83	2,20E+06	175,19	não ok	229,8	211,39	2,20E+06	233,16	ok	249,5	47,62	2,20E+06	52,52	não ok
33	NA'	259,4	58,87	2,20E+06	64,93	não ok	272,5	183,94	2,20E+06	202,89	não ok	233,6	35,08	2,20E+06	38,69	não ok
34	NA'	312,6	58,33	2,20E+06	64,34	não ok	250	177,21	2,20E+06	195,46	não ok	222,5	34,43	2,20E+06	37,98	não ok
35	NS'	365	94,94	2,20E+06	104,72	não ok	317,2	166,91	2,20E+06	184,10	não ok	228,3	40,18	2,20E+06	44,32	não ok
5	NS'	232,8	94,93	2,20E+06	104,70	não ok	244,5	125,40	2,20E+06	138,32	não ok	260,1	17,20	2,20E+06	18,97	não ok
44	NS'	358,1	65,99	2,20E+06	72,79	não ok	273,3	32,40	2,20E+06	35,73	não ok	219,9	32,78	2,20E+06	36,16	não ok
28	NG'/NS'	253,3	137,41	2,20E+06	151,56	não ok	293,8	176,82	2,20E+06	195,04	não ok	264,7	80,25	2,20E+06	88,52	não ok
30	NG'/NS'	393,8	114,80	2,20E+06	126,62	não ok	279,8	90,31	2,20E+06	99,61	não ok	219,9	47,59	2,20E+06	52,49	não ok
45	NG'/NS'	366,1	37,38	2,20E+06	41,23	não ok	359,4	85,87	2,20E+06	94,72	não ok	218,7	22,86	2,20E+06	25,22	não ok

36	NA'-NS'	221,8	42,79	2,20E+06	47,20	não ok	282,5	387,81	2,20E+06	427,76	ok	238,7	14,95	2,20E+06	16,49	não ok
6	NA'-NS'	387,9	86,42	2,20E+06	95,32	não ok	303,4	121,47	2,20E+06	133,98	não ok	275,3	59,19	2,20E+06	65,28	não ok
41	NA'/LA'	250	58,61	2,20E+06	64,65	não ok	266,7	79,39	2,20E+06	87,57	não ok	242,7	60,44	2,20E+06	66,66	não ok
20	NA'/LG'	220,5	118,43	2,20E+06	130,62	não ok	247,2	193,66	2,20E+06	213,60	não ok	239,4	65,21	2,20E+06	71,92	não ok

Tabela 4.16 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Lateríticos - Cenário III

Ponto	MCT	Tensão Vertical Admissível – W_{ot}					Tensão Vertical Admissível – $W_{ot} -2\%$					Tensão Vertical Admissível – $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação
7	LG'	345,6	134,96	2,20E+06	148,86	não ok	266,3	223,15	2,20E+06	246,13	não ok	310,2	59,48	2,20E+06	65,61	não ok
27	LG'	355,7	222,86	2,20E+06	245,82	não ok	334	197,71	2,20E+06	218,08	não ok	305,3	55,27	2,20E+06	60,96	não ok
43	LG'	255,4	102,53	2,20E+06	113,10	não ok	379,2	145,21	2,20E+06	160,16	não ok	268,4	54,41	2,20E+06	60,02	não ok
23	LA	249,7	660,49	2,20E+06	728,52	Ok	287,5	310,80	2,20E+06	342,81	ok	539,5	138,01	2,20E+06	152,23	não ok
16	LA	338,5	293,39	2,20E+06	323,61	não ok	305,9	339,75	2,20E+06	374,75	ok	236,3	56,43	2,20E+06	62,24	não ok
11	LA	305,5	349,44	2,20E+06	385,44	Ok	247,3	320,27	2,20E+06	353,26	ok	347,9	98,42	2,20E+06	108,56	não ok
12	LA	237,6	201,27	2,20E+06	222,00	não ok	237,5	165,51	2,20E+06	182,55	não ok	240,1	40,48	2,20E+06	44,65	não ok
25	LA	297,5	214,14	2,20E+06	236,19	não ok	336,9	150,60	2,20E+06	166,12	não ok	239,9	95,47	2,20E+06	105,31	não ok
17	LA	473,3	83,67	2,20E+06	92,29	não ok	374	169,70	2,20E+06	187,18	não ok	236,4	40,36	2,20E+06	44,51	não ok
24	LA	518,9	246,22	2,20E+06	271,58	não ok	565,6	270,61	2,20E+06	298,48	não ok	296,9	62,78	2,20E+06	69,24	não ok
50	LA	368,2	97,24	2,20E+06	107,26	não ok	319,5	165,08	2,20E+06	182,09	não ok	232,4	23,54	2,20E+06	25,96	não ok
31	LA	381,7	31,36	2,20E+06	34,59	não ok	348,2	75,83	2,20E+06	83,64	não ok	324,9	24,48	2,20E+06	27,00	não ok
18	LA'	245,3	203,41	2,20E+06	224,37	não ok	316,7	341,26	2,20E+06	376,41	ok	267	109,86	2,20E+06	121,18	não ok
14	LA'	305,5	302,86	2,20E+06	334,05	Ok	238,8	406,66	2,20E+06	448,55	ok	239	49,38	2,20E+06	54,47	não ok
21	LA'	362,9	186,88	2,20E+06	206,13	não ok	244,9	258,81	2,20E+06	285,47	ok	314,4	139,61	2,20E+06	153,99	não ok
37	LA'	374,9	44,52	2,20E+06	49,11	não ok	333,3	93,12	2,20E+06	102,72	não ok	231	16,83	2,20E+06	18,56	não ok
8	LA'	243,8	189,34	2,20E+06	208,84	não ok	242,2	269,47	2,20E+06	297,23	ok	331,8	48,46	2,20E+06	53,45	não ok
49	LA'	349,8	100,33	2,20E+06	110,66	não ok	299,9	182,80	2,20E+06	201,63	não ok	270,9	60,98	2,20E+06	67,26	não ok
42	LA'	462,4	158,50	2,20E+06	174,83	não ok	344,7	212,81	2,20E+06	234,73	não ok	236,6	48,25	2,20E+06	53,22	não ok
29	LA'	292,7	217,48	2,20E+06	239,88	não ok	242,1	198,68	2,20E+06	219,14	não ok	237,3	44,83	2,20E+06	49,44	não ok
19	LG'/LA'	276,5	287,11	2,20E+06	316,68	Ok	298,4	311,60	2,20E+06	343,69	ok	283,3	88,95	2,20E+06	98,11	não ok
46	LG'/LA'	462,8	57,49	2,20E+06	63,42	não ok	469,4	92,81	2,20E+06	102,37	não ok	418,3	54,03	2,20E+06	59,59	não ok
52	LG'/LA'	470,6	65,65	2,20E+06	72,41	não ok	408,6	95,86	2,20E+06	105,73	não ok	269,2	48,51	2,20E+06	53,51	não ok

Tabela 4.17 - Verificação da admissibilidade da tensão vertical no topo do subleito - Solos Não Lateríticos – Cenário III

Ponto	MCT	Tensão Vertical Admissível – W_{ot}					Tensão Vertical Admissível – $W_{ot} -2\%$					Tensão Vertical Admissível – $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	σ_v adm (kPa)	Situação
1	NG'	241,7	307,61	2,20E+06	339,29	Ok	240,8	221,77	2,20E+06	244,61	ok	286,2	68,33	2,20E+06	75,37	não ok
38	NG'	380,1	196,35	2,20E+06	216,58	não ok	371	305,36	2,20E+06	336,81	não ok	316,8	55,50	2,20E+06	61,22	não ok
2	NG'	241,7	319,64	2,20E+06	352,56	Ok	240,8	297,39	2,20E+06	328,03	ok	285,1	55,95	2,20E+06	61,71	não ok
10	NG'	241,9	172,65	2,20E+06	190,43	não ok	241	235,00	2,20E+06	259,20	ok	242,6	29,55	2,20E+06	32,59	não ok
51	NG'	368,9	48,16	2,20E+06	53,12	não ok	241,2	88,09	2,20E+06	97,16	não ok	232	20,97	2,20E+06	23,13	não ok
32	NG'	256,2	46,98	2,20E+06	51,82	não ok	241,2	73,21	2,20E+06	80,75	não ok	239,3	39,94	2,20E+06	44,05	não ok
15	NA'	298,8	168,45	2,20E+06	185,80	não ok	241,5	243,38	2,20E+06	268,45	ok	239	36,54	2,20E+06	40,30	não ok
39	NA'	284,1	55,36	2,20E+06	61,06	não ok	272,6	127,76	2,20E+06	140,92	não ok	258,8	27,94	2,20E+06	30,82	não ok
40	NA'	293,4	186,64	2,20E+06	205,87	não ok	345,3	221,31	2,20E+06	244,11	não ok	258	62,51	2,20E+06	68,94	não ok
22	NA'	313,5	232,92	2,20E+06	256,92	não ok	294,1	254,92	2,20E+06	281,18	não ok	310,1	46,24	2,20E+06	51,01	não ok
47	NA'	345	133,91	2,20E+06	147,70	não ok	328,9	176,85	2,20E+06	195,07	não ok	383,8	74,87	2,20E+06	82,59	não ok
26	NA'	267,3	92,40	2,20E+06	101,92	não ok	243,7	167,86	2,20E+06	185,15	não ok	250,7	29,81	2,20E+06	32,88	não ok
48	NA'	244,7	109,88	2,20E+06	121,20	não ok	259,8	316,65	2,20E+06	349,27	ok	237,7	55,87	2,20E+06	61,63	não ok
3	NA'	241,6	322,43	2,20E+06	355,64	Ok	270,5	302,19	2,20E+06	333,31	ok	344,9	49,51	2,20E+06	54,61	não ok
4	NA'	250,3	141,85	2,20E+06	156,46	não ok	238,1	207,57	2,20E+06	228,96	não ok	265,1	48,08	2,20E+06	53,04	não ok
33	NA'	340,1	59,68	2,20E+06	65,83	não ok	276,4	184,81	2,20E+06	203,85	não ok	238,1	34,83	2,20E+06	38,42	não ok
34	NA'	383,5	56,91	2,20E+06	62,78	não ok	298	177,61	2,20E+06	195,90	não ok	240,4	33,85	2,20E+06	37,34	não ok
35	NS'	442,4	100,46	2,20E+06	110,81	não ok	328,3	173,29	2,20E+06	191,13	não ok	238,2	40,53	2,20E+06	44,71	não ok
5	NS'	257,5	85,45	2,20E+06	94,25	não ok	277,8	120,00	2,20E+06	132,36	não ok	287,9	16,85	2,20E+06	18,59	não ok
44	NS'	444,1	78,33	2,20E+06	86,40	não ok	345,5	34,94	2,20E+06	38,54	não ok	238	32,51	2,20E+06	35,86	não ok
28	NG'/NS'	283,4	142,96	2,20E+06	157,68	não ok	460,4	174,38	2,20E+06	192,34	não ok	288,7	84,82	2,20E+06	93,56	não ok
30	NG'/NS'	311,2	102,56	2,20E+06	113,12	não ok	421,9	102,19	2,20E+06	112,71	não ok	252,8	49,80	2,20E+06	54,93	não ok
45	NG'/NS'	397,3	41,88	2,20E+06	46,19	não ok	400,5	82,52	2,20E+06	91,02	não ok	232,9	22,84	2,20E+06	25,19	não ok

36	NA'-NS'	474,5	95,61	2,20E+06	105,46	não ok	243,5	114,36	2,20E+06	126,14	não ok	306	58,75	2,20E+06	64,80	não ok
6	NA'-NS'	313,5	36,51	2,20E+06	40,27	não ok	266,3	397,72	2,20E+06	438,69	ok	264,3	14,20	2,20E+06	15,66	não ok
41	NA'/LA'	272,6	107,61	2,20E+06	118,69	não ok	241,2	196,29	2,20E+06	216,51	não ok	266,1	61,64	2,20E+06	67,99	não ok
20	NA'/LG'	264,5	59,28	2,20E+06	65,39	não ok	287,6	78,79	2,20E+06	86,90	não ok	260,9	59,28	2,20E+06	65,39	não ok

Observa-se a grande quantidade de pontos não admissíveis da tensão vertical utilizando a equação de HEUKELOM e KLOMP (1962). Em todos os cenários, a quantidade de pontos na W_{ot} foi inferior ao da $W_{ot} - 2\%$ (ramo seco), demonstrando que a redução da umidade proporciona o aumento do M_R .

No caso dos pontos que não foram admissíveis, uma das possíveis explicações para este fenômeno poderia estar voltada à composição mineralógica do solo, ou seja, o poder da cimentação ou secagem de cada solo do trecho estudado. Com isso, é necessária a realização dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura associados com os ensaios de espectroscopia de raio x por dispersão em energia.

Um possível questionamento frente a estes resultados estaria voltado no momento da cura e após a compactação do ensaio triaxial de cargas repetidas, com isto, esteja interferindo nos resultados do M_R . ROSA (2020) profere que, por conta das altas tensões de sucção, os solos lateríticos, após um período de 48h pós-compactação, passam por um processo de secagem e cimentação, retraindo-se formando trincamentos e neste momento podem atingir a sua maior resistência, gerando valores de M_R muito mais elevados que os valores de M_R logo após a compactação. Para CARVALHO *et al.* (2015), o teor de umidade é afetada durante a compactação gerando pressão da água nos poros e diminuindo a energia de compactação. Isso piora à medida que o teor de umidade do solo é aumentado, com a consequência de mais redução da energia efetiva.

Os pontos que estão com a situação não admissível também podem ter sido influenciados pela umidade após a chuva, atingido as camadas superiores do solo. Caso não haja uma boa drenagem, está umidade é retida nas camadas inferiores e, conseqüentemente, prejudicando os valores de M_R . Conforme os estudos de LOPES (2017), os materiais de comportamento argiloso, LA' e lateritas apresentam valor de entrada de ar elevado, altas sucções na umidade ótima de compactação e condutividade saturada muito baixa, sendo o inverso para solos LA e NA'.

Na pesquisa de PASCOAL *et al.* (2021), foram utilizadas três amostras de diferentes horizontes pedológicos, sendo de classificação LG' e compactando as suas amostras em três diferentes moldes de cilindros, sendo de energia padrão (EP), energia intermediária (EI) e de energia modificada (EM). Os resultados foram confrontados por cinco diferentes modelos resilientes, dentro estes, destaca-se a diferença de 190,4% entre o M_R realizado pelo molde com compactação EM e o molde EP.

4.7. Número de ciclo de carga simulado “N Calc”

Mediante o resultado da tensão vertical do topo do subleito resultante do *software* SysTrain (S_{zz}) e, posteriormente, o valor calculado do M_R com estes resultados, foi possível verificar o número de ciclos para cada pavimento simulado aplicando à equação (7) - HEUKELON e KLOMP (1962). Nas Tabelas 4.18 a 4.23, são expostos os ciclos de cargas existentes para cada solo laterítico e não laterítico, dos três cenários propostos na simulação e das três variações de umidade (W_{ot} , $W_{ot} - 2\%$ e $W_{ot} + 2\%$).

Neste contexto, existe uma preocupação em comparar o número de ciclos de cargas recomendado pela RFFSA *apud*, STOPATTO (1987) e o número de ciclo real do pavimento estimado por uma simulação computacional, além de verificar as possíveis causas para um determinado valor baixo de “N”.

Tabela 4.18 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Lateríticos - Cenário I

Ponto	MCT	Cálculo do N - Umidade Ótima - W_{ot}					Cálculo do N - Ramo Seco - $W_{ot} - 2\%$					Cálculo do N - Ramo Saturado - $W_{ot} + 2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)
7	LG'	378,9	119,99	2,20E+06	1,93E+01	8,78E-06	305,4	222,69	2,20E+06	6,63E+04	3,01E-02	286,1	58,31	2,20E+06	2,08E+00	9,46E-07
27	LG'	349,9	206,28	2,20E+06	4,21E+03	1,92E-03	381,2	199,66	2,20E+06	1,15E+03	5,23E-04	292,1	54,68	2,20E+06	1,50E+00	6,82E-07
43	LG'	352,9	103,36	2,20E+06	1,21E+01	5,49E-06	291,9	138,43	2,20E+06	4,33E+02	1,97E-04	250,6	55,14	2,20E+06	2,87E+00	1,30E-06
23	LA	238	667,58	2,20E+06	4,11E+22	1,87E+16	357,5	279,97	2,20E+06	1,92E+05	8,74E-02	231,9	101,96	2,20E+06	2,19E+02	9,94E-05
16	LA	292	283,26	2,20E+06	7,70E+06	3,50E+00	471,5	341,55	2,20E+06	6,03E+04	2,74E-02	279,4	55,88	2,20E+06	1,93E+00	8,78E-07
11	LA	283,5	352,60	2,20E+06	1,71E+09	7,76E+02	236	323,25	2,20E+06	2,05E+10	9,32E+03	338,9	93,88	2,20E+06	8,83E+00	4,01E-06
12	LA	231,9	205,92	2,20E+06	1,52E+06	6,92E-01	230,1	170,09	2,20E+06	8,08E+04	3,67E-02	233,4	40,99	2,20E+06	1,19E+00	5,42E-07
25	LA	264,8	208,74	2,20E+06	2,13E+05	9,68E-02	321	153,75	2,20E+06	4,75E+02	2,16E-04	231,9	103,05	2,20E+06	2,40E+02	1,09E-04
17	LA	231,3	63,42	2,20E+06	8,35E+00	3,80E-06	325,8	153,85	2,20E+06	4,16E+02	1,89E-04	231,4	39,80	2,20E+06	1,11E+00	5,05E-07
24	LA	471,6	242,65	2,20E+06	9,59E+02	4,36E-04	335,5	255,61	2,20E+06	1,26E+05	5,75E-02	231,6	55,56	2,20E+06	4,24E+00	1,93E-06
50	LA	388	92,30	2,20E+06	4,08E+00	1,85E-06	330,3	159,60	2,20E+06	5,17E+02	2,35E-04	230,3	23,54	2,20E+06	2,80E-01	1,27E-07
31	LA	361,5	29,12	2,20E+06	1,83E-01	8,31E-08	342,1	73,05	2,20E+06	2,52E+00	1,15E-06	386,3	24,46	2,20E+06	1,30E-01	5,91E-08
18	LA'	232	203,30	2,20E+06	1,21E+06	5,50E-01	260,9	382,39	2,20E+06	1,36E+11	6,19E+04	244,7	112,16	2,20E+06	3,16E+02	1,44E-04
14	LA'	253,4	309,70	2,20E+06	1,11E+09	5,07E+02	249,4	398,41	2,20E+06	1,84E+12	8,35E+05	231,3	48,81	2,20E+06	2,40E+00	1,09E-06
21	LA'	294,4	205,37	2,20E+06	3,56E+04	1,62E-02	340,7	259,18	2,20E+06	1,24E+05	5,62E-02	298,6	139,44	2,20E+06	3,75E+02	1,70E-04
37	LA'	295,1	42,24	2,20E+06	6,28E-01	2,86E-07	325,5	90,78	2,20E+06	9,16E+00	4,16E-06	229,7	16,81	2,20E+06	1,58E-01	7,18E-08
8	LA'	234,3	189,23	2,20E+06	3,12E+05	1,42E-01	234,4	269,34	2,20E+06	2,63E+08	1,20E+02	324,5	48,81	2,20E+06	7,25E-01	3,30E-07
49	LA'	351,9	99,28	2,20E+06	9,77E+00	4,44E-06	309,3	183,54	2,20E+06	4,55E+03	2,07E-03	255	60,77	2,20E+06	4,11E+00	1,87E-06
42	LA'	381,6	152,06	2,20E+06	9,70E+01	4,41E-05	318	210,75	2,20E+06	1,79E+04	8,12E-03	232,9	48,15	2,20E+06	2,21E+00	1,00E-06
29	LA'	300,2	210,48	2,20E+06	3,81E+04	1,73E-02	234,3	203,83	2,20E+06	1,07E+06	4,85E-01	232,2	44,82	2,20E+06	1,68E+00	7,65E-07
19	LG'/LA'	234,6	306,49	2,20E+06	5,88E+09	2,67E+03	301,4	310,68	2,20E+06	2,55E+07	1,16E+01	296,6	89,77	2,20E+06	1,46E+01	6,66E-06
46	LG'/LA'	568,8	51,82	2,20E+06	2,25E-01	1,02E-07	375,3	90,35	2,20E+06	4,31E+00	1,96E-06	438,6	48,38	2,20E+06	3,29E-01	1,49E-07
52	LG'/LA'	361,5	55,54	2,20E+06	7,73E-01	3,52E-07	239,6	82,26	2,20E+06	3,27E+01	1,49E-05	237	48,61	2,20E+06	2,13E+00	9,70E-07

Tabela 4.19 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Não Lateríticos – Cenário I

Ponto	MCT	Cálculo do N - Umidade Ótima – W_{ot}					Cálculo do N - Ramo Seco – $W_{ot} -2\%$					Cálculo do N - Ramo Saturado – $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)
1	NG'	234	306,71	2,20E+06	6,40E+09	2,91E+03	232,8	219,24	2,20E+06	4,40E+06	2,00E+00	273,4	66,38	2,20E+06	4,49E+00	2,04E-06
38	NG'	419,8	200,24	2,20E+06	4,57E+02	2,08E-04	300,4	291,63	2,20E+06	7,81E+06	3,55E+00	319,5	52,20	2,20E+06	9,37E-01	4,26E-07
2	NG'	232,3	318,99	2,20E+06	2,20E+10	9,98E+03	232,7	294,47	2,20E+06	2,62E+09	1,19E+03	259,4	54,83	2,20E+06	2,42E+00	1,10E-06
10	NG'	234	175,79	2,20E+06	1,02E+05	4,66E-02	259,1	228,18	2,20E+06	1,32E+06	5,99E-01	232,9	30,01	2,20E+06	4,74E-01	2,16E-07
51	NG'	361,2	46,84	2,20E+06	4,82E-01	2,19E-07	232,5	85,99	2,20E+06	5,51E+01	2,51E-05	230,3	20,99	2,20E+06	2,25E-01	1,02E-07
32	NG'	231,6	48,27	2,20E+06	2,28E+00	1,04E-06	241,8	72,41	2,20E+06	1,37E+01	6,25E-06	248,8	38,21	2,20E+06	7,72E-01	3,51E-07
15	NA'	233,2	197,20	2,20E+06	6,60E+05	3,00E-01	235	243,46	2,20E+06	2,83E+07	1,29E+01	231,5	36,69	2,20E+06	8,51E-01	3,87E-07
39	NA'	270,7	54,78	2,20E+06	2,02E+00	9,20E-07	268,7	126,43	2,20E+06	4,02E+02	1,83E-04	246,1	28,32	2,20E+06	3,61E-01	1,64E-07
40	NA'	326,9	181,01	2,20E+06	2,08E+03	9,45E-04	367,9	211,50	2,20E+06	3,15E+03	1,43E-03	264,9	62,60	2,20E+06	3,95E+00	1,80E-06
22	NA'	330,1	216,58	2,20E+06	1,57E+04	7,12E-03	299,3	256,56	2,20E+06	8,29E+05	3,77E-01	291,6	48,27	2,20E+06	9,78E-01	4,45E-07
47	NA'	377,6	129,10	2,20E+06	3,18E+01	1,44E-05	387,4	172,84	2,20E+06	2,49E+02	1,13E-04	289,1	68,88	2,20E+06	4,11E+00	1,87E-06
26	NA'	282,9	88,77	2,20E+06	1,82E+01	8,29E-06	232,9	169,01	2,20E+06	6,19E+04	2,81E-02	232,5	30,39	2,20E+06	4,92E-01	2,24E-07
48	NA'	353,3	123,30	2,20E+06	3,66E+01	1,66E-05	244,6	309,74	2,20E+06	2,66E+09	1,21E+03	272,7	55,76	2,20E+06	2,11E+00	9,59E-07
3	NA'	234	322,23	2,20E+06	2,37E+10	1,08E+04	259,6	303,30	2,20E+06	3,85E+08	1,75E+02	320,6	48,53	2,20E+06	7,39E-01	3,36E-07
4	NA'	233,5	152,97	2,20E+06	1,54E+04	6,98E-03	230,4	211,76	2,20E+06	2,81E+06	1,28E+00	268,9	46,28	2,20E+06	1,11E+00	5,06E-07
33	NA'	344,6	57,44	2,20E+06	1,00E+00	4,55E-07	286,6	182,28	2,20E+06	1,05E+04	4,79E-03	236	34,64	2,20E+06	6,76E-01	3,07E-07
34	NA'	292,5	59,15	2,20E+06	2,02E+00	9,17E-07	253,4	178,59	2,20E+06	4,09E+04	1,86E-02	236	33,78	2,20E+06	6,28E-01	2,86E-07
35	NS'	310,7	88,34	2,20E+06	1,02E+01	4,64E-06	333,6	165,01	2,20E+06	6,47E+02	2,94E-04	231,7	40,22	2,20E+06	1,15E+00	5,21E-07
5	NS'	229,5	96,30	2,20E+06	1,47E+02	6,69E-05	251,1	123,46	2,20E+06	6,11E+02	2,78E-04	294,5	16,62	2,20E+06	1,14E-01	5,16E-08
44	NS'	393,4	68,22	2,20E+06	1,14E+00	5,19E-07	302,4	34,34	2,20E+06	3,51E-01	1,59E-07	242	32,19	2,20E+06	5,15E-01	2,34E-07
28	NG'/NS'	270,8	140,56	2,20E+06	1,05E+03	4,77E-04	353	185,06	2,20E+06	1,16E+03	5,28E-04	301	80,08	2,20E+06	7,11E+00	3,23E-06
30	NG'/NS'	269,4	91,47	2,20E+06	3,03E+01	1,38E-05	299,8	89,75	2,20E+06	1,37E+01	6,24E-06	236,5	48,71	2,20E+06	2,17E+00	9,87E-07
45	NG'/NS'	354,7	39,22	2,20E+06	3,31E-01	1,50E-07	395,7	79,65	2,20E+06	1,98E+00	9,00E-07	231,1	22,87	2,20E+06	2,63E-01	1,19E-07

36	NA'-NS'	415,1	90,82	2,20E+06	2,80E+00	1,27E-06	404,5	123,47	2,20E+06	1,54E+01	7,00E-06	272,5	60,89	2,20E+06	3,07E+00	1,39E-06
6	NA'-NS'	291	37,79	2,20E+06	4,84E-01	2,20E-07	288,1	394,95	2,20E+06	2,10E+10	9,54E+03	260	14,04	2,20E+06	1,08E-01	4,92E-08
41	NA'/LA'	381,6	53,23	2,20E+06	5,85E-01	2,66E-07	247,9	83,47	2,20E+06	2,87E+01	1,30E-05	233,7	61,21	2,20E+06	6,55E+00	2,98E-06
20	NA'/LG'	256	111,47	2,20E+06	2,01E+02	9,14E-05	250,7	193,59	2,20E+06	1,55E+05	7,04E-02	259,3	61,45	2,20E+06	4,00E+00	1,82E-06

Tabela 4.20 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Lateríticos – Cenário II

Ponto	MCT	Cálculo do N - Umidade Ótima – W_{ot}					Cálculo do N - Ramo Seco – $W_{ot} -2\%$					Cálculo do N - Ramo Saturado – $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)
7	LG'	280,7	129,62	2,20E+06	3,38E+02	1,54E-04	311,7	221,83	2,20E+06	4,69E+04	2,13E-02	268,9	58,57	2,20E+06	2,74E+00	1,25E-06
27	LG'	300,4	208,42	2,20E+06	3,30E+04	1,50E-02	295,5	204,15	2,20E+06	3,11E+04	1,41E-02	228,8	62,21	2,20E+06	7,98E+00	3,63E-06
43	LG'	355	101,31	2,20E+06	1,04E+01	4,73E-06	320,9	136,35	2,20E+06	1,63E+02	7,43E-05	244,6	54,89	2,20E+06	3,13E+00	1,42E-06
23	LA	219,3	213,48	2,20E+06	8,23E+06	3,74E+00	217,6	176,85	2,20E+06	3,45E+05	1,57E-01	222,4	42,71	2,20E+06	1,65E+00	7,50E-07
16	LA	237,3	655,61	2,20E+06	1,79E+22	8,13E+15	256,9	318,97	2,20E+06	1,64E+09	7,44E+02	222,2	103,81	2,20E+06	3,77E+02	1,71E-04
11	LA	313,5	281,97	2,20E+06	1,91E+06	8,67E-01	291,7	336,93	2,20E+06	2,96E+08	1,35E+02	332,9	58,28	2,20E+06	1,18E+00	5,36E-07
12	LA	269,3	364,20	2,20E+06	1,46E+10	6,62E+03	278,5	314,02	2,20E+06	1,72E+08	7,83E+01	324,1	93,93	2,20E+06	1,14E+01	5,16E-06
25	LA	258,4	207,04	2,20E+06	2,75E+05	1,25E-01	338	145,28	2,20E+06	1,80E+02	8,19E-05	617,7	99,55	2,20E+06	8,97E-01	4,08E-07
17	LA	424,1	77,74	2,20E+06	1,39E+00	6,31E-07	278,2	155,37	2,20E+06	2,28E+03	1,04E-03	252,3	39,91	2,20E+06	8,46E-01	3,85E-07
24	LA	320,3	221,93	2,20E+06	3,24E+04	1,47E-02	420,2	270,56	2,20E+06	1,23E+04	5,60E-03	220,5	54,85	2,20E+06	5,05E+00	2,30E-06
50	LA	318,9	93,32	2,20E+06	1,20E+01	5,46E-06	325,4	161,97	2,20E+06	6,89E+02	3,13E-04	218,5	23,34	2,20E+06	3,07E-01	1,40E-07
31	LA	219,1	27,23	2,20E+06	4,33E-01	1,97E-07	308,2	73,71	2,20E+06	4,18E+00	1,90E-06	313,7	24,96	2,20E+06	1,79E-01	8,15E-08
18	LA'	359,3	194,09	2,20E+06	1,59E+03	7,23E-04	280,1	353,09	2,20E+06	2,38E+09	1,08E+03	250,9	113,61	2,20E+06	2,84E+02	1,29E-04
14	LA'	256,2	314,72	2,20E+06	1,26E+09	5,73E+02	250,8	394,84	2,20E+06	1,16E+12	5,29E+05	287,3	45,46	2,20E+06	8,46E-01	3,85E-07
21	LA'	287,7	206,08	2,20E+06	5,14E+04	2,34E-02	253	265,62	2,20E+06	3,72E+07	1,69E+01	274,1	138,43	2,20E+06	7,95E+02	3,61E-04
37	LA'	352,5	40,84	2,20E+06	3,67E-01	1,67E-07	257,8	96,38	2,20E+06	5,97E+01	2,71E-05	216,9	16,90	2,20E+06	1,74E-01	7,89E-08
8	LA'	223,9	189,02	2,20E+06	6,42E+05	2,92E-01	224,8	269,23	2,20E+06	6,87E+08	3,12E+02	298,1	48,06	2,20E+06	8,98E-01	4,08E-07
49	LA'	344,7	99,37	2,20E+06	1,10E+01	5,01E-06	291,6	177,03	2,20E+06	5,96E+03	2,71E-03	245,3	61,34	2,20E+06	5,18E+00	2,36E-06
42	LA'	574,4	167,31	2,20E+06	1,17E+01	5,32E-06	308,4	203,31	2,20E+06	1,67E+04	7,58E-03	225	47,92	2,20E+06	2,49E+00	1,13E-06
29	LA'	257,6	236,08	2,20E+06	2,67E+06	1,21E+00	222,7	211,24	2,20E+06	5,03E+06	2,29E+00	220,8	44,77	2,20E+06	2,04E+00	9,27E-07
19	LG'/LA'	266,2	284,64	2,20E+06	5,45E+07	2,48E+01	246,5	330,19	2,20E+06	1,13E+10	5,14E+03	271,5	86,61	2,20E+06	2,02E+01	9,19E-06
46	LG'/LA'	461,6	53,32	2,20E+06	3,64E-01	1,66E-07	397,6	90,10	2,20E+06	3,26E+00	1,48E-06	343,1	52,71	2,20E+06	7,73E-01	3,51E-07
52	LG'/LA'	338,3	54,88	2,20E+06	9,16E-01	4,16E-07	315,1	90,31	2,20E+06	1,07E+01	4,85E-06	238	48,49	2,20E+06	2,08E+00	9,45E-07

Tabela 4.21 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Não Lateríticos - Cenário II

Ponto	MCT	Cálculo do N - Umidade Ótima – W _{ot}					Cálculo do N - Ramo Seco – W _{ot} -2%					Cálculo do N - Ramo Saturado – W _{ot} +2%				
		σ _v (kPa)	M _R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ _v (kPa)	M _R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ _v (kPa)	M _R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)
1	NG'	219,4	304,34	2,20E+06	2,89E+10	1,31E+04	221,2	216,70	2,20E+06	9,30E+06	4,23E+00	259,6	66,94	2,20E+06	6,05E+00	2,75E-06
38	NG'	388,2	185,32	2,20E+06	4,60E+02	2,09E-04	294,4	290,93	2,20E+06	1,10E+07	5,00E+00	275,8	52,71	2,20E+06	1,62E+00	7,37E-07
2	NG'	222,2	316,91	2,20E+06	6,25E+10	2,84E+04	221,9	291,21	2,20E+06	6,61E+09	3,01E+03	249,2	55,35	2,20E+06	2,99E+00	1,36E-06
10	NG'	222,2	180,76	2,20E+06	3,50E+05	1,59E-01	247,4	232,19	2,20E+06	4,13E+06	1,88E+00	221,8	31,02	2,20E+06	5,89E-01	2,68E-07
51	NG'	353,2	46,51	2,20E+06	5,01E-01	2,28E-07	221,9	85,83	2,20E+06	7,70E+01	3,50E-05	218	20,95	2,20E+06	2,48E-01	1,13E-07
32	NG'	231,5	48,04	2,20E+06	2,24E+00	1,02E-06	226,1	73,64	2,20E+06	2,31E+01	1,05E-05	240,2	38,80	2,20E+06	9,03E-01	4,11E-07
15	NA'	272,1	169,79	2,20E+06	8,32E+03	3,78E-03	227,4	243,45	2,20E+06	5,60E+07	2,54E+01	220,7	37,21	2,20E+06	1,04E+00	4,72E-07
39	NA'	233,5	57,70	2,20E+06	4,89E+00	2,22E-06	247,7	129,75	2,20E+06	1,15E+03	5,23E-04	235,9	29,26	2,20E+06	4,31E-01	1,96E-07
40	NA'	356	173,30	2,20E+06	5,55E+02	2,52E-04	260,4	217,45	2,20E+06	5,36E+05	2,44E-01	222,4	64,73	2,20E+06	1,16E+01	5,29E-06
22	NA'	260,2	252,67	2,20E+06	7,85E+06	3,57E+00	248,1	289,59	2,20E+06	3,77E+08	1,71E+02	272,9	50,03	2,20E+06	1,39E+00	6,31E-07
47	NA'	346,7	128,00	2,20E+06	5,45E+01	2,48E-05	359,6	179,02	2,20E+06	6,90E+02	3,13E-04	319,8	71,56	2,20E+06	3,09E+00	1,40E-06
26	NA'	244,7	93,52	2,20E+06	7,03E+01	3,20E-05	233,7	167,63	2,20E+06	5,24E+04	2,38E-02	219,9	31,20	2,20E+06	6,13E-01	2,79E-07
48	NA'	342,5	126,06	2,20E+06	5,32E+01	2,42E-05	231,9	302,17	2,20E+06	5,50E+09	2,50E+03	260,2	56,40	2,20E+06	2,69E+00	1,22E-06
3	NA'	219,4	320,53	2,20E+06	1,24E+11	5,64E+04	296,5	295,11	2,20E+06	1,27E+07	5,76E+00	297,3	48,73	2,20E+06	9,47E-01	4,30E-07
4	NA'	224,6	158,83	2,20E+06	4,29E+04	1,95E-02	229,8	211,39	2,20E+06	2,86E+06	1,30E+00	249,5	47,62	2,20E+06	1,61E+00	7,33E-07
33	NA'	259,4	58,87	2,20E+06	3,29E+00	1,49E-06	272,5	183,94	2,20E+06	2,28E+04	1,03E-02	233,6	35,08	2,20E+06	7,22E-01	3,28E-07
34	NA'	312,6	58,33	2,20E+06	1,48E+00	6,74E-07	250	177,21	2,20E+06	4,44E+04	2,02E-02	222,5	34,43	2,20E+06	7,91E-01	3,59E-07
35	NS'	365	94,94	2,20E+06	6,32E+00	2,87E-06	317,2	166,91	2,20E+06	1,21E+03	5,49E-04	228,3	40,18	2,20E+06	1,20E+00	5,47E-07
5	NS'	232,8	94,93	2,20E+06	1,17E+02	5,30E-05	244,5	125,40	2,20E+06	9,28E+02	4,22E-04	260,1	17,20	2,20E+06	1,38E-01	6,25E-08
44	NS'	358,1	65,99	2,20E+06	1,42E+00	6,43E-07	273,3	32,40	2,20E+06	3,87E-01	1,76E-07	219,9	32,78	2,20E+06	7,07E-01	3,21E-07
28	NG'/NS'	253,3	137,41	2,20E+06	1,66E+03	7,56E-04	293,8	176,82	2,20E+06	5,37E+03	2,44E-03	264,7	80,25	2,20E+06	1,48E+01	6,72E-06
30	NG'/NS'	393,8	114,80	2,20E+06	1,18E+01	5,34E-06	279,8	90,31	2,20E+06	2,18E+01	9,90E-06	219,9	47,59	2,20E+06	2,67E+00	1,21E-06
45	NG'/NS'	366,1	37,38	2,20E+06	2,80E-01	1,27E-07	359,4	85,87	2,20E+06	4,16E+00	1,89E-06	218,7	22,86	2,20E+06	2,93E-01	1,33E-07

36	NA'-NS'	221,8	42,79	2,20E+06	1,68E+00	7,63E-07	282,5	387,81	2,20E+06	2,18E+10	9,90E+03	238,7	14,95	2,20E+06	1,28E-01	5,83E-08
6	NA'-NS'	387,9	86,42	2,20E+06	3,03E+00	1,38E-06	303,4	121,47	2,20E+06	1,01E+02	4,58E-05	275,3	59,19	2,20E+06	2,60E+00	1,18E-06
41	NA'/LA'	250	58,61	2,20E+06	3,81E+00	1,73E-06	266,7	79,39	2,20E+06	1,33E+01	6,03E-06	242,7	60,44	2,20E+06	5,08E+00	2,31E-06
20	NA'/LG'	220,5	118,43	2,20E+06	1,50E+03	6,80E-04	247,2	193,66	2,20E+06	1,93E+05	8,79E-02	239,4	65,21	2,20E+06	8,05E+00	3,66E-06

Tabela 4.22 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Lateríticos – Cenário III

Ponto	MCT	Cálculo do N - Umidade Ótima - W_{ot}					Cálculo do N - Ramo Seco – $W_{ot} - 2\%$					Cálculo do N - Ramo Saturado – $W_{ot} + 2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)
7	LG'	345,6	134,96	2,20E+06	8,29E+01	3,77E-05	266,3	223,15	2,20E+06	5,67E+05	2,58E-01	310,2	59,48	2,20E+06	1,64E+00	7,46E-07
27	LG'	355,7	222,86	2,20E+06	8,75E+03	3,98E-03	334	197,71	2,20E+06	4,42E+03	2,01E-03	305,3	55,27	2,20E+06	1,33E+00	6,04E-07
43	LG'	255,4	102,53	2,20E+06	1,03E+02	4,68E-05	379,2	145,21	2,20E+06	7,14E+01	3,25E-05	268,4	54,41	2,20E+06	2,04E+00	9,26E-07
23	LA	249,7	660,49	2,20E+06	1,75E+21	7,97E+14	287,5	310,80	2,20E+06	6,88E+07	3,13E+01	539,5	138,01	2,20E+06	5,81E+00	2,64E-06
16	LA	338,5	293,39	2,20E+06	1,00E+06	4,55E-01	305,9	339,75	2,20E+06	1,23E+08	5,61E+01	236,3	56,43	2,20E+06	4,15E+00	1,89E-06
11	LA	305,5	349,44	2,20E+06	2,38E+08	1,08E+02	247,3	320,27	2,20E+06	4,70E+09	2,14E+03	347,9	98,42	2,20E+06	9,92E+00	4,51E-06
12	LA	237,6	201,27	2,20E+06	6,80E+05	3,09E-01	237,5	165,51	2,20E+06	3,50E+04	1,59E-02	240,1	40,48	2,20E+06	1,04E+00	4,72E-07
25	LA	297,5	214,14	2,20E+06	5,51E+04	2,50E-02	336,9	150,60	2,20E+06	2,53E+02	1,15E-04	239,9	95,47	2,20E+06	9,61E+01	4,37E-05
17	LA	473,3	83,67	2,20E+06	1,22E+00	5,55E-07	374	169,70	2,20E+06	2,89E+02	1,31E-04	236,4	40,36	2,20E+06	1,08E+00	4,92E-07
24	LA	518,9	246,22	2,20E+06	4,35E+02	1,98E-04	565,6	270,61	2,20E+06	4,70E+02	2,14E-04	296,9	62,78	2,20E+06	2,42E+00	1,10E-06
50	LA	368,2	97,24	2,20E+06	6,84E+00	3,11E-06	319,5	165,08	2,20E+06	1,00E+03	4,55E-04	232,4	23,54	2,20E+06	2,75E-01	1,25E-07
31	LA	381,7	31,36	2,20E+06	1,89E-01	8,57E-08	348,2	75,83	2,20E+06	2,74E+00	1,25E-06	324,9	24,48	2,20E+06	1,65E-01	7,50E-08
18	LA'	245,3	203,41	2,20E+06	4,78E+05	2,17E-01	316,7	341,26	2,20E+06	6,42E+07	2,92E+01	267	109,86	2,20E+06	1,25E+02	5,70E-05
14	LA'	305,5	302,86	2,20E+06	1,17E+07	5,32E+00	238,8	406,66	2,20E+06	1,47E+13	6,69E+06	239	49,38	2,20E+06	2,20E+00	1,00E-06
21	LA'	362,9	186,88	2,20E+06	9,67E+02	4,40E-04	244,9	258,81	2,20E+06	4,26E+07	1,94E+01	314,4	139,61	2,20E+06	2,39E+02	1,08E-04
37	LA'	374,9	44,52	2,20E+06	3,88E-01	1,77E-07	333,3	93,12	2,20E+06	9,25E+00	4,21E-06	231	16,83	2,20E+06	1,57E-01	7,13E-08
8	LA'	243,8	189,34	2,20E+06	1,69E+05	7,69E-02	242,2	269,47	2,20E+06	1,28E+08	5,83E+01	331,8	48,46	2,20E+06	6,66E-01	3,03E-07
49	LA'	349,8	100,33	2,20E+06	1,07E+01	4,87E-06	299,9	182,80	2,20E+06	6,25E+03	2,84E-03	270,9	60,98	2,20E+06	3,17E+00	1,44E-06
42	LA'	462,4	158,50	2,20E+06	3,23E+01	1,47E-05	344,7	212,81	2,20E+06	7,30E+03	3,32E-03	236,6	48,25	2,20E+06	2,09E+00	9,48E-07
29	LA'	292,7	217,48	2,20E+06	8,71E+04	3,96E-02	242,1	198,68	2,20E+06	4,03E+05	1,83E-01	237,3	44,83	2,20E+06	1,55E+00	7,05E-07
19	LG'/LA'	276,5	287,11	2,20E+06	2,96E+07	1,35E+01	298,4	311,60	2,20E+06	3,33E+07	1,51E+01	283,3	88,95	2,20E+06	1,83E+01	8,32E-06
46	LG'/LA'	462,8	57,49	2,20E+06	4,33E-01	1,97E-07	469,4	92,81	2,20E+06	1,85E+00	8,39E-07	418,3	54,03	2,20E+06	4,77E-01	2,17E-07
52	LG'/LA'	470,6	65,65	2,20E+06	5,85E-01	2,66E-07	408,6	95,86	2,20E+06	3,82E+00	1,74E-06	269,2	48,51	2,20E+06	1,31E+00	5,94E-07

Tabela 4.23 - Número do ciclo de carga "N" do pavimento - Solos Não Lateríticos - Cenário III

Ponto	MCT	Cálculo do N - Umidade Ótima – W_{ot}					Cálculo do N - Ramo Seco – $W_{ot} -2\%$					Cálculo do N - Ramo Saturado – $W_{ot} +2\%$				
		σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)	σ_v (kPa)	M_R (MPa)	N (RFFSA)	"N" Calc	"N" Calc / N (RFFSA)
1	NG'	241,7	307,61	2,20E+06	3,02E+09	1,37E+03	240,8	221,77	2,20E+06	2,92E+06	1,33E+00	286,2	68,33	2,20E+06	4,15E+00	1,89E-06
38	NG'	380,1	196,35	2,20E+06	9,98E+02	4,54E-04	371	305,36	2,20E+06	4,23E+05	1,92E-01	316,8	55,50	2,20E+06	1,18E+00	5,38E-07
2	NG'	241,7	319,64	2,20E+06	8,07E+09	3,67E+03	240,8	297,39	2,20E+06	1,44E+09	6,53E+02	285,1	55,95	2,20E+06	1,79E+00	8,15E-07
10	NG'	241,9	172,65	2,20E+06	4,89E+04	2,22E-02	241	235,00	2,20E+06	8,50E+06	3,86E+00	242,6	29,55	2,20E+06	4,12E-01	1,87E-07
51	NG'	368,9	48,16	2,20E+06	4,90E-01	2,23E-07	241,2	88,09	2,20E+06	5,03E+01	2,29E-05	232	20,97	2,20E+06	2,22E-01	1,01E-07
32	NG'	256,2	46,98	2,20E+06	1,39E+00	6,32E-07	241,2	73,21	2,20E+06	1,49E+01	6,77E-06	239,3	39,94	2,20E+06	1,00E+00	4,57E-07
15	NA'	298,8	168,45	2,20E+06	2,53E+03	1,15E-03	241,5	243,38	2,20E+06	1,62E+07	7,37E+00	239	36,54	2,20E+06	7,62E-01	3,46E-07
39	NA'	284,1	55,36	2,20E+06	1,74E+00	7,93E-07	272,6	127,76	2,20E+06	3,88E+02	1,76E-04	258,8	27,94	2,20E+06	3,14E-01	1,43E-07
40	NA'	293,4	186,64	2,20E+06	1,06E+04	4,80E-03	345,3	221,31	2,20E+06	1,16E+04	5,28E-03	258	62,51	2,20E+06	4,45E+00	2,02E-06
22	NA'	313,5	232,92	2,20E+06	8,71E+04	3,96E-02	294,1	254,92	2,20E+06	1,00E+06	4,56E-01	310,1	46,24	2,20E+06	7,07E-01	3,22E-07
47	NA'	345	133,91	2,20E+06	7,91E+01	3,60E-05	328,9	176,85	2,20E+06	1,52E+03	6,89E-04	383,8	74,87	2,20E+06	1,75E+00	7,96E-07
26	NA'	267,3	92,40	2,20E+06	3,42E+01	1,56E-05	243,7	167,86	2,20E+06	2,99E+04	1,36E-02	250,7	29,81	2,20E+06	3,90E-01	1,77E-07
48	NA'	244,7	109,88	2,20E+06	2,63E+02	1,20E-04	259,8	316,65	2,20E+06	1,04E+09	4,74E+02	237,7	55,87	2,20E+06	3,86E+00	1,75E-06
3	NA'	241,6	322,43	2,20E+06	1,02E+10	4,66E+03	270,5	302,19	2,20E+06	1,40E+08	6,37E+01	344,9	49,51	2,20E+06	6,34E-01	2,88E-07
4	NA'	250,3	141,85	2,20E+06	2,69E+03	1,22E-03	238,1	207,57	2,20E+06	1,11E+06	5,03E-01	265,1	48,08	2,20E+06	1,34E+00	6,08E-07
33	NA'	340,1	59,68	2,20E+06	1,19E+00	5,41E-07	276,4	184,81	2,20E+06	2,01E+04	9,12E-03	238,1	34,83	2,20E+06	6,69E-01	3,04E-07
34	NA'	383,5	56,91	2,20E+06	6,97E-01	3,17E-07	298	177,61	2,20E+06	4,79E+03	2,18E-03	240,4	33,85	2,20E+06	6,00E-01	2,73E-07
35	NS'	442,4	100,46	2,20E+06	3,29E+00	1,50E-06	328,3	173,29	2,20E+06	1,25E+03	5,67E-04	238,2	40,53	2,20E+06	1,07E+00	4,87E-07
5	NS'	257,5	85,45	2,20E+06	2,61E+01	1,18E-05	277,8	120,00	2,20E+06	1,88E+02	8,54E-05	287,9	16,85	2,20E+06	1,18E-01	5,38E-08
44	NS'	444,1	78,33	2,20E+06	1,21E+00	5,51E-07	345,5	34,94	2,20E+06	2,74E-01	1,25E-07	238	32,51	2,20E+06	5,52E-01	2,51E-07
28	NG'/NS'	283,4	142,96	2,20E+06	7,85E+02	3,57E-04	460,4	174,38	2,20E+06	6,58E+01	2,99E-05	288,7	84,82	2,20E+06	1,23E+01	5,59E-06
30	NG'/NS'	311,2	102,56	2,20E+06	2,49E+01	1,13E-05	421,9	102,19	2,20E+06	4,44E+00	2,02E-06	252,8	49,80	2,20E+06	1,82E+00	8,27E-07
45	NG'/NS'	397,3	41,88	2,20E+06	2,98E-01	1,36E-07	400,5	82,52	2,20E+06	2,18E+00	9,89E-07	232,9	22,84	2,20E+06	2,58E-01	1,17E-07

36	NA'-NS'	474,5	95,61	2,20E+06	1,99E+00	9,04E-07	243,5	114,36	2,20E+06	3,95E+02	1,80E-04	306	58,75	2,20E+06	1,65E+00	7,49E-07
6	NA'-NS'	313,5	36,51	2,20E+06	3,71E-01	1,69E-07	266,3	397,72	2,20E+06	2,36E+11	1,07E+05	264,3	14,20	2,20E+06	1,08E-01	4,89E-08
41	NA'/LA'	272,6	107,61	2,20E+06	9,02E+01	4,10E-05	241,2	196,29	2,20E+06	3,52E+05	1,60E-01	266,1	61,64	2,20E+06	3,61E+00	1,64E-06
20	NA'/LG'	264,5	59,28	2,20E+06	3,11E+00	1,41E-06	287,6	78,79	2,20E+06	8,31E+00	3,78E-06	260,9	59,28	2,20E+06	3,30E+00	1,50E-06

Observa-se, com base nos resultados evidenciados nas tabelas 4.18 a 4.23, um fato preocupante e visto em todos em cenários, isto é, a baixa quantidade de solos tanto lateríticos quanto não lateríticos que apresentaram valores de “N Calc” inferiores ao proposto pela RFFSA, e em diferentes variações de umidade. Percebe-se principalmente a fragilidade do valor de “N Calc” quando exposto na umidade saturada em todos os cenários, resultando uma possível fragilidade durante um período de chuva na plataforma ferroviária, prejudicando diretamente o tráfego de veículos e acarretando prejuízos financeiros com baixas velocidades comerciais do trecho.

No cenário I, com os solos lateríticos na umidade ótima, apenas os pontos 23, 16, 11, 14 e 19 tiveram valores de “N Calc” acima do proposto, ao passo que na $W_{ot} - 2\%$ (ramo seco) os pontos 11, 18, 14, 8 e 19. Nos solos não lateríticos, na umidade ótima, os pontos 1, 2 e 3 tiveram valores de “N Calc” acima do proposto, enquanto no $W_{ot} - 2\%$ (ramo seco) a quantidade do número de pontos aumentou em relação ao anterior, destacando os pontos 1, 38, 2, 15, 48, 3, 4, 6.

No cenário II, com os solos lateríticos na umidade ótima, apenas os pontos 23, 16, 12, 14, 29 e 19 tiveram valores de “N Calc” acima do proposto, ao passo que na $W_{ot} - 2\%$ (ramo seco) os pontos 16, 11, 12, 18, 14, 21, 8, 29 e 19. Por fim, nenhum ponto na umidade saturada. Nos solos não lateríticos do cenário II, na umidade ótima, os pontos 1, 2 e 3 tiveram valores de “N Calc” acima do proposto, enquanto na $W_{ot} - 2\%$ (ramo seco) o número de pontos aumentou mais que o anterior, sendo os pontos 1, 38, 2, 10, 15, 22, 48, 3, 4, 36.

No cenário III, os solos lateríticos na umidade ótima, apenas os pontos 23, 11, 14, e 19 tiveram valores de “N Calc” acima do proposto, enquanto na $W_{ot} - 2\%$ (ramo seco) os pontos 23, 16, 11, 18, 14, 21, 8 e 19. Nos solos não lateríticos do cenário II, na umidade ótima, os pontos 1, 2 e 3 tiveram valores de “N Calc” acima do proposto, enquanto na $W_{ot} - 2\%$ (ramo seco) apresentaram a maioria dos pontos 1, 2, 10, 15, 48, 3, 6.

O cenário II apresentou os melhores resultados do número de ciclos de cargas “N Calc” quanto aos demais cenários. No caso dos solos lateríticos, destacam-se os de granulação fina, sendo três de classe LA, dois de granulação LA' e um solo LG'/LA'. Quando se tem a redução da umidade para $W_{ot} - 2\%$, a quantidade de pontos aumenta em 50% quando comparado com W_{ot} .

Um fator preocupante, seria a grande quantidade de pontos que não tiveram o valor de “N Calc” superior as recomendações do RFFSA, demonstrando assim, a fragilidade dos solos no local da ferrovia. Este resultado já era de se esperar, devido estes locais possuírem problemas com a infraestrutura, sendo observado no local das amostras, bombeamento de finos, vegetação e falta de drenagem, ou seja, características redundantes pelo acúmulo de água no pavimento.

4.8. Correlação dos resultados com outras literaturas

Olhando do ponto de vista de outros estudos voltados ao comportamento mecânico de solos tropicais e aplicação da modelagem computacional, na tabela 4.24 são apresentados os valores de tensões verticais no lastro, sublastro e subleito. No estudo de ROSA (2020) com características físicas e mecânicas similares aos evidenciados nesta dissertação. A tensão vertical máxima do topo do subleito manteve-se na faixa de 198 a 299 kPa para solos lateríticos e 202 a 243 kPa para solos não lateríticos.

Tabela 4.24 - Resumo das tensões verticais total no pavimento – Literatura Nacional

Autor (a)	Quant. de Amostras	Tensão Vertical total no pavimento – SysTrain (kPa)		
		Lastro	Sublastro	Subleito
Lopes (2017)	10		149,5-153,9	
Gomes (2018)	6		10,3-77	
Cruz (2019)	4	130,2-216,1	105,7-135,6	
Rosa (2020)	15			198-299
Teixeira (2020)	10			106,9-151,9
Gonçalves (2021)	4	205-266	130-145	125,8-127,6

Na tabela 4.25, os resultados das tensões verticais no subleito desta dissertação são apresentados nos três cenários. Nota-se que os valores máximos dos solos não lateríticos não são tão inferiores aos solos lateríticos em todos os cenários e variações de umidade, ou seja, passível de mais ensaios geotécnicos para averiguar outros comportamentos destes tipos de solos.

Tabela 4.25 - Resumo das tensões verticais máxima - SysTrain.

Cenários	Tensão Vertical Total no Subleito – SysTrain (kPa)					
	Laterítico			Não Laterítico		
	W _{ot}	W _{ot} -2%	W _{ot} +2%	W _{ot}	W _{ot} -2%	W _{ot} +2%
Cenário I	231-568	230-471	229-438	229 – 419	230-404	230-320
Cenário II	219-574	217-420	216-617	219-393	221-359	218-319
Cenário III	237-518	237-565	231-539	241-474	238-460	232-383

Em outros estudos com o uso do SysTrain, mas de características de estruturais diferente a dessa dissertação, pode-se destacar a pesquisa de LOPES (2017) em que os valores de deslocamento vertical foram de 5,1 a 6,6 mm. No tocante à tensão vertical máxima atuante no sublastro, foram mostrados valores entre 149,5 a 153,9 kPa. Quanto à sensibilidade das amostras com a água, a autora relata que apenas o solo laterítico de classificação LA' e as lateritas com fração passante na peneira de número 10 são adequadas para atuar como material constituinte de camada de sublastro em pavimentação ferroviária.

Com base na investigação de MENEZES (2018), existe uma diferença dos solos lateríticos para não lateríticos com variação da umidade, ao qual, as amostras LA e NA' foram menos suscetíveis à influência do nível d'água, agora quando colocadas uma frente a outra, a classe LA apresenta melhor desempenho, ou seja, menor elevação de umidade após a ação da chuva em relação à amostra de classe NA'.

LIMA (2018) destaca que solo laterítico argiloso avaliado na pesquisa pode resistir a altos ciclos de cargas durante a realização do ensaio triaxial de cargas repetidas. Em relação ao teor de umidade, observou-se que teores de água acima da umidade ótima reduziram a rigidez e, conseqüentemente, aumentaram a deformação permanente.

CRUZ (2019) ressalta que a deformação vertical no pavimento ferroviário ficou entre 1,24 a 3,59 mm, ao passo que a tensão vertical do sublastro chegou a valores entre 118,6 a 230,4 kPa.

Um outro estudo mostrado por TEIXEIRA (2020) salientou que a tensão vertical máxima atingiu valores de 106,9 a 151,9 kPa e de deslocamento vertical total do pavimento na faixa 1,52 a 6,85 mm. O autor conclui que o aumento do módulo de elasticidade de uma camada enseja sempre na diminuição do momento fletor máximo nos trilhos e da deflexão total da estrutura, bem como na elevação da tensão vertical

total nesta camada. Acerca da tensão vertical total no subleito, tendeu a oscilar com a elevação do módulo de elasticidade das demais camadas sobrejacentes, devido à variabilidade do modelo resiliente composto escolhido para representar seu comportamento estrutural nas simulações.

No estudo de SILVA *et al.* (2021), testes triaxiais de cargas repetidas foram realizados em solos lateríticos arenosos para obter parâmetros de deformação permanente sobre três diferentes teores de umidade. Durante a fase de compactação das amostras, os autores relataram que um aumento da variação de 1,5% no teor de água de compactação leva a um aumento de 2,4% na densidade seca e uma diminuição de 40,6% no M_R . Os autores alegam que a utilização do teor de umidade no ramo seco durante a compactação tende a destacar melhores valores de M_R , ou seja, um material mais rígido. Perante tais informações, nesta pesquisa também se observa a mudança de valores tanto do M_R quanto da deformação ou tensão vertical total, pois a umidade saturada influencia nestes valores.

Quanto à influência da água no corpo de prova, de acordo com PASCOAL *et al.* (2021) depois da imersão das amostras na água, obtiveram uma redução de M_R em 72,9%, ou seja, de 246,7 MPa para 66,7 MPa. Os autores continuam alegando que se a drenagem não for projetada e executada adequadamente, poderá afetar o desempenho do material, pois a capacidade de carga fica drasticamente comprometida em contato com a água.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Esta dissertação teve como objetivo principal em avaliar o comportamento mecânico dos solos tropicais característicos de subleito ferroviário, sob a ótica da variação da umidade e o uso da simulação numérica de tensão e deflexão aplicáveis no dimensionamento da infraestrutura ferroviária. Para chegar a este objetivo, foi necessário uma série de ensaios no laboratório com diferentes tipos de teores de umidade (W_{ot} , $W_{ot} - 2\%$ e $W_{ot} + 2\%$). Na modelagem computacional foi utilizado o *software* SysTrain, com intuito de avaliar as tensões no topo do subleito, deflexão total da estrutura e o número do ciclo de cargas “N” em solos tropicais frente a variação da umidade.

As simulações contaram com três diferentes tipos de cenários e em 51 amostras de solos do corredor Centro-Sudeste da FCA, gerando assim, um grande número de simulações, entre diferentes tipos de solos, dentre eles lateríticos e não lateríticos. Os resultados permitiram avaliar a real situação dos pavimentos, demonstrando atenção de muitos solos estarem abaixo do número de ciclo de cargas “N” abaixo da recomendação da RFFSA.

5.1. Conclusões

Mediante aos resultados apresentados no programa experimental, pode-se concluir:

- a) O módulo resiliente sofre impactos consideráveis com o aumento do teor de umidade e quando analisamos os solos lateríticos, os mesmos também podem ser prejudicados com a variação da umidade, por exemplo, no cenário I a diferença do M_R entre a classe LA' e NA' com os valores máximos encontrados dentre as amostras, chegou a 28% de diferença no ramo seco, com isto, torna-se necessário mais estudos voltados para a sucção e mineralógico, afim de entender melhor este comportamento do solo;
- b) Os solos lateríticos no ramo saturado ($W_{ot} + 2\%$) tiveram melhores resultados do que os não lateríticos, utilizando uma comparação de solos arenosos, entre LA' e NA', no cenário I chega a 102% de diferença entre os solos.
- c) Todos os pavimentos compostos por solos tropicais deste estudo e em diferentes variações de umidade e estrutura, apresentaram admissibilidade quanto à deflexão total dos pavimentos exigidas pela recomendação técnica AREMA (2013) de 6,5 mm para suporte de trilhos elásticos. O cenário III apresentou os melhores resultados de deflexão total do pavimento, nisto em todas os cenários e todas as variações da umidade. Uma possível justificativa para tal seria a altura do lastro e sublastro utilizado na simulação, pela norma do DNIT – ISF 212, de 40 cm para lastro e 30 para o sublastro;
- d) Quanto à admissibilidade da tensão no topo do subleito mediante a equação de HEUKELON e KLOMP (1962), muitos solos apresentaram inadmissibilidade. Os resultados variam de acordo com a umidade e o tipo de estrutura simulada no SysTrain. O cenário II apresentou a maior

quantidade de solos admissíveis, mas esta diferença é pouca quando comparando com o cenário III, indicando que a influência da umidade causou menos impactos na estrutura do pavimento realizado no SysTrain;

- e) Ao realizar o cálculo do “N” dos pavimentos, observa-se uma grande preocupação com o valor encontrado para cada pavimento simulado, demonstrando atenção nos pontos em que o valor de “N Calc” é inferior ao “N” sugerido pela RFFSA. Estes pontos já haviam registrados problemas geotécnicos como: ineficiência sistema de drenagem ao lado do talude, bem como em relação à percolação da água durante as chuvas na região;
- f) A modelagem computacional propôs na área científica uma possível solução para acompanhar a deformabilidade do pavimento e as tensões recebidas de acordo com a estrutura do pavimento, materiais e carregamento. Neste trabalho, observa-se a importância de analisar o grau de impacto da água no pavimento em um *software* de modelagem computacional, visto que cada estrutura simulada tem um impacto diferente no pavimento.

Uma das possíveis soluções para o controle da variação da umidade em solos tropicais seria a utilização de geossintéticos, com o papel de reter as partículas finas do subleito. KOERNER (2016) descreve que o solo granular é disposto sobre um solo fino: a entrada de solo fino nos vazios da camada granular (bombeamento de finos) prejudica a capacidade de drenagem, assim como a penetração do solo granular na camada de solo fino prejudica a resistência do pavimento.

5.2. Recomendações futuras

No decorrer da realização deste estudo, surgiram alguns questionamentos sobre a variação da umidade no pavimento, principalmente em solos tropicais, além de buscar algumas soluções que contribuíssem com a diminuição deste problema. Mediante a isto, sugere-se para as futuras pesquisas:

- a) Complementar a tensão admissível no topo do subleito com os dados de deformação permanente;

- b) Realizar a matriz de sucção dos solos presentes desta região do estudo, utilizando ensaios convencionais como papel filtro ou equipamentos como o caso do HYPROP e WP4-C;
- c) Aplicar alguns ensaios de difração de Raio-X e Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) a fim de identificar a composição física dos solos do trecho estudado;
- d) Realizar intervalo triaxial de cargas repetidas com carregamento cíclico consecutivo e carregamento cíclico intermitente, considerando o intervalo do tempo e o teor de umidade;
- e) Realizar ensaios com geossintéticos com o intuito de estabilizar a drenagem dos solos de subleito ferroviário e aumentar a resistência dos solos tropicais;
- f) Utilização do Radar de Penetração do Solo (*Ground Penetration Radar* – GPR). Vale frisar que o referido método pode identificar as partes da distribuição do bombeamento de finos que não pode ser vista a olho nu.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AREMA. 2013. American railway engineering and maintenance-of-way association. Manual for Railway Engineering, 2, 55–57.
- BENTO, P. F., 2006, *Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos*. Dissertação de M.Sc., Universidade de Brasília, DF, Brasil.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B., 2008. *Pavimentação asfáltica: Formação para engenheiros*, Petrobras:Adeba, Rio de Janeiro.
- CAMPOS, P. C. O., 2019. *Avaliação do efeito da variação da umidade no comportamento mecanístico de um trecho da Estrada de Ferro Carajás*. Dissertação M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CARVALHO, J. C.; REZENDE, L. R.; CARDOSO, F. B. F.; LUCENA, L. C. F. L.; GUIMARÃES, R. C. e VALENCIA, Y. G., 2015, “Tropical soils highway construction: Peculiarities and considerations”. *Transportation Geotechnics*, Vol. 5, pp. 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.004>.
- CHEN, W. B.; FENG, W. Q.; & YIN, J. H., 2020, “Effects of water content on resilient modulus of a granular material with high fines content”. *Construction and Building Materials*, Vol. 236, pp. 117542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117542>
- CHEN, X.; NIE, R.; LI, Y.; GUO, Y.; DONG, J., 2021, “Resilient modulus of fine-grained sub-grade soil considering load interval: An experimental study”. *Soil Dynamics and Earth-quake Engineering*, Vol. 142. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2020.106558>.
- COELHO, C. R. B., 2016, *Estudo Teórico e Experimental de Fluxo de Água e Transporte de Solutos em Equilíbrio e Não-Equilíbrio em Solos Tropicais*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- CRUZ, L. O. e S. R., 2019, *Procedimento para avaliação da integridade estrutural da plataforma ferroviária*. Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S., 2019, “Effects of Compaction Moisture Content on Permanent Deformation of Soils Subjected to Repeated Triaxial Load Tests”. *Transportation Research Record*, Vol. 2673(2), pp. 466–476. <https://doi.org/10.1177/0361198118825124>.
- DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. C.; PAULA, T. L. F., 2014, *Manual de Cartografia Hidrogeológica*. CPRM- Serviço Geológico do Brasil.

<https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16587>.

- DNER_CLA 259/96., 1996, Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-prova compactado em equipamento miniatura. *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*, Brasil.
- DNER-ME 080/94., 1994, Solos - análise granulométrica por peneiramento. *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*, Brasil.
- DNER-ME 093/94., 1994, Solos - determinação da densidade real dos solos. *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*, Brasil.
- DNER-ME 162/94., 1994, Solos - ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*, Brasil.
- DNER-ME 256/94., 1994, Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão. *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*, Brasil.
- DNER-ME 258/94., 1994, Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV. *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*, Brasil.
- DNIT:ISF 212., 2015, Projeto de superestrutura da via permanente - lastro e sublastro. *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*, Brasil.
- DNIT 134/2010-ME., 2010, Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência. *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*, Brasil.
- FREITAS, J. B.; REZENDE, L. R.; GITIRANA, G. F. N., 2020, “Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions”. *Engineering Geology*, Vol. 270, pp. 105580. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105580>.
- GALLAGE, C.; DAREEJU, B.; DHANASEKAR, M.; SHIKAWA, T., 2016, “Effects of Principal Stress Axis Rotation on Unsaturated Rail Track Foundation Deterioration”. *Procedia Engineering*, Vol. 143 (Ictg), pp. 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.032>.
- GOMES, M. S., 2018, *Estudos de solos tropicais de granulometria transicional para emprego em pavimento ferroviário*. Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GONÇALVES, T. M., 2021, *Estudo comparativo entre modelos numéricos de simulação do comportamento tensão-deformação de pavimentos ferroviário*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio Janeiro, RJ, Brasil.
- GUIMARÃES, A. C., 2009, *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio Janeiro, RJ, Brasil.

- GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G.; CASTRO, C. D., 2018, “Permanent deformation parameters of fine – grained tropical soils”. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 20(7), pp. 1664–1681. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1473283>.
- HEUKELOM, W.; KLOMP, A., 1962, “Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction”. *Proceedings 1^o Intern. Conference on the Structural Designs of Asphalt Pavements Ann Arbor*, University Michigan. <https://trid.trb.org/view/717112>.
- HICKS, R. G., Factors influencing the resilient response of granular materials, 1970.
- HUANG, X.; FANG, L.; DUAN, J. J., 2008, “Train dynamics related to railway-subgrade mud pumping”. *Subgrade Eng.*, Vol. 5, pp. 101–102.
- INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C., 2011, “Advanced rail geotechnology ballasted track”. *Taylor & Francis Group*.
- INDRARATNA, B.; SINGH, M.; NGUYEN, T. T.; LEROUÉIL, S.; ABEYWICKRAMA, A.; KELLY, R.; NEVILLE, T., 2020, “A laboratory study on subgrade fluidization under undrained cyclic triaxial loading”. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 57(11), pp. 1767–1779.
- KOERNER, R. M., Designing with geosynthetics, 5th ed, 2016.
- KOOHMISHI, M.; AZARHOOSH, A., 2020, “Assessment of drainage and filtration of sub-ballast course considering effect of aggregate gradation and subgrade condition”. *Transportation Geotechnics*, Vol. 24, pp. 100378. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2020.100378>.
- KUO, C., 2021, “Ground-penetrating radar to investigate mud pumping distribution along a railway line”. *Construction and Building Materials*, Vol. 290, pp. 123104. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123104>.
- KUO, C. P.; HSU, C. H.; WU, C. W.; LIU, P. L.; CHEN, D. W., 2017, “Study on the mechanism and inspection method of railway pumping”. *In Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, pp. 2063–2068.
- LAMAS-LOPEZ, F.; CUI, Y. J.; COSTA DAGUIAR, S., & CALON, N., 2016, “Geotechnical auscultation of a French conventional railway track-bed for maintenance purposes”. *Soils and Foundations*, Vol. 56(2), pp. 240–250. <https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2016.02.007>.
- LI, J.; CHEN, S.; YU, F.; DAI, Z.; OJEKUNLE, O. V., 2020. “In situ model tests to investigate the dynamic response of water-softened subgrade under vibrating loads”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 138, pp. 106336. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106336>.
- LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; GUIMARÃES, A. C. R.; ARAGÃO, F. T. S.,

2018. “Contribution to the study of Brazilian tropical soils as pavement materials”. In *Proceedings of the 13th Conference on Asphalt Pavements – ISAP*.
- LIU, S.; ZOU, H.; CAI, G.; BHEEMASETTI, T. V.; PUPPALA, A. J.; LIN, J., 2016, “Multivariate correlation among resilient modulus and cone penetration test parameters of cohesive subgrade soils”. *Engineering Geology*, Vol. 209, pp. 128–142. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.05.018>.
- LOPES, L. S., 2017, *Análise experimental do comportamento hidráulico e mecânico de um pavimento ferroviário*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LUNDGREN, J. R.; MARTIN, G. C.; HAY, W. W., 1970, “A simulation model of ballast support and the modulus of track elasticity”. *University of Illinois, Urbana, Chicago, USA*.
- MACÊDO, J. A. G., 1996, *Interpretação de ensaios deflectômetros para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MAZARI, M.; NAVARRO, E.; ABDALLAH, I.; NAZARIAN, S., 2014, “Comparison of numerical and experimental responses of pavement systems using various resilient modulus models”. *Soils and Foundations*, Vol. 54(1), pp. 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.004>.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G., *Mecânica dos Pavimentos*. 3 ed. Editora Interciência, 2015.
- MENAN HASNAYN, M.; JOHN MCCARTER, W.; WOODWARD, P. K.; CONNOLLY, D. P.; STARRS, G., 2017, “Railway subgrade performance during flooding and the post-flooding (recovery) period”. *Transportation Geotechnics*, Vol. 11, pp. 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.02.002>.
- MENEZES, L. C. A., 2018, *Estudo da influência da água da chuva na plataforma ferroviária*. Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MUNIZ DA SILVA, L. F. L., 2002, *Fundamentos teórico-experimentais da mecânica dos pavimentos ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção da via permanente*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP 1-37^a., 2004, “Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures”. *Transportation Research Board*.
- NI, H.; ZHANG, L.; ZHOU, Q., 2007, “Production Mechanism and remedition measures of mud pumping on Yanshou-Shijiusuo railway foundation”. *Railway Eng.* Vol. 2, pp. 61–63.

- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F., 1981, “Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias”. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais Em Engenharia*, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 30–40.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F., 1995, Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Villibor.
- OÑATE, E., 2009, “Structural Analysis with the Finite Element Method”. *Linear statics: volume 2: beams, plates and shells*. Springer Science & Business Media, Vol. 2.
- PASCOAL, P.; SAGRILO, A.; BARONI, M.; SPECHT, L.; PEREIRA, D., 2021, “Evaluation of the influence of compaction energy on the resilient behavior of lateritic soil in the field and laboratory”. *Soils and Rocks*, Vol. 44(4), pp. 1–14. <https://doi.org/10.28927/SR.2021.071321>.
- PROFILLIDIS, V. A., “Railway Management and Engineering”. *Ashgate Publishing Limited*, 2014.
- RANGEL, G. W., 2017, *Um método para a estimativa da deflexão do pavimento ferroviário lastreado*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROSA, A. C., 2020, *Análise Mecânica do pavimento ferroviário de um trecho da ferrovia centro-atlântica*. Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SÁNCHEZ, M.; WANG, D.; BRIAUD, J. L.; DOUGLAS, C., 2014, “Typical geomechanical problems associated with railroads on shrink-swell soils”. *Transportation Geotechnics*, Vol. 1(4), pp. 257–274. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2014.07.002>.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á. de.; Lumbreras, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. de A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F., “Sistema Brasileiro de Classificação de Solos”, *Embrapa*, 5th ed., Brasil, 2018.
- SCHULZ-POBLETE, M. V.; GRÄBE, P. J.; JACOBSZ, S. W., 2019, “The influence of soil suctions on the deformation characteristics of railway formation materials”. *Transportation Geotechnics*, Vol. 18, pp. 111–123. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2018.11.006>.
- SELIG, E.; WATERS, J., “Track geotechnology and substructure management”. *Thomas Telford*, 1994
- SILVA, M. F.; RIBEIRO, M. M. P.; FURLAN, A. P.; FABBRI, G. T. P., 2021, “Effect of com-paction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil”. *Transportation Geotechnics*, Vol. 26, pp. 100443. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100443>.

- SILVA, R. F., 2016, *Análise de tensões e deformações em pavimentos ferroviários*. Dissertação M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SILVA FILHO, J. C., 2018, *Contribuição para o desenvolvimento de um método de dimensionamento mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos ferroviários com foco nos solos tropicais*. Tese de D.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SPADA, J. L. G., 2003, *Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- STOPATTO, S., “Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações”. *Editora da Universidade de São Paulo*, 1987.
- SU, Y.; CUI, Y. J.; DUPLA, J. C.; CANOU, J., 2021, “Effect of water content on resilient modulus and damping ratio of fine/coarse soil mixtures with varying coarse grain contents”. *Transportation Geotechnics*, Vol. 26, pp. 100452. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2020.100452>
- SVENSON, M., 1980, *Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- TAKEDA, M. C., 2006, *A Influência da Variação da Umidade Pós-Compactação no Comportamento Mecânico de Solos de Rodovias do Interior Paulista*, Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.
- TEIXERA, M. A. O., 2020, *Análise do comportamento estrutural do pavimento ferroviário utilizando o software Systrain®*, Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- VARGAS, G. A. B., 2020, *Simulação numérica do comportamento mecânico de um pavimento asfáltico instrumentado submetido a diferentes condições de saturação*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- VIANA, H. M. F., 2007, *Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo*. Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.
- VILLIBOR, D. F.; ALVES, D. M. L., Pavimentação de baixo custo para regiões tropicais: projeto e construção: novas considerações. *Editora Tribo da Ilha*, 1 ed., 2019.
- VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S., Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. *Editora Arte & Ciência*, 2009.
- WANG, T.; LUO, Q.; LIU, M.; WANG, L.; QI, W., 2020, “Physical modeling of train-induced mud pumping in substructure beneath ballastless slab track”.

Transportation Geotechnics, Vol. 23, pp. 100332. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100332>.

WANG, Y.; KONG, L.W.; WANG, Y.-L., 2014, "Mechanism and Control of Subgrade Mud Pumping Under the Cyclic Load of Train". *Proceedings of the 2014 International Conference on Mechanics and Civil Engineering*, Vol. 7, pp. 369–374. <https://doi.org/10.2991/ICMCE-14.2014.63>.

7. ANEXOS

7.1. Anexo 1: Arquivos do software SysTrain – Relatório e Simulação

As modelagens computacionais dos 51 solos estão disponibilizadas em formato de QR Code ou link, este link será redirecionado para a pasta do Google drive. O conteúdo destas pastas está apresentado em três cenários, dentro deles em três umidades diferentes: H_OT (W_{ot}), H_RS ($W_{ot} - 2\%$ - Ramo seco) e H_ST ($W_{ot} + 2\%$ - Ramo Saturado). Os arquivos de formato .sti podem ser abertos no software SysTrain.

QR Code



LINK

<https://drive.google.com/drive/folders/1EwxlPZoQirEj6Ptb9R02maqQM0uUVv4w?usp=sharing>

7.2. Anexo 2: Arquivos do software SysTrain – Visualização 3D do pavimento

Nesta dissertação, as imagens das visualizações em 3D obtido pelo software SysTrain, contendo informações quanto a deflexão do pavimento e tensão vertical do topo do subleito, serão disponibilizados via QR Code ou link, sendo redirecionado a pasta do Google Drive. Optou-se por demonstrar apenas o ponto 01 de todos os três cenários como exemplo das simulações realizadas pela modelagem computacional.

QR Code



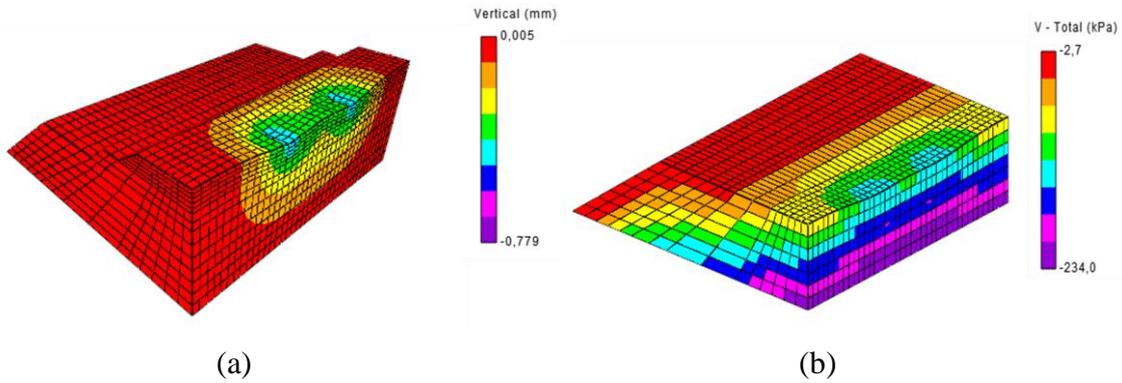
LINK

<https://drive.google.com/drive/folders/1G1cfBn4-1yEfAyWagas4loX6Qr8P6NGx?usp=sharing>

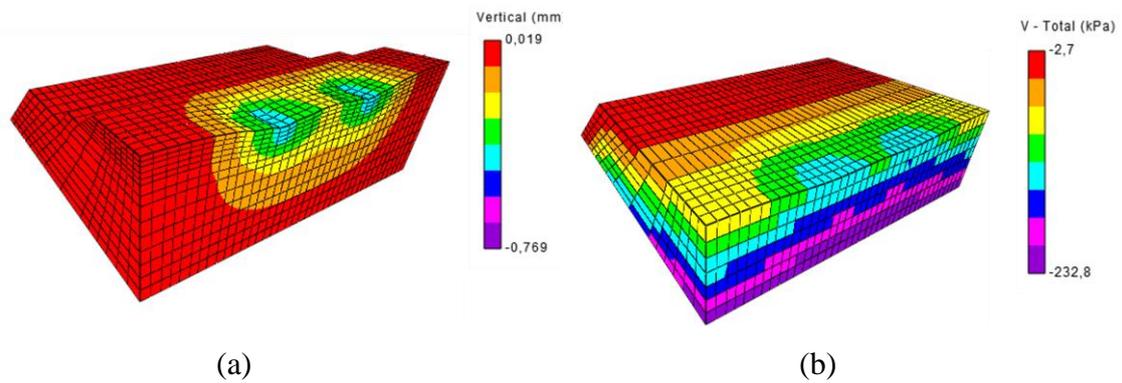
7.2.1. Cenário I

Cenário I - Ponto 01

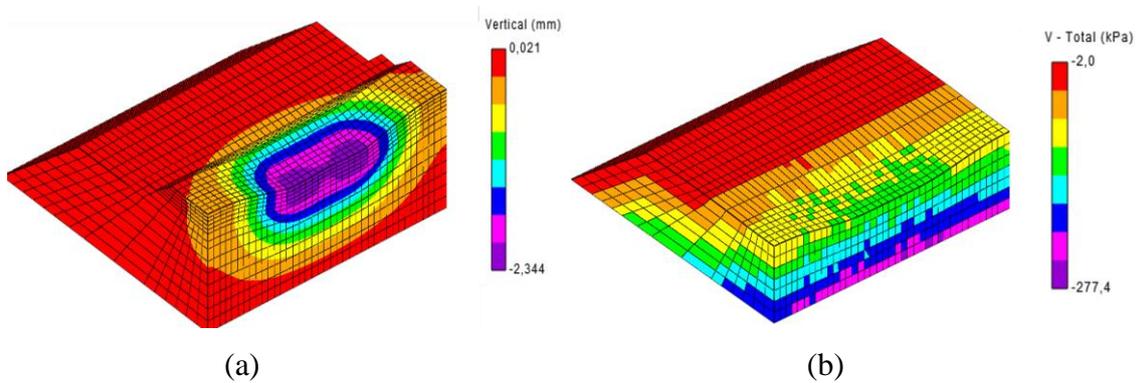
W_{ot} (Umidade Ótima). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)



W_{ot} -2% (Ramo Seco). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)



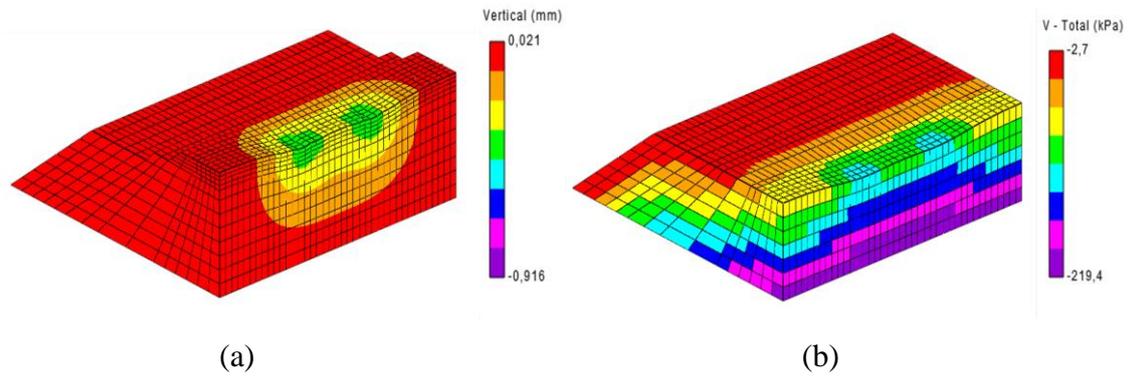
W_{ot} +2% (Ramo Saturado). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)



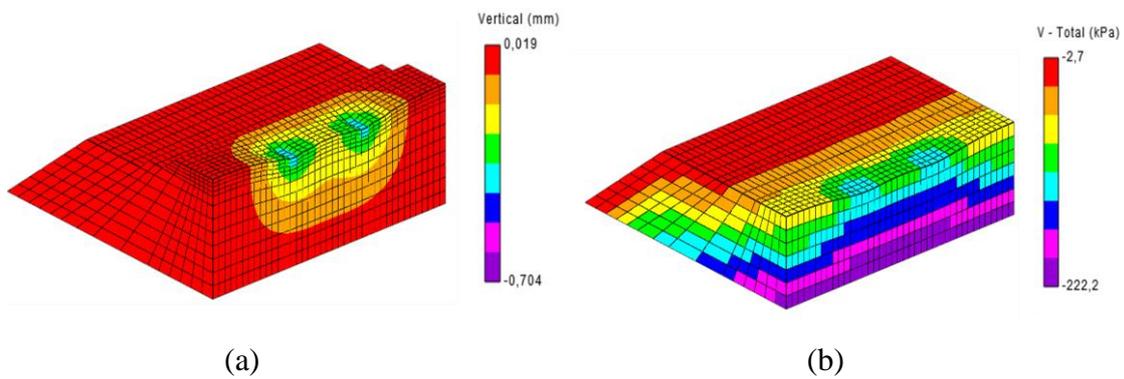
7.2.2. Cenário II

Cenário II - Ponto 01

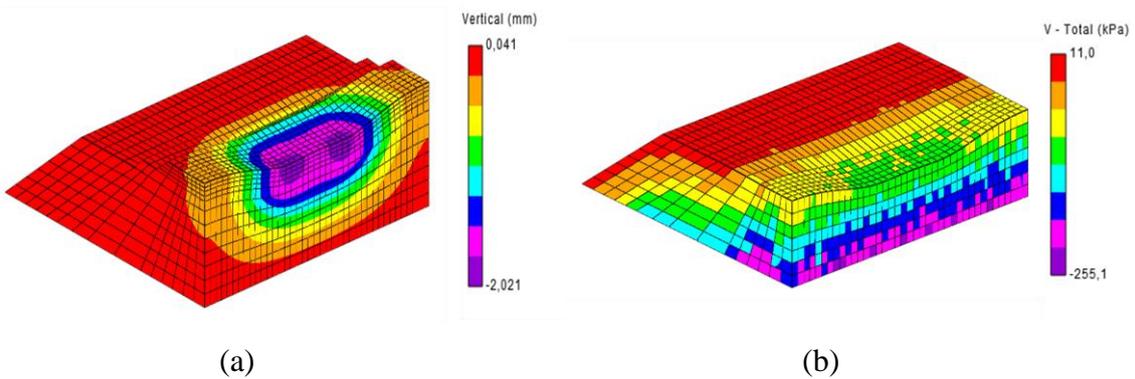
W_{ot} (Umidade Ótima). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)



W_{ot} -2% (Ramo Seco). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)



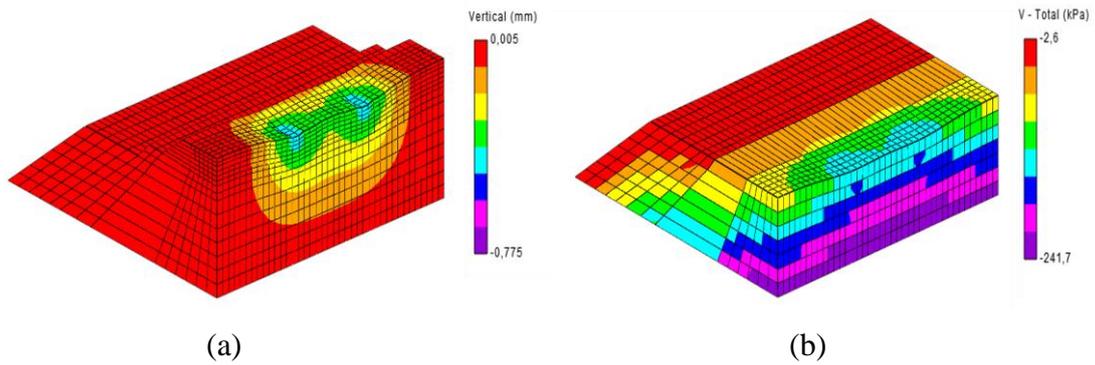
W_{ot} +2% (Ramo Saturado). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)



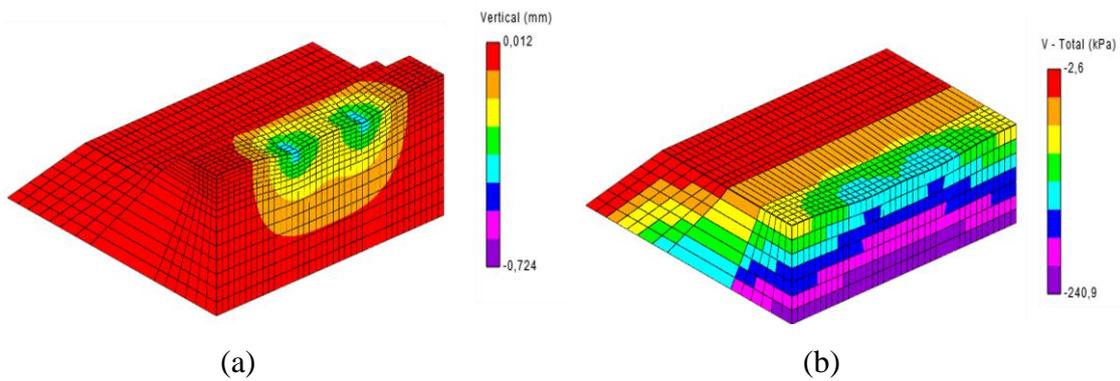
7.2.3. Cenário III

Cenário III - Ponto 01

W_{ot} (Umidade Ótima). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)



W_{ot} -2% (Ramo Seco). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)



W_{ot} +2% (Ramo Saturado). a) Deflexão do pavimento (mm); b) Tensão vertical no subleito (kPa)

