



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ANTONIA FABIANA MARQUES ALMEIDA

**ANÁLISE DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO QUANTO AO
DIMENSIONAMENTO, OCORRÊNCIA DE DEFEITOS E IMPACTOS
CLIMÁTICOS NOS ACOSTAMENTOS**

FORTALEZA

2024

ANTONIA FABIANA MARQUES ALMEIDA

**ANÁLISE DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO QUANTO AO
DIMENSIONAMENTO, OCORRÊNCIA DE DEFEITOS E IMPACTOS
CLIMÁTICOS NOS ACOSTAMENTOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientadora: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A444a Almeida, Antonia Fabiana Marques.

Análise de rodovias de baixo volume de tráfego quanto ao dimensionamento, ocorrência de defeitos e impactos climáticos nos acostamentos / Antonia Fabiana Marques Almeida. – 2024.

186 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2024.

Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

1. Módulo de Resiliência. 2. Deformação Permanente. 3. Tratamento Superficial por Penetração. 4. Regressão Logística. 5. Carga Piezométrica. I. Título.

CDD 388

ANTONIA FABIANA MARQUES ALMEIDA

ANÁLISE DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO QUANTO AO
DIMENSIONAMENTO, OCORRÊNCIA DE DEFEITOS E IMPACTOS CLIMÁTICOS
NOS ACOSTAMENTOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura.

Aprovada em 16/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Profa. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci
Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior
Universidade de São Paulo (USP)

Dedico esta Tese à Elis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, à Beata Benigna, à Nossa Senhora de Fátima e ao “Padim” Padre Cícero.

Agradeço incondicionalmente aos meus pais, Conceição e Veridiano, por tudo o que sou (e quem sou) hoje.

Agradeço imensamente ao meu marido, Marcos Timbó, por ser lugar de apoio, carinho e conforto.

Agradeço ao meu irmão, Fabiano, e aos parentes que torceram sempre por mim.

Agradeço à minha sogra, Teresinha, pelas orações, e aos meus cunhados, em especial ao João.

Agradeço à minha orientadora, professora Suelly, pelos ensinamentos e conselhos.

Agradeço ao meu coorientador, professor Heber, por todos os cafés, conversas e auxílios.

Agradeço à banca pela participação e todas as recomendações para melhoria do trabalho, professores Ernesto, Paulo Roberto, Leomar e Liedi.

Agradeço aos amigos da UFCA: Ana, Ary, Edenia, Igor, Flávio, Lilian e Sofia. Aos amigos do PETRAN. Aos amigos que fiz no campus da UFC em Crateús: Amanda, Lívio, Marciel, Pablo e Wellington. Aos amigos que fiz ao longo da vida: Boris e Fátima.

Agradeço ao colega e professor do IFCE, Antônio Júnior, pela parceria.

Agradeço ao colegiado do curso de Engenharia Civil e ao Centro de Ciências e Tecnologia da UFCA pela liberação para cursar o doutorado.

Agradeço ao PETRAN, que tem sido minha casa acadêmica desde o mestrado, e todos que fazem parte dele, funcionários e professores.

Agradeço também à Iolanda, que sempre nos ajudou nas burocracias quando a gente já não tem mais cabeça para fazer o que é necessário.

Agradeço à professora Carla Beatriz pela disponibilização, junto ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), da licença para uso do *software* Slide2.

Agradeço à Fundação Cearense de Apoio à Pesquisa (FUNCAP) pelo auxílio financeiro e pela participação no Programa Cientista Chefe, bem como ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) através do “Subprojeto 2 - Plataforma Integrada de Estruturação e Análise de Dados com Uso de Inteligência Artificial” contrato TED 679/2020).

RESUMO

As Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT) são essenciais na promoção de acessibilidade a serviços básicos de comunidades mais distantes dos grandes centros, e correspondem a mais de 60% da rede rodoviária no mundo. Elas devem ter capacidade de fornecer um transporte confortável e seguro aos usuários, por meio de estruturas adequadas e duráveis. Os normativos técnicos do meio rodoviário brasileiro são destinados às rodovias de maior volume, tornando as RBVT pouco atrativas quanto à sua eficiência e não prioritárias nas ações de manutenção e reabilitação por parte dos gestores. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo analisar as RBVT do estado do Ceará quanto ao seu dimensionamento, mecanismos de ocorrência de defeitos e impactos dos efeitos climáticos nos acostamentos na sua estrutura, como subsídios de apoio à tomada de decisão. Para tanto, o trabalho foi estruturado em três artigos. No Artigo 1 foram analisadas estruturas com quatro diferentes subleitos, dimensionadas com valores de Módulo de Resiliência (MR) estimados pelo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), o que resultou em um catálogo de soluções que não compromete a vida útil quanto à Deformação Permanente (DP) em RBVT. No Artigo 2 foram analisados os defeitos categorizados disponíveis em relatórios de levantamentos de rodovias federais, e com a regressão logística ordenada foram identificadas as variáveis explicativas que implicam em maior frequência de panelas e de remendos. O Artigo 3 avaliou a influência da pluviometria nos acostamentos quanto ao desempenho estrutural das rodovias, em que incrementos de umidade nas camadas granulares dos pavimentos de RBVT, pela infiltração lateral, ocasionam perda de resistência mecânica, decorrentes das reduções dos valores médios de MR, e o aumento nos valores de DP. Assim, as RBVT podem ser construídas de forma mais eficiente e de baixo custo com o auxílio dos catálogos de dimensionamento e, para proteção desses pavimentos, é necessário que sejam construídos acostamentos, preferencialmente com a mesma estrutura da pista principal e revestidos em tratamento superficial simples, com no mínimo 0,50 m de largura. Além disso, recomenda-se o monitoramento do tráfego das RBVT e dos defeitos que, tão logo sejam identificados, devem ser sanados, impedindo o aumento da sua frequência e o conseqüente desconforto e insegurança aos usuários. Com os resultados desta Tese, espera-se ter contribuído para ampliar o conhecimento sobre RBVT para auxiliar na expansão da rede pavimentada e gestão dessa infraestrutura rodoviária.

Palavras-chave: Módulo de Resiliência; Deformação Permanente; Tratamento Superficial por Penetração; Regressão Logística; Carga Piezométrica.

ABSTRACT

Low-Volume Roads (LVR) are essential in promoting accessibility to basic services in communities further away from large centers and correspond to more than 60% of the road network in the world. They must be able to provide comfortable and safe transportation to users through adequate and durable structures. The technical regulations for the road environment are aimed at higher volume highways, making LVR unattractive in terms of its efficiency and not a priority in maintenance and rehabilitation actions by managers. In this sense, this work aims to analyze the LVR in the state of Ceará regarding their design, mechanisms of occurrence of defects, and impacts of climate effects on shoulders in their structure, as subsidies to support decision making. To this end, the work was structured into three articles. In Article 1, structures with four different subgrades were analyzed, dimensioned with Resilient Modulus (MR) values estimated by the National Dimensioning Method (MeDiNa), which resulted in a catalog of solutions that do not compromise the useful life in terms of Permanent Deformation (PD) in LVR. In Article 2, the categorized defects available in the federal highway survey reports were analyzed and with ordered logistic regression, the explanatory variables that imply a greater severity of potholes and patches were identified. Article 3 evaluated the influence of shoulders on the structural performance of highways, in which increases in humidity in the granular layers of LVR pavements, through lateral infiltration, cause loss of mechanical resistance, resulting from reductions in average MR values and an increase in PD values. Thus, LVR can be built more efficiently and at low cost with the help of sizing catalogs, and to protect these pavements, shoulders must be built, preferably with the same structure as the main lane and covered in a simple surface treatment, at least 0.50 m wide. Furthermore, LVR traffic must be monitored and defects that, as soon as they are identified, must be remedied, preventing their severity from increasing and the consequent discomfort and insecurity for users. With the results of this work, it is expected to have contributed to expanding the knowledge about LVR to assist in the expansion of the paved network and the management of this road infrastructure.

Keywords: Resilient Modulus; Permanent Deformation; Chipseal; Logistic Regression; Pressure Head.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Artigos definidos para atingis os objetivos geral e específicos da Tese	29
Figura 2 – Esquema da relação entre o Número N e a contribuição para ocorrência de defeitos em rodovias considerando tráfego e clima	37
Figura 3 – Zonas de variação de umidade de acordo com a existência de revestimento nos acostamentos	40
Figura 4 – Exsudação na BR-230, trecho Farias Brito-Várzea Alegre, Ceará	45
Figura 5 – Perda de agregados na CE-152, trecho Mauriti-Palestina, Ceará	46
Figura 6 – Desagregação longitudinal e remendos na CE-152, trecho Mauriti-Palestina, Ceará	47
Figura 7 – Panelas na CE-152, trecho Mauriti-Palestina, Ceará	47
Figura 8 – Desgaste de borda na CE-060, trecho Jardim-Divisa Ceará - Pernambuco	48
Figura 9 – Esquema de um segmento de rodovia com corrugação	50
Figura 10 – Dispersão dos valores de ATR obtidos das simulações do subleito G1	68
Figura 11 – Dispersão dos valores de ATR obtidos das simulações do subleito G2	68
Figura 12 – Dispersão dos valores de ATR obtidos das simulações do subleito SA1	69
Figura 13 – Dispersão dos valores de ATR obtidos das simulações do subleito SA2	69
Figura 14 – <i>Boxplot</i> dos valores de deformação permanente nos subleitos	71
Figura 15 – <i>Boxplot</i> dos valores de tensão no topo do subleito	73
Figura 16 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito panela a partir do percentual de afundamento (local e plástico)	93
Figura 17 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito panela a partir do percentual de trincamento	94
Figura 18 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito panela a partir do Volume Médio Diário (VMD)	94

Figura 19 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito remendo a partir do Número N (binário) (0 – tráfego baixo; 1 – tráfego médio/alto)	96
Figura 20 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito remendo a partir do tipo de revestimento da faixa principal (0 – CA; 1 – TSP; 2 – Microrrevestimento)	96
Figura 21 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito remendo a partir do percentual de trincamento	97
Figura 22 – Áreas de influência dos postos pluviométricos do DO-10	105
Figura 23 – Série histórica de chuvas diárias máximas do posto 91	106
Figura 24 – Estrutura do pavimento analisada neste estudo (sem escala, medidas em m)	108
Figura 25 – Classificação AASHTO dos pontos de amostragem do subleito da CE-292 ...	114
Figura 26 – Custos por quilômetro das estruturas simuladas	119
Figura 27 – Carga piezométrica <i>versus</i> teor de umidade das camadas granulares	121
Figura 28 – Carga piezométrica <i>versus</i> teor de umidade do acostamento arenoso (SOP)	121
Figura 29 – Carga piezométrica <i>versus</i> teor de umidade do acostamento siltoso (Jardim)	122
Figura 30 – Recorte da estrutura sAc discretizada com condições de contorno aplicadas	123
Figura 31 – Recorte do mapa de calor dos valores de carga piezométrica obtidos da simulação da estrutura sAc	123
Figura 32 – Umidades gravimétricas nas camadas granulares da estrutura do pavimento	124
Figura 33 – Variação da umidade gravimétrica nas camadas granulares das estruturas de pavimentos simulados com relação à umidade ótima (Ref)	125
Figura 34 – Classificação em ordem decrescente dos incrementos de umidade dada a pluviometria nas estruturas simuladas	126

Figura 35 – Vetores de velocidade do fluxo transiente da água infiltrada	128
Figura 36 – Variação dos MR médios nas umidades de interesse (MRh) com base nos MR obtidos com as umidades ótimas do ensaio de Proctor (Ref)	129
Figura 37 – Valores de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) por camada e total (em mm)	131
Figura 38 – Características geométricas da estrutura sAc	159
Figura 39 – Características geométricas das estruturas A-sR-05 e S-sR-05	159
Figura 40 – Características geométricas das estruturas A-sR-10 e S-sR-10	160
Figura 41 – Características geométricas das estruturas A-R-05 e S-R-05	160
Figura 42 – Características geométricas das estruturas A-R-10 e S-R-10	161
Figura 43 – Características geométricas da estrutura P-sR-05	161
Figura 44 – Características geométricas da estrutura P-sR-10	162
Figura 45 – Características geométricas da estrutura P-R-05	162
Figura 46 – Características geométricas da estrutura P-R-10	163
Figura 47 – Estrutura sAc discretizada com as condições de contorno iniciais	171
Figura 48 – Estrutura A-sR-05 discretizada com as condições de contorno iniciais	171
Figura 49 – Estrutura A-sR-10 discretizada com as condições de contorno iniciais	171
Figura 50 – Estrutura A-R-05 discretizada com as condições de contorno iniciais	172
Figura 51 – Estrutura A-R-10 discretizada com as condições de contorno iniciais	173
Figura 52 – Estrutura S-sR-05 discretizada com as condições de contorno iniciais	173
Figura 53 – Estrutura S-sR-10 discretizada com as condições de contorno iniciais	174
Figura 54 – Estrutura S-R-05 discretizada com as condições de contorno iniciais	174
Figura 55 – Estrutura S-R-10 discretizada com as condições de contorno iniciais	175
Figura 56 – Estrutura P-sR-05 discretizada com as condições de contorno iniciais	175
Figura 57 – Estrutura P-sR-10 discretizada com as condições de contorno iniciais	176
Figura 58 – Estrutura P-R-05 discretizada com as condições de contorno iniciais	176

Figura 59 – Estrutura P-R-10 discretizada com as condições de contorno iniciais	177
Figura 60 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura sAc	178
Figura 61 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura A-sR-05	178
Figura 62 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura A-sR-10	179
Figura 63 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura A-R-05	179
Figura 64 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura A-R-10	180
Figura 65 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura S-sR-05	180
Figura 66 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura S-sR-10	191
Figura 67 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura S-R-05	181
Figura 68 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura S-R-10	182
Figura 69 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura P-sR-05	182
Figura 70 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura P-sR-10	183
Figura 71 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura P-R-05	183
Figura 72 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura P-R-10	184

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação quanto ao tráfego das RBVT no mundo	34
Quadro 2 – Catálogo de dimensionamento de RBVT em subleitos ocorrentes na RMF	74
Quadro 3 – Variáveis consideradas na análise	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Valores típicos de MR do subleito para as classes AASHTO ocorrentes na RMF	62
Tabela 2	– Informações das camadas das estruturas simuladas	63
Tabela 3	– Simulações do subleito realizadas no MeDiNa (51 simulações) para $N = 10^6$	65
Tabela 4	– Estruturas a serem simuladas com base no método empírico (TSD = 2,5 cm)	66
Tabela 5	– Resumo descritivo dos dados numéricos coletados	86
Tabela 6	– Tabela de contingência das informações categóricas do revestimento da faixa principal	87
Tabela 7	– Matriz de correlação com as variáveis explicativas numéricas	88
Tabela 8	– Valores do VIF obtidos da análise das variáveis explicativas	89
Tabela 9	– Significância dos parâmetros do modelo logit ordenado para Panela	90
Tabela 10	– Significância dos parâmetros do modelo logit ordenado para Remendo	90
Tabela 11	– Parâmetros de desempenho dos modelos de regressão logística das variáveis dependentes categóricas ordenadas	91
Tabela 12	– <i>Odds ratio</i> e intervalo de confiança da variável dependente Panela	91
Tabela 13	– <i>Odds ratio</i> e intervalo de confiança da variável dependente Remendo	92
Tabela 14	– Larguras de acostamentos verificadas em sete rodovias estaduais do Ceará no Distrito Operacional 10	102
Tabela 15	– Limites dos parâmetros das camadas granulares de pavimentos ($N \leq 5 \times 10^6$)	107
Tabela 16	– Codificações das simulações a serem realizadas	109
Tabela 17	– Informações do subleito da CE-292 (energia normal)	114
Tabela 18	– Informações dos empréstimos (EMP) da CE-292 (Energia normal)	114

Tabela 19 – Informações descritivas da jazida de sub-base da CE-292 (Energia intermediária)	115
Tabela 20 – Informações descritivas de 11 amostras da mistura de solo-brita para a camada de base da CE-292 (Energia intermodificada)	116
Tabela 21 – Coeficientes de MR para os solos da CE-292	117
Tabela 22 – Coeficientes de DP para os solos da CE-292	117
Tabela 23 – Informações de entrada das camadas para dimensionamento das estruturas	118
Tabela 24 – Espessura das camadas da estrutura calculada e respectivos valores de ATR calculados no dimensionamento	119
Tabela 25 – Parâmetros simulados pela textura dos materiais	120
Tabela 26 – Umidade ótima, volumétrica e carga piezométrica das camadas granulares ..	122
Tabela 27 – Informações descritivas e de dispersão dos valores de MR_h	130
Tabela 28 – Valores do coeficiente de regressão k_1 nas umidades de interesse	130
Tabela 29 – Tempos de recorrência das chuvas máximas diárias do posto pluviométrico 91	157
Tabela 30 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura sAc (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	164
Tabela 31 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura A-sR-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	164
Tabela 32 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura A-sR-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	165
Tabela 33 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura A-R-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	165
Tabela 34 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura A-R-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	166
Tabela 35 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura S-sR-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	166

Tabela 36 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura S-sR-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	167
Tabela 37 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura S-R-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	167
Tabela 38 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura S-R-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	168
Tabela 39 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura P-sR-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	168
Tabela 40 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura P-sR-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	169
Tabela 41 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura P-R-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	169
Tabela 42 – Composição do custo para execução de 1km da estrutura P-R-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)	180
Tabela 43 – Valores de umidade gravimétrica, em percentual, verificados pós simulação de infiltração	185
Tabela 44 – Valores de incremento de umidade nas camadas do pavimento, em percentual, verificados pós simulação de infiltração com relação à referência	185
Tabela 45 – Módulos de resiliência (MRh) nas umidades de interesse (h)	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
AIC	Critério de informação de Akaike (<i>Akaike Information Criterion</i>)
ALP	Afundamento plástico local
ATP	Afundamento plástico da trilha
ATR	Afundamento de trilha de roda
BD	Banco de dados
BIC	Critério de informação Bayesiano (<i>Bayesian Information Criterion</i>)
CA	Concreto asfáltico
CE	Ceará
CBR	Índice de Suporte Califórnia (<i>California Bearing Ratio</i>)
CREMA	Programa de Contratação, Restauração e Manutenção
cv	Coefficiente de variação
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DO	Distrito operacional
DP	Deformação permanente
EP	Erro de previsão
EXP	Expansão
FC-2	Trincas com abertura superior a 1,0 mm e sem erosão nas bordas
FC-3	Trincas com abertura superior a 1,0 mm e com erosão nas bordas
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
$h_{ót}$	Umidade ótima
IC	Intervalo de confiança
ICPF	Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis
IES	Índice do Estado de Superfície do Pavimento
IGG	Índice de Gravidade Global
IGGE	Índice de Gravidade Global Expedido
IGI	Índice de Gravidade Individual
ICM	Índice de Condição de Manutenção
IP	Índice de Plasticidade
IRI	Índice Internacional de Irregularidade (<i>International Roughness Index</i>)

IS	Instrução de Serviço
LA	Lama asfáltica
LL	Limite de Liquidez
LVC	Levantamento Visual Contínuo
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MEAS	Massa específica aparente seca
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MEPDG	<i>Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide</i>
M&R	Manutenção e Reabilitação
MR	Módulo de resiliência
MRh	Módulo de resiliência na umidade de interesse
MRAF	Microrrevestimento asfáltico à frio
N	Número N
NCHRP	<i>The National Cooperative Highway Research Program</i>
NL	Não-Líquido
NP	Não-Plástico
OR	<i>Odds Ratio</i>
PRO	Procedimento
RCI	Índice de Condição da Rodovia (<i>Road Condition Index</i>)
RMC	Região Metropolitana do Cariri
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RBVT	Rodovia de baixo volume de tráfego
SADC	<i>Southern African Development Community</i>
Seinfra	Secretaria de infraestrutura
SGP	Sistema de gerência de pavimentos
TER	Terminologia
TS	Tratamento superficial
TSD	Tratamento superficial duplo
TSP	Tratamento superficial por penetração
TSS	Tratamento superficial simples
USACE	<i>The United States Army Corps of Engineers</i>
VIF	Fator de Inflação da Variância (<i>Variance Inflation Factor</i>)
VMD	Volume médio diário

VMDA	Volume médio diário anual
VSA	Valor de serventia atual

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO	24
1.1	Problema	28
1.2	Objetivos	28
1.3	Organização da Tese em formato de artigos	28
1.4	Estrutura da Tese	29
2	REVISÃO DA LITERATURA – CONSIDERAÇÕES ACERCA DAS RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO	31
2.1	Introdução	31
2.2	Volume de tráfego como critério de classificação de rodovias	33
2.3	Fatores importantes que afetam as estruturas dos pavimentos das rodovias de baixo volume de tráfego além do tráfego	36
2.3.1	<i>Clima</i>	36
2.3.2	<i>Drenagem</i>	37
2.3.3	<i>Acostamentos</i>	39
2.4	Dimensionamento de rodovias de baixo volume de tráfego	41
2.4.1	<i>Método baseado na experiência</i>	42
2.4.2	<i>Método empírico</i>	42
2.4.3	<i>Método mecânico e mecânico-empírico</i>	43
2.4.4	<i>Método baseado em catálogos</i>	43
2.5	Defeitos em rodovias com TSP	44
2.5.1	<i>Exsudação</i>	45
2.5.2	<i>Perda de agregados</i>	45
2.5.3	<i>Desagregação longitudinal</i>	46
2.5.4	<i>Desagregação do revestimento (Painéis)</i>	47
2.5.5	<i>Desgaste dos agregados</i>	48
2.5.6	<i>Desgaste da borda</i>	48
2.5.7	<i>Superposição</i>	49
2.5.8	<i>Juntas de construção defeituosas</i>	49
2.5.9	<i>Corrugações</i>	49
2.5.10	<i>Rugosidade geométrica inadequada</i>	50
2.6	Levantamento em rodovias com TSP	50

2.6.1	<i>Terminologia</i>	51
2.6.2	<i>Avaliação objetiva da superfície</i>	52
2.6.3	<i>Avaliação da condição da superfície de subtrecho homogêneo</i>	53
2.6.4	<i>Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos</i>	53
2.6.5	<i>Valor de serventia atual</i>	54
2.6.6	<i>Índice de irregularidade longitudinal - IRI</i>	54
2.6.7	<i>Avaliação estrutural de pavimentos</i>	55
2.7	Considerações finais	56
3	ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO CONSIDERANDO PARÂMETROS DE RIGIDEZ	58
3.1	Introdução	58
3.2	Planejamento experimental	61
3.2.1	<i>Determinação da variação do Módulo de Resiliência de diferentes subleitos</i>	61
3.2.2	<i>Simulações para obtenção de Deformação Permanente e tensão no topo do subleito</i>	63
3.2.3	<i>Proposição de catálogo mecanístico-empírico para RBVT</i>	66
3.3	Resultados e discussões	66
3.3.1	<i>Determinação das estruturas a serem simuladas</i>	66
3.3.2	<i>Deformação Permanente total e do subleito</i>	67
3.3.3	<i>Verificação dos valores de tensão no topo do subleito</i>	73
3.3.4	<i>Catálogo de dimensionamento</i>	74
3.4	Considerações finais	75
4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO PARA OCORRÊNCIA DE PANELA E REMENDO DE MAIOR FREQUÊNCIA NOS PAVIMENTOS	78
4.1	Introdução	78
4.2	Método	81
4.2.1	<i>Caracterização das informações</i>	81
4.2.2	<i>Verificação dos pressupostos dos modelos de regressão logística ordinal</i>	83
4.2.3	<i>Construção e desempenho dos modelos</i>	84

4.2.4	<i>Odds ratio e intervalos de confiança</i>	85
4.2.5	<i>Representação gráfica das probabilidades de ocorrência das categorias avaliadas</i>	85
4.3	Resultados	86
4.3.1	<i>Caracterização dos dados utilizados na análise</i>	86
4.3.2	<i>Verificação dos pressupostos</i>	87
4.3.3	<i>Construção dos modelos de regressão logística ordinal</i>	89
4.3.4	<i>Odds ratio e intervalos de confiança</i>	91
4.3.5	<i>Representação gráfica das probabilidades</i>	92
4.4	Considerações finais	98
5	INFLUÊNCIA DOS ACOSTAMENTOS NO DESEMPENHO ESTRUTURAL DAS RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO	100
5.1	Contextualização	100
5.2	Materiais e método	104
5.2.1	<i>Obtenção de informações dos materiais</i>	106
5.2.2	<i>Dimensionamento da estrutura de pavimento</i>	107
5.2.3	<i>Modelo hidráulico das camadas não-saturadas</i>	109
5.2.4	<i>Cálculo da infiltração nas camadas</i>	110
5.2.5	<i>Verificação da alteração da rigidez dos materiais devido à variação de umidade</i>	111
5.2.6	<i>Análise de desempenho estrutural</i>	112
5.3	Resultados e discussões	112
5.3.1	<i>Informações dos materiais</i>	113
5.3.1.1	<i>Subleito</i>	113
5.3.1.2	<i>Sub-base</i>	115
5.3.1.3	<i>Base</i>	115
5.3.1.4	<i>Revestimento</i>	116
5.3.1.5	<i>Material do acostamento</i>	116
5.3.1.6	<i>Módulo de resiliência e deformação permanente</i>	117
5.3.2	<i>Dimensionamento da estrutura do pavimento</i>	118
5.3.3	<i>Modelo hidráulico das camadas não-saturadas</i>	120
5.3.3.1	<i>Curvas para obtenção dos valores de carga piezométrica</i>	120
5.3.4	<i>Cálculo de infiltração nas camadas</i>	122

5.3.5	<i>Impacto da variação de umidade na rigidez das camadas granulares</i>	129
5.3.6	<i>Análise do desempenho estrutural em função dos afundamentos de trilha de roda</i>	131
5.4	Considerações finais	132
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	134
6.1	Principal contribuição da Tese	134
6.2	Principais conclusões	134
6.2.1	<i>Acerca da revisão bibliográfica</i>	134
6.2.2	<i>Acerca da análise do dimensionamento de pavimentos de RBVT</i>	135
6.2.3	<i>Acerca da influência de variáveis explicativas na frequência de painéis e remendos</i>	135
6.2.4	<i>Acerca da influência dos acostamentos no desempenho estrutural de RBVT</i>	136
6.3	Principais limitações da Tese	136
6.4	Recomendações de trabalhos futuros	137
	REFERÊNCIAS	139
	APÊNDICE A – CÁLCULO DA PLUVIOMETRIA DIÁRIA MÁXIMA DO TEMPO DE RECORRÊNCIA DE 10 ANOS E DAS INFILTRAÇÕES	156
	APÊNDICE B – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS ESTRUTURAS SIMULADAS PARA INFILTRAÇÃO	159
	APÊNDICE C – COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO SIMULADAS	164
	APÊNDICE D – ESTRUTURAS COM MALHA DE ELEMENTOS FINITOS PARA SIMULAÇÃO DE INFILTRAÇÃO	171
	APÊNDICE E – VALORES DE CARGA PIEZOMÉTRICA BTIDOS DAS SIMULAÇÕES DE INFILTRAÇÃO	178
	APÊNDICE F – VALORES DE UMIDADE GRAVIMÉTRICA VERIFICADOS PÓS SIMULAÇÃO DE INFILTRAÇÃO	185
	APÊNDICE G – VALORES DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA NAS UMIDADES DE INTERESSE	186

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil é um país em desenvolvimento econômico e para aumentar seu crescimento é necessária a ampliação da infraestrutura rodoviária, com necessidade de investimento, até setembro de 2023, de R\$ 242,4 bilhões (2,26% do Produto Interno Bruto – PIB), tendo sido investidos R\$ 41,4 bilhões (0,39% do PIB) (ABDIB, 2024). Essa ampliação pode auxiliar na redução dos custos de transportes e melhorar a acessibilidade e mobilidade de comércio de regiões mais isoladas (Cosar *et al.*, 2021). Uma infraestrutura rodoviária inadequada retarda o potencial de crescimento econômico ao minar a competitividade de exportação de produtos agrícolas e outros produtos manufaturados, restringe a oportunidade de emprego e desenvolvimento de negócios e impede os esforços de desenvolvimento humano em saúde e educação (World Bank, 2021).

Em pesquisa realizada pela CNT (2023), em uma amostra de 111.502 km de rodovias pavimentadas no Brasil, identificou que a condição de 56,8% foi de regular, ruim ou péssimo e 43,2% classificados como ótimo e bom. Ainda de acordo com essa pesquisa, a condição da superfície dos pavimentos foi classificada como perfeita (8,3%), desgastada (55,9%), com trincas e remendos (30,8%), com afundamentos, ondulações e buracos (4,5%) e destruída (0,6%). Logo, parte da malha rodoviária pavimentada no Brasil necessita de alguma ação de manutenção e reabilitação (M&R) ou até reconstrução. O custo estimado para recuperar as rodovias brasileiras é de R\$ 94,12 bilhões (CNT, 2023).

Com isso, é possível verificar que, para a solução que utiliza o Concreto Asfáltico (CA) como camada de revestimento, os custos de construção e de manutenção tornam a melhoria da infraestrutura da rede rodoviária mais onerosa. Dessa forma, a utilização de Tratamento Superficial por Penetração (TSP) como principal camada de revestimento é uma alternativa de pavimento mais econômico, sobretudo, em rodovias com baixos volumes de tráfego (RBVT). Conforme Nogami e Villibor (1995), o TSP é uma solução de revestimento de baixo custo para RBVT, de fácil aplicação, com rápida execução e liberação da pista. Outros tipos de Tratamentos Superficiais (TS), como o Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e a Lama Asfáltica (LA), também podem ser utilizados com o objetivo de selagem da base granular em RBVT (SOP, 2019a).

RBVT são definidas como rodovias em meio rural onde trafegam no máximo 500 veículos motorizados por dia, podendo ser pavimentadas ou não, e são responsáveis pelo desenvolvimento regiões mais afastadas (Behrens, 1999). De acordo com Roughton (2000), RBVT é uma via por onde circulam cerca de 300 veículos por dia, com um percentual de

veículos pesados de 5% a 10%, sendo o Número N do período de projeto máximo de 10^6 . Para Pasindu, Gamage e Bandara (2020), as RBVT são as vias que atendem as necessidades diárias sociais e econômicas de uma localidade. O tráfego como critério e classificação de baixo volume varia de local para local e ainda podem ser definidas como RBVT com base em critérios políticos (Pasindu; Gamage; Bandara, 2020).

Roughton (2000), SATCC (2003), Zimmerman e Peshkin (2003), Libéria (2019), Franzen e Thorpe (2020) estimam que as RBVT correspondem de 70% a 90% da rede rodoviária de muitos países, o Canadá com 77% (Doré, 2017), os Estados Unidos com 80% (AASHTO, 2019), o Afeganistão com 85% (Thapa, 2020), e a Índia com 90% (Bolem; Shankar, 2018). Dada essa estimativa e a quantidade de rodovias não pavimentadas, supõe-se que as RBVT correspondem uma maior proporção no Brasil, e, assim, a construção pode ser realizada com menores custos, pois as soluções com TS são mais econômicas.

Apesar da quantidade estimada de RBVT no Brasil (em média 80% estimado com base nos dados de CNT, 2023), as diretrizes técnicas voltadas para dimensionamento e gerência desses pavimentos englobam critérios voltados aos pavimentos em CA, que podem não se adequar apropriadamente aos com TSP. Assim, as RBVT são dimensionadas com o uso de métodos que não otimizam o uso de materiais mais econômicos, elevando seus custos e tornando sua construção inviável (Kumar *et al.*, 2022). Esse pode ser o motivo pelo qual muitas rodovias permanecem sem a estrutura aceitável para garantir trafegabilidade com conforto e segurança e, por se tratar de RBVT, tem baixa prioridade quando comparadas às de maior volume.

Embora apresentem baixo volume, as RBVT são elementos importantes para as regiões mais afastadas dos centros comerciais, visto que têm a função de conexão ao sistema principal para permitir acesso às atividades essenciais, apresentando um viés social (Coghlan, 2000). Thapa (2020) apresentou um compilado com 17 estudos de caso de avanço da mobilidade de regiões afastadas e comunidades da zona rural do sul da Ásia e África Subsaariana decorrente da melhoria de acesso rodoviário. Assim, é importante inserir as RBVT em planos e cronogramas de implantação de estrutura adequada e, para isso, deve-se utilizar uma orientação adequada de projeto que permita a pavimentação com menores custos e manutenção da qualidade técnica (Roughton, 2000).

Em 2022, no estado do Ceará, cerca de 8.877 km de rodovias estaduais eram pavimentadas (correspondendo a 64,4% do total) e a solução de camada de revestimento adotada em 64% delas é do tipo TS (SOP, 2023). Considerando as rodovias não pavimentadas e as que possuem TS como camada de revestimento, o Ceará possui 76,8% de RBVT entre as

rodovias estaduais. Essa proporção no estado e no País como um todo, mostram a importância de direcionamentos técnicos voltados às suas especificidades.

Quanto à gerência dessa rede, se não forem consideradas as peculiaridades de cada tipo de pavimento, podem existir informações da condição das RBVT que não reflitam sua realidade. Além disso, os levantamentos das condições funcionais, e, talvez, das estruturais, deveriam ser adaptados para as RBVT, visto que a infraestrutura é mais esbelta e a camada de revestimento, caso seja algum TS, não possui função estrutural.

Pierce e Kebede (2015) afirmam que pavimentos com TSP não se comportam da mesma forma que pavimentos em CA. A compreensão do comportamento e da ocorrência dos defeitos dos TSP pode ser complexa, pois, os materiais empregados e sua interação, execução, exposição às condições climáticas, compactação e outros fatores, podem interferir das mais diversas formas (Boz; Kumbargerri; Kutay, 2019). Além disso, Adams, Castorena e Kim (2019) afirmam que as taxas de ligante e de agregados indicadas em projeto não são as aplicadas em campo, e essas diferenças, bem como a ineficiência dos métodos de dosagem são as prováveis causas dos defeitos de rodovias em TSP.

Pode-se afirmar que o desempenho de um pavimento com revestimento em TSP é dado pelos seus componentes, projeto e execução (Buss; Guirgui; Gransberg, 2018). Por serem construídas muitas vezes com materiais que não atendem aos padrões estabelecidos, as rodovias em TSP são mais suscetíveis às variações de umidade e à forma como a estrutura é afetada pelos fatores ambientais, sendo os principais para ocorrência de falha (Kumar *et al.*, 2022):

- a) Qualidade dos materiais (resistência e suscetibilidade à umidade);
- b) Controle construtivo (compactação, umidade e espessura das camadas);
- c) Meio (clima, umidade, pluviometria);
- d) Manutenção (drenagem, revestimento e acostamento); e
- e) Tráfego (carregamentos veiculares).

De acordo com Kim e Lee (2005), Loiola (2009) e Kumbargerri, Boz e Kutai (2019), os defeitos mais críticos dos TSP são a perda de agregados e a exsudação, seguidos de desagregação longitudinal e panelas. Os levantamentos realizados em trechos de rodovias com TS são fundamentados em documentos e normativos que foram desenvolvidos para CA, o que não leva em consideração as particularidades dessas estruturas. Um exemplo foi o cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG) adaptado para TS analisado por Almeida *et al.* (2019), que teve como base um levantamento realizado em rodovias federais por meio de DNIT (2003a), que não considera os defeitos mais comuns do TSP.

Assim, para garantir uma vida útil adequada à necessidade de uma rodovia, é necessário que as RBVT passem por processo adequado de dimensionamento, execução e M&R. A implantação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é um fator de importância para a manutenção da qualidade funcional e estrutural da via com a realização de levantamentos e intervenções de maneira sistemática. O SGP demanda a existência de um banco de dados (DNIT, 2011) com os parâmetros que podem ser utilizados na avaliação dos pavimentos, com obtenção de informações construtivas e de levantamentos realizados pelos órgãos gestores rodoviários, além de informações complementares com ensaios laboratoriais e levantamentos *in loco*. Essas informações podem auxiliar o SGP em estudos para identificar correlações e efeitos causais para a ocorrência de defeitos, permitindo uma tomada de decisão mais precisa e eficiente para evitar as falhas ou saná-las quando do seu surgimento.

Para manter um nível de serviço adequado, promovendo conforto e segurança aos usuários, a estrutura de uma RBVT deve ser protegida para que não ocorram variações do seu desempenho funcional e estrutural ao longo da sua vida útil. Além da preocupação com os materiais a serem utilizados nas camadas granulares, nos últimos anos tem sido importante também analisar os impactos das mudanças climáticas em rodovias. Nesse sentido, há estudos que mostram que as RBVT se deterioram muito mais pela ação do clima (Kim; Adams; Jeong, 2018) do que pelo tráfego, tornando-se essencial o uso dos acostamentos para contribuir na proteção dessa estrutura. Os acostamentos, além de atuarem na segurança de tráfego, criam uma contenção da estrutura principal (MoDoT, 2024) e podem auxiliar na drenagem da rodovia.

Em RBVT, os acostamentos são, quando existentes, construídos somente com materiais granulares, sem revestimento, por serem de menor custo de implantação, porém, têm manutenção mais onerosa (Price, 1990). Dado o incremento de tráfego que pode ocorrer numa RBVT com revestimento asfáltico, além dos impactos de eventos climáticos, a existência de acostamento com largura adequada e com revestimento pode garantir que não ocorra um dano estrutural precoce oriundo da variação de umidade das camadas granulares subjacentes (Portigo, 1976; Willett, 1990; MTPW, 2020).

Existem documentos que indicam as larguras mínimas recomendadas para os acostamentos em RBVT que, diferente de rodovias de maior volume, podem ter medidas reduzidas. Como os acostamentos são, também, elementos de segurança para estacionamento e parada de veículos em emergência ou como faixa de conversão, em rodovias de maior tráfego, é necessário que a largura seja suficiente para acomodar um veículo sem interferir no fluxo da faixa principal. Em RBVT, ocorrem brechas que asseguram a ultrapassagem por veículos parados e realização de conversões de forma segura, o que permite que esse elemento possa ser

reduzido, dada a necessidade de menor custo para sua implantação. As larguras mínimas recomendadas em RBVT variam: 0,60 m (Stephens Jr., 2005), 1,00 m (com revestimento) (MTPW, 2020), 0,61 m (sem revestimento) (MoDoT, 2024).

1.1 Problema

A partir da literatura consultada, constatou-se que o dimensionamento e o gerenciamento dos pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego são inadequados, não auxiliando na tomada de decisões que poderiam resultar em menores custos de execução e manutenção, bem como na consequente ampliação da malha rodoviária em condições confortáveis e seguras.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta Tese é analisar as rodovias de baixo volume de tráfego (RBVT) do estado do Ceará quanto ao seu dimensionamento, mecanismos de ocorrência de defeitos e impactos dos efeitos climáticos nos acostamentos como subsídios para apoio à tomada de decisão.

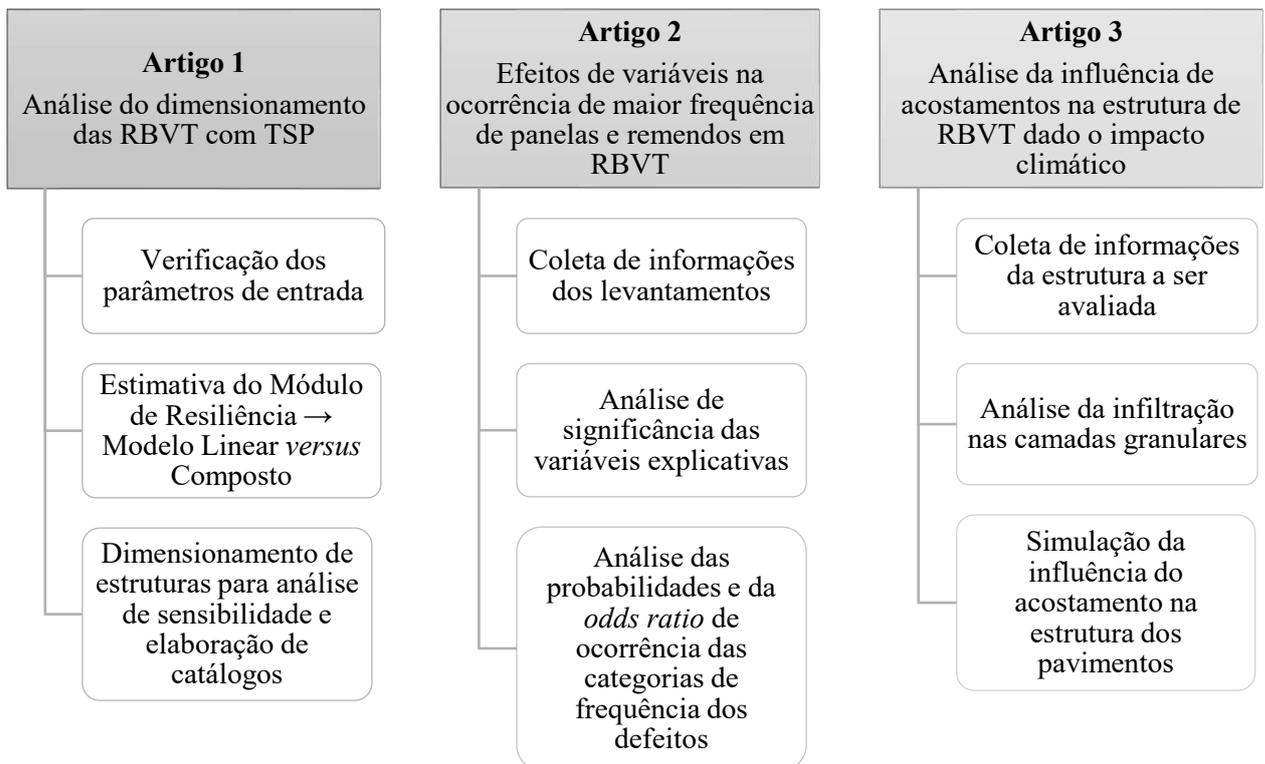
Com vistas a atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar o impacto da modelagem de parâmetros de rigidez no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos de RBVT a partir de subleitos típicos de uma região do estado do Ceará;
- b) Compreender, a partir de dados disponíveis nos relatórios do Programa CREMA (Contratação, Restauração e Manutenção), quais variáveis explicativas influenciam na probabilidade de categorias mais severas de panelas e remendos em pavimentos de RBVT;
- c) Avaliar se a largura e os materiais componentes dos acostamentos promovem a proteção das estruturas de RBVT quanto à infiltração lateral devido aos impactos climáticos.

1.3 Organização da Tese em formato de artigos

Esta Tese foi organizada em seis capítulos, sendo três escritos em formato de artigo, seguidos das referências e dos apêndices. Os capítulos que compõem este trabalho referem-se à: Introdução, Revisão Bibliográfica, Artigo 1, Artigo 2, Artigo 3 e Conclusões. Vale destacar que cada artigo proposto busca atender aos objetivos específicos delineados nesta pesquisa e, conseqüentemente, o objetivo geral. A Figura 1 apresenta um esquema da estrutura dos artigos desenvolvidos nesta tese.

Figura 1 – Artigos definidos para atingir os objetivos geral e específicos da Tese



Fonte: Autora (2024).

1.4 Estrutura da Tese

O presente trabalho está dividido em seis capítulos e apêndices. Além deste capítulo introdutório, o Capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica que foi desenvolvida para compreensão das RBVT no que se refere ao dimensionamento, dosagem, levantamentos funcionais e estruturais, defeitos, acostamentos e efeitos climáticos, causas e soluções adotadas para minimização dos problemas que surgem ao longo da sua vida útil.

O Capítulo 3 apresenta um artigo que analisa o dimensionamento de pavimentos de RBVT com relação à variação do Módulo de Resiliência (MR) do subleito. Para tanto, foram considerados quatro materiais de subleito da Região Metropolitana de Fortaleza, onde se

disponha das informações dos modelos compostos de MR, bem como dos modelos lineares, conforme identificados na literatura. O objetivo foi verificar se o dimensionamento das RBVT apresenta disparidade quando não é possível realizar o ensaio do MR e faz-se o uso de modelos mais simples.

O Capítulo 4 apresenta um artigo que analisa os efeitos das variáveis explicativas coletadas em RBVT na ocorrência das categorias mais severas dos defeitos panela e remendo. Para a análise, foram utilizados dados oriundos de relatórios do Programa de Contratação, Restauração e Manutenção (CREMA) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) de segmentos homogêneos com TSP como camada principal e/ou Número N máximo de 10^6 . Foi aplicado o método de regressão logística ordenada de análise de variáveis categóricas ordenadas para calcular as probabilidades de ocorrência das categorias baixo, médio e alto dos defeitos em análise.

O Capítulo 5 apresenta um artigo que verifica o impacto dos efeitos climáticos nos acostamentos e de como esses elementos da estrutura auxiliam na proteção dos pavimentos de RBVT. Foram utilizadas as informações de uma rodovia estadual do Ceará que possui TSP como camada de revestimento da pista principal com uma largura média de acostamento de 0,80 m que teve sua construção finalizada em 2018. Foram simuladas estruturas com diferentes larguras de acostamentos, com e sem revestimento, para obter a variação de umidade das camadas granulares, a redução de resistência mecânica dada essa variação e o impacto na vida útil das estruturas simuladas.

O Capítulo 6 trata de um compilado com as considerações finais da Tese, bem como apresenta recomendações para trabalhos futuros. Após as referências, são também apresentados apêndices com informações complementares ao texto.

2 REVISÃO DA LITERATURA – CONSIDERAÇÕES ACERCA DAS RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

Este capítulo tem como finalidade apresentar definições fundamentais para subsidiar o desenvolvimento da tese, além de servir de complemento, uma vez que, os demais tópicos são artigos e tem revisão bibliográfica mais resumida. Assim serão abordados temas como os principais fatores que afetam a estrutura das RBVT (tráfego, clima, drenagem, acostamentos), métodos de dimensionamento, defeitos e levantamentos de rodovias de baixo volume de tráfego que tenham tratamento superficial por penetração como camada de revestimento principal.

2.1 Introdução

De acordo Coghlan (2000) e Rolt *et al.* (2020), as rodovias de baixo volume de tráfego (RBVT) são importantes conexões das regiões mais afastadas à rede viária principal. Ainda não existe, de forma oficial, estudos mais aprofundados acerca das RBVT, embora muitos profissionais tenham se dedicado a estudá-las usando experiências profissionais ou acadêmicas. Em consequência, muitos gestores e engenheiros utilizam as melhores informações que se tem disponíveis, buscando adaptar as sistemáticas existentes para pavimentos flexíveis nas RBVT.

Franzen e Thorpe (2020) indicam que as RBVT correspondem de 75% a 90% da extensão rodoviária no mundo, sendo essa variação dependente das diferentes definições existentes nos países, e muitas dessas vias não possuem revestimento. Henning, Kadar e Thew (2005) afirmam que a proporção de rodovias sem revestimento ou algum tipo de tratamento superficial é superior a 60% nos países desenvolvidos, e ainda superior nos países em desenvolvimento.

Por apresentarem baixos volumes e conseqüentemente pequena demanda de usuários, geralmente não são priorizadas pelos órgãos gestores e, assim, muitas RBVT no mundo demandam melhorias, construção ou reconstrução (Coghlan, 2000). Uma provável explicação é que, como existem poucas recomendações técnicas para essas vias, muitas vezes são utilizadas diretrizes voltadas àquelas com maiores volumes de tráfego, que pode resultar em intervenções mais onerosas, com benefício-custo pouco atrativo. Ou ainda, utiliza-se de conhecimento baseado na experiência para o seu projeto, construção e manutenção.

Para Doré (2017), os métodos de dimensionamento mais rigorosos e que permitam a otimização dos recursos são essenciais para maximizar o desempenho e o retorno dos investimentos realizados. Esse autor também afirma que são necessários estudos para identificar quais os melhores materiais e estratégias de tratamento superficial para as RBVT. Dingen e Cook (2018) citam que são necessárias normas específicas para RBVT adequadas para proporcionar um padrão de melhor qualidade.

Dos dados analisados por Cook, Petts e Rolt (2013), mais de 80% das RBVT em países com economia baseada na agricultura não possuem revestimento, com a superfície composta pelo terreno natural, pois os materiais considerados adequados são geralmente escassos ou de alto custo. Essas rodovias são caracterizadas pela estrutura precária e geração de ônus aos usuários, uma vez que não dispõem de recursos ou capacidade técnica de manutenção adequada. Faz-se necessário o desenvolvimento dessa rede com o uso de recursos locais de forma acessível e sustentável (Cook; Petts; Rolt, 2013).

Assim, um tratamento superficial que permita a selagem dessas estruturas é ideal para garantir sua proteção, já que, além do tráfego, ficam diretamente expostas ao meio e se deterioram mais rapidamente (Ilo, 2013). Uma das possibilidades mais economicamente viáveis de revestimento em RBVT é o tratamento superficial por penetração (TSP) constituído de camadas alternadas de ligantes e agregados a depender da sua classificação em simples, duplo ou triplo. Os pavimentos das RBVT com TSP como camada de revestimento principal apresentam especificidades, inclusive com relação aos defeitos ocorrentes.

Karaşahin *et al.* (2016) e Doré (2017) afirmam que o modo de ocorrência dos defeitos em RBVT difere das rodovias de alto volume, e que o clima é o que mais atua para a deterioração. De acordo com Cook, Petts e Rolt (2013) e Dingen e Cook (2018), as falhas são causadas, principalmente, pela ação do meio em que estão, diferente das rodovias de alto volume, cujos defeitos têm maior participação do tráfego. MTPW (2020) aponta que a umidade tem maior participação na deterioração do pavimento, sendo a drenagem do pavimento um fator de elevada importância para seu desempenho. Os defeitos podem ser originados de um conjunto de fatores, muitas vezes difíceis de serem identificados. Assim, é fundamental compreender as variáveis envolvidas no processo de ocorrência dos defeitos.

Dado o exposto, este capítulo buscou, por meio de uma revisão bibliográfica, levantar os documentos, estudos e fatores que influenciam a análise das rodovias de baixo volume de tráfego com tratamento superficial como camada de revestimento principal no Brasil e no mundo. A finalidade foi conceber uma fundamentação teórica para auxiliar na

compreensão desses fatores, com o intuito de subsidiar análises futuras de estimativa da ocorrência de falhas desses pavimentos.

2.2 Volume de tráfego como critério de classificação de rodovias

Um sistema de classificação de rodovias é de extrema importância já que o agrupamento de vias similares pode permitir dimensionamento, dosagem, construção e gerenciamento da forma mais adequada otimizando recursos técnicos e financeiros. Esse sistema depende diretamente da sistemática de monitoramento do tráfego, para garantir uma atualização das redes existentes às ações de gerência adequadas, com o foco de garantir a vida útil dos pavimentos com economia e segurança aos usuários.

As RBVT possuem demanda veicular inferior às das rodovias principais, porém, não há um consenso no valor para sua classificação. Cook, Petts e Rolt (2013) apontam que são consideradas RBVT quando o tráfego de veículos motorizados varia entre 200 e 300 veículos por dia (vpd) ou que apresentem uma quantidade de operações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante a vida útil do pavimento (Número N) máximo de 10^6 , para o caso em que exista o tráfego de veículos comerciais. Recomendam, ainda, que esses dados devem ser avaliados e adaptados para cada realidade local. Dentre as rodovias não pavimentadas do mundo, e cerca de 85% das pavimentadas, estima-se que o volume de tráfego é de no máximo 1.000 vpd (Faiz, 2012; Douglas, 2016).

Para compreender como as diferentes agências no mundo classificam as RBVT de acordo com o tráfego, serão apresentados alguns valores investigados na bibliografia técnica e científica mundial (Quadro 1). Esses limites são geralmente representados pelo Número N, pelo Volume Médio Diário Anual (VMDA, que é o número total de veículos que trafegam durante o ano, dividido por 365 de acordo com DNIT, 2006b; Sun; Das, 2019) ou pelo Volume Médio Diário (VMD, que é a média dos volumes de veículos que circulam durante 24 horas em um trecho de via por um período representativo o qual, geralmente, é de um ano - ou tempo diferente, que deve ser indicado – de acordo com DNIT, 2006b). O VMDA e o VMD são fornecidos em vpd geralmente em um sentido de tráfego, sendo essenciais para compreensão, critérios de dimensionamento e estratégias de construção e manutenção das RBVT.

Quadro 1 – Classificação quanto ao tráfego das RBVT no mundo

Locais	Limites de tráfego (vpd)	Fontes
África	Volume diário ≤ 300 Veículos pesados: 5-10% $N \leq 10^6$	Roughton (2000)
Austrália	VMDA ≤ 750	Austroads (2021)
Brasil	$N \leq 10^6$	Bernucci (1995) DNIT (2006a)
Brasil – Ceará	Volume de tráfego ≤ 700	DER-CE (2015) <i>apud</i> Silva (2018)
Brasil – Minas Gerais	VMDA ≤ 300 (em 6 anos)	DERMG (2009)
Brasil – São Paulo ¹	VMD ≤ 1500 (bidirecional) Veículos comerciais ≤ 600	DERSP (2012)
Canadá – Alberta	VMDA ≤ 200	Doré (2017)
Canadá – Colúmbia Britânica	Volume de tráfego ≤ 200	BCTAC (2019)
Canadá – New Brunswick	VMDA ≤ 400	Allaby, Logan e Parsons (2012)
Canadá – Ontário	VMDA ≤ 500	Doré (2017)
Canada – Saskatchewan	VMDA ≤ 500	Retzlaff <i>et al.</i> (2007)
Etiópia	VMDA ≤ 300	ERA (2011)
EUA – Arizona	VMDA ≤ 400	ADoT (2017)
EUA – Arkansas	VMD ≤ 500	Hall (2000)
EUA – Colorado	VMD ≤ 400	CDoT (2018)
EUA – Missouri	VMDA ≤ 400	MoDoT (2024)
EUA – Ohio	VMDA ≤ 400	ODoT (2023)
EUA – Pensilvânia	VMDA ≤ 500	PASCC (2020)
EUA	VMDA ≤ 400	FHWA (2009)
EUA	VMD ≤ 2.000	AASHTO (2019)
Honduras	$N \leq 10^6$ (via pavimentada) $N \leq 10^5$ (sem pavimentação)	DGC (1996)
Índia	VMD ≤ 300 $N \leq 10^6$	Kumar <i>et al.</i> (2022)
Inglaterra – Leeds	VMD ≤ 200	Lebo e Schelling (2003)
Malawi	VMDA ≤ 300 $N \leq 10^6$	MTPW (2020)
Peru	$N \leq 10^6$	MTC (2013)
Tanzânia	VMD ≤ 300 $N \leq 10^6$	MWTC (2016)
Zâmbia	$N \leq 10^6$	Pinard <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autora (2024).

¹ Considerando a faixa A, mais elevada do Manual Básico de Estradas e Rodovias Viciais (DERSP, 2012).

Algumas considerações iniciais podem ser realizadas analisando o Quadro 1. Em DNIT (2006a) há uma indicação de que, quando o $N \leq 10^6$, podem-se utilizar tratamentos superficiais betuminosos e, portanto, dada a abordagem aqui apresentada, é o limite que classifica, no Brasil, as RBVT. Em BCTAC (2019) não é clara a variável de volume veicular

que classifica as rodovias como de baixo volume, então, foi indicado somente volume de tráfego. Em versões anteriores de AASHTO (2019), o VMD era de 400 veículos por dia, e aplicável para construção de novas rodovias e melhorias em rodovias já existentes.

Pode-se observar, do Quadro 1, que não há um consenso com relação aos parâmetros que representam o tráfego, tampouco com relação aos valores. Essas particularidades existem, provavelmente, devido à necessidade pontual de cada local, com valores que funcionam para as condições intrínsecas como: tráfego, clima, solo, dimensionamento, materiais disponíveis, conhecimento do corpo técnico e construção dessas estruturas.

Pasindu, Gamage e Bandara (2020) afirmam que as RBVT são, na maioria dos casos, definidas por estratégias políticas, e não baseadas no tráfego ou quaisquer outras características da rodovia, o que pode acarretar nessa falta de padrão. Vale apontar que o tráfego na forma de VMD ou VMDA pode ser adotado como critério de classificação das RBVT, porém, é importante que seja considerado ou o volume de veículos comerciais ou o Número N, pois é um parâmetro de carga que influencia na estrutura do pavimento.

Muitas rodovias não têm dados coletados que permitam esse cálculo, em especial as de baixo volume, provavelmente devido aos esforços para obtenção serem elevados e onerosos. No caso de dimensionar uma nova rodovia, a estimativa do tráfego deve ser realizada pela análise de uma rodovia similar, que atenda às mesmas regiões ou por meio de uma pesquisa origem-destino nas comunidades próximas. Para intervenções de RBVT existentes, deve-se ter atenção à duração de coleta de informações, uma vez que, por apresentarem volumes veiculares reduzidos, menores períodos de coleta podem acarretar maiores erros, estimados em até cerca de 63% a depender da quantidade de veículos (Kumar *et al.*, 2022).

Por isso, Allaby, Logan e Parsons (2012) recomendam que também sejam considerados: a velocidade de projeto, o uso da via (rodovias rurais, turísticas e de transporte de recursos, como os provenientes da agricultura, por exemplo), o tráfego de caminhões e a quantidade de propriedades atendidas. Já Landers, Mason e MacNaughton (2015) indicam que a classificação funcional, o volume de tráfego e o volume diário de caminhões devem ser as variáveis consideradas na seleção do tipo de revestimento.

Chandak *et al.* (2018) apontaram que na Índia o volume de tráfego considerado para o dimensionamento de uma RBVT tem um acréscimo de 20%, porém, como há uma demanda de motoristas que desviam das rodovias de maior volume para evitar os pedágios, ainda assim há o comprometimento das rodovias com TS. Como não há controle do tráfego e das cargas,

ocorre uma necessidade de ações de manutenção e reabilitação (M&R) mais rotineiras e muitas vezes, de maior magnitude.

Há, portanto, um desafio quanto ao tráfego das RBVT: a estimativa mais acurada do volume de tráfego e do número de caminhões com sobrecarga (Gupta; Kumar; Rastogi, 2014). O acompanhamento do tráfego operante por meio de fiscalização também é necessário, visto que volumes maiores ou veículos com carga superior à capacidade de projeto da rodovia podem afetar sua vida útil.

2.3 Fatores importantes que afetam as estruturas dos pavimentos das rodovias de baixo volume de tráfego além do tráfego

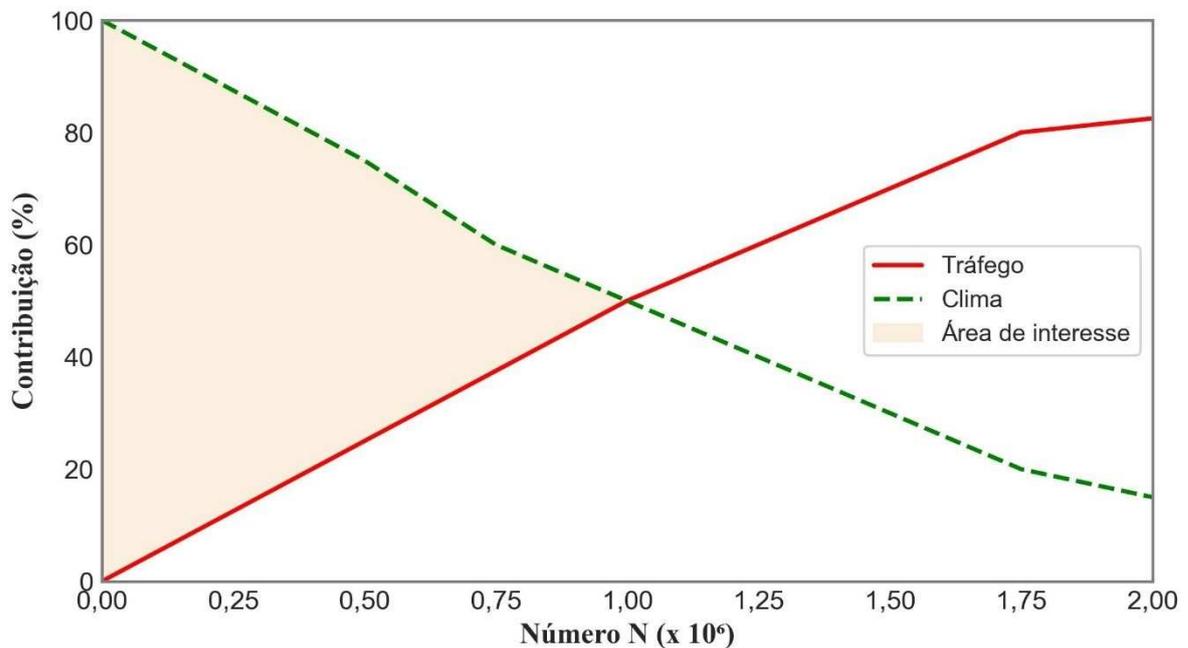
2.3.1 *Clima*

Como já relatado, o tráfego não é o principal responsável para a ocorrência de defeitos e consequente deterioração nas RBVT. O desempenho de uma RBVT na verdade é influenciado por uma série de fatores e suas combinações, e está relacionado à vida útil do pavimento e ao cumprimento adequado de suas funções (TRH, 2007). Como exemplo, de acordo com Kim, Adams e Jeong (2018), muitos fatores afetam o desempenho de rodovias com TSP como camada de revestimento principal, sendo o clima o mais importante (Karaşahin *et al.*, 2016).

O meio, que pode ser definido como o clima, conforme apontado por Bernucci (1995), é influenciado pelo conjunto de alguns fatores além de temperatura, como: latitude, altitude, relevo, ventos, proximidade ao oceano, rios, lagos ou reservatórios, tipo de vegetação e de solo e o uso do solo. Rolt *et al.* (2020) mencionam que a umidade é o fator que mais afeta o desempenho do pavimento das RBVT e sua manutenção a longo prazo.

A Figura 2 apresenta como a contribuição do tráfego e do meio afetam na ocorrência de defeitos, de acordo com o Número N, para o caso das rodovias. A área preenchida indica a região onde as RBVT estão enquadradas. Pode-se observar que, em RBVT, o tráfego tem menor contribuição na ocorrência de defeitos, aumentando com o incremento do valor do Número N até 50% no limite de 10^6 . Já a influência do clima em que a rodovia está inserida decresce com o aumento do Número N, apresentando menor contribuição em rodovias de maior tráfego.

Figura 2 – Esquema da relação entre o Número N e a contribuição para ocorrência de defeitos em rodovias considerando tráfego e clima



Fonte: Adaptado de MTPW (2020), Rolt *et al.* (2020) e Kumar *et al.* (2022).

Ainda sobre o clima, TRH (2007) cita que a temperatura ambiente e do pavimento, e como varia de acordo com a altitude, interfere na seleção do tratamento superficial a ser empregado. Também menciona outros fatores, como: a estrutura e condição do pavimento, subleito existente, tráfego, geometria, dimensionamento, materiais (características e taxas de aplicação), preparação, tratamentos e reparos realizados anteriormente, construção, fiscalização da obra, manutenção e o meio físico e social.

2.3.2 Drenagem

Além do tráfego e do meio em que a rodovia se encontra, outro fator deve ser considerado: a existência de drenagem. Henning, Kadar e Thew (2005) identificaram que RBVT sem adequada drenagem podem apresentar até 2,5 vezes mais deformação permanente. Entender a influência dos fatores no desempenho dos pavimentos de RBVT é essencial para seu dimensionamento e acompanhamento ao longo da vida útil. Como as RBVT são comumente construídas com materiais naturais, por vezes não processados, que apresentam tendência de sensibilidade com relação à umidade, a drenagem torna-se um item importante (Rolt *et al.*, 2020).

Para garantir uma drenagem adequada às RBVT, a umidade natural do subleito deve ser menor ou igual ao teor de umidade ótima para garantir resistência mecânica, além de depender da espessura das camadas superiores (Rolt *et al.*, 2020). Como a drenagem também é condicionada pelo clima, para prover RBVT com uma boa drenagem, devem ser executados os cinco princípios a seguir (Rolt *et al.*, 2020):

- a) conhecer a demanda de água a ser drenada, através de análise do clima e hidrologia;
- b) manter a água fora das estruturas das RBVT, impermeabilizando e/ou desviando o fluxo de água;
- c) minimizar a perda de resistência da estrutura e do sistema de drenagem quando em contato com água;
- d) fornecer estabilidade adequada contra movimento das forças da água corrente;
- e) remover rapidamente a água da superfície do pavimento.

A relação entre os processos hidrológicos, o sistema de drenagem e o pavimento é essencial para entender a dinâmica da água em ambientes rodoviários. Os processos hidrológicos englobam as várias etapas do ciclo hidrológico, como a precipitação, infiltração, escoamento superficial, e evapotranspiração. A pavimentação de rodovias altera significativamente esses processos, pois superfícies impermeáveis, como o revestimento com material asfáltico das rodovias, reduzem a infiltração, resultando em maior escoamento superficial.

Dado o aumento do escoamento superficial, é essencial que haja um sistema de drenagem eficiente. Sistemas de drenagem são projetados para captar e conduzir as águas pluviais, evitando a sobrecarga dos sistemas naturais e protegendo a infraestrutura existente. Os sistemas de drenagem devem ser adequadamente dimensionados para lidar com os volumes de escoamento elevados, garantindo a vida útil das estruturas pavimentadas.

A inter-relação entre esses três componentes é crítica. A pavimentação aumenta o escoamento superficial, o que exige uma drenagem mais robusta para evitar inundações e a deterioração das superfícies impermeabilizadas. Sem um sistema de drenagem eficiente, a água acumulada pode infiltrar pelas laterais e danificar a estrutura do pavimento. Deve ser considerada a integração dos processos hidrológicos, o dimensionamento dos pavimentos rodoviários e um adequado sistema de drenagem para mitigar os impactos negativos (Booth, 1991).

2.3.3 Acostamentos

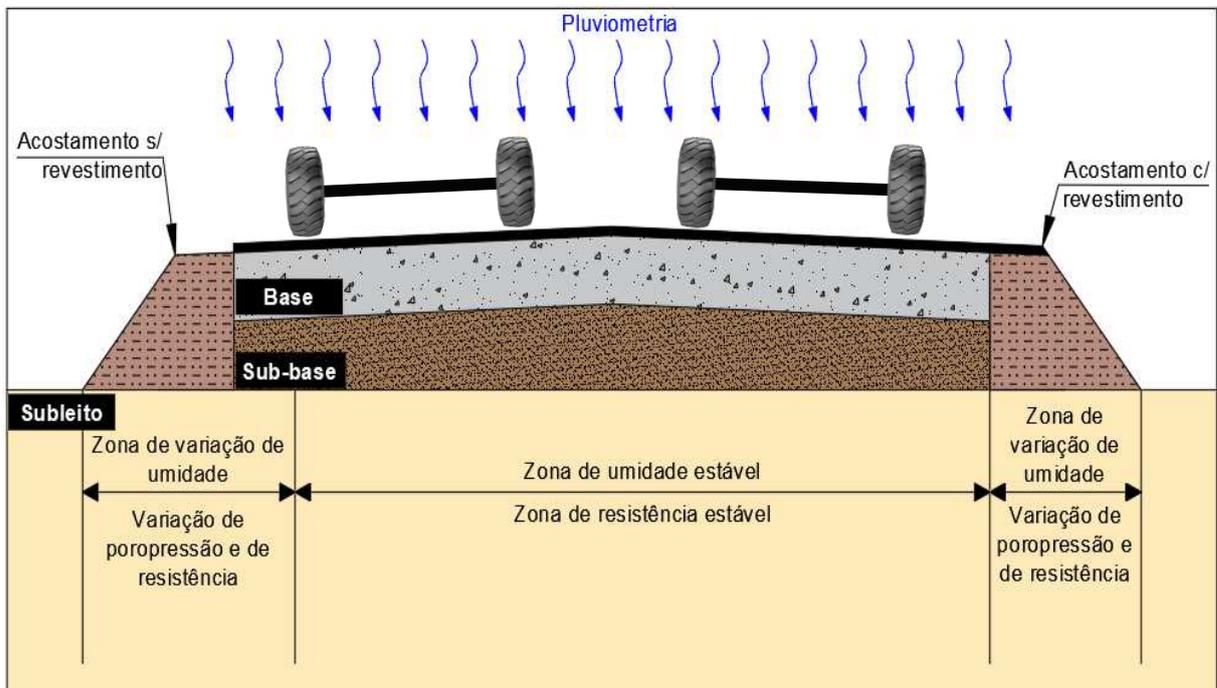
A inexistência de acostamentos, ou acostamentos inadequados podem influenciar na infiltração de água proveniente de chuvas nas camadas granulares, reduzindo o desempenho da estrutura do pavimento. Quando há ingresso de água por infiltração, e conseqüente variação da umidade dos materiais das camadas granulares, podem ocorrer danos prematuros e perda do desempenho da estrutura do pavimento com a redução da resistência do subleito, base e sub-base (Espinoza; Bourdeau; White, 1993). A retenção da água infiltrada gera uma ação dinâmica e, cada vez que um veículo passa, ocorre um aumento na poropressão. Esse aumento de pressão nos poros pode ocasionar danos como: fissuras, sulcos, bombeamento de finos e desintegração de bases cimentadas (Espinoza; Bourdeau; White, 1993).

Em RBVT, como as estruturas tendem a ser menos robustas, com menores espessuras das camadas devido ao tráfego reduzido, os acostamentos podem atuar como auxílio de proteção da estrutura principal quanto à infiltração. Os acostamentos de RBVT são usualmente executados sem revestimento por apresentarem menos custo de construção, porém, os custos de manutenção são mais elevados (Price, 1990).

Willett (1990) recomenda que o acostamento seja construído da mesma forma que a estrutura da pista principal, pois facilita a execução, melhora o desempenho do pavimento como um todo e reduz custos de manutenção. Ainda de acordo com esse autor, o ideal é que os acostamentos tenham revestimento em toda sua extensão e, quando não for possível, que tenham larguras maiores, da ordem de 0,91 m, já que larguras menores podem causar tensão nas bordas da pista principal, e conseqüente desgaste.

Os problemas ocorrentes em acostamentos sem revestimento são: erosão (causada pelo vento e por chuvas), sulcos, desgaste das bordas e corrugação, que podem afetar diretamente os usuários da via, demandando manutenção constante (Vorobjovas; Žilionienė, 2008). Assim, um acostamento com revestimento asfáltico promove, além da proteção superficial, uma área reduzida de infiltração, diminuindo, conseqüentemente, a zona de variação de umidade, quando comparado ao acostamento sem revestimento, como pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 – Zonas de variação de umidade de acordo com a existência de revestimento nos acostamentos



Fonte: Autora (2024) baseado em SADC (2003).

Em estudo conduzido por Araújo (2019), foram simulados pavimentos com CA (nas espessuras de 5,0 cm e 10,0 cm) e com TSP (2,0 cm de espessura). Quanto ao acostamento, foram avaliadas as variações de largura de 0,0 m (sem acostamento), 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m. Foram consideradas as camadas granulares de base com 15 cm de espessura (solo A-1-a), sub-base também em 15 cm de espessura (A-2-4) e subleito (A-2-4). A variação da profundidade do lençol freático também foi analisada, nos valores de 3,0 m, 3,5 m, 4,0 m e 4,5 m. A autora identificou que a infiltração nas camadas granulares (base = 15,0 cm, sub-base = 15,0 cm e subleito) com revestimento em TSP é maior quando não há acostamento.

Quando a água infiltra, há redução de resistência mecânica dos materiais constituintes das camadas granulares. Takeda (2006) estudou o Módulo de Resiliência (MR) em função da variação de umidade dos solos pós-compactação, considerando materiais não estabilizados quimicamente, sendo a amostra composta por solos lateríticos e não-lateríticos do interior paulista, com granulometria do tipo fina, intermediária e grossa. As análises conduzidas tiveram como premissa o fato que, no campo, os materiais granulares são inicialmente compactados numa umidade próxima à ótima determinada pelo ensaio de Proctor e que, com o tempo, o teor de umidade do meio atingirá uma condição de equilíbrio que pode variar

dependendo da drenagem e das condições ambientais. O autor identificou que, quando há incremento de 1% de umidade, o MR reduz, em média, 37%.

Em função da bibliografia estudada, a autora deste trabalho entende que a análise dos efeitos da umidade para projetar pavimentos que levem em consideração os desafios das mudanças climáticas é de fundamental importância principalmente para o caso das RBVT. Sendo assim, considera-se essencial investigar a presença dos acostamentos, bem como o comportamento resiliente de solos sob diferentes condições de variação de umidade sazonal.

2.4 Dimensionamento de rodovias de baixo volume de tráfego

Para garantir uma estrutura adequada às RBVT, uma possibilidade são os pavimentos flexíveis de baixo custo, como com uso de algum revestimento de selagem (como por exemplo o tratamento superficial por penetração), tornando-os esbeltos. Podem ser dimensionadas para um Número N entre 10^4 e 10^6 , com período de projeto de 10 anos, visto que em países em desenvolvimento a previsão do tráfego não é precisa (Bernucci, 1995). O método de dimensionamento deve levar em consideração que, devido à baixa espessura, revestimentos em tratamento superficial não possuem capacidade estrutural, atuando somente como camada de desgaste à ação abrasiva dos pneus dos veículos e fornecendo impermeabilização, garantindo uma drenagem superficial (TRH, 2007).

Um dos desafios significativos enfrentados no dimensionamento é fornecer uma estrutura de pavimento em que os efeitos prejudiciais da umidade sejam mitigados a limites aceitáveis em relação à carga de tráfego, natureza dos materiais utilizados, disposições de construção e manutenção e grau de risco aceitável (Rolt *et al.*, 2020). Devem-se considerar as especificidades das RBVT quanto aos modos de falha, cujos limites variam consideravelmente das rodovias de volume mais elevado (Doré, 2017).

O tratamento superficial por penetração (TSP) foi utilizado pela primeira vez como camada de revestimento principal em RBVT nos anos 1920s, e vem sendo também empregado como método de manutenção do revestimento de pavimentos (Kutay *et al.*, 2017). Desde então, os métodos de dosagem específicos para as RBVT vêm sendo desenvolvidos, como relatado por Hanson (1935), Kearby (1953), McLeod (1969), Hall (2000), Austroads (2001), TRH (2007), Brito (2011), Kim e Adams (2015), Kumbarger, Boz e Kutai (2018). Dada a quantidade de métodos desenvolvidos, este tópico apresenta informações sobre dimensionamento da estrutura dos pavimentos das RBVT que tenham previsão de uso de TSP como camada de revestimento.

De acordo com Doré (2017), a abordagem para dimensionamento da estrutura das RBVT pode ser realizada utilizando algum dos métodos: por experiência, empírica, empírico-mecanística e mecanicista, e que a maior parte das agências rodoviárias de pequeno porte utiliza as duas primeiras. Shallal e Ahmed (2019) e Orr, Scott e Kuzmik (2020) consideram, ainda, o método de dimensionamento por catálogos. Para compreender essas abordagens, elas serão brevemente descritas a seguir.

2.4.1 Método baseado na experiência

Para Orr, Scott e Kuzmik (2020), os métodos de dimensionamento baseados na experiência ainda são muito utilizados, pois, embora antigos, possuem baixo custo, são simples e confiáveis dentro de determinadas condições. Nesses métodos, são adotadas estruturas de pavimento pré-determinadas para todo o sistema rodoviário de acordo com tráfego e condições ambientais (Shallal; Ahmed, 2019).

O método baseado na experiência só é bem-sucedido se o gestor tiver vasta experiência para adaptar as espessuras das camadas de acordo com as diferentes necessidades. Tende a superdimensionar as espessuras, buscando não atingir a falha, ou subdimensionar quando os recursos estão escassos e o gestor precisa pavimentar o máximo de vias possível.

Esse método considera os valores médios das propriedades dos materiais, do tráfego e das condições ambientais, e, se algum desses parâmetros é alterado ou diferente na realidade, essa abordagem perde a validade (Shallal; Ahmed, 2019). Uma rodovia que foi pavimentada com base na experiência não considera adequadamente a variação do volume de tráfego e consequentemente não possui embasamento racional para obtenção das espessuras da estrutura (Orr; Scott; Kuzmik, 2020).

2.4.2 Método empírico

Os parâmetros de entrada para o método empírico são basicamente o tráfego (dado pelo Número N) e o Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio* - CBR), além da adequação das faixas granulométricas às recomendadas pelo órgão gestor. Utiliza-se, então, um ábaco que relaciona essas informações à espessura mínima da camada calculada, também levando em consideração coeficientes estruturais que têm como referência materiais utilizados na criação do CBR. Esse método tem a tendência de sub ou superdimensionar as camadas, gerando deficiências ou custos elevados, respectivamente.

O método empírico adotado no Brasil foi desenvolvido inicialmente por Souza (1966), revisado por DNER (1981) e, em sua versão mais recente, DNIT (2006a), ainda está apto a ser utilizado para o dimensionamento de rodovias federais. Muitos órgãos rodoviários estaduais ainda o utilizam, dada a recente publicação pelo órgão federal e a limitação para realização dos ensaios que consideram os parâmetros de rigidez, como o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP).

2.4.3 Método mecanístico e mecanístico-empírico

O dimensionamento mecanístico de um pavimento é realizado quando um modelo é utilizado para calcular as reações de tensão e deformação da estrutura quando uma carga de tráfego é aplicada (Newcomb; Timm, 2001). Já o método baseado em princípios mecanístico-empíricos tem sua eficácia de acordo com a quantidade e qualidade das informações existentes sobre infraestruturas rodoviárias existentes (Santiago, 2017). Esse tipo de dimensionamento considera as propriedades mecânicas dos materiais constituintes da estrutura do pavimento que são utilizados como dados de entrada da análise e consideram critérios de ruptura baseados na experiência.

Um método mecanístico-empírico foi implementado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) em 1993 (AASHTO, 2008). O MEPDG tem como objetivo aperfeiçoar a forma de estimar a condição do pavimento ao longo do tempo considerando as cargas de tráfego e as condições climáticas em pavimentos flexíveis e rígidos.

Mais recentemente no Brasil, foi publicada a instrução de serviço (IS) 247 (DNIT, 2021), que busca definir os aspectos para a adoção do novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa). O método MeDiNa é baseado na abordagem que verifica e dimensiona as estruturas dos pavimentos de forma mecanístico-empírica, por meio da rotina de análise elástica de múltiplas camadas (AEMC) e considerando critérios de ruptura como o trincamento por fadiga e a deformação permanente.

2.4.4 Método baseado em catálogos

O método baseado em catálogos é oriundo da aplicação de algum dos outros métodos mencionados nos subitens anteriores. São catalogados projetos desenvolvidos de acordo com os insumos e condições analisadas (Orr; Scott; Kuzmik, 2020). Mesmo que se

trabalhe com dimensionamento da estrutura do pavimento, dependendo da condição (tráfego, manutenção, reconstrução de trecho danificado por obras etc.), o órgão pode possuir um catálogo para alguns tipos de rodovias, como NCHRP (2004), Li *et al.* (2011), MTC (2013), TxDoT (2016), DGST (2021).

Como exemplo, o *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) utilizou informações do método de dimensionamento mecanístico para construir um catálogo para construção e reabilitação de pavimentos, baseado em alguns critérios e, portanto, só pode ser aplicado nessas condições. Assim, a depender da localização do nível de confiança (que varia entre 50% e 75%), do tráfego máximo de 750.000 veículos pesados no período de 20 anos, e do atendimento a outros parâmetros, estruturas pré-definidas que foram determinadas mecanisticamente podem ser adotadas (NCHRP, 2004).

2.5 Defeitos em rodovias com TSP

As RBVT apresentam falhas devido à falta de manutenção preventiva, e avançam rapidamente, demandando mais recursos para efetiva realização das ações de M&R (Agarwal; Choudhary; Khan, 2016). Assim, torna-se importante compreender os defeitos ocorrentes nas RBVT, mais especificamente, neste trabalho, aquelas com TSP.

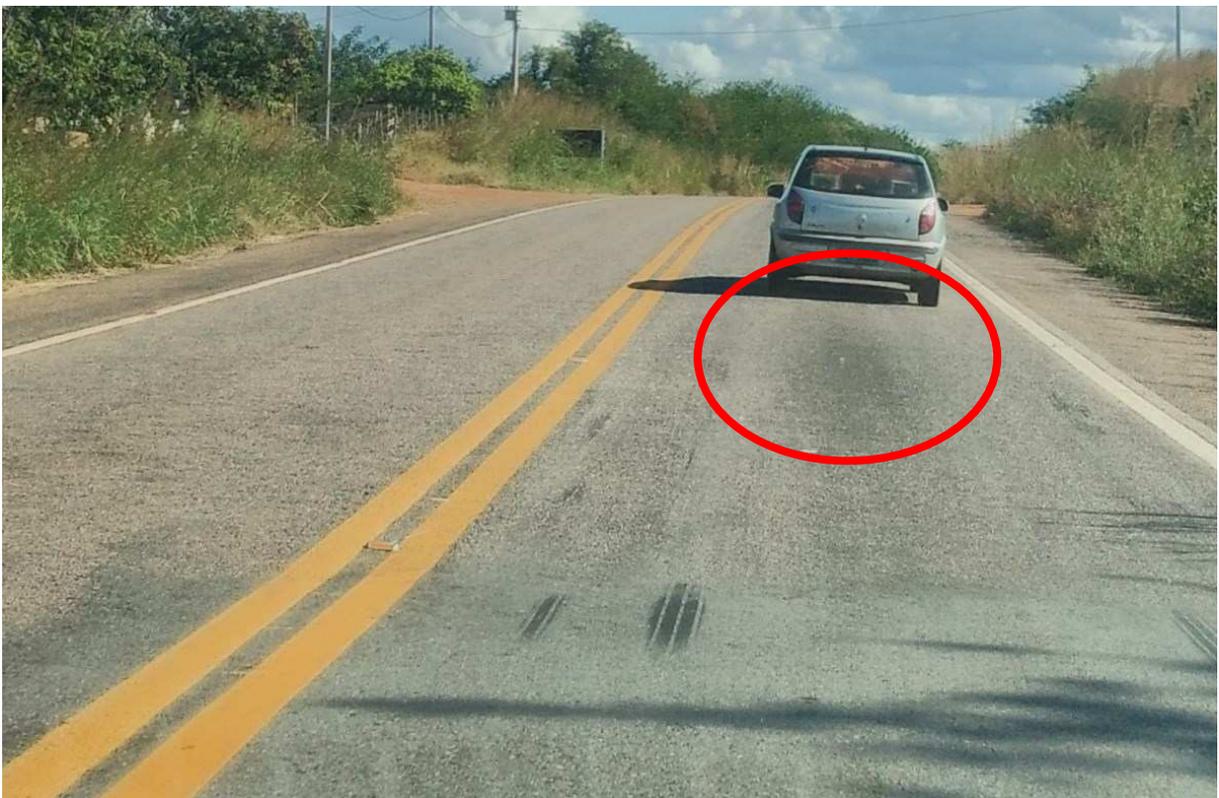
Como o revestimento do tipo TSP não apresenta capacidade de resistir às cargas, os defeitos estruturais estão ligados à falha do subleito ou das camadas granulares (Henning; Kadar; Thew, 2005). Os defeitos são comumente relacionados ao material, espessura das camadas, e deficiências na geometria e/ou drenagem (Henning; Kadar; Thew, 2005; Karaşahin *et al.*, 2016).

Para o caso de TSP, os dois principais problemas decorrentes de projeto ou execução malsucedidos são a exsudação e a perda de agregados (Lee; Kim, 2009; Aktaş *et al.*, 2013; Kutay *et al.*, 2017; Silva; Barroso; Kim, 2018; Adams; Castorena; Kim, 2019; Boz; Kumbarger; Kutay, 2019; Rahman *et al.*, 2020), que afetam significativamente as características de textura da superfície (Buss; Guirgui; Gransberg, 2018). Além desses defeitos, Loiola (2009) listou em RBVT com TSP: desagregação (longitudinal e de revestimento), desgaste (do agregado e da borda), superposição (ou encravamento), juntas de construção defeituosas, corrugações e rugosidade geométrica inadequada. Essas falhas estão brevemente descritas a seguir.

2.5.1 Exsudação

A exsudação (Figura 4) é uma falha relevante, pois reduz a textura superficial do pavimento e, conseqüentemente, compromete a segurança dos usuários, principalmente em períodos de chuva e nas interseções. Depende de muitos fatores como: condições climáticas, volume e tipo de tráfego, propriedades de agregados, propriedades de emulsão asfáltica, taxa de aplicação de emulsão e superfície do pavimento existente (se aplicado como medida de manutenção). Tanto os agregados quanto as emulsões asfálticas contribuem para garantir resistência à exsudação (Chaturabong, 2019).

Figura 4 – Exsudação na BR-230, trecho Farias Brito-Várzea Alegre, Ceará



Fonte: Autora (Levantamento realizado em 2021).

2.5.2 Perda de agregados

A perda de agregados (Figura 5) afeta o atrito da superfície o que resulta em perda de resistência à derrapagem, pode gerar a exsudação (Adams, 2014) e danos aos veículos, uma vez que os agregados soltos podem trincar para-brisas, por exemplo. Ocorre, na maioria dos

casos, durante o tráfego inicial, logo após o trecho recém-construído ter sido liberado (Adams, 2014).

As principais causas que resultam na perda de agregados, conforme citam Gransberg e James (2005), Loiola (2009), Rahman *et al.* (2012), Aktaş *et al.* (2013) e Adams (2014), são: o excesso de agregados empregado, a falta de controle de tráfego durante o processo construtivo, à penetração inadequada no ligante (seja por sua qualidade ou falha de compactação), má graduação do agregado ou pelo excesso de pó.

Figura 5 – Perda de agregados na CE-152, trecho Mauriti-Palestina, Ceará



Fonte: Autora (Levantamento realizado em 2021).

2.5.3 Desagregação longitudinal

Esse defeito, também conhecido como penteadura, ocorre devido ao desprendimento dos agregados no sentido longitudinal da via (Figura 6). Não é um defeito estrutural e, de acordo com Loiola (2009) ocorre em razão da má execução da camada asfáltica do TSP, e as prováveis causas são: altura da barra espargidora, ângulo dos bicos, bomba de ligante, temperatura do ligante ou falha nos bicos.

Além disso, pode-se citar a inadequada distribuição dos agregados no pavimento. Quando ampliado há maior perda de agregados, o que pode originar buracos/panelas. Pode-se observar na parte inferior à direita da imagem, apresentada na Figura 6, a existência de desagregação longitudinal, e logo à frente e ao lado a existência de remendos. Ou seja, a penteadura evoluiu para panelas que foram posteriormente preenchidas por material asfáltico em ações de M&R.

Figura 6 – Desagregação longitudinal e remendos na CE-152, trecho Mauriti-Palestina, Ceará



Fonte: Autora (Levantamento realizado em 2021).

2.5.4 Desagregação do revestimento (Painelas)

Esse defeito é localizado, e é ocasionado pela perda de agregados. De acordo com Loiola (2009), as prováveis causas da desagregação do revestimento (Figura 7) são: adesividade ligante-agregado, subdosagem do ligante, excesso de agregado, deficiência na granulometria, excesso de pó/impurezas ou da natureza/estado do substrato. Em alguns casos, parece ocorrer um deslocamento do revestimento aplicado sobre a base e visualmente essa falha é identificada como painela. Vale observar que os defeitos do tipo desagregação têm, de alguma forma, ligação com os dois principais defeitos listados inicialmente (exsudação e perda de agregados) que ocorrem nos TSP.

Figura 7 – Painelas na CE-152, trecho Mauriti-Palestina, Ceará



Fonte: Autora (Levantamento realizado em 2021).

2.5.5 Desgaste dos agregados

Esse defeito gera um risco para os usuários da via, uma vez que reduz o atrito da superfície e conseqüentemente a resistência à derrapagem. Ocorre pelo desgaste do agregado, uma vez que, em TSP, é diretamente exposto aos veículos. De acordo com Loiola (2009) pode ser causado pelo uso de agregados com formato arredondado e liso, ou com baixa resistência à abrasão.

2.5.6 Desgaste da borda

Esse defeito ocorre pela perda excessiva de agregados nas bordas da rodovia, ou pelo deslocamento do revestimento nessa região, e pode reduzir a vida útil da estrutura, uma vez que facilita a infiltração de água nas camadas subjacentes. O aparecimento do desgaste é mais comum em rodovias em que não há acostamento ou quando a via é estreita (Loiola, 2009). Porém, foi identificado também quando, mesmo com acostamento, não há serviço de manutenção e roçada do solo lindeiro, onde a vegetação avança e desgasta o revestimento, como pode ser observado na Figura 8. O ideal, para evitar o surgimento do desgaste de borda, é realizar periodicamente a retirada do excesso de vegetação nas margens da rodovia e, tão logo surja o desgaste, realizar a recuperação com a implantação de TSP.

Figura 8 – Desgaste de borda na CE-060, trecho Jardim-Divisa Ceará - Pernambuco



Fonte: Autora (Levantamento realizado em 2021).

2.5.7 Superposição

Esse defeito, também denominado encravamento, pode ocorrer devido a uma taxa elevada de agregados, deficiência de ligante, oriunda da dosagem inadequada ou falha no processo construtivo (Loiola, 2009). No caso da falha no processo construtivo, se refere ao produto do excesso de compactação sobre a integridade do revestimento (pela quebra do filme de ligante da interface com a camada de base) (Almeida *et al.*, 2019). Para reverter esse defeito, pode-se refazer o tratamento na área afetada ou um remendo, após a retirada da extensão que sofreu o dano.

2.5.8 Juntas de construção defeituosas

De acordo com Loiola (2009), esse defeito é considerado estético, podendo estar presente no sentido longitudinal ou transversal, e ocorre devido à falta de cuidado no processo construtivo pela superposição das camadas. Pode provocar exsudação, dada a quantidade de ligante aplicada na área superposta e dificulta a execução da sinalização horizontal. A depender do defeito na junta, o usuário pode não visualizar adequadamente a sinalização presente. No processo executivo, esse defeito pode ser evitado ao colocar uma proteção sobre a faixa já executada e, havendo excesso, retira-se a proteção e conseqüentemente o material dos TSP.

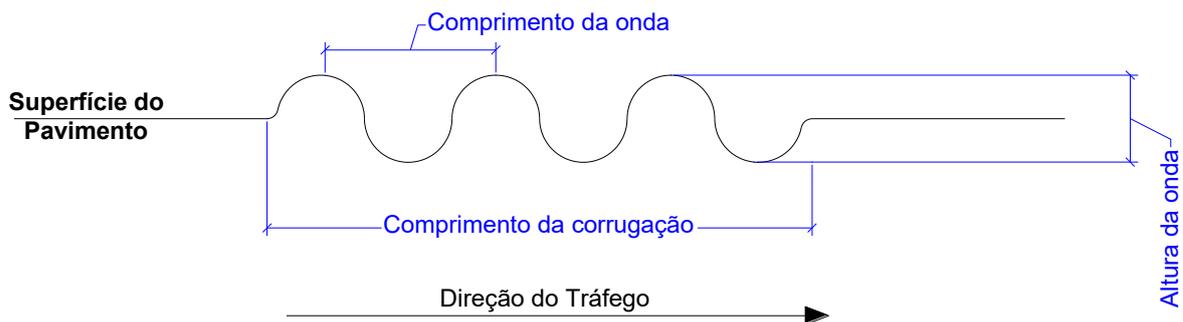
2.5.9 Corrugações

Também conhecidas como ondulações ou costelas de vaca, as corrugações são ondulações em sequência que ocorrem no sentido transversal da faixa de rolamento (Figura 9) e que causam desconforto aos usuários e pode ser facilmente visualizado e medido pelo IRI (Mahgoub; Bennett; Selim, 2011). Diferente de pavimentos em Concreto Asfáltico (CA), onde as corrugações decorrem de movimento plástico do revestimento pelas acelerações/frenagens na área (McDonald; McDonald, 2011), de acordo com Loiola (2009), em TSP as causas prováveis são: distribuição do ligante, bomba dosadora e velocidade da bomba (se as ondas ocorrerem somente no revestimento).

No geral, os TSP são empregados em vias que anteriormente não eram pavimentadas ou em estradas de terra, essas têm como causas das corrugações: volume de tráfego, características do subleito, vibração do sistema de suspensão veicular, propriedades da camada de base, espessuras das camadas granulares, umidade do subleito, relação entre a

espessura da base e a espessura total das camadas granulares, e velocidades veiculares, sendo as três últimas as de maior relevância (Mahgoub; Bennett; Selim, 2011). Para correção, devem ser realizadas manutenções de forma sistemática, através do corte do excedente das ondas geradas e, se for necessário, a aplicação de uma camada sobre a superfície acabada, seja com TSP ou outro material.

Figura 9 – Esquema de um segmento de rodovia com corrugação



Fonte: Autora (2024).

2.5.10 Rugosidade geométrica inadequada

De acordo com Loiola (2009), esse defeito ocorre quando a superfície está com aspecto liso, não promovendo resistência à derrapagem, o que influencia na segurança. As prováveis causas são: excesso de ligante, baixa viscosidade do ligante ou emprego de agregado inadequado. A correção dessa falha é aplicação de uma nova camada na região, como um microrrevestimento asfáltico a frio, por exemplo.

2.6 Levantamentos em rodovias com TSP

Os levantamentos em rodovias fazem parte do Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), e podem ser a nível de rede ou a nível de projeto. De acordo com DNIT (2011):

- a) Nível de rede: se estuda uma grande área com várias rodovias com o objetivo de conhecer a malha como um todo e, conseqüentemente, possibilitar a adequada priorização na aplicação de recursos para manutenção com o melhor retorno.
- b) Nível de projeto: envolve atividades detalhadas do próprio projeto e da execução de obras em um trecho específico da malha, com dados coletados de

forma aprofundada com análise da estrutura do pavimento, determinação do surgimento de defeitos e seleção dos serviços de M&R mais adequados.

Para Henning, Kadar e Thew (2005) é necessário que seja realizada manutenção para justificar o elevado investimento inicial. Para tanto, levantamentos sistemáticos devem ser conduzidos de forma a acompanhar o surgimento e evolução de defeitos, buscando identificar quais as melhores intervenções a serem conduzidas. Os levantamentos podem ser conduzidos para avaliar a condição funcional superficial ou a estrutural do pavimento. De acordo com DNIT (2011):

- a) a avaliação funcional é a análise do estado de sua superfície e de como esse estado influencia no conforto ao rolamento;
- b) a avaliação estrutural está associada à capacidade de carga que pode ser vinculada ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento.

No Brasil, as normas e diretrizes que devem ser seguidas para realizar levantamentos de rodovias foram elaboradas com foco naquelas com CA e estruturas mais robustas. Embora indiquem que são adequadas para pavimentos flexíveis e semirrígidos, englobando os TSP, não abrangem alguns defeitos intrínsecos aos tratamentos. Algumas das orientações serão brevemente descritas a seguir.

2.6.1 Terminologia

A Norma DNIT 005/2003 – TER (Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia) define os termos empregados em defeitos de pavimentos flexíveis e semirrígidos (DNIT, 2003d). São definidos os defeitos: fenda (fissura, trinca isolada, transversal, trinca isolada longitudinal, trinca de retração e trinca interligada do tipo couro de jacaré ou em bloco); afundamento (plástico e de consolidação, local ou na trilha de roda); ondulação/corrugação; escorregamento do revestimento betuminoso; exsudação; desgaste; panela/buraco; e remendo (profundo e superficial).

Pode-se observar que, para os defeitos listados, nem todos ocorrem em pavimentos com TSP. Por exemplo, as trincas que surgem no revestimento, de acordo com DNIT (2003d) podem ter origem de deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga, ou ainda podem não estar associadas à fadiga. Para o caso de pavimentos com o revestimento esbelto do tipo TSP, as trincas que surgem na superfície estão associadas basicamente à retração de camadas subjacentes, sendo análogas às trincas isoladas não

atribuídas à fadiga. Em um levantamento, portanto, caso esse entendimento não exista, o avaliador pode classificar a trinca existente erroneamente.

O defeito escorregamento do revestimento betuminoso, por exemplo, não ocorre em revestimentos do tipo TSP. Já o desgaste tem, no objeto em estudo, mecanismo de surgimento diferente do apontado pela norma. Assim, o ideal é que exista um conjunto de definições de defeitos em pavimentos com TSP mais direcionado, adaptando e complementando a diretriz atual.

2.6.2 Avaliação objetiva da superfície

A Norma DNIT 006/2003-PRO (Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento) (DNIT, 2003a) determina as condições para avaliação objetiva da superfície de pavimentos rodoviários pela contagem e classificação de ocorrências aparentes e da medida de deformação permanente nas trilhas de roda. Esse levantamento dá uma noção da condição funcional do pavimento e gera a demanda de realizar análise estrutural de forma complementar.

Para realizar a coleta de informações, são utilizados: treliça de alumínio padronizada com régua móvel (capaz de medir os afundamentos), e materiais auxiliares para localização e demarcação das estações (trena, giz, pincel, tinta, formulário de inventário do estado da superfície do pavimento, caneta). Em rodovias de pista simples as estações devem ser alternadas em relação ao eixo da via, distantes entre si em 20 m, sendo que, na mesma faixa, a distância é de 40 m. Se a pista for dupla, a distância é de 20 m na faixa mais solicitada. Cada estação deve ter a largura igual à largura da pista subtraída em 6 cm, uma vez que é recomendado um afastamento do bordo externo com essa dimensão, e o comprimento de 6 m, sendo 3 m à jusante e à montante do ponto de referência utilizado para identificá-la.

Em cada estação são medidos os maiores valores de flecha (em milímetros), a existência dos defeitos apontados em DNIT (2003d), com algumas particularidades nas trincas e remendos, bem como o tipo de seção de terraplenagem. Essas informações serão consideradas para o cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG) a partir do Índice de Gravidade Individual (IGI), que considera a frequência relativa (f_r) de cada defeito e seu fator de ponderação (f_p). O valor do IGG obtido é então analisado em uma escala que classifica qualitativamente a degradação do pavimento em ótimo, bom, regular, ruim ou péssimo.

Como exemplo, o defeito exsudação, que em rodovias com TSP é apontado como um dos principais, e que dele outros podem surgir, tem um f_p de 0,5, enquanto o defeito

corrugação/ondulação, que não afeta a estrutura do pavimento, pois é um defeito que afeta o conforto, tem f_p igual a 1,0. Assim, o IGG é um índice que pode ser adaptado para TSP. Almeida *et al.* (2019) já realizaram uma tentativa de adaptação do IGG e baseado nisso este trabalho tem a proposta de desenvolver um índice adequado, voltado às especificidades dos pavimentos objetos de estudo.

2.6.3 Avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo

A Norma DNIT 007/2003-PRO (Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos - Procedimento) (DNIT, 2003e) apresenta as condições do levantamento para avaliação objetiva da condição de superfície de subtrechos homogêneos. Essa norma é utilizada na gerência de pavimentos, em estudos e projetos, para determinação do grau de degradação dos pavimentos.

Para realizar a coleta de informações em nível de rede, são utilizados os mesmos materiais apontados no item anterior. Devem ser divididos os subtrechos homogêneos identificados visualmente. A extensão mínima de um subtrecho é de 300 m, e a máxima de 20 km, e dentro de um subtrecho devem ser identificados outros três subtrechos de 100 m cada, localizados no início, meio e fim.

Em cada um desses subtrechos de 100 m devem existir duas superfícies de avaliação, sendo seis no total, marcadas de (a), (b), ..., (f), onde devem ser inventariados os defeitos apontados em DNIT (2003d) ou no Anexo E de DNIT (2003e). As flechas devem ser medidas na trilha de roda interna e externa, e ambas devem ser registradas. Essas informações devem ser preenchidas no formulário apresentado no Anexo C da norma, com as unidades de medida consideradas para cada defeito: para trincas isoladas é considerado o produto do seu comprimento por 0,15 m representadas por linhas nos gráficos; para trincas interligadas e demais defeitos são considerados os retângulos circunscritos, e no gráfico da ficha de campo são representadas as áreas desses retângulos.

Para realizar o inventário de defeitos com a finalidade de avaliação para estudos e projetos (nível de projeto), a demarcação dos trechos selecionados tal qual ocorre em DNIT (2003a), apresentado no item 2.6.2. O inventário dos defeitos com essa finalidade deve ser realizado no formulário disponível no Anexo D de DNIT (2003e).

2.6.4 Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos

A Norma DNIT 008/2003-PRO (Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento) (DNIT, 2003b) apresenta as condições do levantamento visual contínuo (LVC) para avaliação da superfície dos pavimentos. Essa norma é utilizada para determinar o valor do Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis ou semirrígidos (ICPF) e proporciona informações necessárias para o cálculo do Índice de Gravidade Global Expedido (IGGE) e do Índice de Estado de Superfície (IES).

Para o levantamento, deve ser utilizado um veículo com odômetro calibrado, capaz de aferir velocidade de operação e distâncias percorridas, deve-se evitar realizá-lo em dias de chuva ou com pouca luz natural, e deve ser realizado por uma equipe de um motorista e de pelo menos dois técnicos. A velocidade média do veículo deve ser de 40 km/h, percorrendo um único sentido (se pista simples), ou nos dois, se pista dupla. Em pista simples, o sentido a ser considerado é aquele da descrição da rodovia.

No levantamento, deve ser levado em consideração o formulário disposto no Anexo B de DNIT (2003b), em trechos de 1 km a 6 km, sendo preferencial os trechos de menor dimensão. Os defeitos a serem identificados são: trincas (isoladas, interligadas tipo jacaré, interligadas tipo bloco), remendos, panelas, afundamento plástico e de trilhas de roda, ondulações/corrugações, escorregamento do revestimento betuminoso, exsudação e desgaste.

Devem ser anotadas a frequência de defeitos na escala: alta, média ou baixa e, de posse dos resultados dos técnicos, a média deve ser utilizada para o cálculo dos índices. Inicialmente devem ser calculados o ICPF e o IGGE para, com os valores, identificar o IES, cujo conceito qualitativo varia, em escala de ótimo a péssimo para cada segmento avaliado.

2.6.5 Valor de serventia atual

A Norma DNIT 009/2003-PRO (Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento) (DNIT, 2003c) busca avaliar de forma subjetiva a superfície de pavimentos com base no Valor de Serventia Atual (VSA), indicando o grau de conforto e suavidade ao rolamento proporcionado, de acordo com o usuário. Para a realização desse levantamento, deve ser constituído um grupo de cinco pessoas, que conheçam a norma, divididas em dois veículos de passeio similares, que deverão analisar trechos homogêneos de no máximo 2 km de extensão, percorrendo a uma velocidade próxima ao limite máximo da via.

A sensibilidade de avaliação desse grupo deve ser comparada na verificação experimental, sempre que possível.

Na verificação experimental de sensibilidade deve ser considerado um segundo grupo, com um total de 10 a 15 pessoas. São selecionados dez trechos de pavimentos com aproximadamente 600 m cada, de aspecto uniforme, localizados numa sequência para serem avaliados em um curso espaço de tempo. Cada integrante deve atribuir um VSA subjetivo para cada trecho, utilizando a ficha de avaliação padronizada. São então consideradas as médias dos dois grupos e, caso a diferença seja inferior a 0,3, a sensibilidade é considerada boa para avaliação. Deve ser então realizada uma segunda avaliação, e a diferença de média dessa etapa para a primeira deve ser inferior a 0,3. São admitidas diferenças de até 1,5 em avaliações individuais. Quando não forem atingidas essas premissas, um ou dois membros do grupo menor devem ser substituídos.

As condições para identificar o VSA dos trechos são: a avaliação individual deve ponderar a experiência em rodovias; deve-se considerar a rodovia como de tráfego intenso; deve-se analisar somente o estado atual da superfície (não tentar estimar o que irá ocorrer no futuro); não deve ser realizada em condições climáticas desfavoráveis; não devem ser incluídos os aspectos geométricos da rodovia; não deve mensurar a resistência à derrapagem; os defeitos que devem ser analisados são os buracos/panelas, saliências e irregularidades longitudinais e transversais; deve-se desprezar cruzamento rododiferroviários, e irregularidades ocasionadas nos acessos a obras d'arte; cada trecho deve ser avaliado independentemente; não deve ser realizada consulta entre os avaliadores.

Ao final, cada avaliador irá fornecer uma nota para cada trecho percorrido, de 0 a 5, com base em uma escala qualitativa correspondente de péssimo a excelente. Para a obtenção do VSA é calculada a média aritmética simples dos valores apontados pelos membros do grupo.

2.6.6 Índice de irregularidade internacional - IRI

O índice de irregularidade internacional – IRI (*International Roughness Index*) é uma característica do perfil longitudinal da rodovia desenvolvido por Sayers, Gillespie e Paterson (1986) e se refere ao somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um eixo de referência, que afeta a dinâmica veicular, qualidade ao rolamento, drenagem superficial (DNIT, 2011) e conforto aos usuários. É medido em m/km, e existem diferentes formas de obter essa informação em campo. O IRI tem sido utilizado como ferramenta de controle e de aceitação de serviços e obras rodoviárias (DNIT, 2011).

Pode ser verificado, por exemplo, com equipamentos topográficos, com o uso de um perfilógrafo a laser, que coleta informações de distância com o laser instalado no para-choques dianteiro do veículo, utiliza dados de aceleração vertical e da distância e velocidade percorridas. Também pode ser coletado por meio de aplicativos de celular, como o SmartIRI (Almeida, 2018), que é acoplado no para-brisas de em veículo de passeio que deve trafegar a uma velocidade média ideal de 80 km/h, de preferência nas trilhas de roda.

2.6.7 Avaliação estrutural de pavimentos

Um dos mecanismos de falha de pavimentos flexíveis é o estrutural que, nos casos de projetos mais robustos, com uso de CA, se dá pela deformação permanente ou pelo trincamento por fadiga. No caso de rodovias com TSP, é considerada somente a deformação permanente como falha estrutural, uma vez que o trincamento que pode surgir é por reflexão de trincas da camada granular inferior, que surgem pela natureza do material. Essa afirmação vem do fato de que o TSP pode ser utilizado como manutenção e uma das suas ações no pavimento existente é a selagem de trincas, bem como seu uso como camada de antirreflexão que pode ser aplicada antes do revestimento em CA.

Assim, para verificação da capacidade estrutural do pavimento podem ser utilizados: viga Benkelman para medir e calcular deflexões (DNER, 1994; DNIT, 2010), *Falling Weight Deflectometer* (FWD) (DNER, 1996) ou qualquer outro equipamento, desde que os resultados obtidos sejam correlacionados com a viga Benkelman. Essas deflexões são, então, comparadas com o valor admissível realizado como indicado em DNER (1979) que também apresenta um método para cálculo do raio de curvatura da bacia, da vida útil restante da estrutura e propõe um projeto de reforço de pavimentos que estejam com baixa capacidade de suporte.

2.7 Considerações finais

Pode-se observar que existem publicações sobre TSP em quantidade razoável. A maior parte faz considerações ao uso do material como camada de manutenção, aplicada sobre o revestimento existente. Assim, faz-se necessário que sejam desenvolvidos estudos voltados ao projeto mais racional das RBVT, que visem uma implantação atrativa com custos mais viáveis para a promoção de acessos seguros e confortáveis às comunidades mais afastadas dos grandes centros urbanos, como o uso de catálogos de dimensionamento.

Quanto à forma de classificação pelo tráfego, não há um consenso de valor ou até de parâmetro entre os vários documentos de diferentes locais analisados. Assim, são aplicadas diretrizes que foram desenvolvidas para rodovias de maior volume, fazendo com que as RBVT não sejam adequadamente pavimentadas ou não passem por ações de manutenção e reabilitação rotineiras.

Com relação às formas de surgimento de defeitos existe uma compreensão do caráter complexo de identificação das causas. Considerando os defeitos de TSP, já há uma convergência acerca dos dois mais importantes (exsudação e perda de agregados). Já a forma de análise, como foram apresentadas diretrizes nacionais, foi observado que essas são voltadas a pavimentos flexíveis ou semirrígidos, não considerando as especificidades das RBVT, como os acostamentos.

Assim, é necessário que existam recomendações de gerência voltadas às estruturas dos pavimentos das RBVT, buscando a melhor compreensão da ocorrência dos defeitos detectados, subsidiando a possibilidade de previsão do surgimento ou da frequência de outras falhas. Essas diretivas devem conter informações que auxiliarão os gestores na normatização de procedimentos de dimensionamento e de gerência, atentando-se para o controle de defeitos, do tráfego e a minimização dos efeitos do clima nas estruturas dessas rodovias.

3 ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO CONSIDERANDO PARÂMETROS DE RIGIDEZ

O atual método de dimensionamento de pavimentos asfálticos instituído no Brasil - MeDiNa, demanda ensaios para determinação do Módulo de Resiliência (MR) e da Deformação Permanente (DP) das camadas granulares. Como esses ensaios apresentam elevados tempos e custos de execução, o objetivo deste capítulo foi avaliar a variação do MR de subleitos de rodovias de baixo volume de tráfego e o seu impacto no dimensionamento dos pavimentos. Foram simulados quatro subleitos considerando solos da Região Metropolitana de Fortaleza, com três estruturas pré-definidas. Como parâmetro de avaliação, foi considerada a DP fornecida pelo *software* MeDiNa. Os resultados das simulações permitiram verificar que os valores de DP de uma mesma estrutura são muito próximos e, assim, qualquer valor de MR dentre os simulados, além dos estimados pelo uso do modelo composto, pode ser considerado no dimensionamento dessas rodovias, mesmo com erros de previsão dos valores superiores a 20%. O estudo também propõe um catálogo de projetos de rodovias de baixo volume de tráfego considerando os subleitos analisados.

3.1 Introdução

No Estado do Ceará, localizado no nordeste do Brasil, 70,6% das rodovias são pavimentadas (SOP, 2023). Pode-se considerar que os 3.698,9 km de rodovias não pavimentadas são Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT). Além das rodovias não pavimentadas, 64% daquelas pavimentadas estão revestidas com Tratamento Superficial por Penetração (TSP) como solução de revestimento principal e são consideradas RBVT.

As RBVT são acessos importantes às populações que demandam deslocamentos para aquisição de bens, produtos e serviços em cidades maiores, além de busca por saúde, educação e lazer (Gupta; Kumar; Rastogi, 2014). Essas rodovias, podem também ser conhecidas como estradas vicinais (Bernucci, 1995), geralmente conectam distritos a sedes de cidades em regiões no interior dos estados e formam as ligações à rede rodoviária principal. As diretrizes técnicas e de projeto para as RBVT são limitadas. Isso pode ocasionar um dimensionamento ineficiente das infraestruturas, gerando custos elevados para implantação, o que pode dificultar a aprovação e a execução dos trechos.

Somente a partir de 2021, no Brasil, foi recomendado o uso do método de dimensionamento das rodovias (DNIT, 2021) que requer a obtenção de parâmetros mecânicos, como o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP), dos materiais das camadas granulares, inclusive do subleito, independente do volume de tráfego. Ambos os ensaios são realizados em equipamento triaxial de carga repetida para conhecimento dos parâmetros de rigidez do material.

No método brasileiro (DNIT, 2018a) cada corpo de prova moldado demanda, para o MR, a realização de 10 ciclos com 18 pares de tensões (ou em 30 pares de tensões, no caso de subleito) na etapa do ensaio propriamente dito. No caso da DP, são recomendados 150.000 ciclos com 9 pares de tensões (DNIT, 2018b) após a etapa de condicionamento (1500 ciclos no MR e 50 ciclos na DP). Cada ciclo, a depender do equipamento, pode durar 1 s, 2 s ou 5 s, e consequentemente o tempo total de ensaio pode ser de cerca de 2h para determinar o MR e de 17 dias para a DP para a frequência de 1 Hz. Observa-se que o tempo para realização dos ensaios é elevado, bem como seus custos.

A média dos custos para realização de MR é de R\$ 2.000,00 e para DP é de R\$ 10.000,00, conforme cotações obtidas da Universidade Federal do Ceará, do Instituto Federal do Ceará e de empresas privadas no ano de 2024. Assim, em um trecho de 10 km de extensão, onde são necessários no mínimo 20 pontos de amostragem do subleito (com espaçamento de 500 m) conforme a Instrução de Serviço - IS 247 (DNIT, 2021), são demandados R\$ 40.000,00 para execução de ensaios de MR, e R\$ 30.000,00 para realizar o ensaio de DP em 3 amostras mínimas, com duração superior a 51 dias (considerando um equipamento).

O Brasil possui método para dimensionamento de pavimentos flexíveis desde a década dos anos 60 com a publicação de Souza (1966). Passadas mais de cinco décadas, adaptações, revisões, melhorias e novos métodos de dimensionamento vêm sendo desenvolvidos para aproximar a prática das técnicas mais modernas de caracterização de materiais e de métodos de cálculo de desempenho das estruturas projetadas.

O método do DNER (1981), que é uma revisão de Souza (1966), indicado em DNIT (2006a), ainda é o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis mais utilizado em território brasileiro, com uso do CBR (*California Bearing Ratio*) como medida de resistência ou compacidade dos materiais granulares. Contudo, o novo Método de Dimensionamento Nacional, denominado MeDiNa, está em fase de implantação no país por meio de DNIT (2021). Esse método adota características mecânicas-empíricas para determinar os parâmetros de rigidez dos materiais granulares que compõem as camadas de base, sub-base, reforço do subleito e subleito.

Para disseminar o uso do método MeDiNa, desenvolveu-se no Brasil um *software* que permite a verificação do dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas em camadas, como é o caso dos pavimentos rodoviários. Para tanto, o método se baseia na Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), calculando tensões e deformações sob o carregamento de repetições do eixo simples padrão de 8,2 tf (Número N). A saída desse método é a espessura das camadas e a verificação de atendimento quanto aos critérios de confiabilidade estabelecidos no dimensionamento: fadiga (área trincada) e DP. Esses critérios variam de acordo com o tipo de via informado na interface do *software*, conforme relatado por Franco e Motta (2020).

Para o dimensionamento de RBVT com TSP, o MeDiNa considera as seguintes premissas: (i) opções de TSP com dupla (TSD) ou tripla (TST) camada como revestimento e (ii) a área trincada (dano por fadiga) não é avaliada. Adotando os parâmetros equivalentes aos considerados no sistema local, com exceção da área trincada, a DP teria limite máximo permitido de 20 mm com confiabilidade de 65%.

Em relação ao tráfego, não existe um entendimento convergente para classificar as RBVT. Pasindu, Gamage e Bandara (2020) afirmam que a maioria dos gestores rodoviários não tem um direcionamento para definir qual a solução ideal para cada caso ou identificar o tipo de rodovia de acordo com o tráfego. Esses autores fizeram um levantamento de órgãos rodoviários e identificaram que rodovias com volume médio diário superior a 500 veículos/dia são pavimentadas em Concreto Asfáltico (CA) e que, somente com tráfego superior a 200 veículos/dia a rodovia recebe algum revestimento. DNIT (2006a) recomenda o emprego de TSP para um Número N de repetições do eixo-padrão de até 10^6 .

Os métodos de dimensionamento de pavimentos de RBVT, como os da *United States Army Corps of Engineers* (USACE) e NCSA (1972; 1973), ainda utilizam o CBR como propriedade de entrada no projeto. Já os métodos *Code of Practice for the Design of Road Pavements* (SATCC), *Low Volume Road Design Guide of Iowa* (I-Pave), *Guide For Mechanistic-Empirical Design of New Rehabilitated Pavement Structures-NCHRP 1-37A* e o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* normatizam o uso do MR obtido a partir das correlações com o CBR dos trabalhos de Heukelom e Foster (1962), *Asphalt Institute* (1982) e Powel *et al.* (1984).

Entretanto, para determinar a qualidade dos materiais que compõem as camadas estruturais e dos subleitos das RBVT nos métodos de dimensionamentos mecanísticos-empíricos, como é o caso do MeDiNa, são adotados os ensaios de MR e de DP. Esses ensaios permitem determinar as características dos materiais frente aos carregamentos dinâmicos

impostos pelo tráfego (AASHTO, 2008; Zhang; Yu, 2016; Ribeiro; Silva; Barroso, 2018; Souza; Ribeiro; Silva, 2020).

AASHTO (2008), Nazzal e Tatari (2013), Salour, Erlingsson e Zapata (2014), Sadrossadat, Ali e Saeedeh (2016) e Mousavi, Gabr e Border (2018) recomendam que para RBVT, assim como para rodovias com tráfego mais pesado, pode ser adotado como alternativa viável a utilização de modelos de previsão do MR e da DP, a partir de propriedades de ensaios mais simples. Essa recomendação é relevante, principalmente em locais onde a falta de pessoal qualificado e os custos de aquisição de equipamentos triaxiais de carga repetida inviabilizam a implantação dessas metodologias de dimensionamento. Dessa maneira, o uso de modelos de previsão dos parâmetros mecânicos dos materiais granulares no dimensionamento de pavimentos de RBVT por meio de ensaios mais simples pode ser um diferencial para o uso dos métodos mecanísticos-empíricos nesse tipo de rodovia, bem como pode auxiliar a analisar melhor a sua vida de projeto.

Contudo, é necessária uma análise de sensibilidade do uso desses modelos de previsão, com a finalidade de verificar a influência da variação do MR dos materiais no dimensionamento de RBVT, e assim, tornar possível a quantificação dos seus erros admissíveis máximos, em comparação aos resultados dos ensaios. Nota-se na literatura uma escassez de trabalhos que tratem dos erros de previsão de MR e DP tolerados no dimensionamento dessas estruturas. Pelo motivo exposto, o objetivo deste capítulo foi analisar o impacto da modelagem de parâmetros de rigidez no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos de RBVT a partir de subleitos típicos de uma região do estado do Ceará.

3.2 Planejamento experimental

O procedimento metodológico deste artigo foi dividido em três etapas: (i) determinação da variação do MR de diferentes subleitos; (ii) simulações para obtenção de DP e tensão no topo do subleito e (iii) proposição de um catálogo de estruturas a serem implantadas sobre os subleitos analisados para RBVT.

3.2.1 Determinação da variação do Módulo de Resiliência de diferentes subleitos

Conforme AASHTO (2004; 2008), Taskiran (2010), Tenpe e Patel (2018) e Chu, Dawson e Thom (2021), é comum, na área rodoviária, a relação dos ensaios geotécnicos com a classificação da AASHTO (*The American Association of State Highway and Transportation*

Officials). Destaque-se a importância de verificar se essa classificação ou outra em uso, como a MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), é adequada para solos ocorrentes em uma dada região. No caso específico deste trabalho, verificou-se que a classificação da AASHTO representa de modo adequado à previsão do comportamento dos solos que ocorrem na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) conforme destacado por Ribeiro, Silva e Barroso (2015; 2018).

Para adoção dos valores de MR a serem utilizados na modelagem das estruturas, de modo a inferir de forma mais simples sua previsão, gerou-se um modelo linear geral com 95% de confiança para uma única variável conforme dados disponíveis em Ribeiro (2016). Esse modelo classificou o MR pela AASHTO, identificando seus valores típicos e faixa predominante de ocorrência para o caso da RMF. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos por meio dos modelos de regressão linear geral, inerentes ao MR dos solos compactados na energia Proctor normal. Os resultados oriundos do modelo linear geral demonstram que para cada classe de solo, há uma faixa de valores para cada valor típico de MR, a considerar um intervalo de confiança de 95%. Segundo Ribeiro (2016), os modelos lineares gerais são uma alternativa viável a ser utilizada no conhecimento prévio dos valores de MR de uma região, sendo adotados por AASHTO (2004; 2008).

Tabela 1 – Valores típicos de MR do subleito para as classes AASHTO ocorrentes na RMF

Tipos de Subleitos (Códigos)	Classificação AASHTO -Previsão da qualidade do subleito -	MR_{médio} (MPa)	Faixas de MR (MPa)
Granular 1 (G1)	Areia e Areia Siltosa e Argilosa (A-2-4 e A-2-6) - Excelente a bom -	196	150 - 241
Granular 2 (G2)	Areia Fina (A-3) - Excelente a bom -	119	106 - 132
Siltoso e Argiloso 1 (SA1)	Solos Siltosos (A-4 e A-5) - Fraco a pobre -	181	94 - 268
Siltoso e Argiloso 2 (SA2)	Solos Argilosos (A-6) - Fraco a pobre -	228	196 - 260

Fonte: Autora (2024).

Os tipos de subleito apresentados na Tabela 1 foram considerados nas simulações apresentadas no tópico seguinte. Esses solos, que são amostras das classes mais comuns na

RMF, são compostos de dois materiais granulares (identificados com os códigos G1 e G2) e dois siltosos e argilosos (identificados com os códigos SA1 e SA2). O G2, porém, por tratar-se de uma areia fina e, portanto, sem coesão, resultou no menor MR médio dentre os solos da RMF.

3.2.2 Simulações para obtenção de Deformação Permanente e tensão no topo do subleito

Por tratar-se de RBVT, com Número N máximo de 10^6 , foram consideradas estruturas típicas das rodovias da RMF no estado do Ceará, com revestimentos em Tratamento Superficial Duplo (TSD) com 2,5 cm de espessura, construídos sobre uma base de solo-brita e um reforço de subleito composto por um solo arenoso típico dessa região. A Tabela 2 apresenta as características mecânicas dos materiais considerados para as camadas das estruturas simuladas, conforme dados dos ensaios de Bastos (2013) e Vasconcelos (2018).

Vale ressaltar que as equações de DP para as camadas de base e reforço foram retiradas do banco de dados (BD) do MeDiNa, procurando-se utilizar informações dos materiais mais próximos aos estudados por essas duas últimas autoras. Isso foi necessário pelo procedimento de obtenção da DP ser relativamente recente e não existir ainda, no Brasil, uma base com informações mais completas e com maior variabilidade de materiais. Como exemplo, o BD do MeDiNa possui DP de somente dez materiais.

Tabela 2 – Informações das camadas das estruturas simuladas (continua)

Parâmetros	Camadas		
	Revestimento	Base	Reforço
Material	TSD	Solo-brita (Bastos, 2013)	Solo areno-siltoso não-laterítico (NA') (Vasconcelos, 2018)
Coefficiente de Poisson (μ)	0,25	0,30	0,45
Umidade ótima ($h_{ót.}$) (%)	-	6,1	15,1
Massa Específica Aparente Seca máxima (MEAS _{máx}) (g/cm ³)	2,400	2,273	1,970
CBR (%)	-	70	20
Expansão (%)	-	0	0
MR _{médio} (MPa)	1.500	506	161

Tabela 2 – Informações das camadas das estruturas simuladas (conclusão)

Parâmetros	Camadas		
	Revestimento	Base	Reforço
Modelo composto de MR (MPa)	-	$k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	$k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$
		$k_1 = 1161,357$	$k_1 = 139,3$
		$k_2 = 0,530$	$k_2 = -0,269$
		$k_3 = -0,296$	$k_3 = -0,538$
		$R^2 = 0,74$	$R^2 = 0,78$
Modelo de Deformação Permanente (DP) (Fonte dos coeficientes: Banco de dados do MeDiNa)	-	$\psi_1 \sigma_3^{\psi_2} \sigma_d^{\psi_3} N^{\psi_4}$	$\psi_1 \sigma_3^{\psi_2} \sigma_d^{\psi_3} N^{\psi_4}$
		$\psi_1 = 0,31$	$\psi_1 = 0,57$
		$\psi_2 = 0,06$	$\psi_2 = 0,71$
		$\psi_3 = 0,85$	$\psi_3 = 0,27$
		$\psi_4 = 0,05$	$\psi_4 = 0,05$
		Solo-brita – M5 (LG ²)	Solo NA ²

Fonte: Autora (2024).

Como subleitos das simulações foram utilizados os quatro tipos de solos mais comuns na RMF do estado do Ceará (Tabela 1), conforme discutidos nos trabalhos de Chaves (2000), Barroso (2002) e Ribeiro, Silva e Barroso (2015). Como o principal objetivo foi verificar a influência da variação do MR do subleito no dimensionamento de pavimentos de RBVT, foram consideradas as variações dos valores de MR (comportamento elástico linear) e elástico não-linear. Para tanto, foram utilizados os valores de MR típicos e os valores do intervalo de confiança de ocorrência (Tabela 2) dos subleitos em estudo.

Os *softwares* adotados foram o MeDiNa, versão 1.1.5.0 na análise da estrutura e o AEMC, versão 2.4.1, no cálculo das tensões no topo do subleito. Nas simulações, os valores de MR dos quatro diferentes tipos de solos de fundação variaram na análise linear em 10 MPa, desde o valor mínimo até o máximo, sendo também utilizado o modelo composto de Pezo (1993) para análise não linear. A Tabela 3 apresenta as características mecânicas básicas e de rigidez necessárias ao dimensionamento pelos métodos empírico e mecanístico-empírico, dos quatro diferentes subleitos considerados (G1, G2, SA1 e SA2). Para a definição da variação dos valores de MR foram considerados os limites apresentados na Tabela 1, totalizando 53 simulações realizadas.

Na Tabela 3 também pode-se verificar a informação referente ao erro de previsão (EP), em percentual, que considera os limites de MR simples máximo (MR_{\max}) e mínimo (MR_{\min}) simulados com base na estimação da modelagem realizada em Ribeiro (2016). O cálculo do EP pela Equação (1) tem o objetivo de ressaltar a amplitude dos dados de MR modelados.

$$EP(\%) = \left(\frac{MR_{m\acute{a}x} - MR_{m\acute{i}n}}{MR_{m\acute{i}n}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Tabela 3 – Simulações do subleito realizadas no MeDiNa (51 simulações) para N = 10⁶

Descrição	G1	G2	SA1	SA2
	A-2-4/A-2-6	A-3	A-4/A-5	A-6
MR composto (MPa) (Ribeiro, 2016)	$k_1\sigma_3^{k_2}\sigma_d^{k_3}$ k ₁ = 197 k ₂ = 0,301 k ₃ = -0,286 R ² = 0,47	$k_1\sigma_3^{k_2}$ k ₁ = 303 k ₂ = 0,332 R ² = 0,97	$k_1\sigma_3^{k_2}\sigma_d^{k_3}$ k ₁ = 667 k ₂ = 0,312 k ₃ = 0,323 R ² = 0,40	$k_1\sigma_3^{k_2}$ k ₁ = 379 k ₂ = 0,307 R ² = 0,83
MR (MPa)	150; 160; 170; 180; 190; 196; 200; 210; 220; 230; 240; 241; 250	100; 106; 110; 119; 120; 130; 132; 140	90; 94; 100; 110; 120; 130; 140; 150; 160; 170; 180; 181; 190; 200; 210; 220; 230; 240; 250; 260; 270	190; 196; 200; 210; 220; 228; 230; 240; 250; 260
EP (%)	66,7	40,0	200,0	42,1
DP (Fonte dos coeficientes: Banco de dados do MeDiNa)	$\psi_1\sigma_3^{\psi_2}\sigma_d^{\psi_3}N^{\psi_4}$ $\psi_1 = 0,570$ $\psi_2 = 0,710$ $\psi_3 = 0,270$ $\psi_4 = 0,050$ Solo areno-siltoso não laterítico (NA')	$\psi_1\sigma_3^{\psi_2}\sigma_d^{\psi_3}N^{\psi_4}$ $\psi_1 = 0,097$ $\psi_2 = -1,600$ $\psi_3 = 1,900$ $\psi_4 = 0,063$ Areia fina de Campo Azul	$\psi_1\sigma_3^{\psi_2}\sigma_d^{\psi_3}N^{\psi_4}$ $\psi_1 = 0,244$ $\psi_2 = 0,419$ $\psi_3 = 1,309$ $\psi_4 = 0,069$ Solo argiloso de Papucaia	$\psi_1\sigma_3^{\psi_2}\sigma_d^{\psi_3}N^{\psi_4}$ $\psi_1 = 0,270$ $\psi_2 = -0,140$ $\psi_3 = 1,330$ $\psi_4 = 0,060$ Solo argiloso não laterítico (NG')
μ	0,45	0,45	0,45	0,45
h _{ót} (%)	9,85	4,20	14,92	12,10
MEAS _{máx} (g/cm ³)	2,120	1,725	1,930	1,935
CBR (%)	32	15	14	11
Expansão (%)	0,90	0,00	0,50	0,03
Simulações	13	8	21	10

Fonte: Autora (2024).

Os valores de EP calculados mostram que o solo SA1 apresentou uma maior amplitude, já identificada na Tabela 1 pelos valores mínimo e máximo. O solo com menor EP

foi o A-3 (subleito G2), e, portanto, os valores de MR modelados apresentam menor variabilidade, assim como o EP do solo A-6.

3.2.3 Proposição de catálogo mecanístico-empírico para RBVT

Após análise dos dados, as estruturas que obtiverem os valores de DP total e do subleito dentro dos limites admissíveis, foram apresentadas como as opções possíveis a serem adotadas quando o subleito for um dos analisados. O catálogo foi proposto com o uso de estruturas pré-dimensionadas para os tipos de subleitos ocorrentes na RMF considerando o período de projeto de 10 anos.

3.3 Resultados e discussões

Neste tópico são determinadas as espessuras dimensionadas das estruturas que foram simuladas e os valores obtidos correspondentes às deformações permanentes e tensões no topo do subleito. Por fim, será apresentado o catálogo obtido a partir das análises.

3.3.1 Determinação das estruturas a serem simuladas

Como ponto de partida para as simulações, foi realizado um dimensionamento pelo método empírico (DNIT, 2006a), para considerar tal estrutura como base para as demais a serem avaliadas pelo método mecanístico-empírico (MeDiNa). Com base nos resultados obtidos do dimensionamento inicial, foram indicadas 3 diferentes estruturas para simulação que podem ser verificadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Estruturas a serem simuladas com base no método empírico (TSD = 2,5 cm)

Tipos de subleito	Método Empírico (cm)			Estrutura 1 (cm)		Estrutura 2 (cm)		Estrutura 3 (cm)	
	H _{total}	Base	Reforço	Base	Reforço	Base	Reforço	Base	Reforço
G1	19,03	20	0	20	20	15	15	15	0
G2	29,93	23	20	20	20	15	15	15	0
SA1	31,19	23	20	20	20	15	15	15	0
SA2	36,03	23	20	20	20	15	15	15	0

Fonte: Autora (2024).

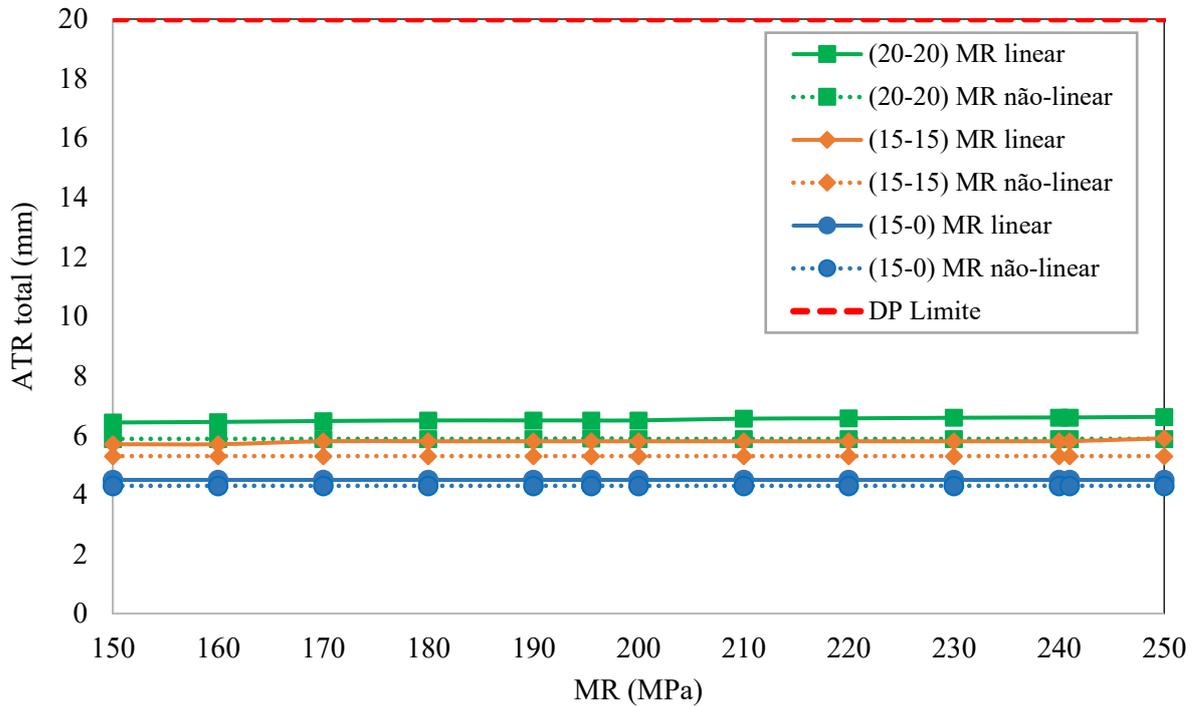
O método empírico do CBR, como tem valores mínimos a serem adotados das espessuras das camadas, apresenta uma tendência de superdimensionar a estrutura para o caso de RBVT conforme citado por Gupta, Kumar e Rastogi (2014). Com base nos valores de estrutura demandados pelos subleitos, foram adotadas as espessuras da Estrutura 1, visto que atendem ao mínimo do método empírico e totalizam 40 cm, valor superior ao requerido para proteção do subleito (H_{total}). Outras estruturas foram definidas: a Estrutura 2, que atende às espessuras mínimas demandadas do MeDiNa, e uma Estrutura 3, sem o reforço do subleito, visto que o material de base apresenta bom desempenho mecânico e a depender da resistência do subleito essa camada poderá ser omitida.

As estruturas 1, 2 e 3 foram denominadas (20-20), (15-15) e (15-0), respectivamente, fazendo menção aos valores das espessuras das camadas de base e reforço do subleito, respectivamente. Essas estruturas foram simuladas no MeDiNa para obtenção da deformação permanente (total e no subleito) e no AEMC para obtenção das tensões verticais no topo do subleito. Como limite total da DP para RBVT foi adotado o valor de 20 mm, indicado para o sistema local por Franco e Motta (2020).

3.3.2 Deformação Permanente total e do subleito

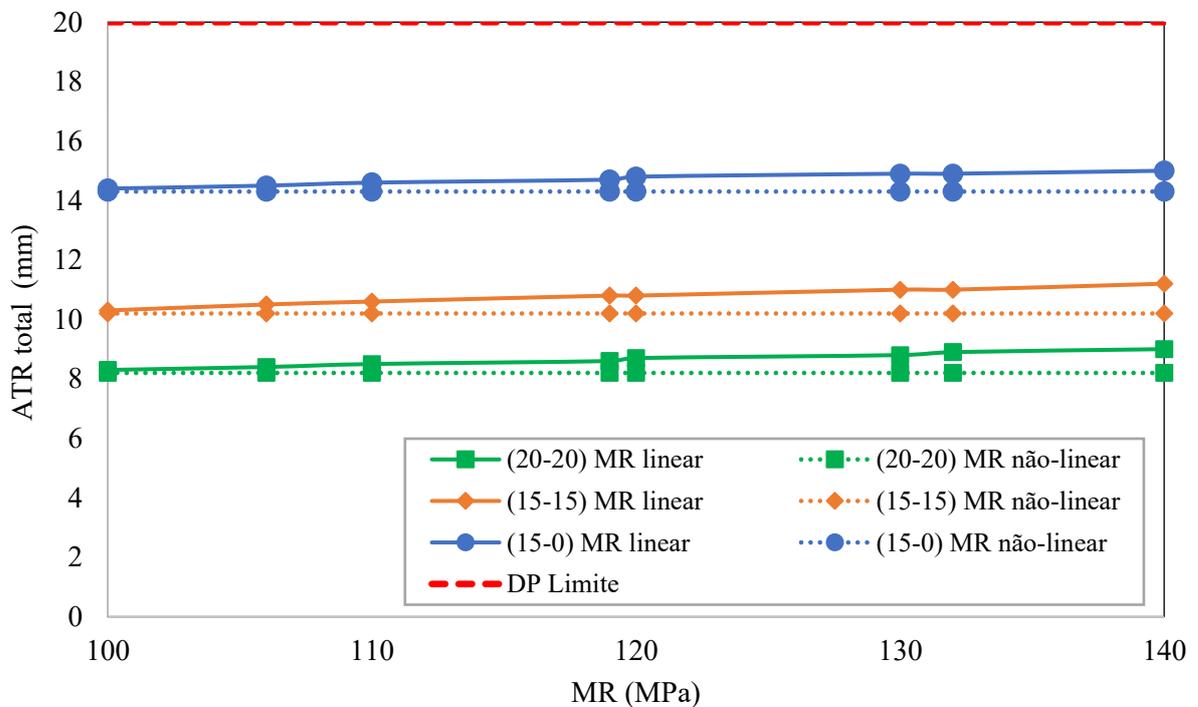
Os gráficos de dispersão das figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam os valores de DP total por meio do Afundamento de Trilha de Roda (ATR) e o limite da escala vertical (20 mm), que é o limite admissível adotado neste estudo. Foram consideradas as simulações realizadas das três estruturas adotadas com a variação dos valores absolutos de MR (comportamento elástico linear) e do modelo composto (comportamento elástico não-linear) dispostos na Tabela 3, para os quatro diferentes tipos de subleito avaliados.

Figura 10 – Dispersão dos valores de ATR obtidos das simulações do subleito G1



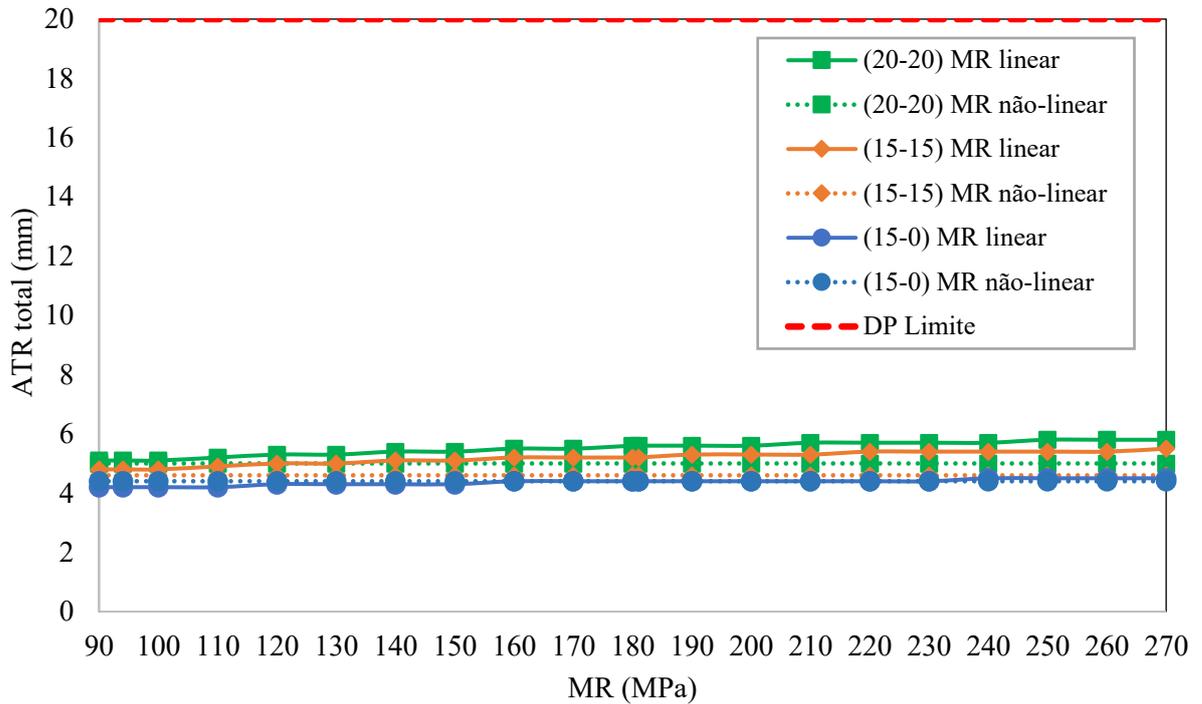
Fonte: Autora (2024).

Figura 11 – Dispersão dos valores de ATR obtidos das simulações do subleito G2



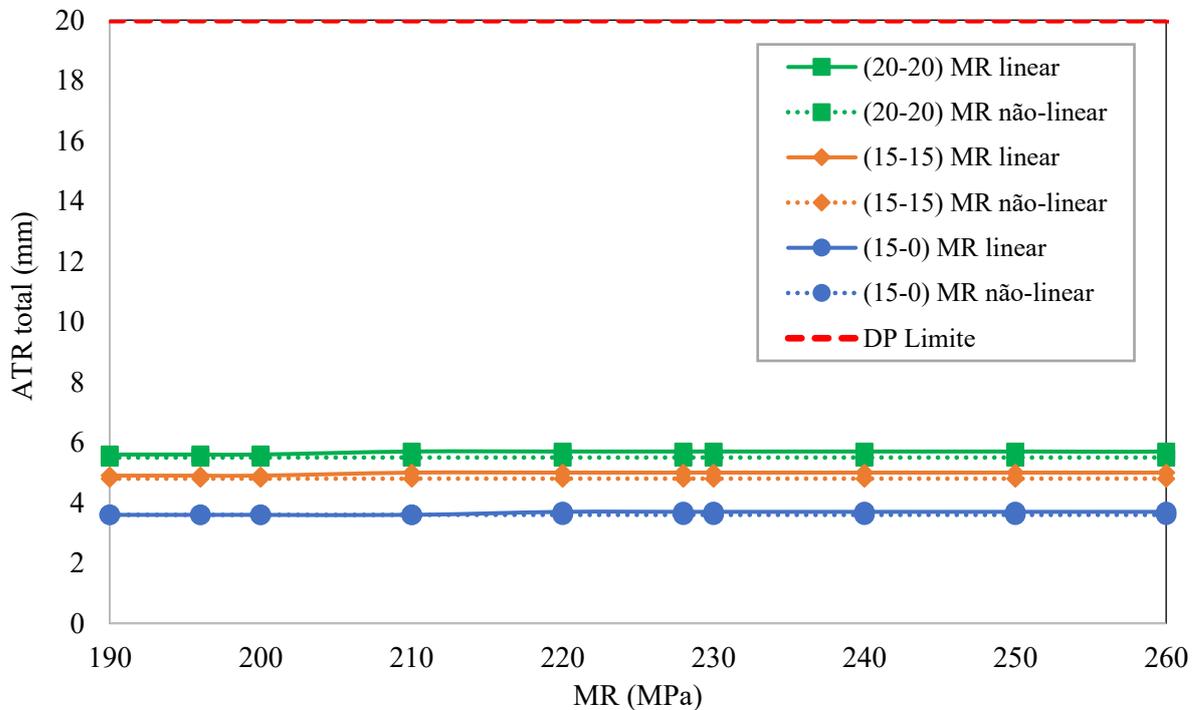
Fonte: Autora (2024).

Figura 12 – Dispersão dos valores de ATR obtidos das simulações do subleito SA1



Fonte: Autora (2024).

Figura 13 – Dispersão dos valores de ATR obtidos das simulações do subleito SA2



Fonte: Autora (2024).

Para o subleito G1 (Figura 10), é possível verificar que a partir do incremento da espessura da estrutura, os valores de DP totais tendem a aumentar, mas com menor incremento,

variando de 4,3 mm a 6,6 mm. Observa-se que todos os pontos analisados estão abaixo do limite 20 mm de DP. Para os subleitos A-2-4 e A-2-6 (G1) a estrutura mais simples simulada (15-0) pode ser recomendada, pois não há deformação excessiva quando comparada às estruturas mais robustas.

Os ATR obtidos do MR com valores modelados (elástico linear) do G1 foi em média 8,5% superior aos valores calculados usando-se do modelo composto (elástico não-linear). Observa-se que mesmo com o MR do subleito G1 variando entre 150 MPa e 250 MPa, os ATR são pouco discrepantes. Constatou-se que não existem diferenças significativas do dimensionamento de RBVT para esse tipo de solo em qualquer uma das estruturas adotadas. Assim pode-se afirmar que para o subleito G1 é possível adotar MR estimado por modelos com erro de previsão (EP) de 66,7% (Tabela 3), sem significativa influência no dimensionamento de RBVT.

No subleito G2 (Figura 11) a estrutura mais espessa tem o ATR menor e na mais esbelta os valores de DP apresentam maiores variações (entre 8,2 mm e 15 mm). Ou seja, considerando o subleito do tipo Areia Fina (A-3), as estruturas necessárias para atender aos limites estabelecidos devem ser mais robustas, uma vez que a estrutura (15-0) obteve os maiores valores de DP, embora inferiores a 20 mm.

O solo do tipo G2 necessita de um tratamento mais adequado em campo em função de sua baixa coesão o que resulta em baixos valores de MR. Observe-se que o maior valor de MR, de 140 MPa, é ainda inferior ao menor do solo G1. Com relação ao MR do subleito G2, foi verificado que as variações dos valores não influenciaram no dimensionamento de maneira a alterar o atendimento ao parâmetro de ATR em RBVT. Com a variação de MR entre 100 MPa e 140 MPa foi possível observar para cada estrutura adotada que os valores de DP são próximos (ATR dos MR simples maiores em média 4,7% do calculado pelo MR não-linear). Dessa forma, a previsão dos valores de MR dos subleitos do tipo G2 com EP da ordem de 40%, pode ser utilizada sem significativa influência no dimensionamento de RBVT.

O subleito SA1 (Figura 12) obteve valores de ATR reduzidos, variando de 4,2 mm a 5,8 mm. Os dados obtidos para as três diferentes estruturas são muito próximos, sendo os menores valores de ATR encontrados para a estrutura menos espessa. Para as estruturas (20-20) e (15-15) há um incremento do ATR com o aumento do MR, porém, em menor amplitude, quando comparado ao subleito G2.

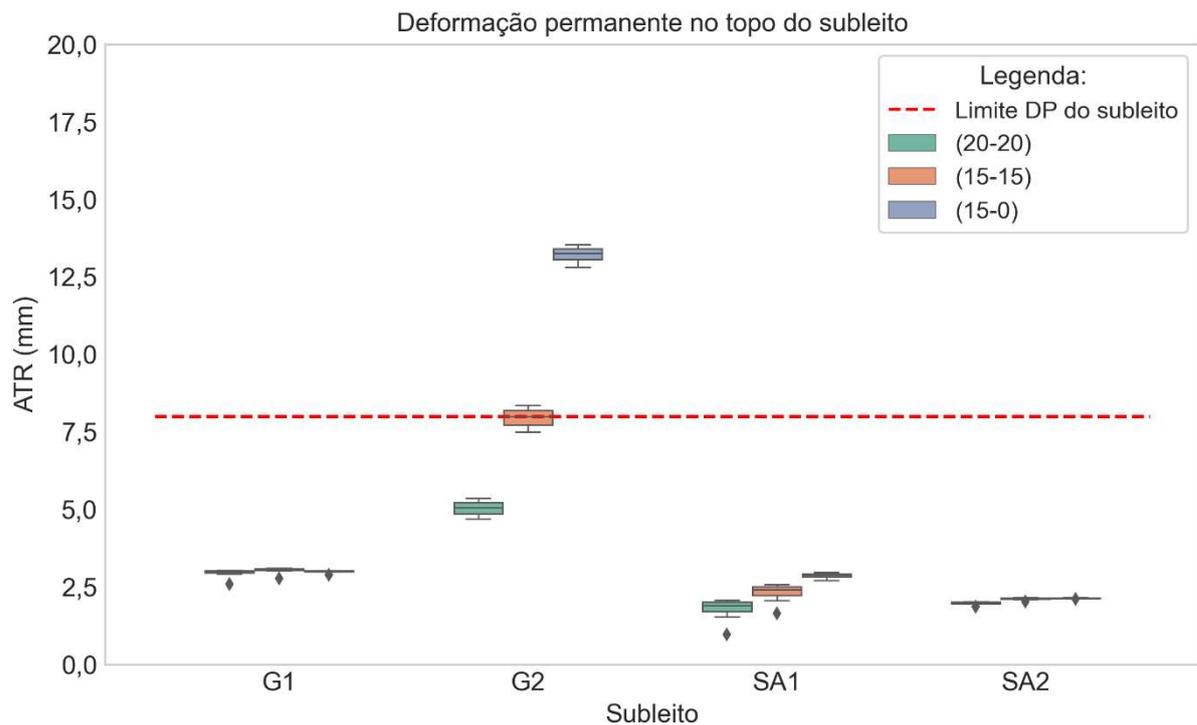
A variação dos valores de MR simples entre 90 MPa e 270 MPa, para os solos do tipo A-4 e A-5 (do tipo SA1) e o uso do MR não-linear não apresentou influência significativa no resultado do dimensionamento para as três estruturas consideradas neste experimento

(diferença média de 7,2%). Pode-se afirmar, à luz dos resultados aqui apresentados, que o uso de modelos para prever os valores de MR dos subleitos do tipo SA1 é possível, com uma variação de 200% sem comprometimento da estrutura.

No caso do subleito SA2 (Figura 13), os valores de ATR (de 3,6 mm a 5,8 mm) para as diferentes estruturas simuladas são tão próximos que há sobreposição em alguns pontos das curvas e são os menores entre os quatro subleitos analisados. Assim como nos outros subleitos simulados, conclui-se pela possibilidade de uso dos valores previstos de MR para o subleito SA2, sendo admitidos EP de 42,1%.

A Figura 14 apresenta um *boxplot* com a compilação dos valores de DP dos subleitos por meio do afundamento de trilha de roda, em que foi considerado um valor admissível linear de 8 mm somente para o subleito, proporcional ao limite de 20 mm adotado como ATR máximo para RBVT, conforme Equação (2).

Figura 14 – *Boxplot* dos valores de deformação permanente nos subleitos



Fonte: Autora (2024).

$$L_{subleito_{RBVT}} = \frac{L_{RBVT} * L_{subleito}}{L_{total}} \quad (2)$$

Em que, L_{total} é o limite admissível da DP total (valor de 12,5 mm recomendado por Guimarães, 2009); $L_{subleito}$ é o limite admissível da DP no subleito (valor de 5 mm recomendado

por Franco; Motta, 2020, quando 12,5 mm de DP total é o limite máximo); L_{RBVT} é o limite da DP total em RBVT (adotado do sistema local, de 20 mm); e $L_{totalRBVT}$ é o limite admissível do subleito de RBVT aqui calculado que resulta assim em 8 mm.

Da Figura 14, pode-se observar que os valores de ATR dos subleitos G1 e SA2 apresentam baixa variação. Assim, para esses subleitos, com as estruturas pré-definidas, pode ser utilizado o modelo de previsão de MR, adotando os valores médios, por exemplo. Apesar de intervalos um pouco maiores, pode-se dizer o mesmo para o subleito SA1.

Ainda pela Figura 14, no caso do subleito G2, o intervalo de dados é superior, ou seja, há maior variabilidade nos valores de ATR calculados. A simulação do subleito G2 foi a única que o *software* MeDiNa apresentou excesso de deformação no subleito nas três estruturas avaliadas. Pela visualização das caixas da Figura 14, pode-se verificar que os valores médios de DP do subleito G2 das estruturas (15-15) e (15-0) estão acima do valor máximo admissível considerado. Vale ressaltar que as três estruturas simuladas para G2 apresentaram valores de DP no subleito acima de 5 mm, definido como limite do *software* e apontado como alerta na análise da estrutura. Sugere-se que esse limite para o caso de RBVT seja ampliado para 8 mm, conforme calculado e indicado na Equação (2), caso o comportamento da DP possa ser considerado linear.

Para as estruturas testadas sobre os subleitos G1, SA1 e SA2, pode-se afirmar, com base nos valores de ATR, que a estrutura mais esbelta (15-0) poderia ser implementada para RBVT. Ao se comparar com as estruturas dimensionadas por meio do método empírico, há redução das espessuras, do consumo de materiais, e conseqüentemente dos custos de implantação da rodovia nessas condições.

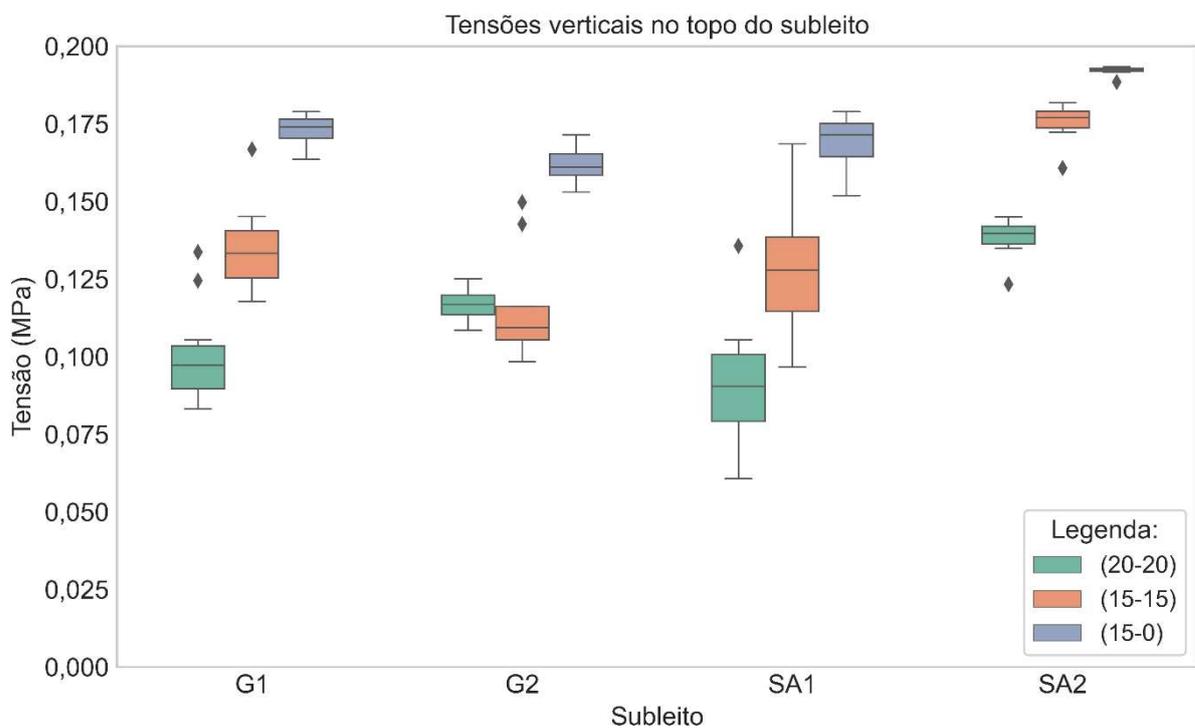
Pode-se observar nas figuras 10, 11, 12 e 13 que somente no subleito simulado G2 a estrutura mais esbelta teve os maiores valores de ATR total quando comparada às estruturas mais robustas. Nos demais subleitos simulados, ocorreu o inverso, onde as estruturas com camadas mais espessas apresentaram maior DP total. Na Figura 14, os valores de ATR do subleito tiveram esse comportamento das estruturas mais esbeltas com maiores deformações nos subleitos G2 e SA1. Nos demais subleitos (G1 e SA2), ocorreu o inverso, onde as estruturas mais robustas apresentaram maior DP total, embora com variações pequenas de cerca de 0,06 mm. Uma causa que pode ter levado a esses resultados são os modelos de DP utilizados. Como já citado, para a análise da DP foram utilizados os coeficientes do banco de dados do MeDiNa e a adoção de modelos de DP que não foram os ensaiados para os materiais pode influenciar nos resultados.

Além das observações realizadas, ainda de acordo com as figuras 10, 11, 12 e 13, ao comparar os valores de ATR totais obtidos pelos modelos de previsão (elástico linear) e pela equação do modelo composto (elástico não-linear), pode-se verificar que os valores são próximos e, para essas condições de dimensionamento de RBVT, os modelos de previsão surgem como uma boa alternativa a realização dos ensaios triaxiais para o subleito. Foi demonstrado que erros de previsão dos valores de MR da ordem de 40% são bem tolerados, não impactando negativamente no dimensionamento das rodovias analisadas. Assim, para RBVT, as estruturas a serem dimensionadas podem ser mais esbeltas, utilizando valores de MR lineares, podendo ser, inclusive, qualquer um dos dispostos na Tabela 1.

3.3.3 Verificação dos valores de tensão no topo do subleito

Outros dados obtidos do processo de dimensionamento analisados foram as tensões encontradas no topo do subleito (Figura 15). Pode-se perceber que os valores de tensão vertical no topo do subleito apresentam maior variabilidade, porém, a maior diferença entre o valor máximo e mínimo foi de 0,075MPa para a estrutura (20-20) do subleito SA1. Também pode-se verificar que não há presença de outliers significativos.

Figura 15 – *Boxplot* dos valores de tensão no topo do subleito



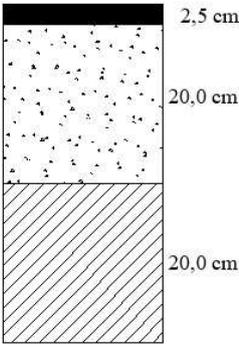
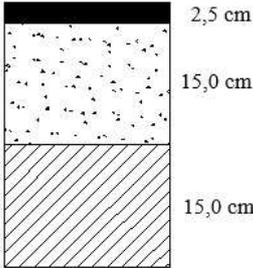
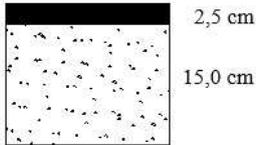
Fonte: Autora (2024).

Para alguns casos, como por exemplo as estruturas do subleito SA2 e a (15-0) do subleito G1, as caixas são menos dispersas, o que indica proximidade dos valores de mínimo e máximo. Pode-se notar, além do exposto, que os valores de tensão no topo do subleito tendem a aumentar conforme a estrutura é mais delgada, indicando que as camadas granulares dispostas acima do subleito absorvem as cargas aplicadas, protegendo a camada inferior, que é o esperado.

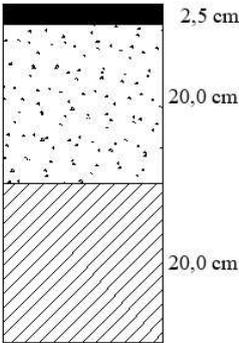
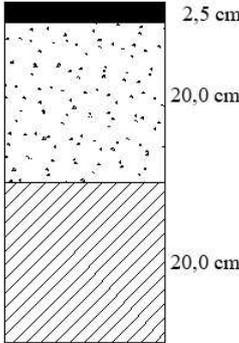
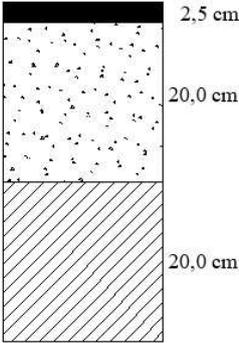
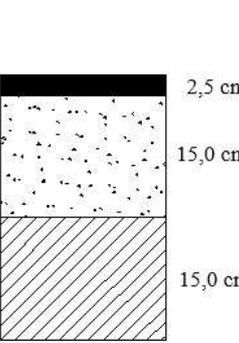
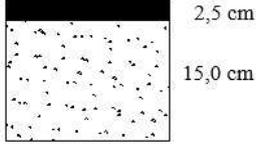
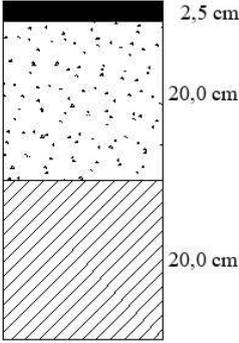
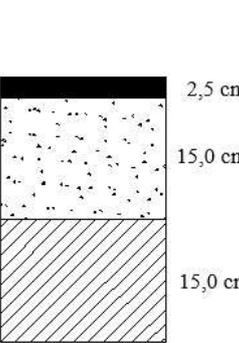
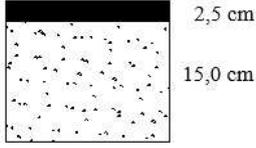
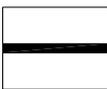
3.3.4 Catálogo de dimensionamento

Considerando os resultados das análises apresentadas no tópico anterior, o Quadro 2 contém um resumo com as possíveis estruturas, para RBVT, dados os diferentes subleitos simulados da RMF, de acordo com o tráfego dado pelo número de repetições do eixo-padrão de 82 tf (Número N). Apesar de todas as estruturas apresentarem DP total abaixo de 20 mm, foram consideradas somente aquelas com DP do subleito inferior a 8 mm. Para essas estruturas, a base e o reforço são compostos dos mesmos materiais apresentados na Tabela 2. De posse do catálogo é possível escolher qualquer uma das três estruturas para cada tipo de subleito (com exceção do G2), levando em consideração os aspectos econômicos apenas, pois do ponto de vista estrutural, todas atendem aos aspectos técnicos de durabilidade para o período de projeto de 10 anos adotado na pesquisa.

Quadro 2 – Catálogo de dimensionamento de RBVT em subleitos ocorrentes na RMF
(continua)

SUBLEITOS	ESTRUTURAS DE ACORDO COM O TRÁFEGO		
	$10^5 < N \leq 10^6$	$10^4 < N \leq 10^5$	$N \leq 10^4$
Areia e Areia Siltosa e Argilosa (A-2-4 e A-2-6) CBR \geq 32% MR (150-241) MPa			

Quadro 2 – Catálogo de dimensionamento de RBVT em subleitos ocorrentes na RMF (conclusão)

SUBLEITOS	ESTRUTURAS DE ACORDO COM O TRÁFEGO		
	$10^5 < N \leq 10^6$	$10^4 < N \leq 10^5$	$N \leq 10^4$
<p>Areia Fina (A-3)</p> <p>CBR \geq 15% MR (106-132) MPa</p>			<p>Não há estrutura que resulte em valores dentro dos limites admissíveis de deformação permanente.</p>
<p>Solos Siltosos (A-4 e A-5)</p> <p>CBR \geq 14% MR (94-268) MPa</p>			
<p>Solos argilosos (A-6)</p> <p>CBR \geq 11% MR (196-260) MPa</p>			
<p><u>TSD:</u></p>  <p>MR = 1500 MPa Coef. de Poisson = 0,25 Densidade = 2,4 g/cm³</p>	<p><u>Base:</u></p>  <p>Solo-brita (Bastos, 2013)</p>	<p><u>Reforço:</u></p>  <p>Solo NA' (Vasconcelos, 2018)</p>	

Fonte: Autora (2024).

3.4 Considerações finais

Neste capítulo foram considerados valores de Módulo de Resiliência (MR) previstos por modelagem (modelo elástico linear) além dos obtidos com a aplicação de ensaio triaxial de carga repetida (modelo elástico não-linear) no dimensionamento de rodovias de baixo volume de tráfego. Para tanto, foram considerados dados obtidos através de modelagens de quatro subleitos típicos da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e três estruturas diferentes foram definidas para simulações. As considerações sobre a análise dos resultados de Deformação Permanente (DP) estão dispostas a seguir.

- a) Subleito G1 (solos A-2-4 e A-2-6): para as três estruturas avaliadas, os valores de DP foram abaixo do valor máximo admissível, sendo a estrutura menos robusta a que apresentou os menores valores. A variação da DP foi praticamente nula com a variação dos valores de MR lineares, apresentando um comportamento gráfico praticamente linear, ou seja, os valores de DP, independente do MR, são praticamente iguais. No caso da DP do subleito houve atendimento ao valor máximo de 8 mm, com baixa variabilidade dos resultados obtidos. Embora os valores de DP considerando o modelo elástico linear tenham sido superiores aos obtidos pelo modelo não-linear para o caso do parâmetro de MR, ainda podem ser adotados para dimensionamento de RBVT com Erro de Previsão (EP) de 66,7%;
- b) Subleito G2 (solo A-3): os resultados de DP obtidos nesse subleito tiveram comportamento diferente dos demais. Por tratar-se de uma areia fina, material sem coesão e com baixos valores de MR, esse solo demandou uma estrutura mais robusta para atender o limite máximo de DP do subleito, tendo obtido valores dentro do limite somente na estrutura (20-20). Também foi possível verificar que com o incremento dos valores de MR maior é a DP. Ao analisar as tensões no topo do subleito, esse solo é o único com comportamento diferente, dentre os estudados, visto que a estrutura (15-15) foi a que apresentou menores valores, fato esperado na estrutura (20-20). O MR previsto teve EP de 40%;
- c) Subleito SA1 (solos A-4 e A-5): esse solo obteve valores de DP reduzidos, sendo a estrutura (15-0) a que apresentou as menores deformações, e quanto maior a espessura da estrutura, os valores calculados foram ligeiramente maiores. Os valores de DP obtidos com a variação do MR linear foram muito próximos, podendo serem considerados iguais. A DP no subleito se manteve dentro do limite máximo, sendo a estrutura (15-15) a que apresentou os

menores valores. Quanto à tensão no topo do subleito, quanto maior a estrutura, menores os valores de tensão. O MR previsto teve EP de 200%;

- d) Subleito SA2 (solo A-6): esse subleito apresentou os menores valores de DP e baixa variabilidade em cada estrutura, independente do MR utilizado. Assim, poderia ser adotada a estrutura mais esbelta (15-0), que se mostrou eficiente em proteger o subleito e reduzir custos de execução. O MR previsto teve EP de 42,1%.

Observou-se, portanto, que os valores de DP encontrados por meio do *software* MeDiNa não sofreram alterações consideráveis conforme são variados os dados de MR. Essa verificação vale para as variações dos modelos lineares obtidos de previsão e não-lineares de MR obtidos de ensaio. Os valores encontrados também atenderam aos limites de DP total de 20 mm e de 8 mm calculado para o subleito, com exceção do subleito G2.

Pode-se concluir que para o dimensionamento das RBVT não há necessidade da realização de muitos ensaios para obtenção dos modelos não-lineares do MR, pois os valores previstos em modelagem são capazes de serem utilizados e resultar nas mesmas estruturas e em valores de DP muito próximos ou até iguais. Vale ressaltar que a análise deste artigo contempla os quatro tipos de solos de subleito mais comuns na RMF e, para serem considerados em outras regiões, análises específicas através de um melhor reconhecimento dos materiais locais precisam ser realizadas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a continuidade das simulações, utilizando modelos de DP de outros solos, além dos presentes no banco de dados do MeDiNa. Também se recomenda essa análise para rodovias de maior volume, em que as condições dos materiais a serem empregados seja controlada e que possam ser produzidos catálogos.

4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO PARA OCORRÊNCIA DE PANELA E REMENDO DE MAIOR FREQUÊNCIA NOS PAVIMENTOS

Para RBVT identificou-se que o defeito panela, bem como a medida mais utilizada para sua correção, o remendo, podem ser classificados de forma categórica ordenada quanto à sua frequência. As informações para essa classificação podem ser obtidas a partir de relatórios do Programa de Contratação, Restauração e Manutenção (CREMA) instituído pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, que apresentam, além dessas informações, dados de outros defeitos, de tráfego e de segmentos homogêneos. Esses dados podem ser utilizados numa análise de regressão logística para avaliar as variáveis dependentes dos defeitos panela e remendo. Este trabalho buscou compreender, a partir das informações constantes nos relatórios citados, quais variáveis explicativas influenciam na probabilidade de categorias mais severas de painéis e remendos em pavimentos de RBVT. Para o defeito panela, identificou-se que as variáveis explicativas significantes em ordem decrescente foram os afundamentos, os trincamentos e o volume médio diário. Para o remendo foram o Número N, o tipo de revestimento da faixa principal e o trincamento (soma das fissuras das classes FC-2 e FC-3). Foram também obtidos os modelos de probabilidade para cada variável explicativa citada e gerados os respectivos gráficos para facilitar a visualização.

4.1 Introdução

Pavimentos rodoviários estão expostos ao clima e ao tráfego, o que afeta o seu desempenho. Dentre os vários defeitos que ocorrem dada essa exposição, podem ser citados as painéis e os remendos, que refletem diretamente na percepção da condição de conforto da superfície por parte dos usuários. A solução desses defeitos figura a lista de ações de manutenção mais realizadas por gestores rodoviários como tapa-buracos, com execução de remendos superficiais e profundos (Greenstein, 1995; Ghosh *et al.*, 2018; Cheng; Hicks; Smith, 2022; WSDoT, 2023).

As painéis refletem um estado de deterioração avançado do pavimento e afetam a segurança dos usuários (Dong; Huang; Zhao, 2013; Dong; Dong; Huang, 2015; Saeed *et al.*, 2015; Cheng; Hicks; Smith, 2022; Abed *et al.*, 2023), danificam veículos e geram impactos ambientais pelo elevado consumo de combustível (Atkins, 2021). As painéis se desenvolvem a partir do desprendimento de material da camada de revestimento (DNIT, 2006a), e esse

processo pode ocorrer devido a fatores construtivos, de exposição ou pela evolução de outros defeitos, principalmente o trincamento que facilita o ingresso de água na estrutura (Ghosh *et al.*, 2018).

O remendo é um dos métodos de reabilitação mais adotados para sanar as panelas, trincamento e afundamentos, podendo ser aplicados isoladamente ou como método de preparação da superfície que receberá uma camada de algum tratamento superficial (Cheng; Hicks; Smith, 2022). Os remendos são influenciados pelo tráfego, clima, materiais, equipamentos e métodos executivos empregados (Caltrans, 2008; Mcdaniel *et al.*, 2014; Cheng; Hicks; Smith, 2022). Podem ser executados com o simples preenchimento da área afetada (remendo superficial), ou com um recorte de uma área mais ampla seguido do seu preenchimento (remendo profundo) (DNIT, 2003d). Vale destacar que os remendos são defeitos introduzidos nos pavimentos pelos órgãos gestores para sanar outras falhas.

É importante evitar a ocorrência de panelas, e consequentemente de remendos, porém, se identificados, devem ser resolvidos. Para esse controle são necessários levantamentos sistemáticos no intuito de gerenciamento da malha rodoviária. Como são onerosos em tempo e custo, os levantamentos não são realizados adequadamente em todos os segmentos da rede, sendo monitorados de forma mais ostensiva somente naqueles considerados mais importantes, seja pelos volumes de tráfego identificados ou por escolha dos gestores. Para minimizar os problemas advindos do gerenciamento inadequado, a compreensão da ocorrência dos defeitos é importante, com intuito de identificar os trechos em que são necessários levantamentos completos e ações de manutenção e reabilitação (M&R).

No Brasil, o Programa de Contratação, Restauração e Manutenção (CREMA) prevê a recuperação de pavimentos com a integração dos serviços de manutenção de pavimentos e conservação da faixa de domínio (DNIT, 2012). Esse programa gera relatórios com a condição da rodovia à época dos levantamentos e indicação dos serviços a serem realizados. Dentre as informações de levantamentos disponibilizadas nos documentos podem ser citados: volume de tráfego e estimativa do Número N, deflexão, largura e revestimento da pista e dos acostamentos, identificação e quantificação de defeitos para o cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG) e do Índice de Estado de Superfície (IES).

Uma das formas que pesquisadores têm buscado identificar a ocorrência de defeitos nos pavimentos rodoviários é por meio da realização de estudos para sua previsão, minimizando os custos dos levantamentos. Biswas, Hashemian e Bayat (2018) avaliaram panelas classificadas como moderadas a altamente severas (média de 84%) no Canadá, sendo as principais causas identificadas: ciclo gelo-degelo, tráfego, drenagem deficiente, idade do

pavimento, tipo de solo do subleito, nível do lençol freático, reabilitação tardia de afundamentos, precipitação, mistura asfáltica, reparo inapropriado e práticas de manutenção.

Lee, Le e Kim (2023) estudaram a previsão de panelas em rodovias urbanas de Seul com a aplicação de *machine learning* para obter informações mais precisas, com base no clima, no volume de tráfego e em levantamentos anteriores. Abed *et al.* (2023) desenvolveram uma ferramenta para prever a quantidade de panelas com base na condição da rede, considerando o afundamento, trincamento, macrotextura, geometria e um Índice de Condição da Rodovia (RCI – *Road Condition Index*) utilizando análise espacial. Outros estudos apresentam os mesmos parâmetros explicativos citados anteriormente para a ocorrência de panelas e seu agravamento, principalmente a infiltração de água, tráfego, deficiência de drenagem e dos materiais das camadas da estrutura, trincamento e outros defeitos que permitem a entrada de água (Wilson; Romine, 1999; Thom, 2008; Dong; Huang; Zhao, 2013; Atkins, 2021).

Dong, Dong e Huang (2015) utilizaram três métodos estatísticos (regressão logística binária, árvore de decisão e regressão e análise de sobrevivência) para avaliar a influência dos parâmetros velocidade, comprimento, largura, volume médio diário anual, períodos de gelo, clima e materiais da estrutura no nível de serviço de remendos. Saeed *et al.* (2015) identificaram que as principais causas de falhas nos remendos realizados são penetração de água, baixa adesividade entre o remendo e a estrutura existente, compactação inadequada e baixa qualidade dos materiais empregados.

A compreensão do mecanismo de ocorrência do defeito é de extrema importância para um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), uma vez que permite entender quais parâmetros influenciam na severidade das rodovias. Khahro (2022), por exemplo, avaliou o grau de importância dos defeitos em pavimentos flexíveis no Paquistão para sua compreensão, e utilizou essas informações para propor um SGP de baixo custo.

Dentre os métodos estatísticos possíveis para compreender e/ou estimar defeitos em pavimentos pode ser citada a Regressão Logística Ordinal, que é utilizada quando a variável dependente é ordenada com uma escala conhecida. Nesse método, a estimativa é calculada com base nas probabilidades de ocorrência das categorias, estimando somente valores discretos na faixa correspondente à escala. Por sua vez, o método dos mínimos quadrados ordinários pode não ser adequado uma vez que não estima probabilidades, e as premissas de análise não são atendidas.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo compreender, a partir dos dados disponíveis nos relatórios do Programa CREMA, quais variáveis explicativas influenciam na probabilidade de categorias mais severas de panelas e remendos em pavimentos de RBVT. Para

tanto, serão considerados os segmentos de rodovias de baixo volume de tráfego (Número $N \leq 10^6$) e/ou com tratamento superficial por penetração como revestimento principal.

4.2 Método

O modelo de escolha qualitativa do tipo Regressão Logística Ordinal foi selecionado para a avaliação da frequência dos defeitos panela e remendo, por se tratarem de variáveis com escala categórica organizada ordenadamente (baixo, médio e alto). Para tanto, foram definidas as seguintes etapas para este trabalho: (i) caracterização das informações e definição das categorias de referência das variáveis categóricas nominais; (ii) verificação dos pressupostos do modelo de regressão logística ordenada; (iii) construção dos modelos pelo método *stepwise* e avaliação da qualidade de ajuste; (iv) utilização das taxas de chances (*Odds Ratio* - OR) para explicar a influência dos parâmetros; e (v) representação gráfica das probabilidades de ocorrência dos defeitos nas categorias. Para as análises deste trabalho, foram utilizados os *softwares* R (pacote MASS, versão 7.3-58.1) e Gretl (versão 2019c).

4.2.1 Caracterização das informações

Foram coletadas informações de relatórios de rodovias federais do Programa CREMA. Os trechos selecionados são aqueles que, ou possuem algum revestimento delgado como camada principal na pista de rolamento como o Tratamento Superficial por Penetração, ou que têm Número N igual ou inferior a 10^6 , limite que, segundo Bernucci (1995) e DNIT (2006b) delimitam as rodovias de baixo volume de tráfego. Para este trabalho, considerou-se que um Número N superior a 10^6 contém as rodovias de tráfego médio e alto.

Para a aplicação do modelo de regressão logística é necessário que sejam identificados os parâmetros explicativos da variável dependente. O Quadro 3 apresenta os parâmetros disponíveis dos relatórios que serão avaliados como variáveis explicativas quanto ao atendimento dos pressupostos e significância.

Quadro 3 – Variáveis consideradas na análise (continua)

Variáveis	Tipos	Códigos	Categorias
Variável dependente Panela	Categórica ordenada	P_Cat	0 para Baixo (< 2/km) 1 para Médio (entre 2 e 5/km) 2 para Alto (> 5/km)

Quadro 3 – Variáveis consideradas na análise (conclusão)

Variáveis	Tipos	Códigos	Categorias
Variável dependente Remendo	Categórica ordenada	R_Cat	0 para Baixo (< 2/km) 1 para Médio (entre 2 e 5/km) 2 para Alto (> 5/km)
Volume Médio Diário de veículos comerciais (VMDc)	Numérica	VMDc	-
Volume Médio Diário (VMD)	Numérica	VMD	-
Número N (USACE)	Categórica	N	0 para tráfego baixo ($N \leq 10^6$) 1 para tráfego médio/alto ($N > 10^6$)
Tipo de revestimento da pista principal (RPP)	Categórica	Revest	0 para revestimento em Concreto Asfáltico (CA) 1 para revestimento em Tratamento Superficial Duplo (TSD) 2 para revestimento em Microrrevestimento (Micro)
Tipo de acostamento	Categórica	Acost	0 para revestimento em tratamento superficial por penetração (TSP) e reperfilamento (REP) 1 para acostamentos sem revestimento 2 para locais em que não há acostamento
Largura da faixa de rolamento (m)	Numérica	Lfaixa	-
Largura do acostamento (m)	Numérica	Lacost	-
Panelas (%)	Numérica	Pan	-
Remendos (%)	Numérica	Rem	-
Trincamento (%) (soma das fissuras classes FC-2 e FC-3)	Numérica	Trinc	-
Afundamento Plástico Local (ALP) e na trilha de roda (ATP) (%)	Numérica	Afund	-
Ondulações (%)	Numérica	Ond	-
Flecha (mm) (do afundamento de trilha de roda)	Numérica	Fl	-
Deflexão média ($\times 10^{-2}$ mm)	Numérica	Df	-

Fonte: Autora (2024).

Os defeitos panela e remendo, fornecidos pelo levantamento em formato numérico, foram categorizados conforme escala de frequência definida em DNIT (2022) (apresentado na coluna de “categorias”). Das variáveis nominais, foram agregados em uma única categoria os revestimentos do acostamento do tipo TSP (TSS e TSD) e reperfilamento. As variáveis panela,

remendo, trincamento, afundamento e ondulação no formato numérico foram avaliadas considerando sua frequência relativa (%) conforme fornecido pelos relatórios.

Foram considerados como limite para classificar a rodovia como de baixo volume de tráfego os valores de 1.500 veículos para o VMD e de 600 veículos comerciais para o VMDc (DERSP, 2012), caso alguma dessas variáveis seja significativa nos modelos (esses valores serão, nesses casos, considerados nas escalas dos gráficos de probabilidade). Na etapa de resultados serão apresentadas as informações descritivas para conhecimento dos dados.

4.2.2 Verificação dos pressupostos dos modelos de regressão logística ordinal

Os modelos logit ordenados apresentam alguns pressupostos para as variáveis que precisam ser respeitados para sua aplicação, conforme apresentados a seguir. Quando a premissa for avaliada por verificação teórica, significa que não há um teste estatístico.

- a) A variável dependente deve ser nominal e com categorias mutuamente exclusivas: verificação teórica;
- b) As categorias da variável dependente devem ser mutuamente exclusivas: o mesmo segmento não pode possuir duas categorias diferentes do mesmo defeito – verificação teórica;
- c) A amostra deve ser independente (sem repetições): verificação teórica;
- d) O modelo deve possuir uma ou mais variáveis independentes (explicativas) que sejam numéricas, categóricas ou ordinais: verificação teórica;
- e) As variáveis explicativas não devem apresentar multicolinearidade: essa premissa será conferida pela matriz de correlação e pelo fator de inflação da variância que será brevemente descrito a seguir.

Demanda-se uma ausência de multicolinearidade entre as variáveis explicativas, que é a indicação de alta correlação entre as variáveis independentes (Freund; Wilson; Sa, 2006). A matriz de correlação entre as variáveis é uma forma inicial de identificar aquelas que, se incluídas no mesmo modelo, podem gerar multicolinearidade e acarretar problemas de estimação. Todavia, a matriz é adequada somente para avaliar as variáveis numéricas.

Um método que permite verificar essa ausência quando se dispõe de variáveis explicativas nominais e numéricas, é o Fator de Inflação da Variância (*Variance Inflation Factor* – VIF), que representa o incremento da variância devido à presença de multicolinearidade (Equação 3). Também será apresentada uma matriz de correlação para visualização das variáveis numéricas.

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (3)$$

Em que R^2 é o coeficiente de determinação entre as variáveis independentes analisadas. Os valores de VIF entre 5 e 10 indicam correlação moderada, enquanto valores superiores a 10 indicam altas correlações (James *et al.*, 2013). Neste trabalho foi considerado que valores de VIF superiores a 10,0 podem afetar na estimação dos coeficientes.

4.2.3 Construção e desempenho dos modelos

Para avaliar os parâmetros estimados foi adotado um nível de significância de 0,10, para não restringir as variáveis explicativas disponíveis. Modelos iniciais foram criados para teste, sendo pelo menos um para cada variável dependente e, caso existam variáveis explicativas não significativas, essas foram excluídas para geração de outros modelos (método *stepwise*).

Na aplicação de um modelo logit ordenado, uma categoria das variáveis ordenadas é indicada como referência (indicada como zero no Quadro 3) e então as demais são avaliadas com relação a essa. Além das variáveis em si, também são fornecidos os interceptos das categorias, os cutoffs, que correspondem aos limites de uma categoria para a outra. Desse modo, são obtidos (M-1) valores de *cutoffs*, sendo M a quantidade de categorias das variáveis dependentes.

Após identificar as variáveis que podem ser incorporadas no modelo sem originar problemas de estimação, deve-se avaliar a premissa de que o modelo possua chances proporcionais (*proportional odds* ou *parallel lines*). Essa premissa é avaliada pelo teste estatístico de Brant-Wald (Brant, 1990), em que não se deve rejeitar a hipótese nula (H_0 é que o modelo tem chances proporcionais) para que o modelo logit ordenado seja considerado válido.

Para avaliar o desempenho dos modelos testados, foram utilizados os parâmetros listados a seguir. É importante ressaltar que esses valores são úteis para comparação com aqueles obtidos por outros métodos de modelagem.

- a) Log da máxima verossimilhança;
- b) Casos preditos corretamente (em quantidade e em percentual);
- c) Critério de Informação de Akaike (*Akaike Information Criterion* - AIC);
- d) Critério de Informação Bayesiana (*Bayesian Information Criterion* - BIC).

É preferível que valores do log da máxima verossimilhança e de casos preditos corretamente sejam mais elevados, sendo o percentual de casos preditos corretamente correspondente a um índice similar ao coeficiente de determinação dos modelos de regressão tradicionais, que não é utilizado no logit ordenado. No caso do AIC e BIC, o ideal são valores mais baixos, representando modelos de melhor estimação. Esses parâmetros foram utilizados para efeito comparativo entre os modelos obtidos dos defeitos panela e remendo categóricos.

4.2.4 Odds ratio e intervalos de confiança

A *odds ratio* (OR) refere-se a uma forma de compreender adequadamente as informações obtidas de uma regressão logística. A OR apresenta as chances de um resultado ocorrer dada uma exposição específica, quando comparada às chances na ausência dessa exposição (Szumilas, 2010), e pode ser obtida pela exponencial do coeficiente das “*i*” variáveis explicativas (β_i), conforme Equação (4).

$$OR = e^{\beta_i} \quad (4)$$

Os valores de *odds ratio*, quando a variável dependente é exposta à variável explicativa significativa podem ser:

- a) OR = 1: a exposição não afeta a ocorrência do resultado;
- b) OR < 1: a exposição reduz as chances de ocorrência do resultado; e
- c) OR > 1: a exposição aumenta as chances de ocorrência do resultado.

Juntamente à OR, é comum apresentar o intervalo de confiança (IC), geralmente a 95%, que representa a precisão da taxa de chances. Para a análise, se deve verificar se o IC não compreende o valor unitário, já que OR = 1 não afeta na ocorrência do resultado. Além disso, IC de maior amplitude reflete menor precisão, enquanto os menores intervalos significam melhor precisão da OR.

4.2.5 Representação gráfica das probabilidades de ocorrência das categorias avaliadas

Gráficos de probabilidade foram elaborados para a ocorrência das categorias baixo, médio e alto de cada defeito. Para tanto, foi considerada cada variável explicativa separadamente, mantendo as demais fixas. Para a construção desses gráficos foram utilizados

os modelos de probabilidades obtidos a partir da análise de significância das variáveis explicativas, elaborados a partir da Equação (5) (Gujarati, 2015).

$$P(Y \leq j | x_i) = \frac{\exp(a_j - \sum x_i * \beta_i)}{1 + \exp(a_j - \sum x_i * \beta_i)} \quad (5)$$

Em que,

$P(Y \leq j | x_i)$ é a probabilidade da variável dependente assumir a categoria j dadas as variáveis explicativas (x_i);

\exp refere-se à função exponencial;

a_j refere-se ao *cutoff* da categoria j ;

x_i são as i variáveis explicativas; e

β_i são os i coeficientes correspondentes às variáveis explicativas.

4.3 Resultados

4.3.1 Caracterização dos dados utilizados na análise

Foram coletados 386 segmentos homogêneos dos relatórios CREMA que atendiam às restrições descritas anteriormente. A maior parte desses segmentos está localizada no estado do Piauí (121), seguido pelo Ceará (71), Rio Grande do Sul (62), Mato Grosso (56), Bahia (31), Paraíba (23) e Minas Gerais (19). A Tabela 5 apresenta um resumo descritivo das informações numéricas que foram incorporadas na análise do modelo de regressão logística com medidas centrais e de dispersão, em que o desvio padrão e o coeficiente de variação foram representados pelas siglas DP e cv, respectivamente.

Tabela 5 – Resumo descritivo dos dados numéricos coletados (continua)

Parâmetros	Média	Mediana	DP	Mínimo	Máximo	cv
Panela (%)	18,67	0,00	33,95	0,00	100,00	1,82
Remendo (%)	21,65	0,00	35,14	0,00	100,00	1,62
VMD	1926	1833	1117	265	4815	0,58
VMDc	659	831	410	51	1375	0,62
Número N	2,35E+06	1,30E+06	2,60E+06	2,40E+05	1,30E+07	1,10
Lfaixa (m)	7,03	7,00	0,48	3,50	14,00	0,07
Lacost (m)	1,94	2,50	0,96	0,00	3,50	0,49

Tabela 5 – Resumo descritivo dos dados numéricos coletados (conclusão)

Parâmetros	Média	Mediana	DP	Mínimo	Máximo	cv
Trincamento (%)	15,70	0,00	29,30	0,00	100,00	1,87
ALP+ATP (%)	9,25	0,00	21,05	0,00	100,00	2,27
Ondulação (%)	13,25	0,00	22,08	0,00	100,00	1,67
Flecha (mm)	2,26	2,00	1,81	0,00	12,00	0,80
Deflexão ($\times 10^{-2}$ mm)	38,90	38,70	26,66	0,00	146,20	0,68

Fonte: Autora (2024).

A partir da Tabela 5, pode-se verificar que os coeficientes de variação (cv) dos defeitos panela, remendo, trincamento, afundamentos e ondulação são elevados, todos com valores acima de 1, indicando que há alta variação em torno da média, quando comparados às demais variáveis. Dos parâmetros de tráfego, somente o Número N apresenta essa elevada variabilidade quando comparado ao VMD e VMDc. A largura máxima de faixa de rolamento (14 m) se refere a um segmento homogêneo em que foram avaliados os dois sentidos simultaneamente.

4.3.2 Verificação dos pressupostos

As variáveis dependentes Panela e Remendo possuem 3 categorias: baixo, médio e alto. Essas informações são mutuamente exclusivas, uma vez que cada elemento do banco de dados é um segmento homogêneo diferente de rodovia e, portanto, não há repetições. Para a verificação de independência das informações, foi gerada uma tabela cruzada (Tabela 6) somente com as variáveis explicativas categóricas que auxilia na visualização desse pressuposto, considerando a variável revestimento da faixa principal como referência, para facilitar a organização.

Tabela 6 – Tabela de contingência das informações categóricas do revestimento da faixa principal (continua)

Variáveis	Categorias	CA	TSD	Micro	Total
Panela	Baixo	90	135	71	296
	Médio	2	23	41	66
	Alto	14	9	1	24
Remendo	Baixo	92	128	36	256
	Médio	5	41	14	60
	Alto	9	30	31	70

Tabela 6 – Tabela de contingência das informações categóricas do revestimento da faixa principal (conclusão)

Variáveis	Categorias	CA	TSD	Micro	Total
Número N	Baixo	89	73	0	162
	Médio/Alto	17	126	81	224
Tipo de acostamento	Pavimentado	90	164	64	318
	Sem revestimento	15	1	0	16
	Sem acostamento	1	34	17	52

Fonte: Autora (2024).

Uma das formas de identificar a independência das informações contidas na Tabela 6 é verificar que, para cada par de variáveis cruzadas, ao somar os quantitativos por categorias, o resultado deve ser o mesmo que o total de informações analisadas, neste caso de 386. Por sua vez, para a verificação da existência de multicolinearidade, a Tabela 7 apresenta uma matriz de correlação considerando somente os parâmetros com informações numéricas.

Tabela 7 – Matriz de correlação com as variáveis explicativas numéricas

Panela	Remendo	Trincamento	VMD	VMDc	Número N	Lfaixa	Lacost	ALP+ATP	Ondulação	Flecha	Deflexão	
1,00	0,73	0,38	0,29	0,30	0,43	0,07	0,02	0,20	-0,01	0,15	0,40	Panela
	1,00	0,35	0,20	0,51	0,40	0,20	0,04	-0,01	-0,15	0,15	0,25	Remendo
		1,00	0,26	0,16	0,17	-0,06	-0,27	0,18	-0,09	0,34	0,13	Trincamento
			1,00	0,55	0,64	0,11	-0,31	0,21	-0,19	0,43	0,34	VMD
				1,00	0,67	0,25	-0,09	-0,14	-0,31	0,17	0,15	VMDc
					1,00	0,14	-0,37	-0,01	-0,29	0,26	0,36	Número N
						1,00	0,00	-0,03	-0,07	0,05	0,05	Lfaixa
							1,00	-0,03	0,19	-0,27	0,01	Lacost
								1,00	0,55	0,19	0,41	ALP+ATP
									1,00	0,00	0,16	Ondulação
										1,00	0,22	Flecha
											1,00	Deflexão

Fonte: Autora (2024).

Dados os coeficientes da Tabela 7, nota-se que as variáveis relativas ao tráfego (VMD, VMDc e N) apresentam correlação, embora com valores não tão elevados. Contudo, como o VMDc e o VMD são utilizados no cálculo do Número N, o ideal é que não sejam inseridas simultaneamente em um modelo. Também existe uma correlação entre as variáveis Panela e Remendo (0,73). Das demais variáveis numéricas, não há indicação de forte correlação, indicando que todas podem ser utilizadas para verificação de significância.

Como o intuito é analisar o impacto dessas variáveis nos defeitos Panela e Remendo, o ideal é que sejam adotados os parâmetros que tenham apresentado um coeficiente de correlação superior a 0,20. A Tabela 8 apresenta os valores de VIF calculados para os conjuntos de informações (numéricas e categóricas), não englobando aquelas que apresentaram baixa correlação com as variáveis dependentes. Quanto às variáveis de tráfego, para o defeito Panela será incorporado o VMD, e para o defeito Remendo será incorporado o Número N.

Tabela 8 – Valores do VIF obtidos da análise das variáveis explicativas

Variáveis Explicativas	VIF _{Panela}	VIF _{Remendo}
Panela (%)	-	2,81
Remendo (%)	2,23	-
VMD	3,50	-
Número N	-	4,99
Lfaixa (m)	-	4,42
Revestimento da faixa principal	2,15	2,40
Tipo de acostamento	1,63	1,75
ALP+ATP (%)	2,42	-
Ondulação (%)	-	2,41
Trincamento (%)	2,23	2,48
Flecha (mm)	2,23	2,28
Deflexão ($\times 10^{-2}$ mm)	1,02	1,03

Fonte: Autora (2024).

Os valores de VIF apresentados na Tabela 8 são inferiores a 10, o que indica que os conjuntos de parâmetros podem ser utilizados em modelos sem ocasionar problemas de estimação. Assim, foram avaliadas a significância e as chances proporcionais para definição dos modelos dos defeitos Panela e Remendo.

4.3.3 Construção dos modelos de regressão logística ordinal

Foram construídos modelos para cada uma das variáveis dependentes em estudo, incorporando inicialmente as variáveis explicativas que geraram modelos com chances proporcionais. As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados dos coeficientes, dos erros padrão e dos p-valores das variáveis explicativas significativas (considerando um nível de significância de 0,05) das variáveis dependentes categóricas Painela e Remendo, respectivamente.

Tabela 9 – Significância dos parâmetros do modelo logit ordenado para Painela

Parâmetros	Coefficientes	Erros padrão	p-valores
Afundamento Plástico (%)	0,032	0,005	0,000
Trincamento (FC-2 + FC-3) (%)	0,022	0,004	0,000
VMD	0,001	0,000	0,000
Baixo Médio	3,352	0,383	0,000
Médio Alto	4,237	0,430	0,000

Fonte: Autora (2024).

Da Tabela 9, verifica-se que as variáveis explicativas significantes que atenderam ao pressuposto de chances proporcionais para a Painela foram o afundamento plástico local e na trilha de roda (ALP + ATP), o trincamento (soma das fissuras classe FC-2 e FC-3) e o volume médio diário (VMD). Todos os coeficientes foram positivos, indicando que com o acréscimo de uma unidade de cada variável individualmente, mantendo as demais constantes, há aumento da possibilidade de categorias mais severas de painela.

Tabela 10 – Significância dos parâmetros do modelo logit ordenado para Remendo

Parâmetros	Coefficientes	Erros padrão	p-valores
Número N (formato binário)	0,554	0,282	0,049
Revestimento faixa principal	0,523	0,224	0,020
Trincamento (FC-2 + FC-3) (%)	0,039	0,005	0,000
Baixo Médio	2,138	0,229	0,000
Médio Alto	3,350	0,226	0,000

Fonte: Autora (2024).

Quanto à variável dependente Remendo, Tabela 10, as variáveis explicativas significantes que atenderam ao pressuposto de chances proporcionais foram o Número N (no formato binário), o tipo de revestimento da faixa principal e o trincamento (soma das fissuras

classe FC-2 e FC-3). Todos os coeficientes foram positivos, sendo a variável Número N a que mais contribui para categorias mais elevadas do Remendo. A Tabela 11 apresenta os parâmetros de desempenho dos modelos avaliados.

Tabela 11 – Parâmetros de desempenho dos modelos de regressão logística das variáveis dependentes categóricas ordenadas

Parâmetros	Panela	Remendo
Log máxima verossimilhança	-205,184	-267,063
Critério de Informação de Akaike (AIC)	420,369	544,126
Critério de Informação Bayesiana (BIC)	440,148	563,905
Casos preditos corretamente	319 (82,4%)	288 (74,6%)
Teste da razão de verossimilhança:	157,635	164,657
Qui-quadrado (p-valor)	(0,000)	(0,000)

Fonte: Autora (2024).

Pela Tabela 11, de forma comparativa, os parâmetros de desempenho (log da máxima verossimilhança, AIC, BIC e casos preditos corretamente) foram melhores para a variável dependente Panela. Entretanto, como são variáveis diferentes, essa avaliação só pode aferir que o modelo proposto para a análise do defeito Panela em formato categórico é o mais bem ajustado. O modelo para compreender a frequência do Remendo é adequado uma vez que o teste da razão de verossimilhança foi significativo.

4.3.4 Odds ratio e intervalos de confiança

Neste tópico são discutidos os valores de *odds ratio* (OR) dos modelos obtidos para os defeitos analisados. As Tabelas 12 e 13 apresentam os valores de OR e dos intervalos de confiança (IC) para as variáveis dependentes Panela e Remendo, respectivamente.

Tabela 12 – *Odds ratio* e intervalo de confiança da variável dependente Panela

Variáveis Explicativas	OR	IC
ALP + ATP (%)	1,032	1,022 - 1,042
Trincamento (%)	1,022	1,014 - 1,030
VMD	1,001	1,001 - 1,001

Fonte: Autora (2024).

Para a variável dependente *Panela* (Tabela 12), quando o VMD aumenta, a chance de ocorrência de categorias mais elevadas de *panela* é 1,001 vezes superior. Mesmo com esse impacto baixo, o VMD será mantido no modelo, já que o IC não contém o valor da unidade. Por sua vez, a soma dos afundamentos mais elevada aumenta a chance de ocorrência de *panelas* em categorias superiores em 3,2%, enquanto o trincamento amplia em 2,2%. Os intervalos de confiança dessas duas últimas variáveis explicativas estão adequados, ou seja, a incorporação das duas é relevante no modelo.

Tabela 13 – *Odds ratio* e intervalo de confiança da variável dependente *Remendo*

Variáveis Explicativas	OR	IC
Número N (formato binário)	1,741	1,002 - 3,025
Revestimento da faixa principal	1,687	1,087 - 2,618
Trincamento (%)	1,039	1,030 - 1,049

Fonte: Autora (2024).

No caso da variável dependente *Remendo* (Tabela 13), o revestimento da faixa de rolamento principal do tipo TSD ou a existência de microrrevestimento aumenta a chance de remendos em maiores categorias em 1,687 vezes, quando comparado aos casos em que é do tipo CA. Por sua vez, o Número N do tipo “Médio/Alto” aumenta a taxa de chances de ocorrência de categorias mais elevadas em 1,741 vezes, ou 74,1%, quando comparado ao Número N “Baixo”. Por fim, a existência de percentuais de trincamento mais elevados aumenta em 2,1% as chances de remendos de categorias mais severas. Os valores de intervalo de confiança das três variáveis explicativas são adequados e refletem a importância das variáveis no modelo logit ordenado definido.

4.3.5 Representação gráfica das probabilidades

As equações 6 a 11 apresentam o cálculo das probabilidades de ocorrência das categorias baixo, médio e alto, respectivamente, para as variáveis dependentes categóricas ordenadas *Panela* e *Remendo*. Os gráficos de probabilidade dos defeitos analisados como variável dependente são apresentados nos tópicos subsequentes.

$$P(\text{Panela} = \text{Baixo}|x) = \frac{e^{3,352-0,032*Afund-0,022*Trinc-0,001*VMD}}{1 + e^{3,352-0,032*Afund-0,022*Trinc-0,001*VMD}} \quad (6)$$

$$P(\text{Panela} = \text{M\u00e9dio}|x) = \frac{e^{4,237-0,032*Afund-0,022*Trinc-0,001*VMD}}{1 + e^{4,237-0,032*Afund-0,022*Trinc-0,001*VMD}} - (\text{Eq. 6}) \quad (7)$$

$$P(\text{Panela} = \text{Alto}|x) = 1 - (\text{Eq. 6}) - (\text{Eq. 7}) \quad (8)$$

$$P(\text{Remendo} = \text{Baixo}|x) = \frac{e^{2,138-0,554*N_{Bin}-0,523*Revest-0,039*Trinc}}{1 + e^{2,138-0,554*N_{Bin}-0,523*Revest-0,039*Trinc}} \quad (9)$$

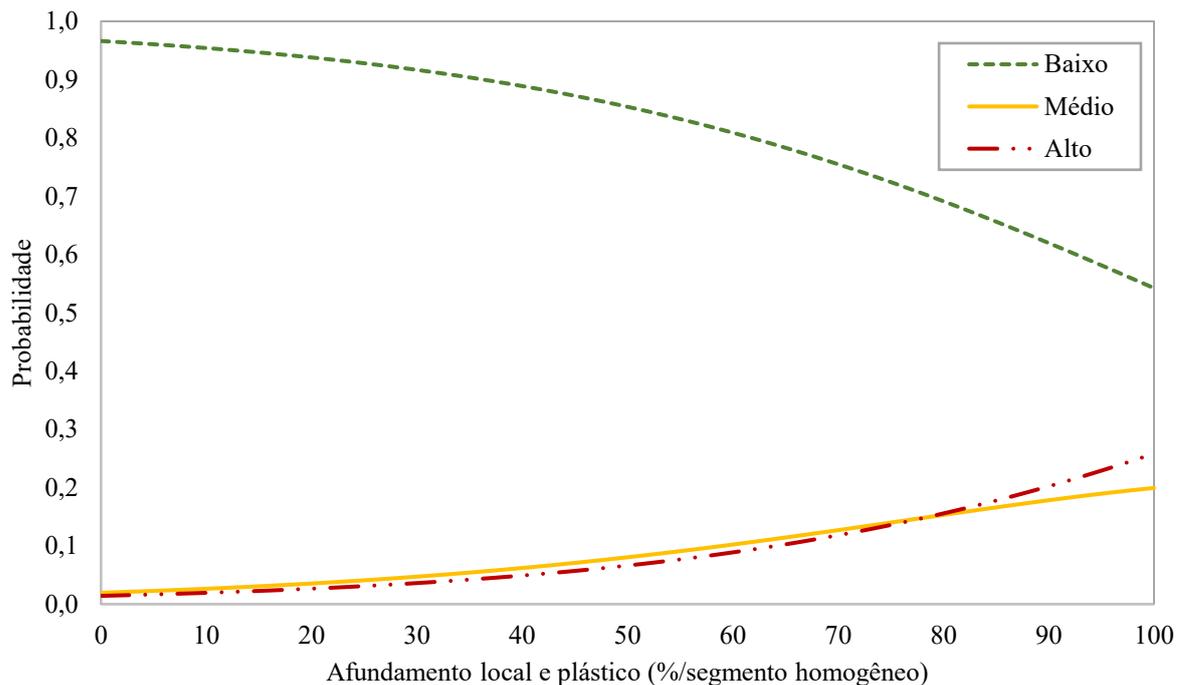
$$P(\text{Remendo} = \text{M\u00e9dio}|x) = \frac{e^{3,350-0,554*N_{Bin}-0,523*Revest-0,039*Trinc}}{1 + e^{3,350-0,554*N_{Bin}-0,523*Revest-0,039*Trinc}} - (\text{Eq. 9}) \quad (10)$$

$$P(\text{Remendo} = \text{Alto}|x) = 1 - (\text{Eq. 9}) - (\text{Eq. 10}) \quad (11)$$

4.3.5.1. Probabilidade de ocorr\u00eancia das categorias do defeito *Panela*

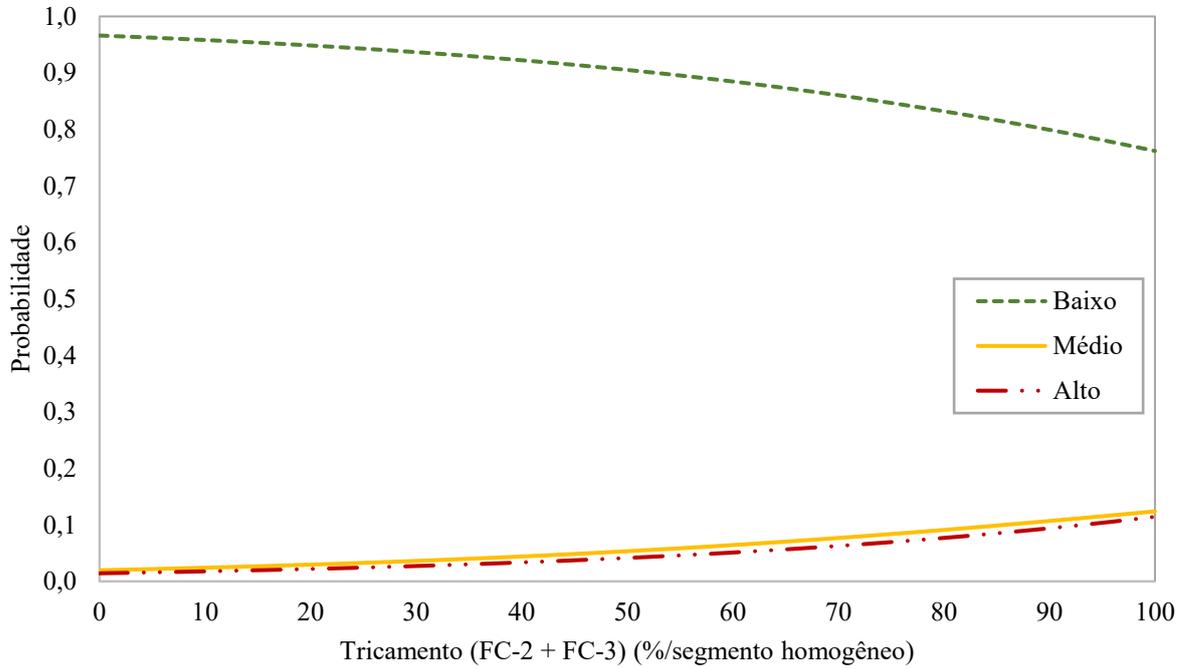
As figuras 16, 17 e 18 apresentam os gr\u00e1ficos das probabilidades de ocorr\u00eancia das categorias baixo, m\u00e9dio e alto do defeito *Panela*, considerando as vari\u00e1veis explicativas significantes: percentual de afundamento (local e pl\u00e1stico), percentual de trincamento (soma das fissuras classe FC-2 e FC-3) e volume m\u00e9dio di\u00e1rio (VMD), respectivamente.

Figura 16 – Probabilidades de ocorr\u00eancia das categorias do defeito *panela* a partir do percentual de afundamento (local e pl\u00e1stico)



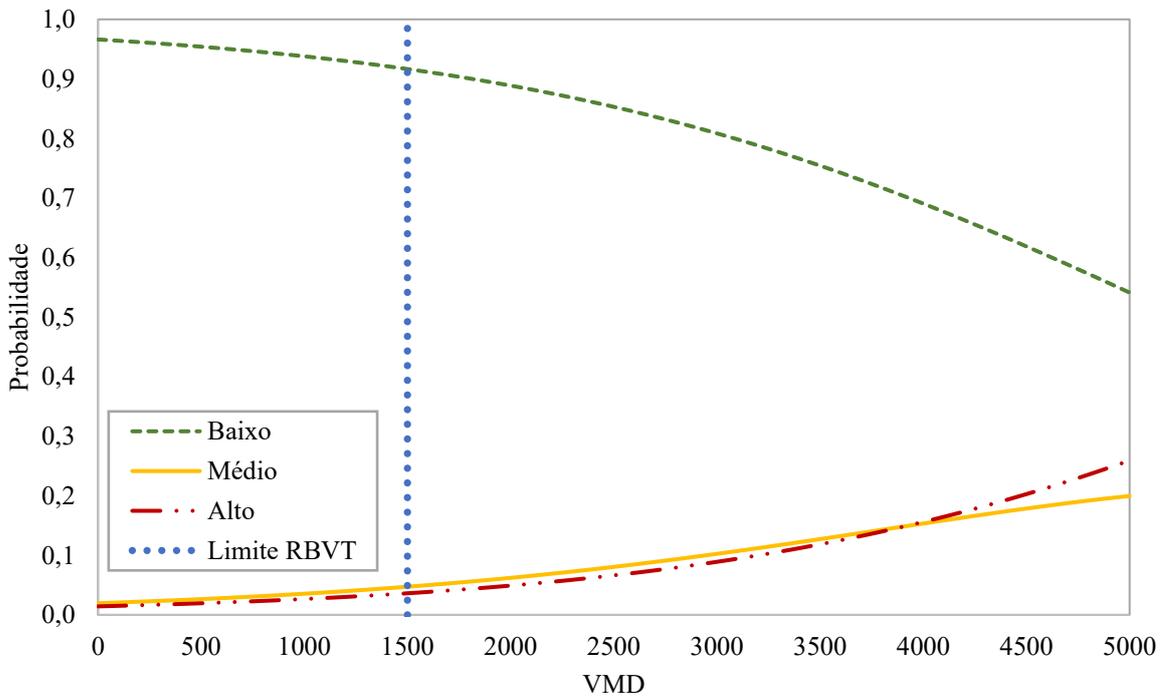
Fonte: Autora (2024).

Figura 17 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito panela a partir do percentual de trincamento



Fonte: Autora (2024).

Figura 18 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito panela a partir do Volume Médio Diário (VMD)



Fonte: Autora (2024).

Pela Figura 16 se pode visualizar que a probabilidade de ocorrência de panelas da categoria “Alto” vai de quase 0% a cerca de 26% quando há incremento nos percentuais de afundamento. Já a probabilidade de ocorrência de panelas na categoria baixo decresce de 97% para cerca de 54% com o aumento dos percentuais de afundamento. Para a ocorrência da categoria “Médio” de panelas, conforme há incremento no percentual de afundamentos, a variação é de 2% a 20%.

Da Figura 17, a probabilidade de ocorrência de panelas na categoria mais elevada aumenta de pouco mais de 0% para cerca de 11% quando o percentual de trincamento é o valor máximo. O contrário acontece com a probabilidade de ocorrer a categoria baixa de panelas, que decresce de 97% para aproximadamente 76%. Para a ocorrência da categoria médio, o comportamento é similar ao da categorial alto.

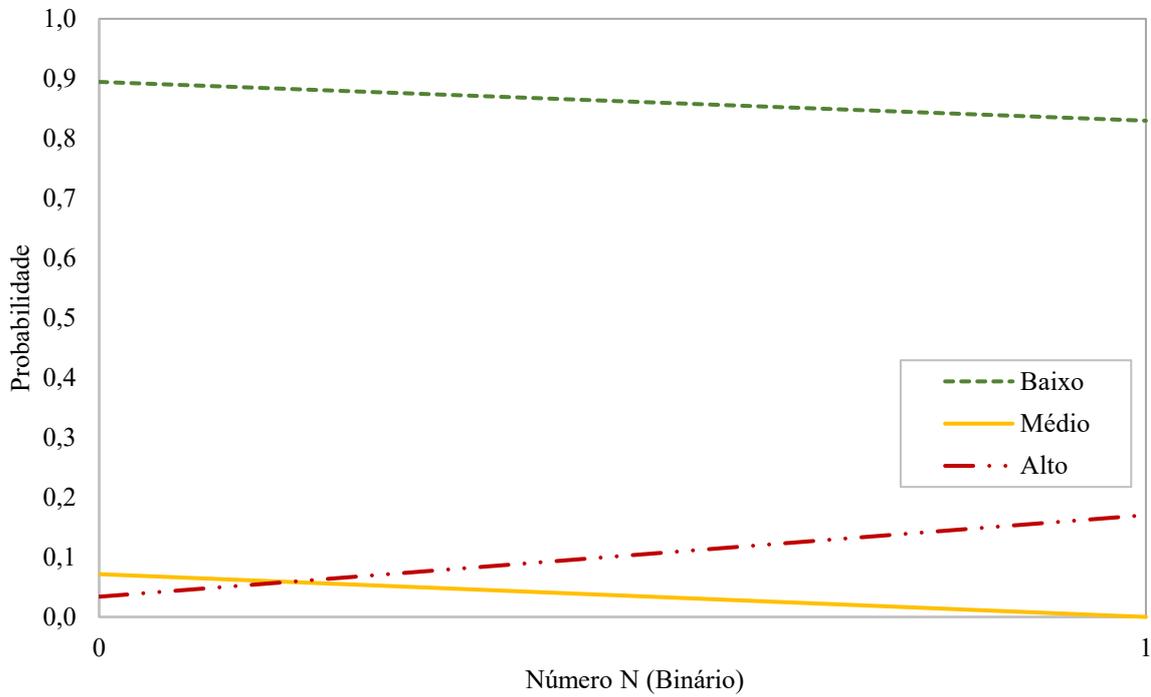
Para o caso de análise a partir do tráfego (Figura 18), a probabilidade de se ter panelas na categoria baixo, quando há incremento no VMD, decresce de quase 97% para cerca de 91%, no limite de VMD de 1.500 veículos/dia. Para a ocorrência de panelas consideradas nas categorias médio e alto, o comportamento é similar, aumentando de quase 0% para cerca de 5% e 4%, respectivamente, considerando o mesmo limite.

Quanto aos parâmetros que influenciam para a maior frequência de panelas observados com os dados utilizados no estudo, nota-se que condizem com as informações citadas no tópico de considerações iniciais. O trincamento favorece a infiltração de água na estrutura que facilita o deslocamento, os afundamentos sofrem trincamento e o VMD mais elevado promove os desgastes. Assim, devem ser priorizados os tratamentos de trincamentos e afundamentos para evitar o aumento da ocorrência de panelas e ser realizado um controle de tráfego nas rodovias.

4.3.5.2. Probabilidade de ocorrência das categorias do defeito Remendo

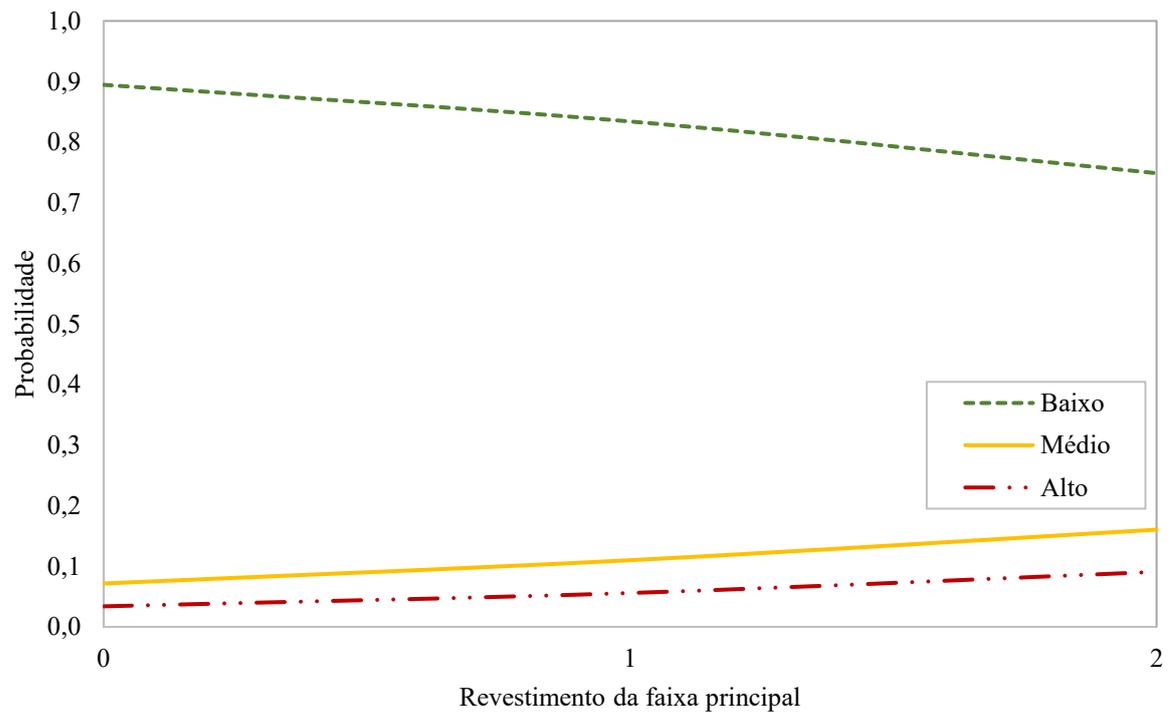
Os gráficos das figuras 19, 20 e 21 apresentam a dispersão das probabilidades de ocorrência das categorias baixo, médio e alto do defeito Remendo, considerando as variáveis explicativas Número N (no formato binário), tipo do revestimento da pista de rolamento principal, e percentual de trincamento, respectivamente.

Figura 19 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito remendo a partir do Número N (binário) (0 – tráfego baixo; 1 – tráfego médio/alto)



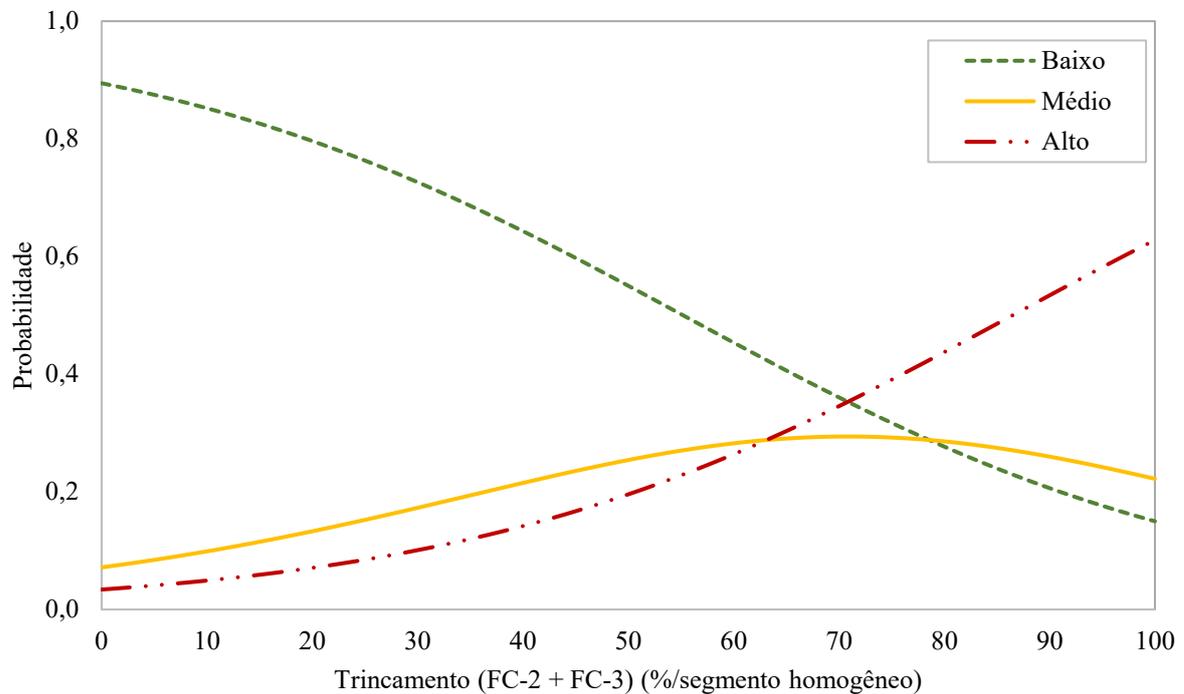
Fonte: Autora (2024).

Figura 20 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito remendo a partir do tipo de revestimento da faixa principal (0 – CA; 1 – TSP; 2 – Microrrevestimento)



Fonte: Autora (2024).

Figura 21 – Probabilidades de ocorrência das categorias do defeito remendo a partir do percentual de trincamento



Fonte: Autora (2024).

A partir da Figura 19, observa-se que o tráfego médio/alto incrementa a probabilidade de ocorrência de remendos na categoria “alto”, de 3% para cerca de 17% quando comparado ao tráfego baixo. A variação quando se verifica a probabilidade da categoria “baixo” de remendo quando o tráfego é baixo é de 89% e de 83% quando o tráfego é médio/alto. A categoria “médio” decresce de cerca de 7% para 0% quando o tráfego muda para médio/alto. Assim, as reduções observadas nas probabilidades de ocorrerem as categorias “baixo” e “médio” se transformam em incremento da probabilidade da categoria “alto”.

Da Figura 20, quanto ao tipo de revestimento da faixa principal, as probabilidades de ocorrer a categoria “baixo” são de 90%, 83% e 74% para CA, TSP e microrrevestimento, respectivamente. Para a categoria “alto”, a probabilidade é de 3% para CA, 6% quando é TSP e 9% quando é microrrevestimento.

Na Figura 21, a probabilidade de ocorrência da categoria “baixo” quando há aumento do percentual de trincamento por segmento homogêneo reduz de 89% para cerca de 15%. O contrário ocorre com a probabilidade de ocorrer a categoria “alto” de remendo, que aumenta de 4% para 63%. A ocorrência da categoria “médio” aumenta até cerca de 7% para 29% quando o percentual de trincamento é de 70%, depois decresce até 22%.

Como neste capítulo também foi verificada a frequência de remendos, as variáveis explicativas significativas identificadas são aquelas que favorecem a ocorrência dos defeitos que são sanados com esse método de reabilitação, fazendo com que sua quantidade seja ampliada. Assim, o revestimento da faixa principal do tipo tratamento superficial, se não executado adequadamente, pode favorecer a perda de agregado, a desagregação do revestimento e desagregação longitudinal, que podem gerar panelas. O Número N acima de 10^6 favorece o desgaste do revestimento, que foi inicialmente projetado para uma RBVT, e até das camadas granulares inferiores, causando trincamentos por reflexão que conseqüentemente podem gerar panelas.

4.4 Considerações finais

Este capítulo teve como objetivo compreender, a partir dos dados disponíveis nos relatórios do Programa CREMA, quais variáveis explicativas influenciam na probabilidade de categorias mais severas de panelas e remendos em pavimentos de RBVT. As conclusões, descritas na sequência, serão divididas por esses dois defeitos. Os resultados aqui apresentados se referem às análises das variáveis dependentes no formato categórico ordenado conforme a escala baixo, médio e alto.

- a) Panelas: verificou-se que as variáveis explicativas significantes que atenderam aos pressupostos do logit ordenado foram a soma dos percentuais dos afundamentos local e de trilha de roda - plástico (ALP+ATP), o percentual de trincamento (soma das fissuras classe FC-2 e FC-3) e o volume médio diário (VMD) em ordem decrescente de coeficiente. Quanto à *odds ratio*, as chances de promover panelas nas categorias mais severas foram de 1,032, 1,022 e 0,001 a mais para o ALP+ATP, o trincamento e o VMD, respectivamente. As probabilidades de ocorrência de cada categoria do defeito panela refletem nos resultados dos coeficientes, e mostram que, considerando os tipos de rodovias analisados, os afundamentos são os que aumentam as chances de ocorrência de panelas mais severas. Os casos preditos corretamente nesse modelo correspondem a 82,4% e, embora o VMD tenha apresentado valor de coeficiente baixo, foi incorporado pois gera melhores parâmetros de desempenho;
- b) Remendos: verificou-se que as variáveis explicativas significantes que atenderam aos pressupostos do logit ordenado foram o Número N no formato

binário, o tipo de revestimento da pista de rolamento principal e o percentual de trincamento em ordem decrescente de coeficiente. Considerando os valores de *odds ratio*, as chances de serem observados remendos nas categorias mais severas foram de 74,1%, 68,7% e 3,9% a mais para a mesma ordem dos coeficientes. Em razão disso, os casos preditos corretamente corresponderam a 74,6%.

Assim, concluiu-se que o modelo da variável dependente categórica ordenada Panela, dados os parâmetros de desempenho, é que possui os melhores resultados, sendo o mais adequadamente representado. O modelo da variável dependente Remendo também apresenta resultados satisfatórios, e pode ser utilizado para compreender os maiores valores de frequência a partir de dados disponíveis.

Ao considerar as informações presentes nos relatórios do Programa CREMA, para evitar as frequências mais elevadas de painelas, devem ser evitados afundamentos e trincamentos, que pode ocorrer com o controle da qualidade dos materiais empregados nas estruturas dos pavimentos, mais especificamente com relação à rigidez. Caso ocorram, necessitam de correção priorizada impedindo seu avanço. Deve-se, ainda, realizar um controle do volume de tráfego, pois, ao exceder aquele considerado no dimensionamento, pode ampliar o surgimento de maior quantidade de painelas.

Para evitar maiores frequências de remendo, deve-se priorizar o controle de tráfego, pois as rodovias de menor volume, quando adequadamente pavimentadas, tendem a ter acréscimo de tráfego, e soluções adequadas para atender essa demanda devem ser adotadas. Deve-se, também, sanar os trincamentos de forma mais ágil para evitar o surgimento de painelas e conseqüentemente dos remendos nas categorias mais severas.

Salienta-se que uma análise similar com a aplicação de um modelo de regressão logística ordenada pode ser replicada em outros bancos de dados, como exemplo de outros estados, com informações de defeitos de pavimentos, para verificar a forma dos modelos obtidos. Informações referentes à construção dos pavimentos também devem ser incorporadas para melhorar a capacidade explicativa dos modelos. Outra análise que pode ser conduzida é quanto às alterações da escala categórica dos defeitos, para verificar qual seria a melhor classificação de frequência deles.

Na posse de dados de RBVT com as variáveis analisadas neste capítulo, os modelos de probabilidade obtidos podem ser utilizados para geração de gráficos inerentes às informações utilizadas. Assim, pode-se verificar, visualmente, o impacto das variáveis explicativas na frequência dos defeitos painela e remendo.

5 INFLUÊNCIA DOS ACOSTAMENTOS NO DESEMPENHO ESTRUTURAL DAS RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

As camadas granulares de uma estrutura dos pavimentos rodoviários devem ser compactadas conforme informações obtidas do ensaio de Proctor: energia de compactação, umidade ótima e massa específica aparente seca correspondentes. Essas camadas passam a maior parte da sua vida útil na condição não saturada, sofrendo algumas variações de umidade devido a infiltrações por alteração do lençol freático e do ingresso de águas de chuva pelas laterais da estrutura ou por trincas existentes em sua superfície. As laterais podem ser protegidas com a existência de acostamentos, preferencialmente com algum revestimento, o que pode reduzir sua permeabilidade. Em rodovias de baixo volume de tráfego (RBVT), os acostamentos, revestidos ou não, são inexistentes ou com larguras reduzidas, o que pode ampliar a variação de umidade na estrutura, principalmente no subleito dessas rodovias, com conseqüente redução de resistência mecânica. Este capítulo buscou avaliar se a largura e os materiais componentes dos acostamentos promovem a proteção das estruturas de RBVT quanto à infiltração lateral devido aos impactos climáticos. Considerou-se a infiltração decorrente de chuva máxima diária com tempo de recorrência de 10 anos, período de dimensionamento da rodovia, e a conseqüente variação de umidade das camadas granulares dada a umidade ótima de compactação. Foi verificado, nas 13 simulações realizadas, que o subleito apresenta as maiores alterações de umidade, com variação média entre as estruturas simuladas de, aproximadamente, 58%, o que causa uma redução de 78% da sua rigidez, medida pelo Módulo de Resiliência (MR). A estrutura mais recomendada dentre as simuladas é aquela em que as camadas granulares dos acostamentos têm as mesmas espessuras e os mesmos materiais de sub-base e base da pista de rolamento principal, com revestimento em Tratamento Superficial Simples (TSS), pois apresentou uma das menores variações de umidade e o menor custo de execução.

5.1 Contextualização

As camadas granulares da estrutura de um pavimento estão submetidas à condição não saturada na maior parte da sua vida útil. Um dos fatores que mais influenciam o desempenho de um pavimento é a variação do teor de umidade na estrutura do pavimento, ocasionada, principalmente, pela infiltração de águas pela superfície, pelas laterais ou pelo lençol freático elevado (Ridgeway, 1976; Elshaer; Ghayoomi; Daniel, 2017; Haider; Masud; Chatti, 2019). A variação de umidade em solos não saturados pode ocasionar alterações de

resistência mecânica, como é o caso do Módulo de Resiliência (MR) (Abu-Farsakh *et al.*, 2015; Phommavone; Sangpetngam, 2018; Ullah; Tanyu, 2020; Kern; Gehling; Núñez, 2021), permeabilidade e volume (Hedayati; Hossain, 2015).

Os acostamentos, além de servirem como faixa de parada de veículos em emergência garantindo a segurança dos usuários da rodovia, podem auxiliar no desempenho da estrutura do pavimento. Sutradhar e Pal (2020) afirmam que os acostamentos fornecem suporte lateral à estrutura do pavimento e protegem as bordas do revestimento principal contra desgaste, que é um dos defeitos mais comuns em RBVT. Douglas (2016) cita que uma forma de prevenir a infiltração de água pelas laterais é com um acostamento com superfície impermeável e ainda recomenda que a estrutura de base se estenda a essa região caso sejam utilizadas valas laterais para drenagem superficial.

SOP (2019b) indica que o acostamento tem como função a segurança, permitindo a realização de manobras e o confinamento da estrutura da pista principal de rolamento, proporcionando maior vida de serviço. Apesar disso, a indicação é de que seja uma construção de menor custo, com material granular que apresente o Índice de Suporte Califórnia (CBR) de, no mínimo, 40% e sem revestimento. Essa limitação pode não garantir a proteção da estrutura contra infiltrações, uma vez que não tem sua superfície revestida com material que permita sua impermeabilização.

Acostamentos sem revestimento podem apresentar defeitos decorrentes da ação dos ventos, da água e até do uso de materiais granulares inadequados (Vorobjovas; Žilionienė, 2008). De acordo com World Bank (2018), os acostamentos cumprem várias funções importantes, principalmente quando revestidos (sempre que possível), como: fornecer melhor suporte e proteção contra umidade para as camadas do pavimento, reduzir a erosão das bordas do pavimento, impedir que as variações sazonais de umidade penetrem na região sob a trilha de roda externa, reduzir os custos de manutenção e os riscos de acidentes.

Não há unanimidade na definição de largura ideal do acostamento. TRRL (1988) indica diferentes larguras de acostamento de acordo com o tipo de rodovia. Para RBVT, com VMD abaixo de 400 veículos/dia, as larguras indicadas são de 1,0 m, no mínimo, em rodovias com duas faixas de rolamento, podendo ser pavimentadas ou não, de acordo com a pista principal. Quando não pavimentadas, é recomendada a realização de manutenções rotineiras, como a reposição de material decorrente de erosão e afundamentos (Guo *et al.*, 2016).

De acordo com BC MoTI (2019), a largura adequada dos acostamentos é aquela que permita o suporte lateral da estrutura do pavimento, sendo o mínimo indicado para RBVT de 0,50 m sem revestimento. Em RBVT, inclusive, não há necessidade de que esse valor seja o

correspondente para o estacionamento de um veículo em emergência, uma vez que, por ter baixo volume, apresenta possibilidade de realização de ultrapassagens de forma segura devido às brechas do tráfego oposto. Assim, as larguras dos acostamentos de RBVT podem ser reduzidas, desde que garantam estabilidade adequada à estrutura principal e permitam uma drenagem superficial favorável.

A largura mínima recomendada por World Bank (2018) do acostamento pavimentado dependerá da extensão da infiltração lateral no acostamento na época mais úmida do ano. A largura mínima recomendada para uma rodovia com 2 faixas de rolamento (1 por sentido) seria da ordem de 1,0 m. Quanto ao revestimento, o ideal é de que seja o mesmo das faixas de rolamento principais.

CNT (2023) recomenda que a largura do acostamento deve ser suficiente para o estacionamento de um veículo de forma segura, sem ocupar a pista principal para não obrigar que veículos precisem ultrapassá-los. Ainda de acordo com o mesmo estudo, para que o acostamento exerça sua principal função, é importante que ele seja pavimentado e ofereça adequadas condições de uso e trafegabilidade. De 111.502 km de rodovias avaliadas por CNT (2023), em 46,9% não foi identificada a presença de acostamentos com a largura recomendada, o que é apontado como preocupante, uma vez que a maior parte das rodovias é de pista simples (85%). As rodovias cearenses com tratamento superficial por penetração (TSP), por serem de baixo volume de tráfego, possuem acostamentos com larguras reduzidas. Essa afirmação pode ser confirmada por meio da Tabela 14, que apresenta o valor médio de três medidas tomadas *in loco* ao longo de sete trechos, de rodovias estaduais do Ceará, investigados pela autora do presente trabalho.

Tabela 14 – Larguras de acostamentos verificadas em sete rodovias estaduais do Ceará no Distrito Operacional 10

Rodovias	Trechos	Largura média (m)
CE-060	Entre Jardim e a divisa CE/PE	0,60
CE-152	Entre Mauriti e Palestina do Cariri	0,35
CE-176	Entre Aratama e Assaré	0,30
CE-176	Entre Assaré e Antonina do Norte	0,40
CE-176	Entre Antonina do Norte e Aiuaba	0,60
CE-292	Entre Aeroporto de Juazeiro do Norte e CE-293	0,80
CE-384	Entre Milagres e Mauriti	0,80
	Média	0,55

Fonte: Autora (2024).

Ridgeway (1976) e Dan *et al.* (2017) analisaram a alteração de umidade nos materiais que compõem a estrutura de pavimentos pela infiltração através de trincamentos no revestimento em Concreto Asfáltico (CA). Ambos os estudos propuseram modelos para estimar a taxa de infiltração na estrutura pelas trincas do pavimento, indicando que deve existir uma drenagem na camada inferior que capte essa água livre. Os autores ainda identificaram que a água que penetra na estrutura do pavimento pelas trincas depende da capacidade de infiltração desses defeitos, da área trincada, da drenagem e da duração da chuva.

Hedayati e Hossain (2015) avaliaram o pavimento de uma RBVT sem acostamento no norte do Texas (EUA) com uma camada esbelta de revestimento em CA. O objetivo foi desenvolver um modelo não-paramétrico para determinar a variação de umidade no subleito da rodovia. Para tanto, foram instalados um pluviômetro e 14 sensores de umidade em profundidades diferentes na estrutura da rodovia, com coletas horárias por 2 anos. O padrão de variação de umidade identificado foi sazonal ($\pm 5\%$) e temporal (devido às chuvas, chegando a 12% de variação), com 90% de confiança.

Abu-Farsakh *et al.* (2015) analisaram modelos existentes para estimar valores de MR em solos de subleitos não saturados. Com base nessa análise, desenvolveram um método para incorporar o efeito da variação da umidade. Para tanto, utilizaram quatro solos de graduação fina representativos do estado de Louisiana, com valores de Índice de Plasticidade (IP) variados. Foram moldados corpos de prova com diferentes teores de umidade para construção de curvas de retenção de água no solo. Considerando o teor de umidade, grau de saturação e sucção matricial, foram analisadas as alterações de MR devido à essa variação. Constatou-se uma relação significativa entre o MR e a sucção matricial e, por isso, o modelo desenvolvido proporcionou um melhor ajuste de dados, com valores de R^2 superiores a 0,90.

Islam, Arafat e Wasiuddin (2017) avaliaram a alteração da condutividade hidráulica na estrutura do pavimento com o uso de pintura de impermeabilização do tipo *fog seal* em uma RBVT como medida de reabilitação. Com aplicações de taxas de 0,45 a 1,0 l/m² da pintura em quatro diferentes pavimentos, a redução média da condutividade hidráulica identificada foi de 38,5%.

Verifica-se que existe uma demanda em considerar a existência, largura e impermeabilização dos acostamentos na estrutura dos pavimentos com TSP como camada de revestimento principal. Como as RBVT têm estruturas mais esbeltas e são de custo reduzido com relação àquelas de maior volume, é necessário prover a rodovia com elementos que garantam sua maior vida útil. Com base nisso, o objetivo deste artigo foi avaliar se a largura e

os materiais componentes dos acostamentos promovem a proteção das estruturas de RBVT quanto à infiltração lateral devido aos impactos climáticos.

5.2 Materiais e método

Foram utilizadas as informações da estrutura da rodovia estadual CE-292 (trecho entre o Aeroporto de Juazeiro do Norte e o entroncamento com a CE-293) devido à disponibilidade de informações oriundas do volume geotécnico para a realização das simulações. A análise, adaptada com base no método proposto por Araújo (2019), foi dividida em seis passos: (i) obtenção de informações dos materiais das camadas do pavimento; (ii) dimensionamento da estrutura do pavimento; (iii) aplicação de modelo hidráulico das camadas não saturadas; (iv) cálculo de infiltração nas camadas; (v) verificação da alteração de rigidez das camadas devido à variação de umidade; e (vi) análise de desempenho das estruturas simuladas baseada nas deformações permanentes obtidas.

Para a compreensão do meio em que as RBVT estão inseridas, foram apresentadas algumas informações, considerando somente a Região Sul do estado do Ceará, onde está inserido o Distrito Operacional (DO) 10 (classificação estadual). Esse DO está contido na Região Metropolitana do Cariri (RMC) (exceto os municípios de Antonina do Norte, Assaré e Várzea Alegre) e possui uma área de, aproximadamente, 14.300 m² (IBGE, 2021). Quanto à geomorfologia da região analisada, a maior parte é constituída pela Chapada do Araripe, chegando a altitudes superiores a 900 m em relação ao nível do mar.

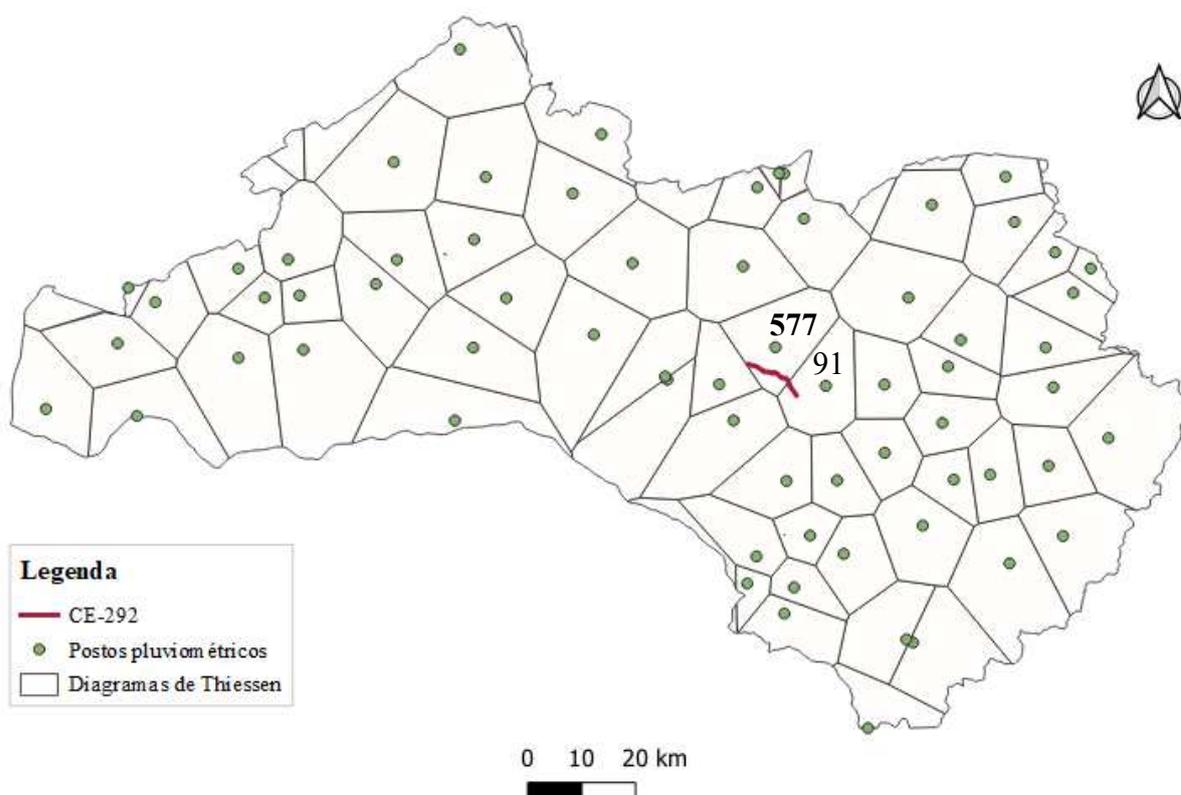
O trecho da CE-292 em análise corresponde a 87% de solos podzólicos (nas extremidades) e 13% de solos aluviais (na parte intermediária). O solo aluvial na CE-292 foi identificado onde está localizado o Rio Salamanca, local em que há uma ponte na rodovia.

A área do DO-10 apresenta uma ampla cobertura hídrica superficial e possui 16 dos 23 municípios membros da sub-bacia hidrográfica do Salgado, cujo rio principal é o Salgado. De acordo com COGERH (2022), essa bacia é de grande potencialidade, com uma acumulação de águas superficiais de 452,31 milhões de m³.

Quanto à disponibilidade de águas subterrâneas, a região onde está inserido o DO-10, possui os melhores sistemas aquíferos do estado onde estão localizadas as maiores reservas, de qualidade satisfatória, abastecendo cerca de 90% municípios da região por meio de poços tubulares e/ou fontes (Cavalcante; Veríssimo, 2011). A recarga desse sistema é oriunda, predominantemente, da infiltração pluviométrica direta.

Para compreender os quadros de chuva da região, foram coletadas as informações da série histórica dos postos pluviométricos da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME). Na região em estudo, existem 67 postos ativos, com informações históricas até 2023, sendo o início das séries variável. Para definir os postos a serem considerados na análise, foram verificadas as áreas de influência por meio dos diagramas de Thiessen. A Figura 22 apresenta essas áreas de acordo com os postos pluviométricos existentes e a localização da rodovia estadual CE-292.

Figura 22 – Áreas de influência dos postos pluviométricos do DO-10



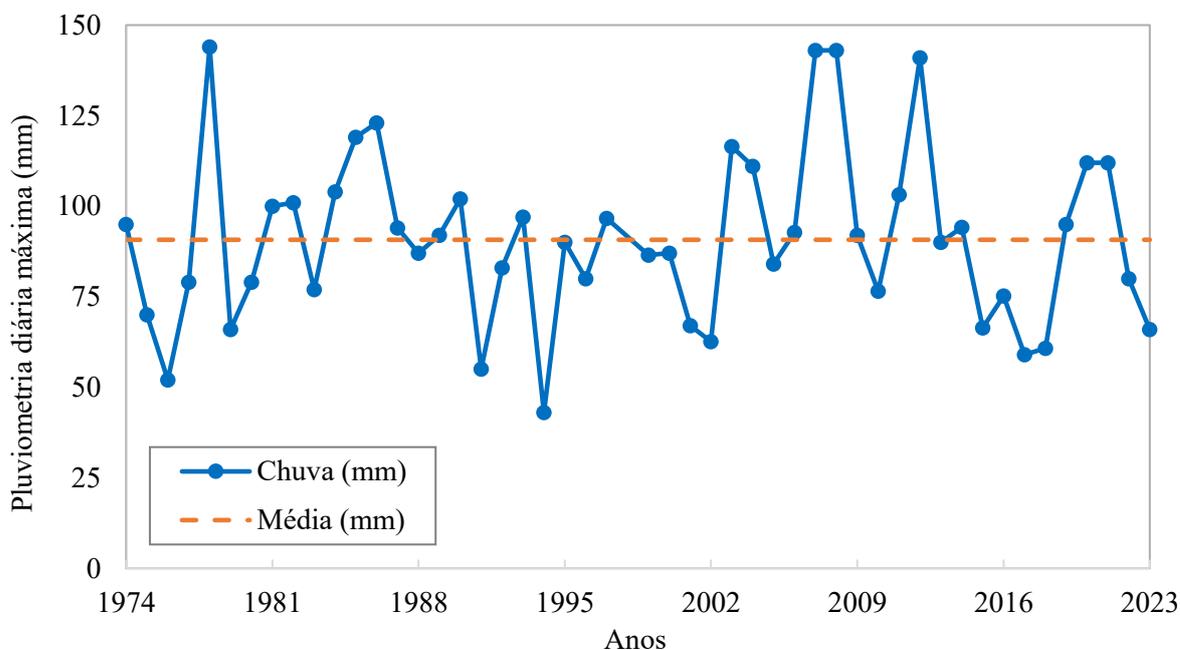
Fonte: Autora (2024), com dados de FUNCEME (2024).

Verifica-se na Figura 22 que a rodovia CE-292 está contida em duas áreas de influência, correspondentes aos postos pluviométricos 91 (Missão Velha) e 577 (Juazeiro do Norte). O posto pluviométrico 91 possui série histórica completa mensal de 1974 a 2023, totalizando 49 anos de informações, por sua vez, o posto 577 teve o início da coleta de informações de chuva em dezembro de 2000 e até o ano de 2023 apresenta falhas mensais e anuais.

Devido à ausência de informações e possível comprometimento dos dados para serem considerados representativos do posto 577, foram utilizadas as informações do posto

pluviométrico 91. O gráfico da Figura 23 apresenta a distribuição de dados pluviométricos diários máximos desse posto para cada ano da série histórica, com a indicação do valor médio para referência.

Figura 23 – Série histórica de chuvas diárias máximas do posto 91



Fonte: Autora (2024), com dados de FUNCEME (2024).

Pode-se observar, da Figura 23, que em 23 anos da série histórica a chuva foi abaixo da média, dois foram próximos à média e 24 acima. Para este trabalho, foi adotada a pluviometria diária máxima que ocorrerá no tempo de recorrência (TR) de 10 anos, que é a vida útil usualmente considerada no dimensionamento de sistema de drenagem superficial de pavimentos no Brasil, usualmente utilizado em RBVT (DNIT, 2005; Jabôr, 2023) e retrata a situação mais crítica de saturação dos solos e camadas granulares. A chuva diária máxima para esse TR foi identificada em 1986, com um total acumulado de 123 mm. O Apêndice A contém os cálculos que embasaram a identificação desse valor.

O clima da região onde está situada a rodovia em análise é caracterizado como tropical semiárido seco (IBGE, 2022). Apresenta temperatura média mensal superior a 18 °C, sendo a maior parte da região semiárida com períodos do ano sem chuva que variam entre 7 e 8 meses.

5.2.1 Obtenção de informações dos materiais

Para as informações de granulometria, limites de consistência (limite de liquidez – LL e Índice de Plasticidade – IP), umidade ótima (h_{6t}), massa específica aparente seca (MEAS), expansão (EXP) e Índice de Suporte California (*California Bearing Ratio* – CBR) dos materiais das camadas granulares da estrutura dessa rodovia, foram consideradas as informações apresentadas no volume geotécnico do trecho da rodovia obtido da empresa que realizou as análises dos solos. No volume geotécnico não foram encontrados os parâmetros de rigidez por tratar-se de um projeto baseado no dimensionamento empírico de pavimentos conforme DNIT (2006a). Sendo assim, os valores de MR foram estimados a partir do modelo de redes neurais desenvolvido por Ribeiro (2016), que considera as informações físicas e mecânicas dos materiais. Para os coeficientes dos modelos de Deformação Permanente (DP) foram considerados os dados oriundos de Guimarães (2009), Lima, Mota e Aragão (2019) e Cabral (2021) que estudaram solos com as mesmas características.

O valor de projeto de cada camada, a ser utilizado na etapa de dimensionamento do pavimento, com relação às propriedades e características dos materiais presentes no volume geotécnico, corresponde ao valor mínimo, máximo ou à média aritmética. Foi utilizado o valor médio da umidade ótima e a massa específica aparente seca correspondente a essa h_{6t} . Para a expansão foi considerado o valor máximo e para o CBR o valor mínimo para garantir a segurança do pavimento a ser dimensionado. A Tabela 15 apresenta os limites definidos para cada um desses parâmetros das camadas granulares conforme DNIT (2006a).

Tabela 15 – Limites dos parâmetros das camadas granulares de pavimentos ($N \leq 5 \times 10^6$)

Camadas	LL	IP	EXP	CBR
Subleito	-	-	$\leq 2\%$	$\geq 2\%$
Reforço	-	-	$\leq 1\%$	$> CBR_{\text{subleito}}$
Sub-base	-	-	$\leq 1\%$	$\geq 20\%$
Base	$\leq 25\%$	$\leq 6\%$	$\leq 0,5\%$	$\geq 60\%^1$

Fonte: Autora (2024) com dados de DNIT (2006a).

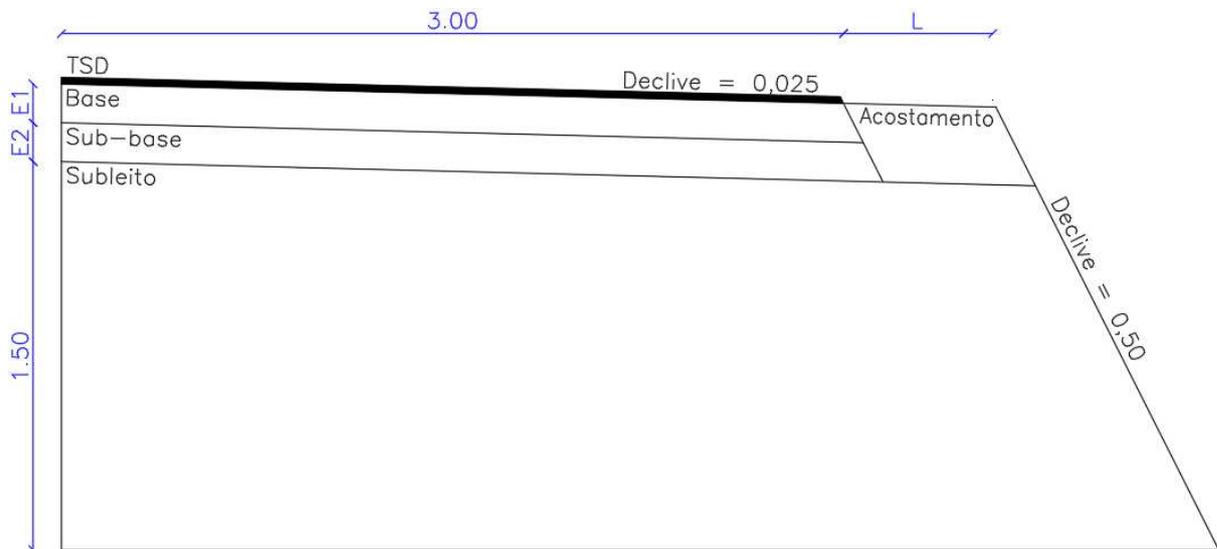
¹ O valor de 60% é aceitável em rodovias em que será utilizado tratamento superficial como revestimento.

5.2.2 Dimensionamento da estrutura de pavimento

Por razões de simetria, foi simulada a metade da estrutura do pavimento, conforme recomendado por Hansson, Lundin e Šimůnek (2005), indicada na Figura 24. Essa estrutura básica foi alterada com relação ao material e à largura (L) do acostamento (0,0 m, 0,5 m e 1,0 m). Nas simulações em que foi inserido revestimento no acostamento, foi utilizado TSS, com

o intuito de promover impermeabilização e verificar se confere maior proteção à estrutura. E1 e E2 são as espessuras das camadas granulares da base e sub-base, respectivamente, que foram definidas pelo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) (DNIT, 2021). A adoção da espessura de 1,50 m do subleito foi necessária dada a limitação decorrente da condução de contorno geométrica do *software* que foi utilizado para calcular a estimativa de infiltração nas camadas granulares e refere-se à profundidade de drenagem do lençol freático a partir do greide recomendada por DNIT (2006a, 2021). No Apêndice B estão os detalhes geométricos de todas as estruturas simuladas.

Figura 24 – Estrutura do pavimento analisada neste estudo (sem escala, medidas em m)



Fonte: Autora (2024).

A partir Figura 24 foram definidas sete estruturas diferentes para a realização das 13 simulações que consideram as observações a seguir listadas:

- a) A inexistência de acostamento, denominada SAc (sem acostamento);
- b) A existência de acostamento com material arenoso (A), CBR mínimo de 40%, sem revestimento (sR), variando a largura (L), denominada A-sR-L;
- c) A existência de acostamento com material arenoso (A), CBR mínimo de 40%, com revestimento (R) em TSS, variando a largura (L), denominada A-R-L;
- d) A existência de acostamento com material siltiloso (S), sem revestimento (sR), variando a largura (L), denominada S-sR-L;
- e) A existência de acostamento com material siltiloso (S), com revestimento (R) em TSS, variando a largura (L), denominada S-R-L;

- f) A existência de acostamento com a mesma estrutura da pista de rolamento principal (P) com base e sub-base, sem revestimento (sR), variando a largura (L), denominada P-sR-L; e
- g) A existência de acostamento com a mesma estrutura da pista de rolamento principal (P) com base e sub-base, com revestimento (R) em TSS, variando a largura (L) denominada P-R-L.

A Tabela 16 apresenta a codificação das simulações realizadas, composta por três partes: a primeira, indicando o material do acostamento (A para o acostamento arenoso, S para o acostamento siltooso e P para base e sub-base); a segunda o tipo de revestimento do acostamento (sR quando é sem revestimento e R quando tem revestimento em TSS); e a terceira a largura do acostamento (05 para largura de 0,50 m e 10 para 1,00 m). A estrutura em que o acostamento foi inexistente teve uma codificação sAc (sem acostamento).

Tabela 16 – Codificações das simulações a serem realizadas

Material do acostamento	Revestimento do acostamento	Largura do acostamento (m)	Código
-	-	-	sAc
Arenoso	Sem revestimento	0,50	A-sR-05
Arenoso	Sem revestimento	1,00	A-sR-10
Arenoso	TSS	0,50	A-R-05
Arenoso	TSS	1,00	A-R-10
Siltooso	Sem revestimento	0,50	S-sR-05
Siltooso	Sem revestimento	1,00	S-sR-10
Siltooso	TSS	0,50	S-R-05
Siltooso	TSS	1,00	S-R-10
Base e sub-base	Sem revestimento	0,50	P-sR-05
Base e sub-base	Sem revestimento	1,00	P-sR-10
Base e sub-base	TSS	0,50	P-R-05
Base e sub-base	TSS	1,00	P-R-10

Fonte: Autora (2024).

5.2.3 Modelo hidráulico das camadas não-saturadas

O modelo hidráulico foi utilizado para caracterizar as condições de escoamento e de infiltração na rodovia, considerando as larguras de acostamento a serem simuladas. Como indicado por Araújo (2019), foram admitidas as hipóteses durante o evento de chuva:

- a) parte da precipitação (i) se divide em escoamento superficial direto (q) e infiltração (f);
- b) o coeficiente adimensional de escoamento superficial (C) varia de acordo com o material. Com isso, foram consideradas as Equações (12) e (13).

$$q = C \cdot i \quad (12)$$

$$f = (1 - C) \cdot i \quad (13)$$

Com base nos coeficientes determinados por Tucci (2000), foram adotados os valores de C de 0,95 para revestimento asfáltico e de 0,30 para a região sem revestimento. Assim, o valor de infiltração (f) acumulada calculada conforme Equação (13) durante o ano na região com revestimento em TSS é de 6,15 mm/dia. Para a região onde não há revestimento, esse valor é de 86,1 mm/dia. Esses cálculos podem ser consultados no Apêndice A.

Quanto à determinação das condutividades hidráulicas saturadas (K_s) de van Genuchten (1980), foram utilizadas as informações dos materiais das camadas. Utilizou-se um *software* com o modelo de redes neurais que considera a classe textural do material, o RETC (*Retention Curve*), versão 6.02 (van Genuchten; Leij; Yates, 1991). Foram, então, listados os parâmetros: teor de água residual (θ_r), teor de água saturado (θ_s), coeficientes empíricos dados pela forma e funções hidráulicas (α e n), K_s e o parâmetro poro-conectividade (l) (que, segundo Mualem, 1976, é de 0,5 para a maior parte dos solos).

5.2.4 Cálculo da infiltração nas camadas

Com as informações encontradas no tópico anterior, foi utilizado um *software* para estimar a infiltração de água nas camadas para cada situação simulada, o Slide2, versão 9.024, que avalia a estabilidade de taludes, fatores de segurança e probabilidade de falhas com análise de infiltração (Rocscience, 2022), com a licença concedida à Universidade Federal do Ceará. Para a utilização do *software* foi considerada a geometria da seção transversal apresentada no tópico 5.2.2, com as medidas obtidas do dimensionamento.

Utilizaram-se os dados das propriedades dos materiais das camadas e os valores de pluviometria máximas dos dois períodos de retorno adotados como condições de contorno iniciais. Foi necessária a obtenção da carga piezométrica referente à água no solo (no *software* Slide2, *pressure head*, em m) correspondente à umidade inicialmente considerada do material.

Obtiveram-se as curvas de cada camada que relacionam a carga piezométrica com a umidade volumétrica também com o RETC. Para obtenção da carga piezométrica, o modelo das curvas selecionado foi o de van Genuchten ($m=1-1/n$) e o modelo de condutividade de Mualem (1976), sendo esse conjunto denominado modelo Mualem-van Genuchten, mundialmente utilizado (Tian *et al.*, 2019).

Ainda sobre as condições de contorno iniciais, foi estabelecida inicialmente a umidade ótima das camadas obtida do ensaio de compactação para o cálculo posterior da variação decorrente da chuva. Como o *software* não apresenta a opção da entrada de dados de umidade gravimétrica (U_g) no formato percentual, foram calculadas as umidades volumétricas (U_v), em m^3/m^3 (Equação 14) que também incorpora a $MEAS_{m\acute{a}x}$, e então determinadas as cargas piezométricas correspondentes de cada solo.

$$U_v = \frac{U_g \times MEAS_{m\acute{a}x}}{100} \quad (14)$$

Para a simulação, foi necessário criar a malha de elementos finitos das estruturas. A configuração para a discretização da malha (*mesh setup*) apresentou um número aproximado de 1.500 elementos do tipo triângulos com nós (configuração *default* do programa). Após criação do modelo para simulação (geometria, condições iniciais e discretização), foi obtida a alteração de cargas piezométricas da estrutura do pavimento. Utilizaram-se os novos valores de carga piezométrica (m) do subleito para conversão em umidade volumétrica (pelo gráfico da camada) e, então, pela umidade gravimétrica (Equação 12). Esse valor foi utilizado para a etapa apresentada no próximo tópico.

5.2.5 Verificação da alteração da rigidez dos materiais devido à variação de umidade

Posteriormente, foi verificado o impacto da infiltração na resistência mecânica dos materiais das camadas granulares analisadas. Para tanto, foi incorporada a variação de umidade decorrente da infiltração devido à pluviometria, com base no modelo de Takeda (2006), que avaliou os MR de diferentes tipos de solos de comportamento laterítico e não lateríticos do interior de São Paulo, na umidade ótima e com variações de -2%, -1% e +1%. O autor, ao realizar uma análise de regressão simples entre a variável dependente correspondente à variação de umidade e a relação entre os MR dessas umidades, identificou uma função exponencial que relaciona essa influência com coeficiente de determinação (R^2) de 0,86, conforme Equação (15).

$$\frac{MR_h}{MR_{h_{ót}}} = e^{-1,43(h-h_{ót})} \quad (15)$$

Em que,

MR_h é o Módulo de resiliência dada a umidade de interesse h (%);

$MR_{h_{ót}}$ é o Módulo de resiliência do material na umidade ótima ($h_{ót}$) (%).

Essa função permite que seja estimado o efeito da variação de umidade pós-compactação sobre o MR do solo. Quanto aos coeficientes do modelo composto de MR, Takeda (2006) identificou que somente k_l sofre alteração dada a variação de umidade, na forma da Equação (16). Na seção de resultados foram apresentados os valores de MR médio obtidos da Equação (15) e o coeficiente k_{lh} do modelo composto (Equação 16) com as alterações de umidade de cada simulação.

$$k_{1h} = k_{1h_{ót}} * e^{-0,43(h-h_{ót})} \quad (16)$$

Em que,

k_{1h} é o coeficiente k_l dada a umidade de interesse h (%);

$k_{1h_{ót}}$ é o coeficiente k_l do modelo composto obtido na umidade ótima ($h_{ót}$) (%).

5.2.6 Análise de desempenho estrutural

Na análise de desempenho estrutural, foram calculados os afundamentos de trilha de roda (ATR), como forma de representar a DP total da estrutura do pavimento e do subleito. Para o cálculo da DP foi utilizado o *software* MeDiNa, versão 1.1.5.0. Com essas informações, foi realizado um comparativo de DP com o incremento de umidade das camadas granulares dada a infiltração pela ocorrência de chuvas máximas quando comparadas à estrutura de referência (com umidade ótima obtida do ensaio de Proctor).

5.3 Resultados e discussões

Esta seção contém informações dos materiais do revestimento e das camadas granulares do pavimento (subleito, sub-base, base e acostamento), dimensionamento da

estrutura considerando a CE-292 como uma RBVT (Número N de 10^6), cálculo de infiltração das camadas considerando a pluviometria diária máxima da série histórica para um período de retorno de 10 anos, impacto dessa alteração de umidade na resistência mecânica e a análise de desempenho quanto aos valores de deformação permanente.

5.3.1 Informações dos materiais

Nesta seção podem ser verificadas as características físicas e mecânicas dos materiais constituintes das camadas da estrutura de pavimento analisada, além do acostamento.

5.3.1.1 Subleito

Do volume de estudo geotécnico, foram analisadas 27 amostras na diretriz da rodovia, espacializados a cada 20 estacas (Figura 25). Pelo sistema AASHTO de classificação de solos, 13 amostras são do tipo A-3 e 12 amostras são do tipo A-2-4, ambos indicados como materiais com comportamento de excelente a bom para subleitos. Somente dois pontos amostrados apresentaram materiais classificados como A-4 e A-6, classificados com comportamento de regular a fraco para subleitos. A classificação expedita desses solos variou entre areia siltosa com e sem pedregulhos.

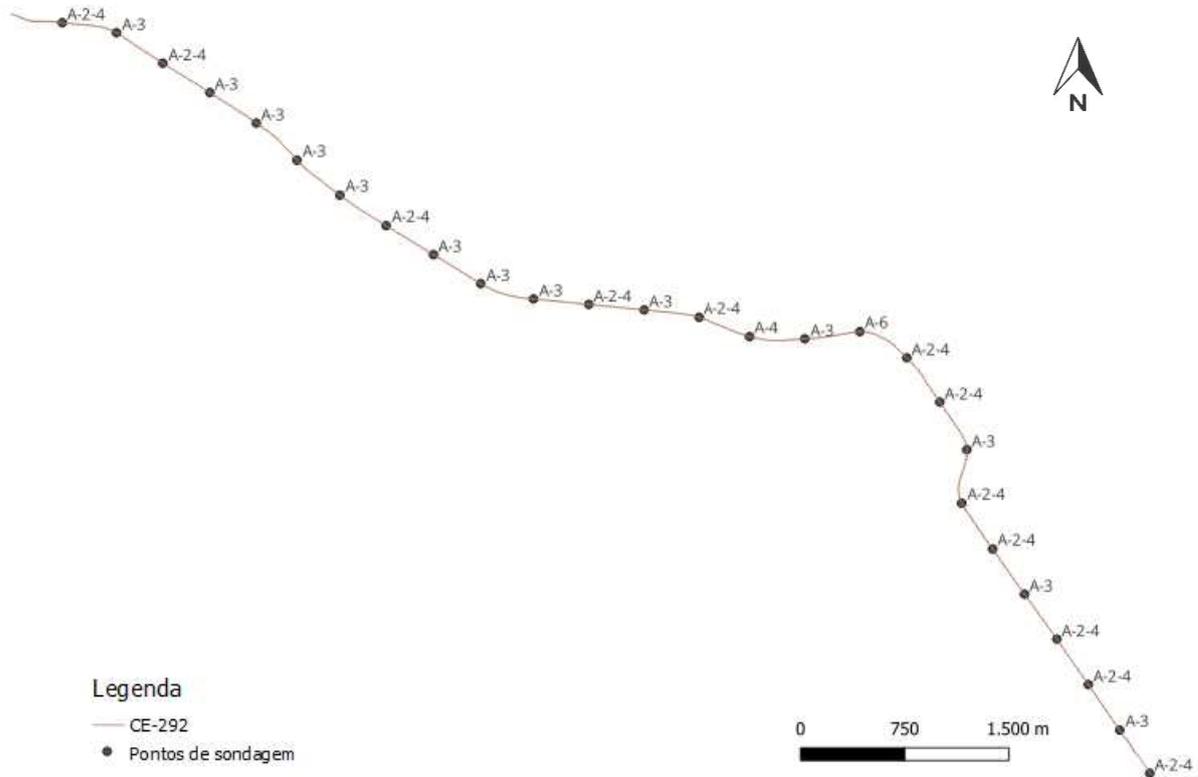
Dos limites de consistência do subleito, 23 pontos apresentaram comportamento não líquido e não plástico. A Tabela 17 apresenta um resumo dos parâmetros analisados nos ensaios realizados, considerando massa específica aparente seca máxima (MEAS), umidade ótima ($h_{ót}$), expansão (EXP) e CBR.

Tabela 17 – Informações do subleito da CE-292 (energia normal)

Medidas	MEAS_{máx} (g/cm³)	h_{ót} (%)	EXP (%)	CBR (%)
Valor mínimo	1,672	4,1	0,00	8,00
Valor máximo	1,939	12,4	1,80	29,00
Mediana	1,831	6,0	0,10	16,00
Média (\bar{X})	1,835	6,4	0,27	16,33
Desvio Padrão (σ)	0,062	1,88	0,45	5,02
Variância	0,391	3,54	0,21	25,23
Coef. de variação	0,034	0,295	1,699	0,308
Valor de projeto	1,835	6,37	1,80	8,00

Fonte: Autora (2024).

Figura 25 – Classificação AASHTO dos pontos de amostragem do subleito da CE-292



Fonte: Autora (2024).

Para regularização do subleito foi utilizado o material oriundo de 6 empréstimos, cujas informações físicas e mecânicas resumidas estão na Tabela 18. A classificação expedita desses solos, assim como no subleito, variou entre areia siltosa com e sem pedregulhos.

Tabela 18 – Informações dos empréstimos (EMP) da CE-292 (Energia normal)

ID/ Medidas	AASHTO	LL	IP	MEAS _{máx} (g/cm ³)	h _{ót} (%)	EXP (%)	CBR (%)
EMP1	A-2-4	NL	NP	1,849	6,60	0,17	14,00
EMP2	A-2-4	17	6	1,858	7,60	0,95	18,00
EMP3	A-2-4	17	7	1,908	8,90	0,15	23,00
EMP4	A-3	NL	NP	1,761	5,50	0,00	14,00
EMP5	A-3	NL	NP	1,762	6,20	0,15	15,00
EMP6	A-2-4	17	6	1,909	6,30	0,00	18,00
Mínimo	-	-	-	1,749	5,40	0,00	10,00
Máximo	-	-	-	1,932	11,10	1,20	26,00
Mediana	-	-	-	1,841	6,70	0,10	16,00
Média	-	-	-	1,841	6,82	0,23	16,54
σ	-	-	-	0,06	1,47	0,35	4,98
Variância	-	-	-	0,00	2,16	0,13	24,77
cv	-	-	-	0,03	0,21	1,52	0,30

Fonte: Autora (2024).

5.3.1.2 Sub-base

Foi analisada uma jazida localizada a cerca de 5 km do lado direito da estaca 100 do trecho investigado, com um volume utilizável de 40.176 m³. Na classificação expedita o material analisado foi identificado como silte argiloso com pedregulho de cor vermelha, A-2-6 conforme AASHTO. A Tabela 19 apresenta um resumo das informações da jazida de sub-base, com informações descritivas básicas e os valores de projeto.

Tabela 19 – Informações descritivas da jazida de sub-base da CE-292 (Energia intermediária)

Parâmetros	LL (%)	IP (%)	h_{ót} (%)	MEAS_{máx} (g/cm³)	EXP (%)	CBR (%)
Valor mínimo	16,0	7,0	9,6	1,936	0,4	21,0
Valor máximo	30,0	17,0	12,4	2,071	1,0	48,0
Mediana	24,0	10,5	11,3	1,989	0,8	34,5
Média	23,9	11,6	11,4	1,989	0,7	33,7
Desvio Padrão (σ)	4,43	2,66	0,65	0,038	0,20	8,50
Coefficiente de variação	0,185	0,229	0,058	0,019	0,290	0,252
Valor de projeto	-	-	11,4	1,989	0,91	25,36

Fonte: Autora (2024).

5.3.1.3 Base

A jazida do material granular para a base está localizada próximo à de sub-base, com um volume útil de 38.808 m³. Na classificação AASHTO, o solo variou entre silte argiloso e silte arenoso, sendo o primeiro predominante. Para base, o CBR de projeto da jazida foi de 23% e, como está abaixo do recomendado por DNIT (2006a), foi proposta a estabilização granulométrica com brita (mistura de 50% de solo da jazida e 50% de brita corrida ¾”). A brita da mistura é do tipo gnaiss e apresentou uma adesividade satisfatória somente com 0,5% de aditivo químico dope. O desgaste pelo ensaio de abrasão Los Angeles (faixa B) foi de 25%.

Essa mistura apresentou classificação AASHTO A-1-b e está enquadrada na Faixa D (DNIT, 2006a) para um Número N < 5×10⁶. Das 11 amostras consideradas, somente três apresentaram LL e IP não nulos, porém, dentro dos limites indicados de 25% e 6%, respectivamente. Os valores de expansão e o CBR atenderam aos limites admissíveis. A Tabela 20 apresenta as informações da mistura.

Tabela 20 – Informações descritivas de 11 amostras da mistura de solo-brita para a camada de base da CE-292 (Energia intermodificada)

Parâmetros	$h_{ót}$ (%)	MEAS _{máx} (g/cm ³)	EXP (%)	CBR (%)
Valor mínimo	8,30	2,043	0,00	134,0
Valor máximo	10,40	2,176	0,20	160,0
Mediana	9,30	2,136	0,10	146,0
Média	9,29	2,121	0,08	146,6
Desvio Padrão (σ)	0,65	0,041	0,09	8,6
Coefficiente de variação	0,069	0,019	1,068	0,059
Valor de projeto	9,29	2,121	0,16	138,63

Fonte: Autora (2024).

5.3.1.4 Revestimento

O revestimento da pista principal adotado foi um TSD, com espessura de 2,5 cm. Para o dimensionamento, foram considerados: massa específica de 2.400 kg/m³, coeficiente de Poisson de 0,25 e MR linear de 1.500 MPa. O revestimento do acostamento adotado, quando houver, foi um TSS, para garantir a impermeabilização superficial.

5.3.1.5 Material do acostamento

Para o acostamento foram adotadas duas amostras de solos. A primeira, atendendo SOP (2019b), foi analisada por Bastos (2013) (Amostra 03), coletada no município de Caucaia, Ceará. O solo é uma areia de granulometria fina, do tipo A-2-4, de comportamento não-líquido e não-plástico, com expansão de 0,02%, umidade ótima 8,3%, densidade real de 2.530 kg/m³, massa específica aparente seca máxima de 1.977 kg/m³ e CBR de 41,5%. Para ensaio desse solo foi aplicada uma energia de compactação intermediária. O MR médio desse material é de 277 MPa, e, dado o modelo composto de Pezo (1993), tem-se: $667,9 \cdot \sigma_3^{0,496} \cdot \sigma_d^{-0,228}$.

A segunda amostra foi estudada por Mascarenhas (2016), oriunda do município de Jardim, município localizado na RMC. Esse solo é siltoso, com classificação AASHTO do tipo A-4, densidade real de 2.689 kg/m³, massa específica aparente seca máxima de 2.013 kg/m³, CBR na energia intermediária de 38,5% e expansão de 0,01%. O LL é de 21,6%, o IP de 6,9% (acima do limite máximo), e a umidade ótima identificada foi de 10,7%. O MR médio desse solo é de 430 MPa, cujo melhor modelo, o universal de Witczak e Uzan (1988), é:

$237,5\theta^{0,436}\tau_{oct}^{-0,4047}$. Embora não atenda ao estabelecido por SOP (2019b) quanto ao CBR, foi adotado por ser um material de maior coesão, e estar disponível na região da rodovia em análise.

O material siltoso também foi verificado no que se refere ao comportamento como solo tropical, com uso da Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Com os resultados obtidos, o material foi classificado como de comportamento laterítico classe LA' (laterítico arenoso), fazendo com que essa amostra seja adequada para aplicações rodoviárias.

5.3.1.6 Módulo de resiliência e deformação permanente

As tabelas 21 e 22 apresentam os dados obtidos de MR e DP para os solos da estrutura da CE-292. Os valores referentes ao MR são provenientes do modelo de redes neurais desenvolvido por Ribeiro (2016). Para o caso da DP, além dos coeficientes do modelo considerado, são indicados os materiais que foram adotados para determinação desses valores. Foram considerados para os coeficientes de MR o modelo composto de Pezo (1993) ($k_1.\sigma_3^{k_2}.\sigma_d^{k_3}$), e para DP o modelo de Guimarães (2009) ($\psi_1.\sigma_3^{\psi_2}.\sigma_d^{\psi_3}.N^{\psi_4}$).

Tabela 21 – Coeficientes de MR para os solos da CE-292

Parâmetros	Camadas		
	Base	Sub-base	Subleito
Material (AASHTO)	Solo-brita (A-1-b)	Silte argiloso com pedregulho (A-2-6)	Silte argiloso (A-2-4)
k_1	28,752	212,476	315,491
k_2	-0,517	-0,521	0,276
k_3	-0,458	0,567	-0,294
R^2	0,58	0,77	0,91
MR _{médio} (MPa)	455	273	281

Fonte: Autora (2024).

Tabela 22 – Coeficientes de DP para os solos da CE-292

Parâmetros	Camadas		
	Base	Sub-base	Subleito
ψ_1	1,146	0,184	0,244
ψ_2	0,246	-0,199	0,419
ψ_3	-0,152	1,045	-1,309
ψ_4	0,019	0,039	0,069
R^2	0,76	0,93	0,95
Material DP (Fonte)	Solo AB + Brita (Cabral, 2021)	Solo NS' (Lima; Mota; Aragão, 2019)	Solo Siltoso NS' (Guimarães, 2009)

Fonte: Autora (2024).

As informações das tabelas 21 e 22 foram utilizadas no dimensionamento das espessuras das camadas granulares da rodovia. No caso do subleito, foi considerado o material granular predominante do tipo A-2-4 da camada natural e da área de empréstimo utilizada para sua regularização. Para a camada de base o modelo composto do MR resultou em um coeficiente de determinação (R^2) considerado baixo, porém, dentre os modelos testados foi o de maior resultado obtido.

5.3.2 Dimensionamento da estrutura do pavimento

Para o dimensionamento, foram considerados os dados dos materiais apresentados nos tópicos anteriores. A Tabela 23 apresenta um resumo das informações de entrada para o dimensionamento da estrutura de referência.

Tabela 23 – Informações de entrada das camadas para dimensionamento das estruturas

Parâmetros	Camadas			
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
Material	TSD	Solo-brita	A-2-6	A-2-4
Coefficiente de Poisson	0,25	0,35	0,35	0,40
MR (MPa)	1.500,00	Coeficientes na Tabela 21		
MEAS (g/cm^3)	2,400	2,121	1,989	1,835
Umidade ótima (%)	-	9,29	11,40	6,37
Modelo de DP	-	Coeficientes na Tabela 22		

Fonte: Autora (2024).

Para o dimensionamento do pavimento, foi inicialmente considerada uma estrutura com as espessuras mínimas (15 cm) nas camadas de base e sub-base e um revestimento em TSD com espessura de 2,5 cm. Essa estrutura foi verificada como um pavimento novo, via do sistema local, com nível de confiabilidade de 65%, Número N de 10^6 e período de projeto de 10 anos.

Foram calculados os valores de ATR por camada e total no período de projeto (Tabela 24), que estão abaixo dos limites aceitáveis (considerando os valores limites de ATR total de 20 mm e de ATR do subleito de 8 mm, conforme calculado no item 3.3.2). A estrutura apresentada, portanto, foi a referência para as simulações de infiltração que serão realizadas.

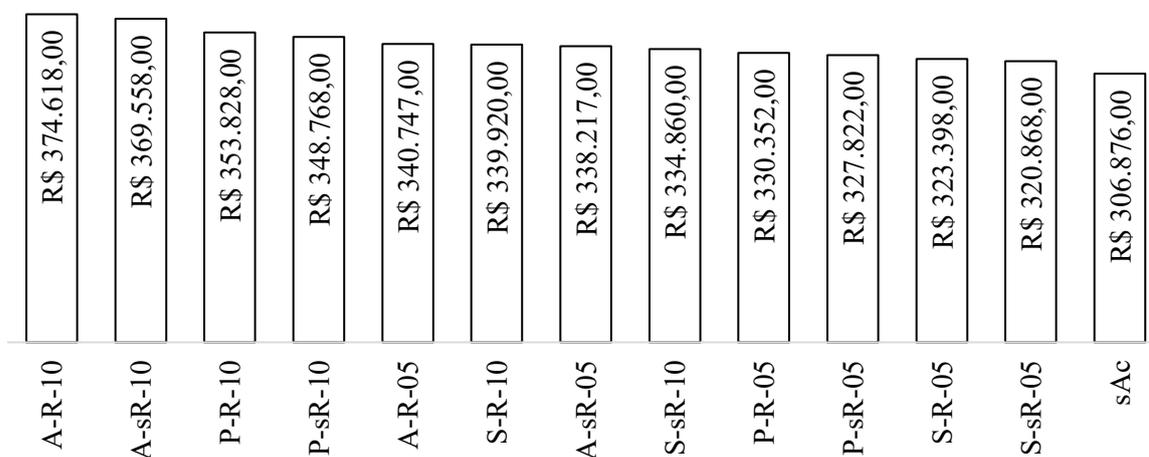
Tabela 24 – Espessura das camadas da estrutura calculada e respectivos valores de ATR calculados no dimensionamento

Camadas	Espessura (cm)	ATR (mm)
Revestimento	2,5	0,00
Base (E1)	15,0	2,06
Sub-base (E2)	15,0	1,18
Subleito	-	2,38
	Total:	5,62

Fonte: Autora (2024).

Ao considerar as espessuras determinadas no dimensionamento e as estruturas a serem simuladas, foram calculados os custos de execução por quilômetro, apresentados no gráfico da Figura 26, em ordem decrescente. Foram consideradas as mesmas condições para os cálculos, incorporando somente os materiais e os serviços de execução das camadas granulares e revestimento, cujas composições podem ser verificadas detalhadamente no Apêndice C. Foi utilizada a versão 28.1 da Tabela de Custos da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (Seinfra, 2023), desonerada.

Figura 26 – Custos por quilômetro das estruturas simuladas



Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Pode-se verificar que as estruturas A-R-10 e A-sR-10, cujos acostamentos são construídos com material conforme SOP (2019b), apresentam maiores custos quando comparadas à estrutura P-R-10, que também possui 1,0 m de largura de acostamento, com revestimento, porém, com os mesmos materiais de base e sub-base. Esses valores serão

utilizados na etapa de análise de desempenho para identificar as estruturas que forneçam a melhor relação benefício-custo.

5.3.3 Modelo hidráulico das camadas não-saturadas

Os parâmetros necessários para determinar a condutividade hidráulica dos materiais estão apresentados na Tabela 25. Foram simulados com base na sua classe textural, também indicadas na tabela. O valor de condutividade hidráulica (K_s) do revestimento em tratamento superficial adotado foi o calculado por Araújo (2019), e corresponde a $9,46 \times 10^{-07}$ m/s, com θ_r nulo, θ_s de 0,069, α de 0,02 1/m e n de 1,917.

Tabela 25 – Parâmetros simulados pela textura dos materiais

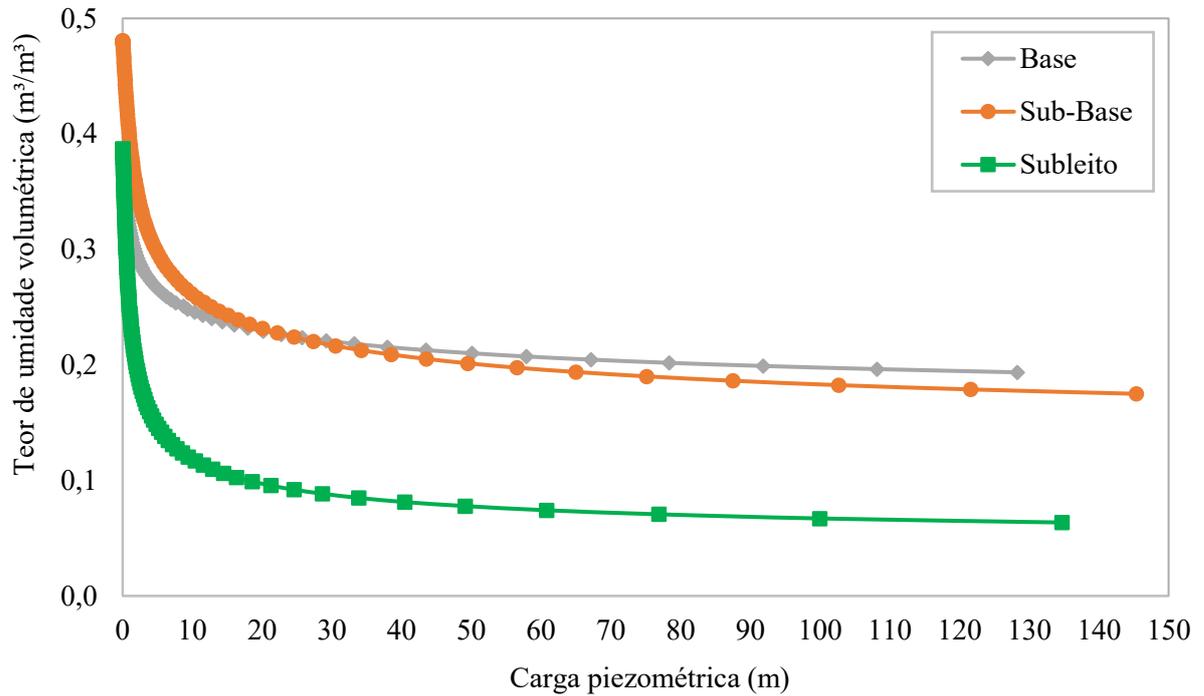
Parâmetros	Base	Sub-base	Subleito	Acostamento (SOP)	Acostamento (Jardim)
Material	Areia argilosa	Silte argiloso	Areia siltosa	Areia fina	Silte
θ_r (cm ³ /cm ³)	0,1169	0,1108	0,0387	0,0530	0,0501
θ_s (cm ³ /cm ³)	0,3854	0,4808	0,3870	0,3747	0,4887
α (1/m)	3,34	1,62	2,67	3,53	0,0066
n	1,2067	1,3207	1,4484	3,1798	1,6769
K_s (m/s)	1,313E-06	1,077E-06	4,427E-06	7,442E-05	5,062E-06

Fonte: Autora (2024).

5.3.3.1 Curvas para obtenção dos valores de carga piezométrica

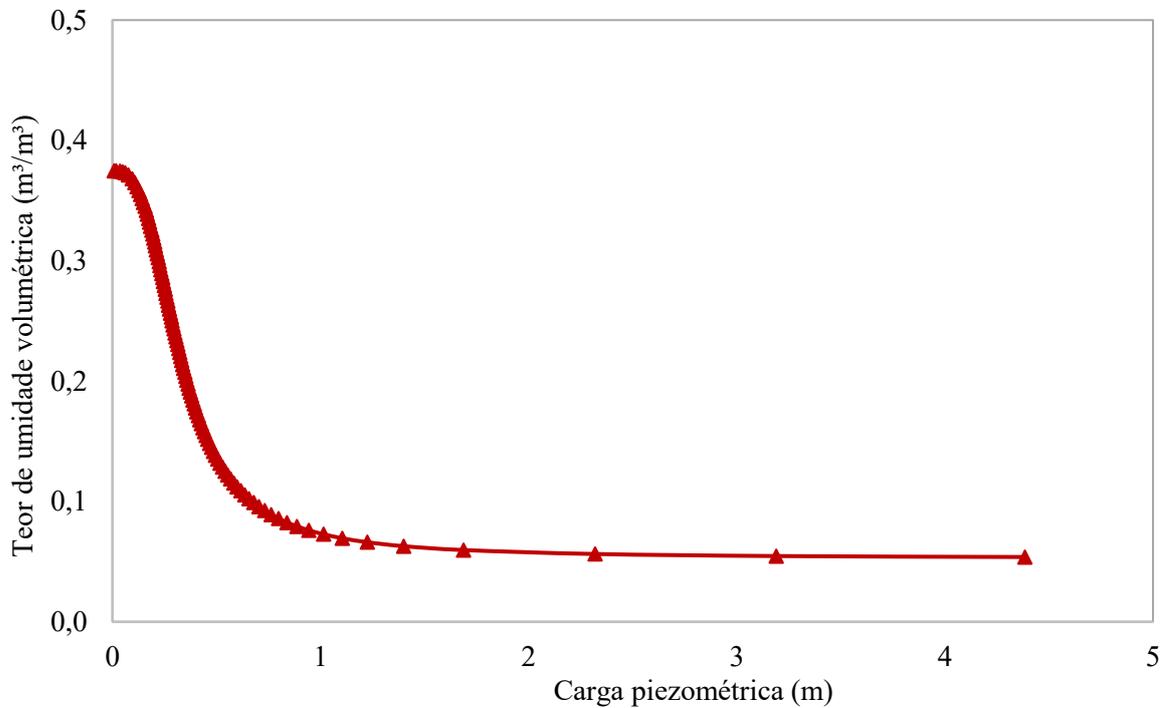
O gráfico da Figura 27 apresenta as curvas de carga piezométrica (*pressure head*) das camadas granulares do pavimento (base, sub-base e subleito) e nas figuras 28 e 29 os dois materiais a serem testados na região do acostamento, arenoso e siltoso, respectivamente. Com essas informações foi possível obter os valores de carga piezométrica correspondentes às umidades ótimas gravimétricas obtidas dos ensaios de compactação (convertidas em umidades ótimas volumétricas) das camadas para inserção no *software* como condição de contorno inicial, apresentadas na Tabela 26.

Figura 27 – Carga piezométrica *versus* teor de umidade das camadas granulares

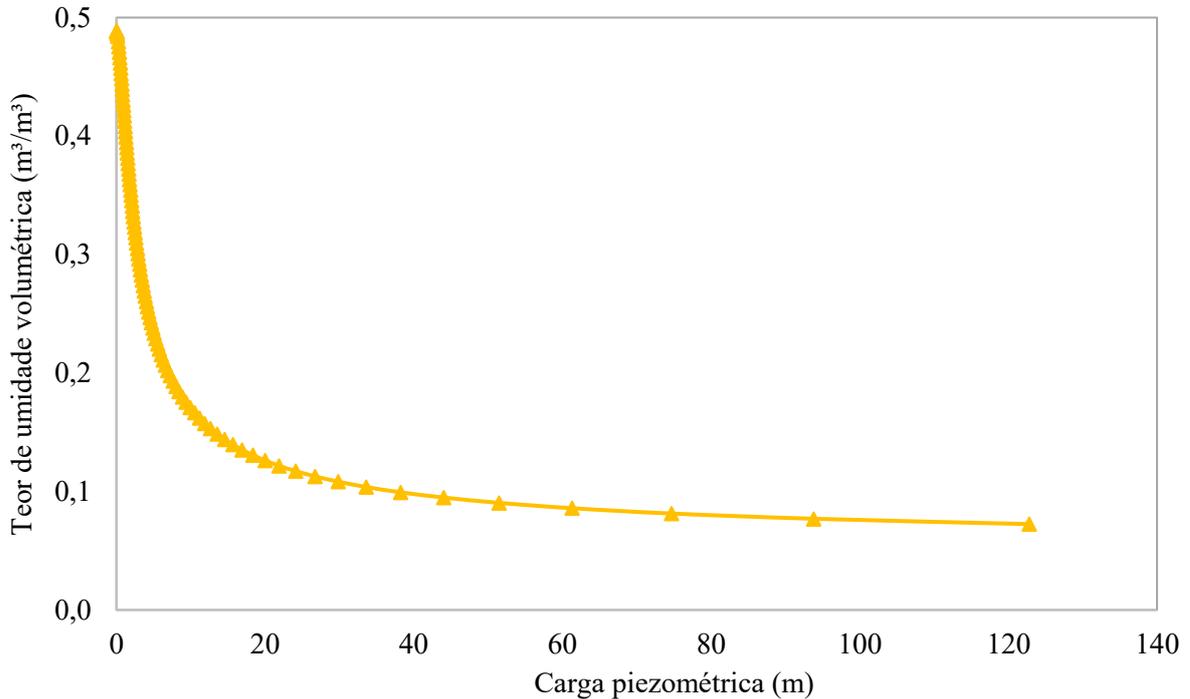


Fonte: Autora (2024).

Figura 28 – Carga piezométrica *versus* teor de umidade do acostamento arenoso (SOP)



Fonte: Autora (2024).

Figura 29 – Carga piezométrica *versus* teor de umidade do acostamento siltoso (Jardim)

Fonte: Autora (2024).

Tabela 26 – Umidade ótima, volumétrica e carga piezométrica das camadas granulares

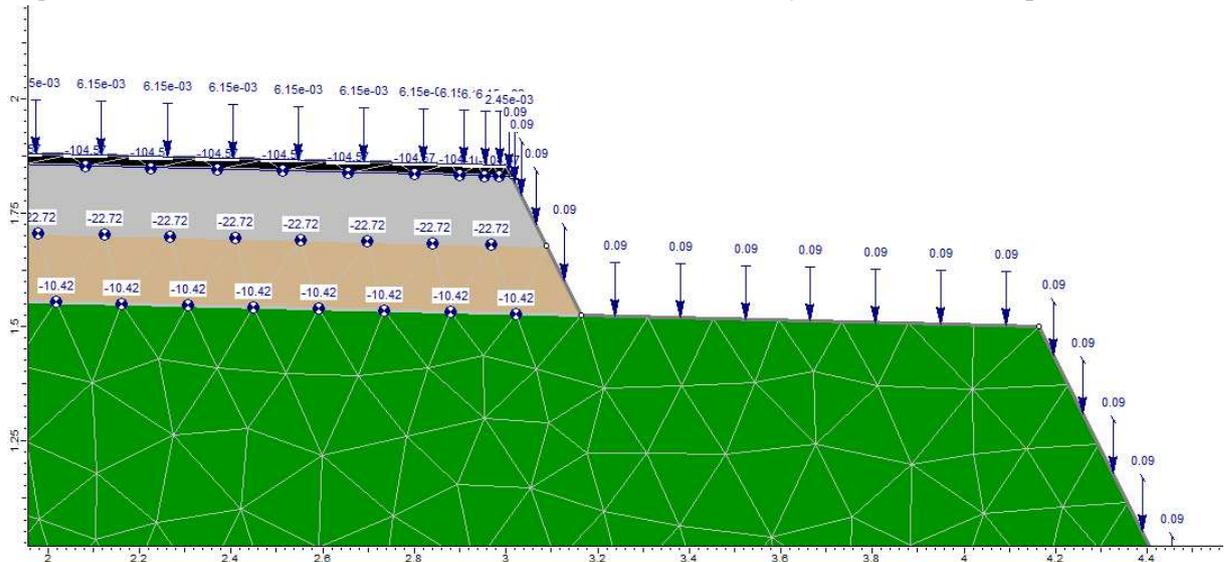
Camada	Umidade ótima (%)	Umidade volumétrica (m³/m³)	Carga piezométrica (m)
Base	9,29	0,197	104,570
Sub-base	11,40	0,227	22,720
Subleito	6,37	0,117	10,420
Acostamento arenoso	8,30	0,164	0,428
Acostamento siltoso	10,70	0,215	6,022

Fonte: Autora (2024).

5.3.4 Cálculo de infiltração nas camadas

Como exemplo de geometria definida para a determinação de infiltração nas camadas do pavimento, dada a pluviometria, a Figura 30 apresenta parte da estrutura 1-00 discretizada pela malha de elementos finitos. Estão inseridas as condições de contorno relativas à infiltração vertical proveniente da pluviometria (no revestimento e nas faces sem proteção conforme calculado no método) e os valores de carga piezométrica de cada camada, correspondentes às umidades ótimas apresentados anteriormente.

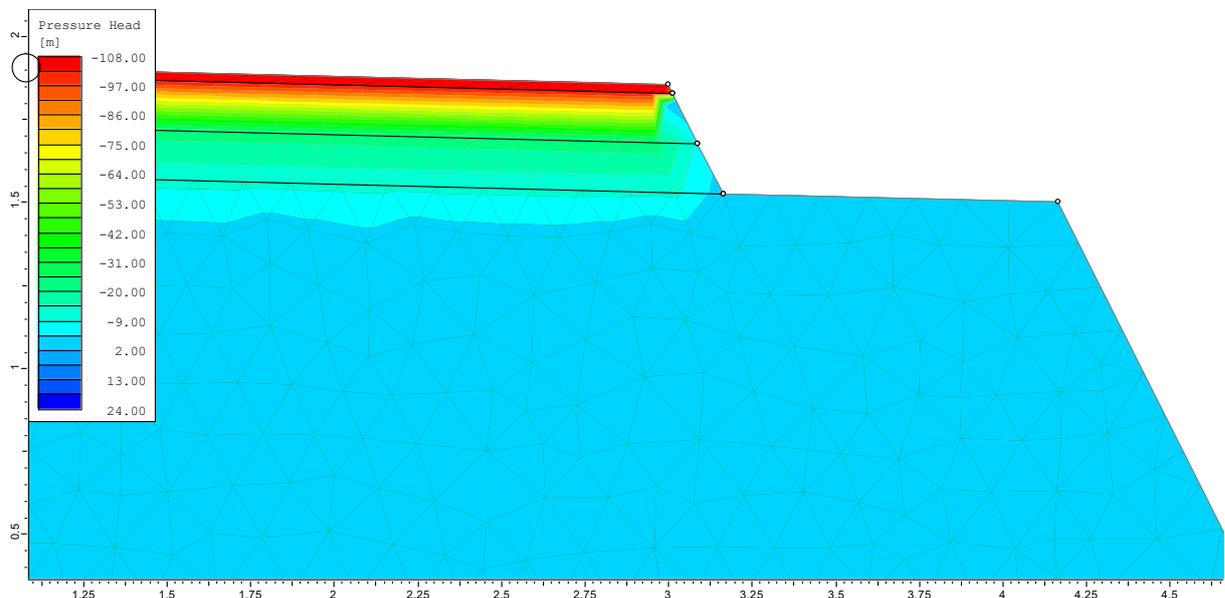
Figura 30 – Recorte da estrutura sAc discretizada com condições de contorno aplicadas



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 30 podem ser observadas as condições de contorno referentes à infiltração vertical, dada a pluviometria, e os valores de carga piezométrica, negativos por estarem em meio não-saturado, ou seja, apresentarem potencial de sucção. A Figura 31 apresenta um gráfico das cargas piezométricas dadas as condições de contorno inicialmente estabelecidas da estrutura sAc. Os gráficos de todas as simulações discretizadas estão no Apêndice D e os gráficos com os valores de carga piezométrica das estruturas simuladas no Apêndice E.

Figura 31 – Recorte do mapa de calor dos valores de carga piezométrica obtidos da simulação da estrutura sAc



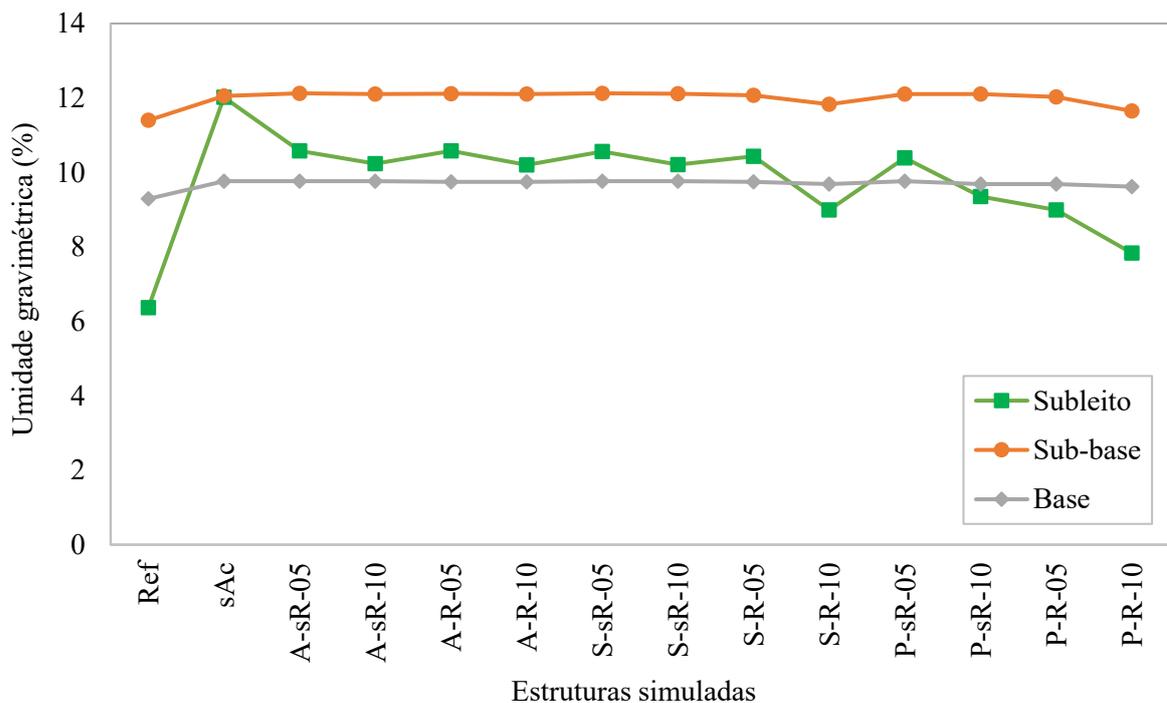
Fonte: Autora (2024).

A partir da Figura 31 podem-se verificar valores negativos de carga piezométrica estimados dadas as infiltrações verticais simuladas indicando que a estrutura, mesmo com alteração de umidade, não está saturada. Portanto, para a obtenção da umidade volumétrica e consequente umidade gravimétrica foram considerados os módulos desses valores, uma vez que são indicativos do meio em análise.

No subleito, o valor de carga piezométrica que gera a maior variação com relação à umidade inicial é o de -1,46 m, correspondente à umidade volumétrica de 0,2205 m³/m³ e, consequentemente, de 12,02% em umidade gravimétrica. Considerando a umidade ótima inicial de 6,37%, houve um acréscimo máximo de 88,6% de água no solo do subleito dada a infiltração proveniente da pluviometria.

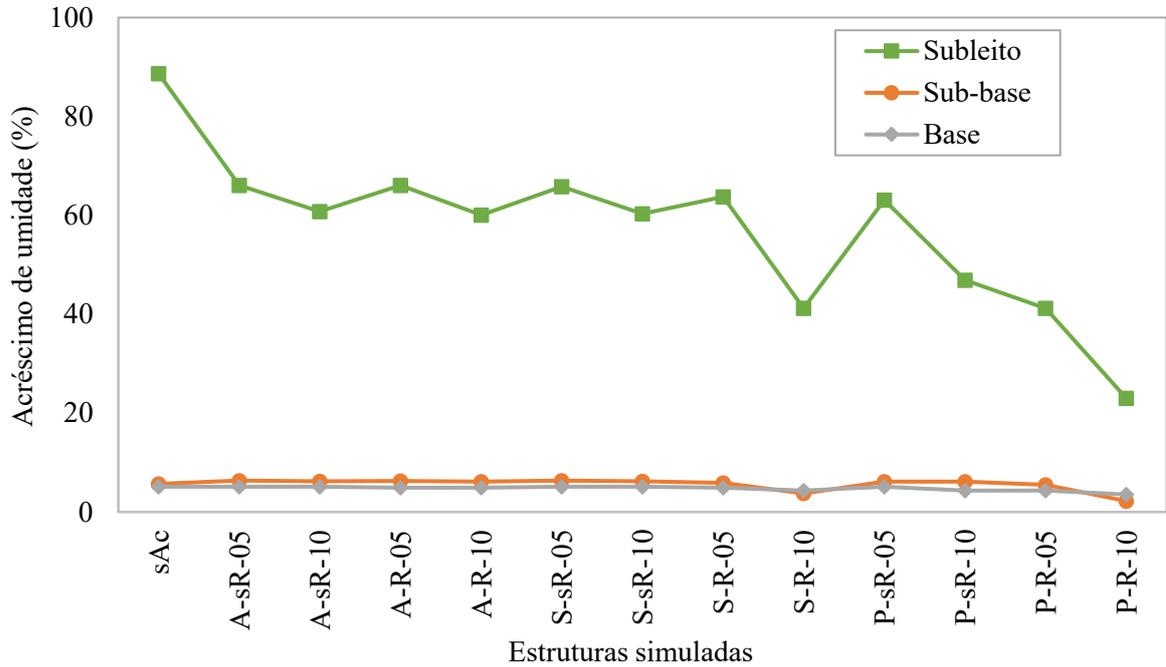
Na sub-base, os valores de carga piezométrica identificados variaram entre -16,40 m e -20,0 m, e na base de -58,50 m a -97,0 m. Para compreender a variação da umidade nas camadas granulares da estrutura do pavimento sobre sua vida útil, foram considerados para cálculo e análise os valores de carga piezométrica que geram as maiores variações com relação à umidade ótima inicial. Assim, a Figura 32 apresenta as umidades gravimétricas ótima da estrutura referência, sem infiltração (Ref) e as obtidas pelas simulações de infiltração, enquanto a Figura 33 os acréscimos de umidade ocorridos da infiltração pela pluviometria por camada.

Figura 32 – Umidades gravimétricas nas camadas granulares da estrutura do pavimento



Fonte: Autora (2024).

Figura 33 – Variação da umidade gravimétrica nas camadas granulares das estruturas de pavimentos simulados com relação à umidade ótima (Ref)

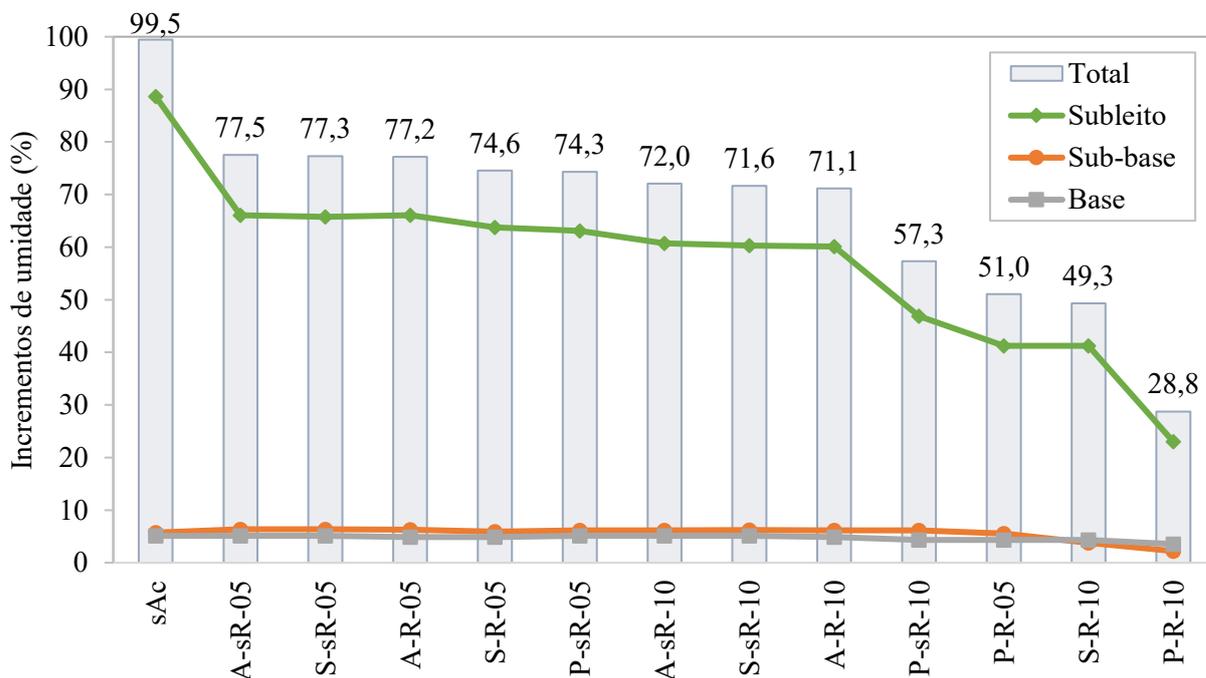


Fonte: Autora (2024).

Pode-se verificar, pela Figura 32, que o subleito sofreu a maior variação de umidade com relação à umidade ótima inicial, seguido pela sub-base e pela base. Essa informação pode ser ratificada pelo gráfico da Figura 33, com variações maiores no subleito, e menores nas demais camadas. O subleito, como pode ser verificado no esquema geométrico da estrutura, é a região que está mais suscetível à infiltração, por não possuir contenção lateral e maior área de infiltração.

Os valores de carga piezométrica identificados das simulações, suas respectivas umidades volumétricas e gravimétricas dada a infiltração pluviométrica estão dispostos no Apêndice F. Nesse apêndice também estão apresentados os valores percentuais dos incrementos que a variação de umidade ocasionou, considerando as umidades ótimas das camadas. Para auxiliar na visualização da camada que mais sofreu variação para a menor, foram também somados os percentuais de acréscimo das camadas em cada estrutura simulada, buscando realizar um ordenamento dessas estruturas. A partir desse ordenamento, o gráfico da Figura 34 apresenta as estruturas simuladas variando do maior incremento total de umidade para o menor valor, bem como os incrementos de umidade calculados de cada camada, para efeito comparativo.

Figura 34 – Classificação em ordem decrescente dos incrementos de umidade dada a pluviometria nas estruturas simuladas



Fonte: Autora (2024).

A partir da Figura 34, algumas considerações podem ser apontadas, conforme seguem na mesma ordem do gráfico:

- sAc (sem acostamento): é a estrutura simulada que apresentou a maior variação de umidade no subleito (88,63%) e na base (5,12%) devido à infiltração. Assim, a falta de acostamento afeta diretamente essas camadas da estrutura do pavimento;
- A-sR-05 (acostamento arenoso, sem revestimento, com largura de 0,5 m): essa estrutura teve a segunda maior infiltração total no subleito identificada, com incremento de 66,04%;
- S-sR-05 (acostamento siltoso, sem revestimento, com 0,5 m): apresentou umidade no subleito inferior à estrutura similar A-sR-05, contudo, um incremento muito próximo, de 65,79%;
- A-R-05 (acostamento arenoso, revestimento em TSS, largura de 0,5 m): apresentou o mesmo valor de umidade no subleito da estrutura A-sR-05, porém, a diferença entre essas estruturas é o fato de uma ser revestida, e assim, esperava-se uma maior proteção quanto à infiltração, que pode não ter ocorrido dado o material arenoso ser mais poroso;

- e) S-R-05 (acostamento siltoso, revestimento em TSS, largura de 0,5 m): apresentou, no subleito, menor umidade que a identificada na S-sR-05, com acréscimo de 63,76%, pois o revestimento atuou como camada impermeabilizante, dificultando a infiltração;
- f) P-sR-05 (acostamento com mesma estrutura da pista principal, sem revestimento, com 0,5 m): apresentou uma variação no subleito de 63,06%, inferior a duas estruturas com mesmas larguras de acostamento, porém com revestimento;
- g) A-sR-10 (acostamento arenoso, sem revestimento, com largura de 1,0 m): mesmo sem revestimento, apresentou variação no subleito de 60,75%, menor que estruturas com revestimento, porém, com menores dimensões, assim, larguras de acostamento superiores auxiliam na proteção das camadas da pista principal;
- h) S-sR-10 (acostamento siltoso, sem revestimento, com 1,0 m): é uma estrutura similar à A-sR-10, porém, com o material do acostamento do tipo siltoso, que apresentou umidade no subleito de 60,31%, um pouco inferior à A-sR-10, por apresentar menor teor de vazios característica da granulometria desse material
- i) A-R-10 (acostamento arenoso, revestimento em TSS, largura de 1,0 m): apresentou uma variação de umidade de 60,09%, inferior às estruturas de mesma largura de acostamento A-sR-10 e S-sR-10 por possuir revestimento;
- j) P-sR-10 (acostamento com mesma estrutura da pista principal, sem revestimento, com 1,0 m): apresentou uma variação de umidade no subleito mais baixa que as estruturas anteriores, de 46,87%;
- k) P-R-05 (acostamento com mesma estrutura da pista principal, revestimento em TSS, largura de 0,5 m): essa estrutura apresentou acréscimo de umidade de 41,21%, uma das menores variações de umidade no subleito;
- l) S-R-10 (acostamento siltoso, revestimento em TSS, largura de 1,0 m): a variação de umidade no subleito foi igual à observada na estrutura P-R-05;
- m) P-R-10 (acostamento com mesma estrutura da pista principal, revestimento, largura de 1,0 m): é a estrutura que apresentou a menor variação de umidade em todas as camadas, correspondente a 23%.

Dadas as condições de acostamentos, verificou-se que a simulação sAc e todas aquelas sem revestimento, exceto P-sR-10, podem não garantir proteção quanto à infiltração para a camada de base, pois nessas simulações essa camada apresentou a maior variação

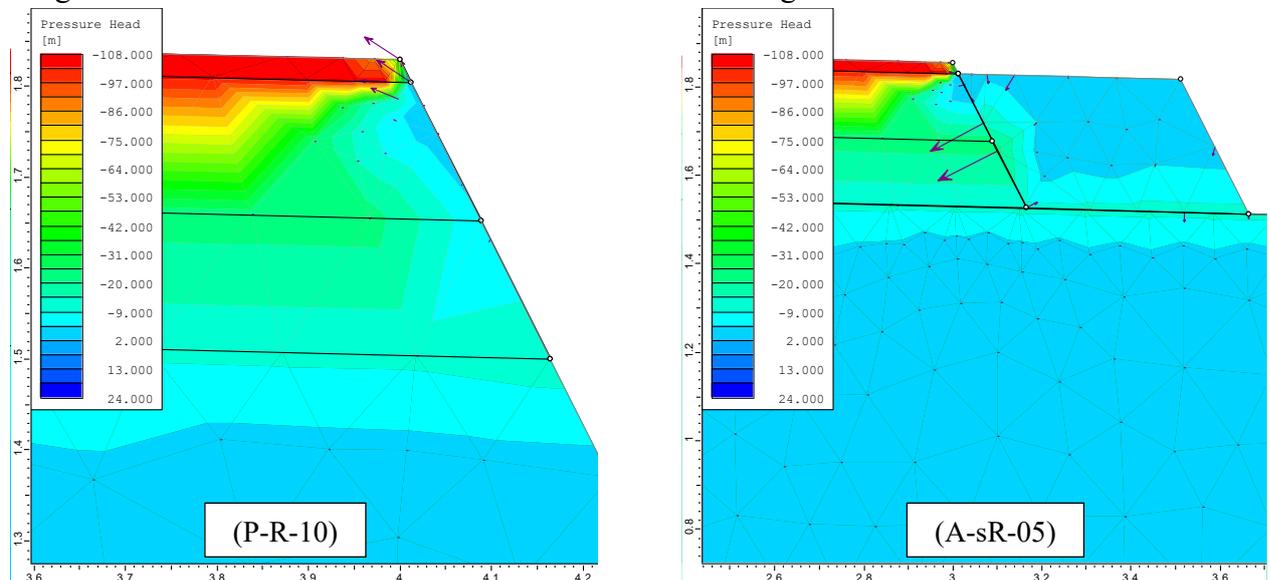
(+5,12%). A sub-base apresentou menor proteção nas simulações A-sR-05 e S-sR-05, ambas com um acréscimo de 6,36%.

Essas mesmas camadas tiveram acréscimos em todas as estruturas simuladas, sendo os valores das simulações que consideraram a presença de acostamentos com ou sem revestimento, independente das larguras, tiveram valores médios de umidades gravimétricas de 12,04% e 9,73%, para a sub-base ($h_{ót}$ de 11,40%) e base ($h_{ót}$ de 9,29%), respectivamente. Assim, pode-se verificar que a existência de acostamento, mesmo que em menor largura e sem revestimento, pode garantir uma proteção à infiltração entre 4,73% e 5,60% nas camadas acima do subleito, quando comparado à situação de não existência de acostamento.

Quanto ao subleito, além da simulação sAc, também se verificou um acréscimo elevado nas umidades de todas aquelas com acostamento em material arenoso, com ou sem revestimento, independente da largura, com valor médio de 63,23%. Também foram identificados valores de acréscimo acima de 60% nas estruturas com acostamento silteoso, exceto S-R-10. Das simulações com a mesma estrutura da pista principal, somente a P-sR-05 teve valor nesse intervalo, sendo as demais abaixo de 50%.

Quando os acostamentos são construídos com os mesmos materiais da pista principal (base e sub-base) e com revestimento do tipo TSS, há acréscimo de umidade, mas em menor escala, sendo o mínimo no subleito observado na simulação P-R-10, de 23% (que também apresentou as menores variações de umidade na base e na sub-base, de 3,54% e de 2,21%, respectivamente). A Figura 35 apresenta os vetores de velocidade do fluxo transiente da água infiltrada das simulações P-R-10 e A-sR-05.

Figura 35 – Vetores de velocidade do fluxo transiente da água infiltrada



Fonte: Autora (2024).

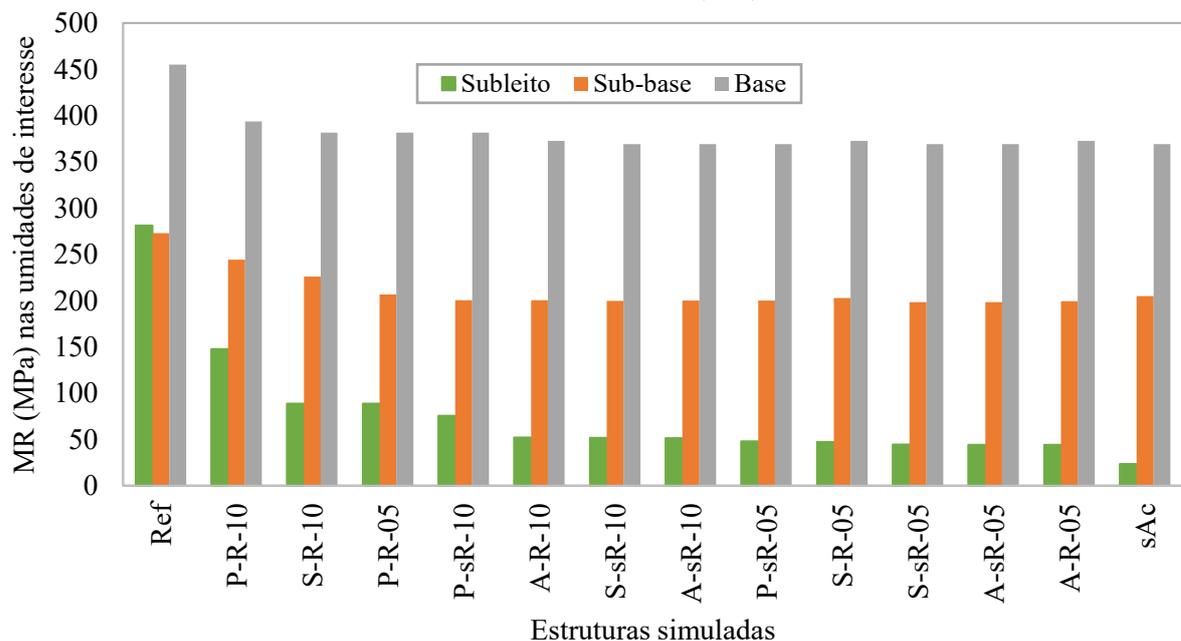
Os comprimentos dos vetores observados na Figura 35 são proporcionais à velocidade do fluxo de água ao longo das camadas granulares. Assim, pode-se verificar que a velocidade de infiltração através das camadas granulares é superior na estrutura simulada A-sR-05 quando comparado à simulação P-R-10, fazendo com que as variações de umidade sejam superiores quando o acostamento é de material arenoso sem revestimento.

Assim, considerando o subleito, que é a camada mais suscetível à infiltração, as estruturas simuladas mais viáveis seriam, considerando as variações de umidade são, em ordem decrescente: P-R-10, S-R-10, P-R-05 e P-sR-10. Essas estruturas não são as que apresentam os maiores valores de execução, sendo, em ordem crescente de custo: P-R-05, S-R-10, P-sR-10 e P-R-10. Considerando o ganho de proteção da estrutura quanto à infiltração e o custo de execução, a estrutura ideal seria preferencialmente a P-R-10 (com acostamento de largura 1,0 m, revestido em TSS sobre a mesma estrutura da pista principal).

5.3.5 Impacto da variação de umidade na rigidez das camadas granulares

Para verificar o impacto na rigidez das camadas granulares das estruturas simuladas, foram calculados os MR médios nas umidades de interesse (MR_h). A Figura 36 apresenta a variação decrescente por simulação das três camadas granulares analisadas, que pode ser comparado a partir da estrutura referência (Ref) na umidade ótima.

Figura 36 – Variação dos MR médios nas umidades de interesse (MR_h) com base nos MR obtidos com as umidades ótimas do ensaio de Proctor (Ref)



Fonte: Autora (2024).

Da Figura 36 pode-se perceber que a variação dos valores de MR_h devido às alterações de umidade são maiores no subleito, sendo o valor do MR médio do material na umidade ótima de 281,11 MPa, com reduções que chegam a 91%. Nas demais camadas, também há decréscimos, porém, em menor amplitude, sendo as maiores variações identificadas, nas camadas de sub-base e de base, de aproximadamente 27% e 18%, respectivamente. A Tabela 27 apresenta parâmetros descritivos e de dispersão dos dados obtidos que estão apresentados no Apêndice G.

Tabela 27 – Informações descritivas e de dispersão dos valores de MR_h

Parâmetros	Subleito	Sub-base	Base
Média (MPa)	77,70	210,98	380,35
Desvio padrão (MPa)	66,00	22,03	22,69
Coefficiente de variação (%)	84,94	10,44	5,97
Mínimo (MPa)	23,44	198,28	369,08
Máximo (MPa)	281,11	272,78	454,94
Mediana (MPa)	51,54	200,31	372,43

Fonte: Autora (2024).

Verifica-se, da Tabela 27, que todas as estruturas simuladas tiveram decréscimo nos valores médios de MR, dado que os valores máximos identificados nas umidades de interesse são inferiores ao MR na umidade ótima. As maiores variações foram identificadas no subleito, com coeficiente de variação próximo a 85%, ou seja, essa camada apresenta indícios de ser mais sensível ao incremento de umidade se comparada às demais. A Tabela 28 apresenta os valores dos coeficientes de regressão (k_{1h}) do modelo composto.

Tabela 28 – Valores do coeficiente de regressão k_1 nas umidades de interesse (continua)

Estruturas	Subleito	Sub-base	Base
Ref	315,49	212,48	28,75
sAc	27,84	160,63	23,44
A-sR-05	51,68	155,57	23,44
A-sR-10	59,75	156,95	23,44
A-R-05	51,68	156,35	23,64
A-R-10	60,84	157,12	23,64
S-sR-05	52,04	155,57	23,44
S-sR-10	60,48	156,61	23,44
S-R-05	55,02	159,13	23,64
S-R-10	102,03	176,69	24,21
P-sR-05	56,08	157,04	23,44

Tabela 28 – Valores do coeficiente de regressão k_1 nas unidades de interesse (conclusão)

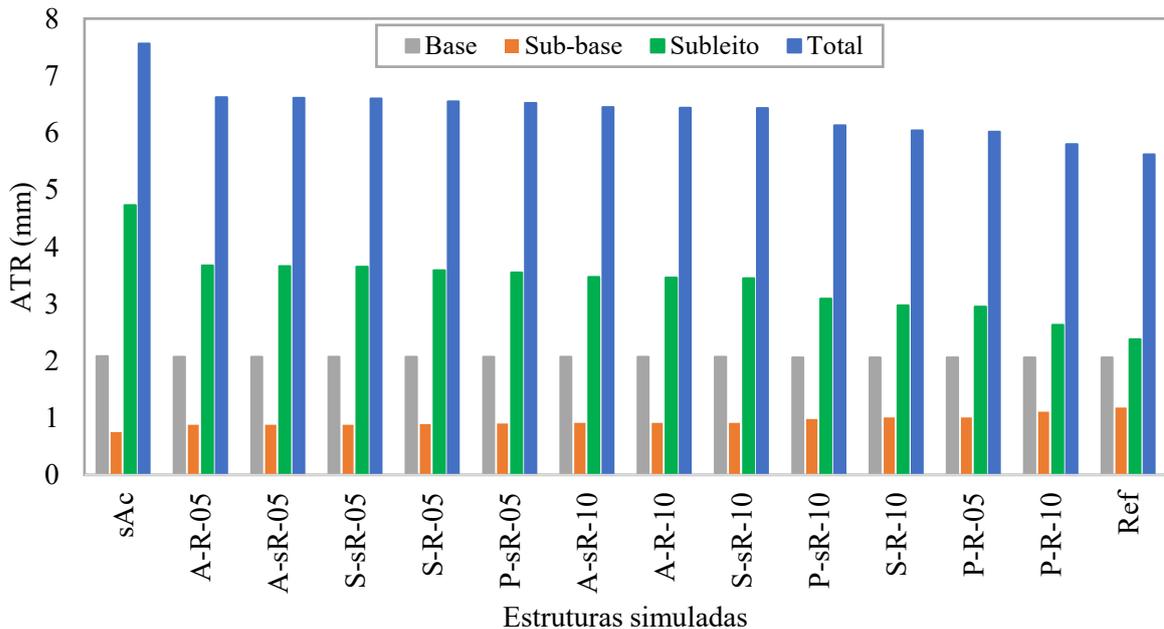
Estruturas	Subleito	Sub-base	Base
P-sR-10	87,37	157,12	24,21
P-R-05	102,03	162,05	24,21
P-R-10	168,03	190,63	24,96

Fonte: Autora (2024).

5.3.6 Análise de desempenho estrutural em função dos afundamentos de trilha de roda

Os valores da Tabela 28 foram utilizados para calcular os afundamentos de trilha de roda, considerando o modelo composto de MR com o coeficiente k_1 das unidades de interesse. O gráfico da Figura 37 apresenta os valores de ATR obtidos por camada e total das estruturas simuladas, em ordem decrescente do ATR_{TOTAL} .

Figura 37 – Valores de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) por camada e total (em mm)



Fonte: Autora (2024).

Pode-se visualizar, a partir da Figura 37, que os ATR da camada de base variam em 0,02 mm, mesmo considerando a estrutura de referência. Essa baixa variação reflete a rigidez e a estabilidade da mistura solo-brita da camada, compactada na energia intermodificada pois, mesmo com variação de umidade, não apresentou afundamentos superiores.

A sub-base apresentou uma variação mais visível das estruturas simuladas, porém, todas com valores próximos, variando em no máximo 0,36 mm. Ainda sobre a sub-base, os

afundamentos calculados das simulações foram inferiores ao da estrutura de referência (com umidade ótima), pois as variações de umidade nessa camada não foram significantes (quando comparadas às variações do subleito) e esse material foi compactado numa energia intermediária.

A maior variação ocorrida foi no subleito (e conseqüentemente no ATR total), com diferenças que chegam a 2,10 mm, correspondente a cerca de 88% da referência. O subleito mostrou maior sensibilidade à infiltração e conseqüente variação da umidade. Mesmo sendo classificado como A-2-4 e A-3, houve maiores deformações, mesmo que inferiores aos limites aceitáveis.

5.4 Considerações finais

As estruturas com variação de acostamento testadas neste artigo permitiram verificar que a sua existência no pavimento rodoviário promove a proteção das camadas de sub-base e base, dificultando a infiltração das águas pluviais. O subleito, por sua vez, está mais suscetível às alterações de umidade pela infiltração dessas águas quando o material do acostamento apresenta maior teor de finos, como foram os casos das estruturas em que foi simulado um solo siltoso e a mesma estrutura do pavimento, com sub-base silto-argilosa, preferencialmente com um revestimento, garantindo maior impermeabilização.

Caso o material a ser empregado nos acostamentos seja um solo mais arenoso, obrigatoriamente é demandado um revestimento na sua superfície, embora ainda apresente uma infiltração mais rápida e de maior proporção. Preferencialmente deve-se executar o acostamento do pavimento rodoviário com as mesmas camadas (materiais e espessuras) da pista principal, uma vez que, a construção da rodovia torna-se mais rápida, e aproveita o uso de jazidas já exploradas.

Quanto à rigidez das camadas, houve maior redução do MR médio do subleito de acordo com as variações de umidade em todas as simulações, sendo a menor variação identificada na estrutura que empregou no acostamento o mesmo material da pista principal, com 1,0 m de largura e revestimento em TSS (P-R-10) para todas as camadas. Conseqüentemente, também houve redução dos valores de coeficiente do modelo composto (k_1), sendo, para a mesma estrutura P-R-10, a menor variação. O subleito foi a camada que mais sofreu mudanças na rigidez devido à alteração de umidade decorrente da infiltração e, assim, pode-se dizer que os materiais A-2-4 e A-3, mesmo sendo classificados bom a excelentes para subleitos são mais suscetíveis a essas mudanças.

Essas alterações acarretam maiores valores de ATR nas simulações, quando comparados àqueles obtidos na estrutura com somente umidade ótima. A estrutura que apresentou os menores valores de afundamento no subleito e total foi a P-R-10, seguida da P-R-05, que possui no acostamento os mesmos materiais e camadas da pista principal, com 0,50 m de largura e revestimento em TSS. Porém, nenhuma das estruturas simuladas ultrapassou os limites de afundamento total ou do subleito no período de projeto considerado. Ao avaliar a alteração de variação, dos valores do MR e a DP, a estrutura mais adequada recomendada seria a que possui os mesmos materiais e espessuras da pista principal no acostamento, com largura de 1,0 m, pois o custo dessa solução não é o maior dentre as opções avaliadas.

As principais limitações deste capítulo referem-se ao *software* utilizado, uma vez que tem como foco a análise mais aplicada à área de geotecnia, como estabilidade de taludes e percolação em barragens de terra. Foi necessário definir uma geometria em que foi limitada uma espessura de subleito, porém, sabe-se que essa camada, nos métodos de análise de estruturas de pavimentos rodoviários, não tem esse valor delimitado. Como o *software* (e de outros que executam análises similares) não é destinado a pavimentos, o parâmetro de entrada referente à umidade teve que ser convertido em carga piezométrica, o que foi realizado com interpolação linear simples dos valores tabelados, o que pode não fornecer o resultado mais adequado.

Além dessa, outra limitação foi a falta de informações sobre permeabilidade dos materiais que foram utilizados na construção dessa rodovia. Embora o método utilizado para estimar a permeabilidade seja amplamente utilizado na literatura, o ideal seria incorporar as informações reais desses solos, uma vez que a permeabilidade está ligada, também, ao arranjo dos grãos que ocorre pelas diferentes energias de compactação possíveis em pavimentos rodoviários.

O estudo apresentado neste capítulo utilizou informações de permeabilidade estimadas, e, assim, propõe-se que sejam incorporados ensaios específicos nos materiais das camadas granulares para obtenção dos valores reais. Recomenda-se, ainda, em RBVT que apresentam mais vulnerabilidade à exposição do clima, notadamente à infiltração por pluviometria, seja incorporado o dimensionamento de largura dos acostamentos com base na capacidade de proteção da estrutura principal da rodovia.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Principal contribuição da Tese

Este trabalho contribuiu para uma melhor caracterização das Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT), quanto ao dimensionamento, mecanismos de ocorrência de defeitos e impactos dos efeitos climáticos nos acostamentos como subsídios para apoio à tomada de decisão. Quanto ao dimensionamento de RBVT, foi elaborado um catálogo desenvolvido com base em parâmetros estimados de resistência mecânica dos materiais, tornando o custo de implantação dessas estruturas mais atrativo.

Quanto aos mecanismos de ocorrência de defeitos, com dados de levantamentos de falhas existentes e condições das RBVT, foi possível compreender quais parâmetros mais influenciam na sua maior frequência. Assim, gestores podem planejar as ações de manutenção e reabilitação de forma mais eficiente para evitar o desenvolvimento dos danos existentes.

Quanto aos efeitos climáticos nos acostamentos, as RBVT demandam acostamentos em larguras e materiais adequados para proteção das suas estruturas quanto às variações de umidade oriundas de infiltrações pluviométricas que podem ocorrer pelas laterais. O ideal é que esses elementos sejam construídos da mesma forma que a pista de rolamento principal quanto aos materiais e espessuras, e que tenham revestimento asfáltico, pelo menos, em tratamento superficial simples.

6.2 Principais conclusões

6.2.1 *Acerca da revisão bibliográfica*

Embora não se tenha uma unanimidade quanto à definição de uma RBVT no que se refere ao tráfego, este trabalho considerou como limite máximo um Número N de 10^6 . Para ampliar a rede pavimentada de RBVT no estado do Ceará, a solução de revestimento recomendada, considerando o baixo custo, é o Tratamento Superficial por Penetração (TSP), a depender dos materiais a serem empregados nas camadas granulares subjacentes.

As RBVT apresentam particularidades que as distinguem daquelas com revestimento em Concreto Asfáltico. Elas devem ser tratadas de forma diferente no que se refere ao dimensionamento, ao projeto, à execução e à avaliação das condições funcionais e estruturais. Essas rodovias são mais afetadas pelo meio ao qual estão expostas do que ao tráfego,

sendo as infiltrações dadas pela pluviometria que ocorrem nas laterais das estruturas um dos principais fatores de atenção.

Como as camadas granulares de rodovias são compactadas na umidade ótima e, portanto, as características mecânicas desses materiais reduzem com o incremento de umidade, o pavimento, mais especificamente o subleito, requer proteção. Os acostamentos são elementos que podem auxiliar no suporte da estrutura, tanto com relação à proteção contra infiltração, quanto ao confinamento das camadas em si.

6.2.2 Acerca da análise do dimensionamento de pavimentos de RBVT

Embora o novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) esteja em vigor, foi possível desenvolver o projeto das estruturas de RBVT com valores médios de Módulo de Resiliência (MR) disponíveis na literatura ou mesmo estimados por métodos comprovadamente eficientes, de acordo com os materiais a serem adotados nas camadas granulares. A partir desses valores de MR, e as demais características dos materiais granulares, podem ser gerados catálogos com soluções que englobem os solos mais ocorrentes na região em que uma rodovia será implantada, reduzindo custos.

6.2.3 Acerca da influência de variáveis explicativas na frequência de panelas e remendos

Com informações de levantamentos realizados para o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), é possível identificar os parâmetros que influenciam na maior frequência de defeitos dos pavimentos. Como a frequência desses defeitos pode ser categorizada em baixa, média e alta, a regressão logística foi o método estatístico que permitiu o cálculo das probabilidades dessas categorias. Foram analisados, como variáveis dependentes, as frequências dos defeitos panelas e remendos.

Panelas mais severas em RBVT são fortemente influenciadas pela existência de afundamentos e trincamentos, que podem ser controladas com a seleção adequada de materiais na etapa de construção e com ações de manutenção e reabilitação (M&R) mais racionais para evitar sua propagação, quando iniciadas. Por sua vez, os remendos mais severos de RBVT podem ser evitados com o controle do tráfego, uma vez que, quando pavimentadas de forma adequada, promovendo conforto ao rolamento, essas rodovias tendem a apresentar acréscimo de tráfego. Além disso, devem ser evitados trincamentos e, se iniciados, saná-los em momento oportuno.

6.2.4 Acerca da influência dos acostamentos no desempenho estrutural de RBVT

Em RBVT sem acostamento, a base e a sub-base estão mais suscetíveis às variações de umidade dada a infiltração lateral. Assim, acostamentos devem sempre ser previstos para proteção dessas camadas. Acostamentos de materiais predominantemente arenosos demandam uma camada de revestimento para sua impermeabilização, pois, caso não seja executada, o subleito apresenta elevadas variações de umidade e perda de rigidez acentuada.

Acostamentos com materiais mais finos, como siltes e argilas, tem percolação menor, apresentando variação de umidade, porém, inferior às estruturas com acostamentos arenosos. Acostamentos com a mesma estrutura da pista principal, quanto aos materiais e espessuras, dotado de um revestimento em TSS, garantem a melhor proteção da rodovia quanto às infiltrações, reduzindo a variação de umidade principalmente do subleito, sendo esses acostamentos, preferencialmente, com largura de 1,0 m (podendo ser de, no mínimo, 0,50 m).

6.3 Principais limitações da Tese

No decorrer desta Tese foram identificadas algumas limitações. Inicialmente pode ser destacado que o parâmetro de tráfego que delimita uma RBVT precisa ser consolidado. Mesmo no Brasil, de acordo com informações de órgãos gestores como o DNIT e os Departamentos de Estradas de Rodagem de alguns estados (Ceará, Minas Gerais e São Paulo), as variáveis consideradas e os valores que as classificam diferem. É importante definir uma ou mais variáveis de tráfego como critérios de classificação, com valores que poderão ser adotados e aplicados por toda a extensão do país, facilitando o projeto, a construção e a gestão das RBVT.

A impossibilidade de acesso a um banco de dados organizado com informações detalhadas sobre projeto de rodovias, sua construção e levantamentos funcionais e estruturais foi a principal limitação identificada ao decorrer desta Tese. Essas informações poderiam auxiliar nos cálculos de influência dos diversos parâmetros na ocorrência e frequências mais elevadas de defeitos em pavimentos das rodovias objetos de estudo. Além disso, informações como a caracterização mecânica dos materiais também podem embasar a ampliação de um catálogo de soluções para RBVT com diferentes solos. Para a predição de valores de frequência de defeitos, a falta de informações afeta a calibração e verificação dos modelos.

Quanto às análises dos acostamentos, a limitação encontrada foi a falta de informações de permeabilidade dos materiais das camadas granulares, como o coeficiente de

permeabilidade. Além disso, é necessário o desenvolvimento de *softwares* específicos para avaliar a infiltração em estruturas de pavimentos rodoviários, com condições de contorno específicas para essa realidade, promovendo um dimensionamento otimizado das larguras dos acostamentos.

Na verificação do desempenho estrutural da RBVT analisada quanto ao acostamento, foi utilizado um modelo estimado para solos do interior de São Paulo. Esse modelo, embora obtido de vários diferentes tipos de solos, buscando abranger uma gama extensa representativa, pode não ser o ideal para os solos das camadas da estrutura analisada no estado do Ceará.

6.4 Recomendações de trabalhos futuros

Dadas as conclusões obtidas e limitações identificadas ao longo dos capítulos, as sugestões de estudos e trabalhos futuros são:

- a) Definir uma classificação padronizada de RBVT com relação a algum parâmetro de tráfego, preferencialmente o Número N que é o parâmetro de entrada para o dimensionamento de pavimentos rodoviários no Brasil;
- b) Ampliar o catálogo de soluções para o dimensionamento de RBVT, alterando as opções de materiais para abranger o máximo possível de combinações, utilizando, por exemplo, o banco de dados desenvolvido por um projeto entre a Universidade Federal do Ceará e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes que pode ser utilizado para melhorar essas simulações;
- c) Estruturar um banco de dados com informações mais completas sobre as RBVT, com dados de projeto, caracterização dos materiais, dados construtivos e dos levantamentos de condição funcional e estrutural que são realizados ao longo da vida útil dessas estruturas;
- d) Compreender de forma mais aprofundada o mecanismo de ocorrência de outros defeitos como corrugação, desgaste, exsudação e trincamento, não abordados aqui pela falta de informações, utilizando dados de outros estados, buscando um modelo mais abrangente em nível nacional;
- e) Desenvolver um método de dimensionamento específico para RBVT que possa incorporar parâmetros como a permeabilidade dos solos (inclusive adicionando ensaios de caracterização como coeficiente de permeabilidade) e as larguras

dos acostamentos para prever a vida útil estimada das RBVT, considerando as informações pluviométricas máximas de cada região;

- f) Utilizar outros *softwares* de dimensionamento e análise estrutural de pavimentos para realizar as simulações apresentadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABED, A.; RAHMAN, M.; THOM, N.; HARGREAVES, D.; LI, L.; AIREY, G. Analysis and Prediction of Pothole Formation Rate Using Spatial Density Measurements and Pavement Condition Indicators. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2677(11). Transportation Research Board, Washington, D.C., 2023. DOI: 10.1177/03611981231166684.

ABU-FARSAKH, M. Y.; MEHROTRA, A.; MOHAMMAD, L.; GASPARD, K. Incorporating the Effect of Moisture Variation on Resilient Modulus for Unsaturated Fine-Grained Subgrade Soils. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2510, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2015, pp. 44–53. DOI: 10.3141/2510-06.

ADAMS, J. M. **Development of a Performance-Based Mix Design and Performance-Related Specification for Chip Seal Surface Treatments**. Dissertation (Ph.D.). Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh, Carolina do Norte, 2014.

ADAMS, J.; CASTORENA, C.; KIM, Y. R. Construction quality acceptance performance-related specifications for chip seals. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. 6(4), 337–348, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.255.

AGARWAL, P. K.; CHOUDHARY, S.; KHAN, A. B. A Rational Strategy for Maintenance of Low Volume Road Network. **Transportation in Developing Economies**. 2:21, 2016. DOI: 10.1007/s40890-016-0024-7.

AKTAŞ, B.; KARAŞAHİN, M.; SALTAN, M.; GÜRER, C.; UZ, V. E. Effect of aggregate surface properties on chip seal retention performance. **Construction and Building Materials**. 44, 639-644, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.060.

ALLABY, P.; LOGAN, J.; PARSONS, T. **Rationalization of Low Volume Roads in New Brunswick**. Innovations and Opportunities in Maintenance Methods and Practice. 2012 Conference of the Transportation Association of Canada Fredericton, New Brunswick, Canadá, 2012.

ALMEIDA, L. C. **Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

ALMEIDA, A. F. M.; GONÇALVES, H. B. B.; SILVA, A. P.; OLIVEIRA, F. H. L. Proposta de Adaptação do Índice de Gravidade Global para Avaliação de Tratamentos Superficiais por Penetração. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET. Balneário Camboriú, 2019.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: of new and rehabilitated pavement structures-Final Report**. National Cooperative Highway Research Program-NCHRP. Washington, D.C., 2004.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Mechanistic-empirical pavement design guide - A manual of practice**. Washington, D.C., 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Guidelines for geometric design of low-volume roads**. 2nd edition. Washington, D.C., 2019.

ARAÚJO, C. B. C. **Gestão integrada de infraestrutura civil em ambiente urbano: água e transportes**. 237p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ARIZONA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – ADoT. **Low volume state routes study. Final Report**. WSP - Parsons Brinckerhoff. Arizona, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INFRAESTRUTURA E INDÚSTRIAS DE BASE – ABDIB. **Relatório Anual 2024**. Disponível em: https://www.abdib.org.br/wp-content/uploads/2024/02/ABDIB_Relatorio-Anual-2024-1.pdf. Acesso em: 28 mar. 2024.

ASPHALT INSTITUTE. **Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual**, 9th ed., Manual Series No.1, College Park, Md., 1982.

ATKINS. **The Potholes Challenge: Achieving a Sustainable Response to Potholes**. Atkins. Reino Unido, 2021.

AUSTROADS. **Austrroads Provisional Sprayed Seal Design Method Revision 2000**. Sprayed Seal Design Project Group. Austrroads Incorporated. Sydney, 2001.

AUSTROADS. **Pavement - Design Method – 5.2. Design Traffic**. Disponível em: <https://austrroads.com.au/publications/pavement/agpt04k/design-method/design-traffic>. Acesso em: 10 jan. 2022. April version, Sydney, 2021.

BARROSO, S. H. A. **Estudo dos solos da Região Metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária**. 253p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da Região Metropolitana de Fortaleza**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

BC MoTI. Supplement to TAC Geometric Design Guide. 3rd. Edition. British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure. Colúmbia Britânica, 2019.

BEHRENS, L. C. Overview of Low-Volume Roads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 1652, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1999, pp. 1-4. DOI: 10.3141/1652-01.

BERNUCCI, L. L. B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizado solos laterítico para rodovias de baixo volume de tráfego**. 275p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BISWAS, S.; HASHEMIAN, L.; BAYAT, A. Investigation of Pothole Severity and Maintenance **Methods in Canada through Questionnaire Survey**. 32(2), 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000161.

BOLEM, L. V. S. S. P.; SHANKAR, S. **A Multi Criteria Approach for Prioritization of Low Volume Rural Roads for Maintenance and Improvement**. ICLVRE 2018: International Conference on Low-Volume Roads Engineering. Paris, 2018.

BOOTH, D. B. **Urbanization and the natural drainage system – Impacts, solutions, and prognoses**. The Northwest Environmental Journal, 7, pp. 93-118, University of Washington, Seattle, 1991.

BOZ, I.; KUMBARGER, Y. S.; KUTAY, M. E. Performance-based percent embedment limits for chip seals. **Transportation Research Record**. 2673(1), 182–192, 2019. DOI: 10.1177/0361198118821370.

BRANT, R. Assessing proportionality in the proportional odds model for ordinal logistic regression. **Biometrics**. 46(4), 1171-1178, 1990. DOI: 10.2307/2532457.

BRITISH COLUMBIA TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA – BCTAC. **BC Supplement to TAC Geometric Design Guide**. 3rd Edition. ISBN: 978-0-7726-7322-0. British Columbia, 2019.

BRITO, L. A. T. **Design Methods for Low Volume Roads**. Ph.D. Thesis. The University of Nottingham. Nottingham, 2011.

BUSS, A.; GUIRGUI, M.; GRANSBERG, D. Chip seal aggregate evaluation and successful roads preservation. **Construction and Building Materials**. 180(1), 396–404, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.255.

CABRAL, W. S. **Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microregião de Mossoró/RN**. 181p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CALTRANS. **Maintenance Technical Advisory Guide: Volume 1 - Flexible Pavement Preservation**. Second Edition. Caltrans Division of Maintenance. State of California Department of Transportation. Sacramento, CA, 2008.

CAVALCANTE, I. N.; VERÍSSIMO, L. S. **A importância das águas subterrâneas do Vale do Cariri, Chapada do Araripe – Estado do Ceará**. Os Recursos Hídricos do Ceará: Integração, Gestão e Potencialidades. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). 268 p. ISBN: 978-85-98664-20-0. Fortaleza, 2011.

CHANDAK, P. G.; PATIL, R. P.; TAPASE, A.; ATTAR, A. C.; SAYYED, S. S. **Performance Evaluation of Low Volume Rural Roads - A State-of-the-Art Review**. In: Frikha, W., Kawamura, S., Liao, WC. (eds) *New Developments in Soil Characterization and Soil Stability*. GeoChina, 2018. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-95756-2_5.

CHAVES, F. J. **Caracterização geotécnica de solos da formação barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza para aplicação em obras rodoviárias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

CHATURABONG, P. Evaluation of Bleeding Resistance in Chip Seal and Asphalt Emulsion Residue Rheology. **Coatings**. 9(10), 2019. DOI: 10.3390/coatings9100670.

CHENG, D.; HICKS, R. G.; SMITH, R. D. **Manual for Asphalt Pavement Repair and Resurfacing Preparation**. Report 22-29. Mineta Transportation Institute. San José, 2022.

CHU, X.; DAWSON, A.; THOM, N. Prediction of resilient modulus with consistency index for fine-grained soils. **Transportation Geotechnics**. 31, 100650, 2021. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100650.

COGERH. **Salgado**. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/salgado/>. Acesso em: 15 out. 2022.

COGHLAN, G. T. Opportunities for Low-Volume Roads. A5002: Committee on Low-Volume Roads. **Transportation Research Board**. Washington, D.C., 2000.

COLORADO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – CDoT. **CDOT Roadway Design Guide**. Colorado, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2023 – Relatório Gerencial**. Confederação Nacional do Transporte; SEST/SENAT. Brasília, 2023.

COOK, J. R.; PETTS, R. C.; ROLT, J. **Low Volume Rural Road Surfacing and Pavements - A Guide to Good Practice**. OTB Engineering UK LLP. London, 2013.

COSAR, K.; DEMIR, B.; GHOSE, D.; YOUNG, N. **Better roads increase domestic trade and improve regional economies: Evidence from Turkey**. VOXEU research-based policy analysis and commentary by leading economists. 2021. Disponível em: <https://voxeu.org/article/better-roads-increase-domestic-trade-and-improve-regional-economies>. Acesso em: 16 jun. 2022.

DAN, H. C.; TAN, J. W.; ZHANG, Z.; HE, L. H. Modelling and estimation of water infiltration into cracked asphalt pavement. **Road Materials and Pavement Design**. 18(3), 590-611, 2017. DOI: 10.1080/14680629.2016.1182057.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS – DERMG. **Critérios de Projeto para Vias de Ligação com Reduzido Volume de Tráfego – Ato Normativo**. RT-01.46.d. Minas Gerais, 2009.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DERSP. **Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais. Volume I – Planejamento, Projeto, Construção e Operação**. São Paulo, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-PRO 011/79**. Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis - Procedimento. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. IPR-667. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 024/94**. Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelman – Método de Ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-PRO 273/96**. Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” - Procedimento. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 006/2003-PRO**. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirígidos - Procedimento. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Rio de Janeiro, 2003a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 008/2003-PRO**. Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Rio de Janeiro, 2003b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 009/2003-PRO**. Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Rio de Janeiro, 2003c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 005/2003-TER**. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Rio de Janeiro, 2003d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma 007/2003-PRO**. Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos - Procedimento. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Rio de Janeiro, 2003e.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. Publicação IPR – 715. 137p. Rio de Janeiro, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR – 719. 278p. Rio de Janeiro, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Estudos de Tráfego**. Publicação IPR – 723. 384p. Rio de Janeiro, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma DNIT 133/2010-ME**. Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman – Método de Ensaio. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Publicação IPR – 745. 189p. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Instrução de Serviço - IS-08**. Regulamenta os procedimentos a serem utilizados na elaboração de projetos do Programa CREMA. Brasília, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT ME-134**: Pavimentação-Solos: Determinação do módulo de resiliência. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT IE-179**: Pavimentação-Solos: Determinação da deformação permanente. Instrução de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT IS-247**: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação Usando o Método de Dimensionamento Nacional-MeDiNa. Instrução de Serviço. Rio de Janeiro, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Resolução No. 05 – **Índice de Condição da Manutenção (ICM)**. Brasília, 2022.

DINGEN, R.; COOK, J. R. **Review of Low Volume Rural Road Standards and Specifications in Myanmar**. Final Report. 80p. Myanmar, 2018.

DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS – DGC. **Manual de Carreteras**. Tomo 4 - Diseño de Pavimentos y Mantenimiento de Caminos. Honduras, 1996.

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS – DGST. **Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana**. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México, 2021. Disponível em: www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Catalogo_Pavimentos/Catalogo.pdf. Acesso em: 14 set. 2021.

DONG, Q.; DONG, C.; HUANG, B. Statistical Analyses of Field Serviceability of Throw-and-Roll Pothole Patches. **Journal of Transportation Engineering**, 141(9), 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000786.

DONG, Q.; HUANG, B.; ZHAO, S. Field and Laboratory Evaluation of Winter Season Pavement Pothole Patching Materials. **International Journal of Pavement Engineering**, 15(4), 279–289, 2013. DOI: 10.1080/10298436.2013.814772.

DORÉ, G. **Pavement design for low volume roads**. Chaire de recherche industrielle du CRSNG sur l'Interaction Charges lourdes/Climat/Chausées (i3C). 2017. Disponível em:

<https://ctep.ca/wp-content/uploads/2017/05/Pavement-Design-for-Low-volume-Roads-Dore.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2020.

DOUGLAS, R. A. **Low-Volume Road Engineering: Design, construction, and maintenance**. 1 ed. Boca Raton, CRC Press. Florida, 2016.

ELSHAER, M.; GHAYOOMI, M.; DANIEL, J. S. Methodology to evaluate performance of pavement structure using soil moisture profile. **Road Materials and Pavement Design**. 2017. DOI: 10.1080/14680629.2017.1283356.

ESPINOZA, R. D.; BOURDEAU, P. L.; WHITE, T. D. **Pavement drainage and pavement-shoulder joint evaluation and Rehabilitation. Numerical analysis of infiltration and drainage**. Final report: Joint highway research project No. 93/2. Indiana Department of Transportation. Indiana, 1993.

ETHIOPIAN ROADS AUTHORITY – ERA. **Design Manual for Low Volume Roads – Final Draft (Parts A, B and C)**. 45p. Etiópia, 2011.

FAIZ, A. **The Promise of Rural Roads. Review of the Role of Low-Volume Roads in Rural Connectivity, Poverty Reduction, Crisis Management, and Livability**. TRB Low-Volume Roads Committee. Washington, D.C., 2012.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Manual of uniform traffic control devices for streets and highways**. 2009 edition. U.S. Department of Transportation. Washington, D.C., 2009.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Manual para utilização do método mecanístico-empírico MeDiNa: Apresentação dos Programas**. Convênio UFRJ/DNIT. Agosto/2020, Rio de Janeiro, 2020.

FRANZEN, T.; THORPE, D. **Sustainable Development and Management of Low Volume Road Networks in Australia**. In: International Sustainable Ecological Engineering Design for Society Conference 2019 (SEEDS 2019), 11-12 Sept, 2019, Ipswich, United Kingdom, 2020.

FREUND, R. J.; WILSON, W. J.; SA, P. **Regression Analysis – Statistical Modeling of a Response Variable**. Elsevier, Inc., San Diego, 459p, 2006.

FUNCEME. (2024). **Postos Pluviométricos**. Fundação Cearense de Meteorologia. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=2694. Acesso em: 01 abr. 2024.

GHOSH, D.; TUROS, M.; HARTMAN, M.; MILAVITZ, R.; LE, J-L.; MARASTEANU, M. **Pothole prevention and innovative repair**. Final Report. Minnesota Department of Transportation. Minnesota, 129p, 2018.

GRANSBERG, D.; JAMES, D. M. B. **Chip seal best practices**. A Synthesis of Highway Practice. NCHRP Synthesis 342. National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C., 2005.

GREENSTEIN, J. **Issues related to planning and administration of low-volume roads.** Transportation Research Circular: Assessing Worldwide Low-Volume Roads: Problems, Needs, and Impacts. Transportation Research Board N° 446. Washington, D.C., 1995.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos.** Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

GUJARATI, D. *Econometrics by example.* Ed. Palgrave. 2nd Edition. 2015.

GUO, J.; HAN, J.; SCHROCK, S. D.; SUN, X.; PARSONS, R. L. **Stabilization of unpaved shoulders on moderate and weak subgrade using geosynthetics.** Report No. K-TRAN: KU-13-2. Department of Transportation. Kansas, 2016.

GUPTA, A.; KUMAR, P.; RASTOGI, R. Mechanistic-Empirical approach for design of low volume pavements. **International Journal of Pavement Engineering.** 16(9), 797-808, 2014. DOI: 10.1080/10298436.2014.960999.

HAIDER, S. W.; MASUD, M. M.; CHATTI, K. Influence of moisture infiltration on flexible pavement cracking and optimum timing for surface seals. **Canadian Journal of Civil Engineering.** 00: 1–11, 2019. DOI: 10.1139/cjce-2019-0008.

HALL, K. D. **Development of Comprehensive Low-Volume Pavement Design Procedures.** Final Report. MBTC 1070. Arkansas State Highway and Transportation Department. Arkansas, 2000.

HANSON, F. M. **Bituminous surface treatment of rural highways.** Conference of NZ Society of Civil Engineers 1934-35. 21, 89-220, 1935.

HANSSON, K.; LUNDIN, L. C.; ŠIMŮNEK, J. Modeling Water Flow Patterns in Flexible Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,** 1936, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp. 133–141. DOI: 10.1177/0361198105193600116.

HEDAYATI, M.; HOSSAIN, S. Data based model to estimate subgrade moisture variation case study: Low volume pavement in North Texas. **Transportation Geotechnics.** 3, 48–57, 2015. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.03.001.

HENNING, T.F.; KADAR, P.; THEW, C. **Surfacing Alternatives for Unsealed Rural Roads.** TRISP. World Bank, Washington, D.C., 2005.

HEUKELOM, W.; FOSTER, C.R. **Dynamic Testing of Pavements.** Transactions of the American Society of Civil Engineers. 127(1), 425-450, 1962.

IBGE. **Área territorial - Brasil, Grandes Regiões, Unidades da Federação e Municípios.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 15 mai. 2022.

IBGE. **Mapa de Clima do Brasil - Escala 5.000.000**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/climatologia/15817-clima.html?=&t=downloads>. Acesso em: 15 mai. 2022.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION – ILO. **Construction of low volume sealed roads**. Good practice guide to labour-based methods. 207p. Pretoria, 2013.

ISLAM, R. M.; ARAFAT, S.; WASIUDDIN, N. M. Quantification of Reduction in Hydraulic Conductivity and Skid Resistance Caused by Fog Seal in Low-Volume Roads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 2657, 2017, pp. 99–108. DOI: 10.3141/2657-11.

JABÔR, M. A. **Drenagem de Rodovias**. Estudos hidrológicos e projetos de drenagem. 200p. 2023. Disponível em: <https://www.marcosjabor.com.br/apostila/2023b.pdf>. Acesso em: 18 jul 2024.

JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. **An introduction to statistical learning: with applications in R**. Springer. New York, 2013.

KARAŞAHIN, M.; GÜRER, C.; SALTAN, M.; TACIROĞLU, M. V.; UZ, V. E. Investigation of chip seal performance under cold climate conditions. **Science and Engineering of Composite Materials**. 23(6): 649–658, 2016. DOI: 10.1515/secm-2014-0041.

KEARBY, J. P. **Tests and theories on penetration surfaces**. Proceedings, Highway Research Board, Vol 32. 1953.

KERN, C.; GEHLING, W. Y. Y.; NÚÑEZ, W. P. Analysis of the resilience modulus of a subgrade soil front of humidity variations. **MATEC Web of Conferences**. 337, 03013. PanAm-UNSAT, 2021. DOI: .10.1051/matecconf/202133703013.

KAHRO, S. H. Defects in Flexible Pavements: A Relationship Assessment of the Defects of a Low-Cost Pavement Management System. **Sustainability**, 14, 16475, 2022. DOI: 10.3390/su142416475.

KIM, Y. R.; ADAMS, J. **Field calibration and implementation of the performance-based chip seal mix design method**. Final Report. North Carolina Department of Transportation (NCDOT). Research Project No. HWY-2013-03. North Carolina, 2015.

KIM, Y. R.; ADAMS, J.; JEONG, J. **Chip seal construction variability and its impact on performance**. Final Report. North Carolina Department of Transportation Office of Research. Research Project No. HWY-2015-19. North Carolina, 2018.

KIM, Y. R.; LEE, J. **Optimizing gradations for surface treatments**. Final Report to North Carolina Department of Transportation. NCSU, North Carolina, 2005.

KIMBALL, B. F. **Assignment of frequencies to a completely ordered set of sample data**. Transactions. American Geophysical Union. Vol. 27, VI. pp. 843-846. 1946.

KUMAR, A.; BANDYOPADHYAY, A.; ANEJA, R.; GUPTA, D. P.; KASHYAP, R. G.; NARAYANAN, L. **Guidelines for the environmentally optimized design of low volume roads**. Report 171563, Vol. 1. World Bank Group. Disponível em: <<https://documents.worldbank.org/curated/en/099523205172258608/IDU0d0201e6e013fb04e209ec907b360c93aa15>>. Acesso em: 05 set. 2022. Washington, D.C., 2022.

KUMBARGERI, Y.; BOZ, I.; KUTAY, M. E. **Performance based design procedure for chip seal projects**. Advances in Materials and Pavement Performance Prediction. April 16-18, 2018, Doha, Qatar, 2018.

KUMBARGERI, Y.S.; BOZ, I.; KUTAY, M. E. Investigating the effect of binder and aggregate application rates on performance of chip seals via digital image processing and sweep tests. **Construction and Building Materials**. 20(1), 213–221, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.089.

KUTAY, M. E.; OZDEMIR, U.; HIBNER, D.; KUMBARGERI, Y.; LANOTTE, M. **Development of an acceptance test for chip seal projects**. Final Report SPR-1649. Project Research N. OR15-508. Michigan Department of Transportation (MDOT). Michigan State University. Michigan, 2017.

LANDERS, S.; MASON, D.; MACNAUGHTON, J. **Developing a Sustainable Pavement Management Strategy for Resurfacing Low Volume Roads in New Brunswick**. 9th International Conference on Managing Pavement Assets (ICMPA9). Washington, D.C., 2015.

LEBO, J.; SCHELLING, D. **Low Volume Rural Roads. Based on World Bank Technical Paper 496**, 2001. Part of Toolkit for the Economic Evaluation of World Bank Transport Projects. Institute for Transport Studies, University of Leeds. Leeds, 2003.

LEE, J. S.; KIM, Y. R. Performance-Based Uniformity Coefficient of Chip Seal Aggregate. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2108, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. pp. 53–60, 2009. DOI: 10.3141/2108-06.

LEE, S. Y.; LE, T. H. M.; KIM, Y. Prediction and detection of potholes in urban roads: Machine learning and deep learning based image segmentation approaches. **Developments in the Built Environment**, 13, 2023. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100109.

LI, J.; UHLMAYER, J.S.; MAHONEY, J.P.; MUENCH, S.T. **Use of the 1993 AASHTO Guide, MEPDG and Historical Performance to Update the WSDOT Pavement Design Catalog. Research Report**. WA-RD 779.1. Washington State Department of Transportation (WSDOT). Washington State, 2011.

LIBÉRIA. **Manual for Low Volume Roads – Part B: Materials, Pavement Design and Construction**. Ministry of Public Works. Republic of Liberia, Liberia, 2019.

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

LOIOLA, P. R. R. **Estudo de Agregados e Ligantes Alternativos para Emprego em Tratamentos Superficiais de Rodovias**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MAHGOUB, H.; BENNETT, C.; SELIM, A. Analysis of Factors Causing Corrugation of Gravel Roads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. 2204, 3-10. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011. DOI: 10.3141/2204-01.

MASCARENHAS, I. M. N. **Caracterização geotécnica de solos na região metropolitana do Cariri/CE para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MCDANIEL, R. S.; OLEK, J.; BEHNOOD, A.; MAGEE, B.; POLLOCK, R. **Pavement Patching Practices**. NCHRP Synthesis of Highway Practice, Issue 463, 86p, 2014. Disponível em: <https://www.nap.edu/read/22328/chapter/1>. Acesso em: 30 jun. 2023.

MCDONALD, T.; MCDONALD, P. **Guide to pavement maintenance**. A comprehensive guidebook to understanding pavement maintenance for parking lots and streets. iUniverse, Inc. Bloomington, Nova Iorque, 2011.

MCLEOD, N. W. **A General Method of Design for Seal Coats and Surface Treatments**. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 38, St. Paul, Minnesota, 1969, 128pp.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES – MTC. **Manual de carreteras - Suelos, geología, geotecnia y pavimentos**. Sección suelos y pavimentos. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Lima, Peru, 2013.

MINISTRY OF TRANSPORT AND PUBLIC WORKS – MTPW. **Low volume roads manual. Volume 1 – Pavement Design**. Malawi, 2020.

MINISTRY OF WORKS, TRANSPORT AND COMMUNICATION – MWTC. **Low Volume Roads Manual**. Tanzania, 2016.

MISSOURI DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – MoDoT. **Shoulder width**. Disponível em: https://epg.modot.org/index.php/231.4_Shoulder_Width. Acesso em: 29 mar. 2024. Missouri, 2024.

MOUSAVI, S.H.; GABR, M.A.; BORDEN, R.H. Resilient modulus prediction of soft low-plasticity Piedmont residual soil using dynamic cone penetrometer. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. 10(2), 323-332, 2018. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.10.007.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, 12, 513-522, 1976. DOI: 10.1029/WR012i003p00513.

NATIONAL CRUSHED STONE ASSOCIATION – NCSA. **Flexible Pavement Design Guide for 26 Highways**. NCSA Publications., Washington, D.C., 1972.

NATIONAL CRUSHED STONE ASSOCIATION – NCSA. **Design Guide for Low Volume for 28 Rural Roads**. NCSA Publications. Washington, D.C., 1973.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**. 1-37A. Part-4. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., 2004.

NAZZAL, M. D.; TATARI, O. Evaluating the use of neural networks and genetic algorithms for prediction of subgrade resilient modulus. **International Journal of Pavement Engineering**. 14(4), 364-373, 2013. DOI: 10.1080/10298436.2012.671944.

NEWCOMB, D. E.; TIMM, D. H. **Mechanistic Pavement Design**. Hot Mix Asphalt Technology. 2001. Disponível em: www.asphaltpavement.org/uploads/documents/mechanistic1.pdf. Acesso em: 11 jan. 2022.

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

OHIO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – ODoT. **Traffic Engineering Manual (TEM)**. Ohio Manual of Uniform Traffic Control Devices (OMUTCD). Disponível em: <https://www.transportation.ohio.gov/working/engineering/roadway/manuals-standards/tem>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ORR, D. P.; SCOTT, G. R.; KUZMIK, N. **Pavement Design for Local Roads and Streets**. Final Report. Cornell Local Roads Program. Nova Iorque, 2020.

PASINDU, H. R.; GAMAGE, D. E.; BANDARA, J. M. S. J. **Framework for selecting pavement type for low volume roads**. Transportation Research Procedia, 48, 3924-3938. World Conference on Transport Research-WCTR. 2019, Mumbai, 26-30 May, 2020. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.028.

PENNSYLVANIA STATE CONSERVATION COMMISSION – PASCC. **Dirt, Gravel, and Low Volume Road Maintenance Program – Administrative Manual**. Pennsylvania, 2020.

PEZO, R. F. **A General Method of Reporting Resilient Modulus Tests of Soils: A Pavement Engineer's Point of View**. 72nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 1993.

PHOMMAVONE, C.; SANGPETNGAM, B. Influences of Moisture Content on Resilient Modulus of Unbound Crushed Limestone. **Engineering Journal**. 22(4), 2018. DOI: 10.4186/ej.2018.22.4.39.

PIERCE, L. M.; KEBEDE, N. **Chip Seal Performance Measures - Best Practices**. Washington State Department of Transportation. Washington, D.C., 2015.

PINARD, M.; ROLT, J.; HONGVE, J.; RATTRAY, S.; GARNER, D.; RIBBENS, H.; MUKANDILA, E. **Low Volume Roads Manual**. Vol. 1. Pavement Design. Ministry of Housing and Infrastructure Development. Road Development Agency. Zambia, 2019.

PORTIGO, J. M. State-of-the-art review of paved shoulders. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. 594, 57-64, 1976.

Powell, W. D.; Potter, J. F.; Mayhew, H. C.; Nunn, M. E. **The Structural Design of Bituminous Roads**. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1984.

PRICE, D. A. **Experimental gravel shoulders**. Final report. Report No. CDOH-DTD-R-90-2. Colorado Department of Transportation. Federal Highway Administration. 39p. Washington, D.C., 1990.

RAHMAN, F.; ISLAM, M. S.; MUSTY, H. HOSSAIN, M. Aggregate Retention in Chip Seal. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. 2267, 56–64. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012. DOI: 10.3141/2267-06.

RAHMAN, N.; SARKAR, T. A.; ELSEIFI, M. A.; MAYEUX, C.; COOPER, S. B. Effects of emulsion types, application rates, and crumb rubber on the laboratory performance of chip seal. **Construction and Building Materials**. 260, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119787.

RETZLAFF, H.; KENT, S.; PODBOROCHYNSKI, D.; KRAWEC, J. **Guidelines for Upgrading Low Volume Roads in Saskatchewan**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Pavements/Soil Materials Session. Saskatoon, Saskatchewan, Canadá, 2007.

RIBEIRO, A. J. A. **Um Modelo de Previsão do Módulo de Resiliência dos Solos no Estado do Ceará para fins de Pavimentação**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

RIBEIRO, A. J. A.; SILVA, C. A. U.; BARROSO, S. H. A. Neural Estimation of Localization and Classification of Soils for Use in Low-Traffic Volume Roads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. 2473, 98-106, 2015. DOI: 10.3141/2473-12.

RIBEIRO, A. J. A.; SILVA, C. A. U.; BARROSO, S. H. A. Metodologia de baixo custo para mapeamento geotécnico aplicado à pavimentação. **Transportes**. 6, 84-10, 2018. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1491.

RIDGEWAY, H. H. Infiltration of water through the pavement surface. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. 616. Committee on Subsurface Drainage. Washington, D. C., 1976.

ROCSCIENCE. **Slide2 Modeler**. 2D Limit equilibrium analysis for slopes. Versão 9.024. 2022.

ROLT, J.; OTTO, A.; MUKURA, K.; REEVES, S.; HINE, J.; MUSENERO, L. **Rural Road Note 01: A Guide on the Application of Pavement Design Methods for Low Volume Rural Roads**, First Edition. London: ReCAP for UK aid. 2020.

ROUGHTON. **Low Volume Roads**. Roughton International. Reino Unido, 2000.

SADC. **SADC Guideline on Low-volume Sealed Roads**. Southern African Development Community (SADC). Southern Africa Transport and Communications Commission. Botswana, 2003.

SADROSSADAT, H.; ALI, E.; SAEDEH, O. Prediction of the resilient modulus of flexible pavement subgrade soils using adaptive neuro-fuzzy inference systems. **Construction and Building Materials**. 123, 235-247, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.008.

SAEED, F.; QAMARIATUL, S.; RAHMAN, M.; WOODSIDE, A. The State of Pothole Management in UK Local Authority. 6th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements, Vol. 6. Thessaloniki, Greece, 2015.

SALOUR, F.; ERLINGSSON, S.; ZAPATA, C. E. Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control. **Canadian Geotechnical Journal**. 51(12), 1413-1422, 2014. DOI: 10.1139/cgj-2013-0484.

SANTIAGO, L. S. **Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 165 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; PATERSON, W. D. O. **Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements**. WTP-46. World Bank Technical Paper – Number 46. The World Bank. Washington, D.C., 1986.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA – SEINFRA. **Tabela de Custos - Versão 028.1 - ENC. SOCIAIS 84,44%**. Disponível em: <https://sites.seinfra.ce.gov.br/siproce/desonerada/html/tabela-seinfra.html>. Acesso em: 10 dez. 2023.

SHALLAL, M. M.; AHMED, E. S. Comparison between the Empirical and Mechanistic-Empirical Pavement Design Methods. **International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM)**. 07(07), 261-267, 2019. DOI: 10.18535/ijssrm/v7i7.ec01.

SILVA, R. C. **Avaliação da dosagem dos tratamentos superficiais por penetração de rodovias baseada na exsudação e na perda de agregados**. 135 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SILVA, R. C.; BARROSO, S. H. A.; KIM, Y. R. Introdução do coeficiente de uniformidade para avaliação de revestimentos asfálticos do tipo tratamentos superficiais. **Transportes**. 26(1), 42-53, 2018. DOI: 10.14295/transportes.v26i1.1371.

SOUTHERN AFRICA TRANSPORT AND COMMUNICATIONS COMMISSION – SATCC. **Guideline – Low-Volume Sealed Roads**. Southern African Development Community (SADC). Botswana, 2003.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. 25p. Rio de Janeiro, 1966.

SOUZA, W. M.; RIBEIRO, A. J. A.; SILVA, C. A. U. Use of ANN and visual-manual classification for prediction of soil properties for paving purposes. **International Journal of Pavement Engineering**. 1-9, 2020. DOI: 10.1080/10298436.2020.1807546.

STEPHENS JR., L. B. **Barrier guide for low volume and low speed roads – Final report**. FHWA-CFL/TD-05-009. Federal Highway Administration. 151p. Lakewood, Colorado, 2005.

SUN, X.; DAS, S. **Estimating Annual Average Daily Traffic for Low-Volume Roadways A Case Study in Louisiana**. 12th International Conference on Low-Volume Roads. Montana, 2019.

SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS PÚBLICAS – SOP. Lama Asfáltica – Especificação. **SOP-ES-P 18/19**. Secretaria de Infraestrutura do Governo do Estado do Ceará. Fortaleza, 2019a.

SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS PÚBLICAS – SOP. Acostamento Granular (Base). **SOP-ES-P 06/19**. Secretaria de Infraestrutura do Governo do Estado do Ceará. Fortaleza, 2019b.

SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS PÚBLICAS – SOP. **Informativo Gerencial 2023**. Secretaria de Infraestrutura do Governo do Estado do Ceará. Superintendência de Obras Públicas, Fortaleza, 2023.

SUTRADHAR, R.; PAL, M. Assessment of Pavement Shoulder Condition in Rural Roads. **International Journal on Emerging Technologies**. 11(1): 91-100, 2020.

SZUMILAS, M. Explaining Odds Ratios. **Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry**. 19(3), 227–229, 2010.

TAKEDA, M. C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TASKIRAN, T. Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine-grained soils by AI methods. **Advances in Engineering Software**. 41, 886–892, 2010. DOI: 10.1016/j.advenzsoft.2010.01.003.

TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR HIGHWAYS – TRH. **Design and construction of surfacing seals**. TRH3. The South African National Roads Agency. Pretoria, 2007.

TRANSPORT AND ROAD RESEARCH LABORATORY – TRRL. **Overseas Road Note 6 - A guide to geometric design**. Transport and Road Research Laboratory Overseas Unit. Department of Transport. Overseas Development Administration. Crowthorne, Berkshire, 1988.

TENPE, A. R.; PATEL, A. Application of genetic expression programming and artificial neural network for prediction of CBR. **Road Materials and Pavement Design**. 21(5), 1183-1200, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2018.1544924.

TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – TxDOT. **Pavement Design Catalogue Development for Pavements in Energy Affected Areas of Texas**. Research Report RR-14-03. Texas A&M Transportation Institute. Texas, 2016.

THAPA, R. **Improving the mobility of rural communities: ReCAP Case studies from Sub-Saharan Africa and South Asia**. KMN2194A. London: ReCAP for FCDO. 2020.

THOM, N. **Principles of Pavement Engineering**. Thomas Telford, London, 2008.

TIAN, Z.; KOOL, D.; REN, T.; HORTON, R.; HEITMAN, J. L. Approaches for estimating unsaturated soil hydraulic conductivities at various bulk densities with the extended Mualem-van Genuchten model. **Journal of Hydrology**. 572, 719-731, 2019. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.027.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**. v. 5 (1), 61-68, 2000. DOI: 10.21168/rbrh.v5n1.p15-23.

ULLAH, S.; TANYU, B. F. Effect of Variation in Moisture Content on the Mechanical Properties of Base Course Constructed with RAP-VA Blends. **Geo-Congress 2020**, February 25–28, 2020. Minneapolis, Minnesota. DOI: 10.1061/9780784482810.063.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils**. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory Office of Research and Development. U. S. Environmental Protection Agency. Oklahoma, 1991.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

VOROBOVAS, V.; ŽILIONIENĖ, D. Evaluation of shoulders functions on Lithuanian regional roads. **The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**. 3(4): 213–218, 2008. DOI: 10.3846/1822-427X.2008.3.213-218.

Washington State Department of Transportation – WSDoT. **Maintenance Manual**. M 51-01.13. Washington, 2023.

WANG, J. P.; ZHUANG, P. Z.; LUAN, J. Y.; LIU, T. H.; TAN, Y. R.; ZHANG, J. Estimation of Unsaturated Hydraulic Conductivity of Granular Soils from Particle Size Parameters. **Water**. 11, 1826, 2019. DOI:10.3390/w11091826.

WANG, Y.; MAHBOUB, K. C.; HANCHER, D. E. Survival Analysis of Fatigue Cracking for Flexible Pavements Based on Long-Term Pavement Performance Data. **Journal of Transportation Engineering**. 131, 608-616. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:8(608).

WILLETT, T. O. **Paved Shoulders**. Technical Advisory T 5040.29. Federal Highway Administration. Washington, D.C., 1990.

WILSON, T. P.; ROMINE, A. R. **Materials and procedures for repair of potholes in asphalt surfaced pavements – Manual of practice**. Report No. FHWA-RD-99-168. Federal Highway Administration. Virginia, 1999.

WITCZAK, M.; UZAN, J. **The Universal Airport Design System**, Report I of IV. Granular Material Characterization; University of Maryland: College Park, MD, USA, 1988.

WORLD BANK. **Guidelines for the environmentally optimized design of low volume roads**. The International Bank for Reconstruction and Development. Washington, D.C., 2018

WORLD BANK. **To Pave or Not to Pave: Developing a Framework for Systematic Decision-Making in the Choice of Paving Technologies for Rural Roads**. Mobility and Transport Connectivity. World Bank, Washington, D.C., 2021. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35163>. Acesso em: 16 jun. 2022.

ZHANG, H.; YU, T. Prediction of subgrade elastic moduli in different seasons based on BP neural network technology. **Road Materials and Pavement Design**. 19(2), 271-288, 2016. DOI: 10.1080/14680629.2016.1259122.

ZIMMERMAN, K. A.; PESHKIN, D. G. Applying Pavement Preservation Concepts to Low-Volume Roads. **Transportation Research Board**. 1819(1), 81-87, 2003. Washington, D.C. DOI: 10.3141/1819a-13.

APÊNDICE A – CÁLCULO DA PLUVIOMETRIA DIÁRIA MÁXIMA DO TEMPO DE RECORRÊNCIA DE 10 ANOS E DAS INFILTRAÇÕES

Para o cálculo de pluviometria máxima que pode ocorrer num dado período de retorno, ou tempo de recorrência (TR) é necessário inicialmente obter uma série história com dados de chuva com a duração desejada. Neste trabalho, definiu-se a chuva máxima (em milímetros) diária como tempo a ser considerado nas análises, ou seja, mm/dia.

Como o intuito foi identificar a maior chuva que pode ocorrer num TR de 10 anos, o passo inicial é ordenar, de forma decrescente, os valores da série. Atribui-se, então, o número referente a esse ordenamento. Com esses valores, é possível calcular a frequência (F) com que o evento é igualado ou superado, ou seja, a probabilidade de excedência, tendo sido utilizado o método de Kimball (Kimball, 1946), conforme Equação (17).

$$F = \frac{m}{n + 1} \quad (17)$$

Em que,

m é a ordem de cada observação; e

n é a quantidade de anos de coleta de informações (nesse caso 49 anos).

Ao considerar que a frequência é uma estimativa adequada da probabilidade teórica (P) para um TR menor que o número de observações da série, ou seja, $P=F$, o TR, medido em anos, em que um determinado evento pode ser igualado ou superado pelo menos uma vez é dado pela Equação (18).

$$TR = \frac{1}{P} = \frac{1}{F} = \frac{n + 1}{m} \quad (18)$$

Como TR adotado é de 10 anos, e a série tem 49 anos de informações sem falhas, não é necessário o ajuste dos dados a uma distribuição de probabilidade, sendo a estimativa da chuva correspondente ao TR obtida por interpolação entre as informações. Assim, a Tabela 29 apresenta os dados referentes aos anos de coleta das informações, as chuvas máximas diárias de cada ano, ordenadas de forma decrescente, a ordem atribuída, a frequência conforme Equação (17) e o TR conforme Equação (18).

Tabela 29 – Tempos de recorrência das chuvas máximas diárias do posto pluviométrico 91
(continua)

Ano	Chuva (mm)	Ordem	F	TR
1978	144,0	1	0,020	50,0
2007	143,0	2	0,040	25,0
2008	143,0	3	0,060	16,7
2012	141,0	4	0,080	12,5
1986	123,0	5	0,100	10,0
1985	119,0	6	0,120	8,3
2003	116,5	7	0,140	7,1
2020	112,0	8	0,160	6,3
2021	112,0	9	0,180	5,6
2004	111,0	10	0,200	5,0
1984	104,0	11	0,220	4,5
2011	103,2	12	0,240	4,2
1990	102,0	13	0,260	3,8
1982	101,0	14	0,280	3,6
1981	100,0	15	0,300	3,3
1993	97,0	16	0,320	3,1
1997	96,6	17	0,340	2,9
1974	95,0	18	0,360	2,8
2019	95,0	19	0,380	2,6
2014	94,2	20	0,400	2,5
1987	94,0	21	0,420	2,4
2006	92,8	22	0,440	2,3
1989	92,0	23	0,460	2,2
2009	92,0	24	0,480	2,1
1995	90,0	25	0,500	2,0
2013	90,0	26	0,520	1,9
1988	87,0	27	0,540	1,9
2000	87,0	28	0,560	1,8
1999	86,5	29	0,580	1,7
2005	84,0	30	0,600	1,7
1992	83,0	31	0,620	1,6
1996	80,0	32	0,640	1,6
2022	80,0	33	0,660	1,5
1977	79,0	34	0,680	1,5
1980	79,0	35	0,700	1,4
1983	77,0	36	0,720	1,4
2010	76,5	37	0,740	1,4
2016	75,2	38	0,760	1,3
1975	70,0	39	0,780	1,3
2001	67,0	40	0,800	1,3
2015	66,4	41	0,820	1,2
1979	66,0	42	0,840	1,2

Tabela 29 – Tempos de recorrência das chuvas máximas diárias do posto pluviométrico 91 (conclusão)

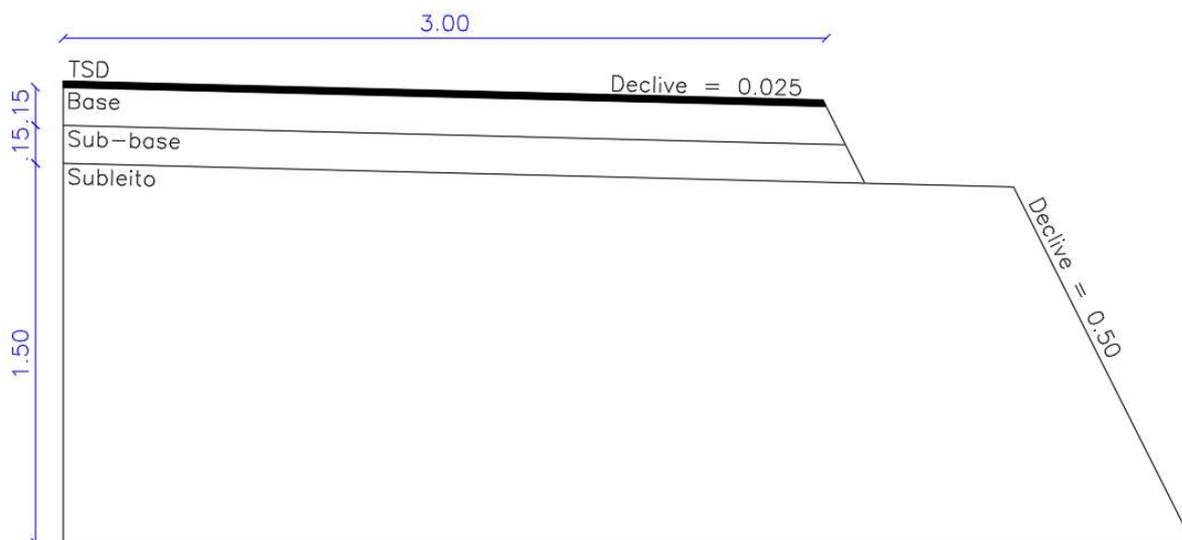
Ano	Chuva (mm)	Ordem	F	TR
1979	66,0	42	0,840	1,2
2023	66,0	43	0,860	1,2
2002	62,6	44	0,880	1,1
2018	60,8	45	0,900	1,1
2017	59,0	46	0,920	1,1
1991	55,0	47	0,940	1,1
1976	52,0	48	0,960	1,0
1994	43,0	49	0,980	1,0

Fonte: Autora (2024).

A partir dessas informações identificou-se que a chuva máxima é de 123 mm/dia. A partir desse valor de pluviometria foi possível calcular as infiltrações na estrutura do pavimento, conforme Equação (13). Assim, tem-se que a infiltração na estrutura, na região com revestimento é de: $f = (1 - 0,95) \times 123 = 6,15 \text{ mm/dia}$ e na região sem revestimento é de: $f = (1 - 0,30) \times 123 = 86,1 \text{ mm/dia}$.

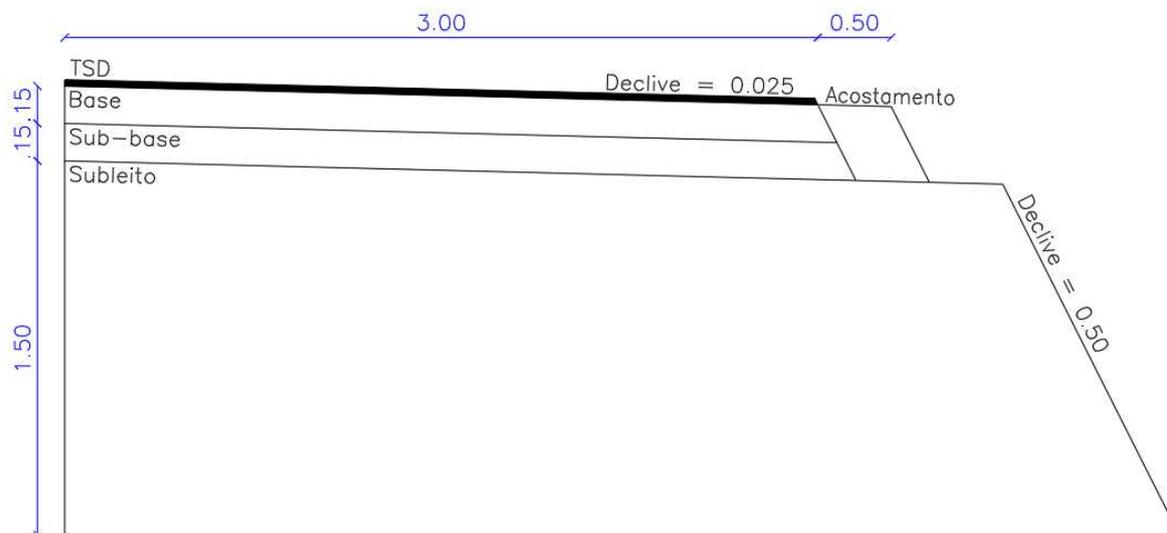
APÊNDICE B – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS ESTRUTURAS SIMULADAS PARA INFILTRAÇÃO

Figura 38 – Características geométricas da estrutura sAc



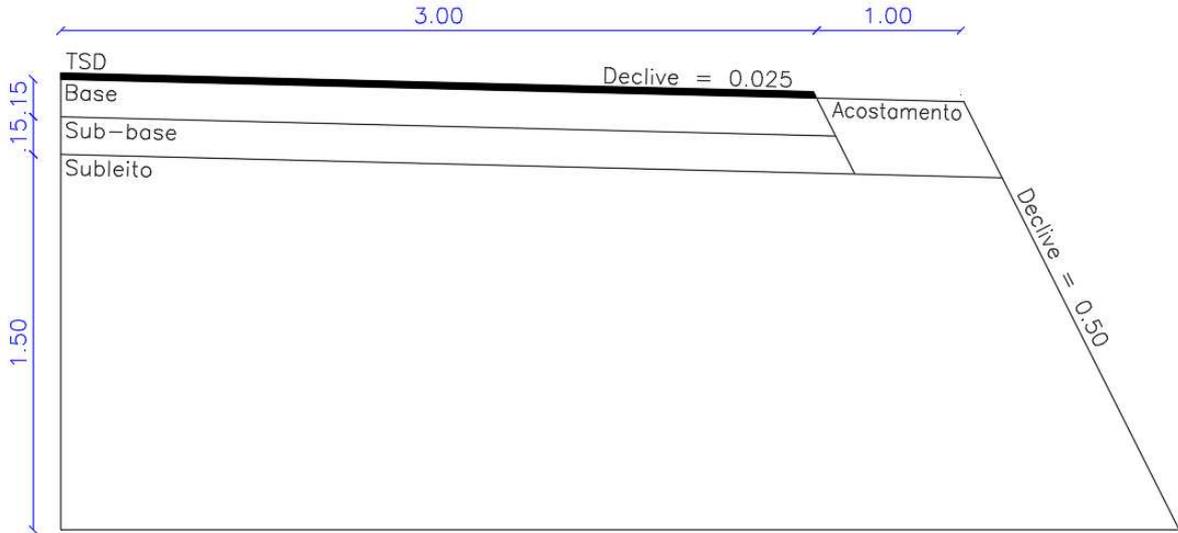
Fonte: Autora (2024).

Figura 39 – Características geométricas das estruturas A-sR-05 e S-sR-05



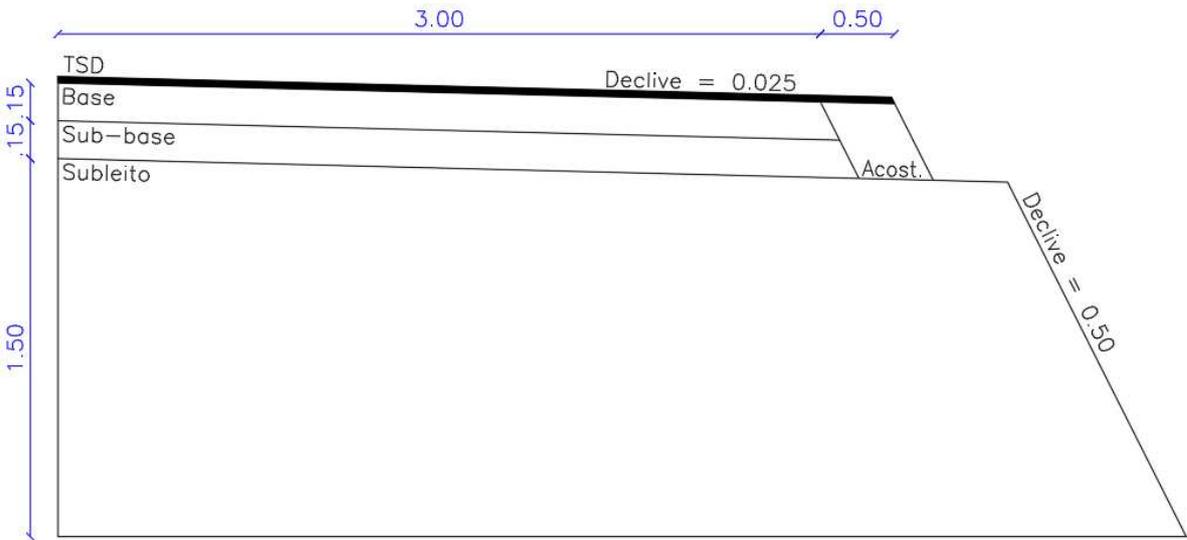
Fonte: Autora (2024).

Figura 40 – Características geométricas das estruturas A-sR-10 e S-sR-10



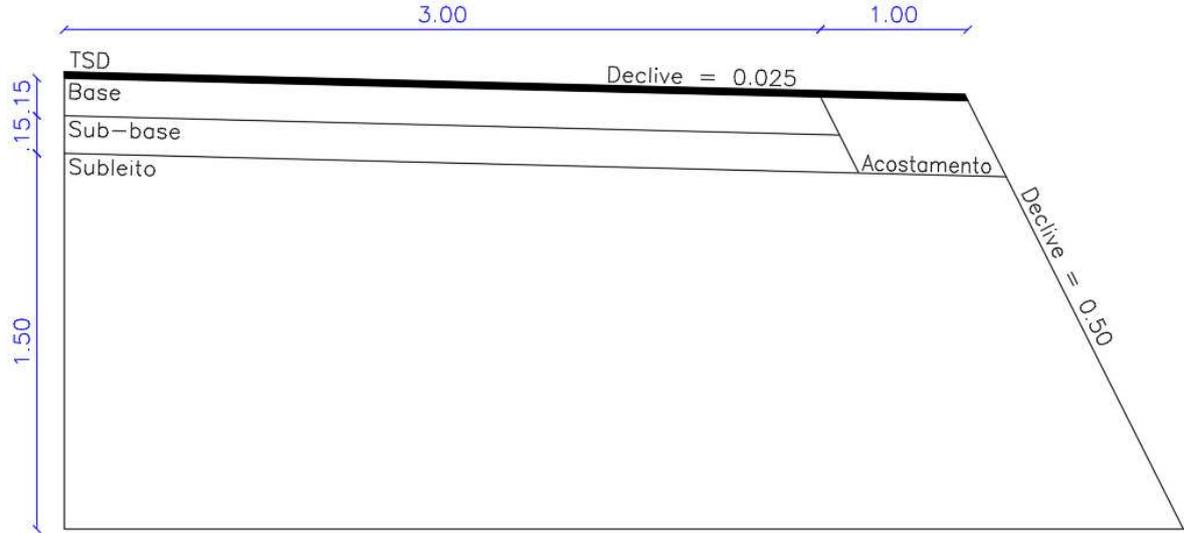
Fonte: Autora (2024).

Figura 41 – Características geométricas das estruturas A-R-05 e S-R-05



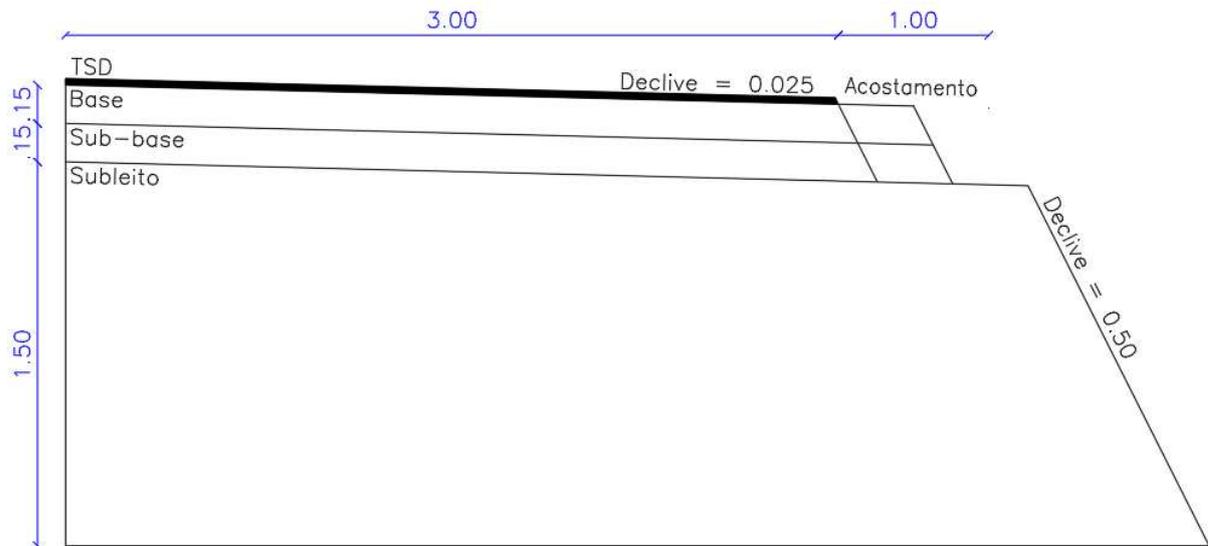
Fonte: Autora (2024).

Figura 42 – Características geométricas das estruturas A-R-10 e S-R-10



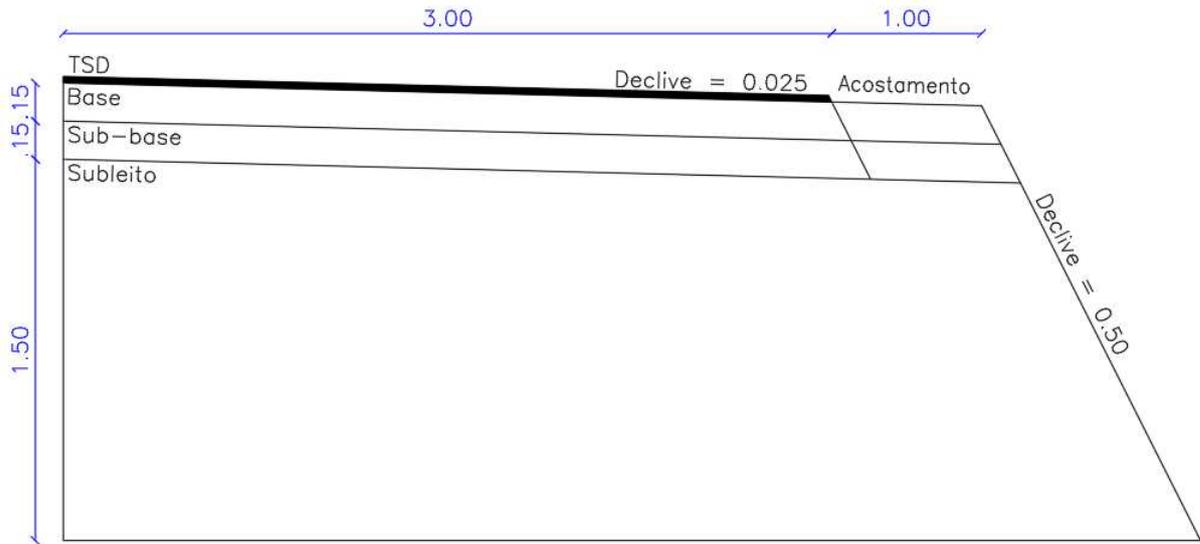
Fonte: Autora (2024).

Figura 43 – Características geométricas da estrutura P-sR-05



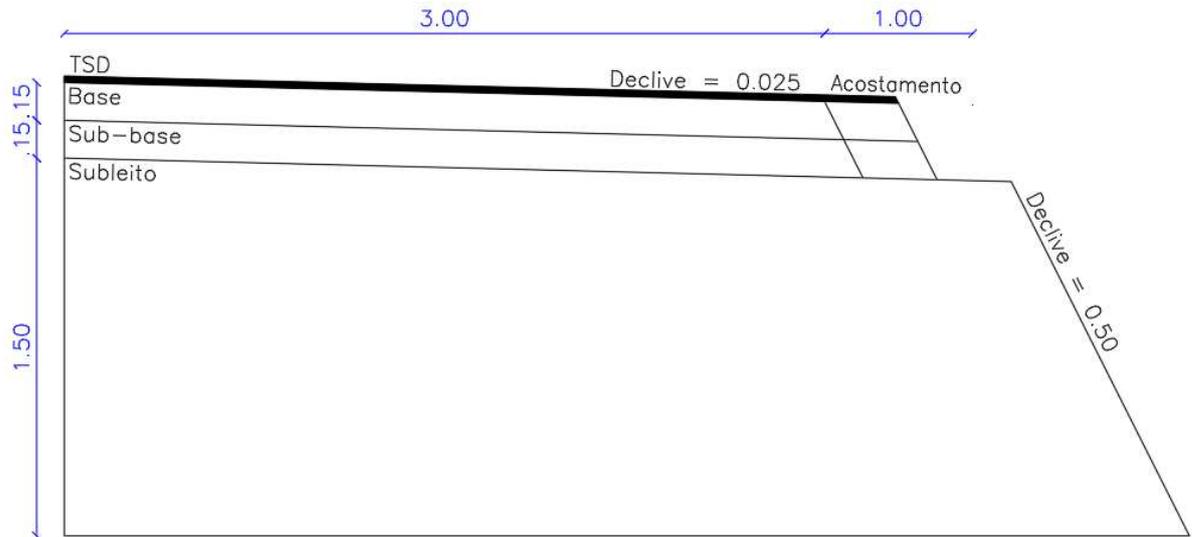
Fonte: Autora (2024).

Figura 44 – Características geométricas da estrutura P-sR-10



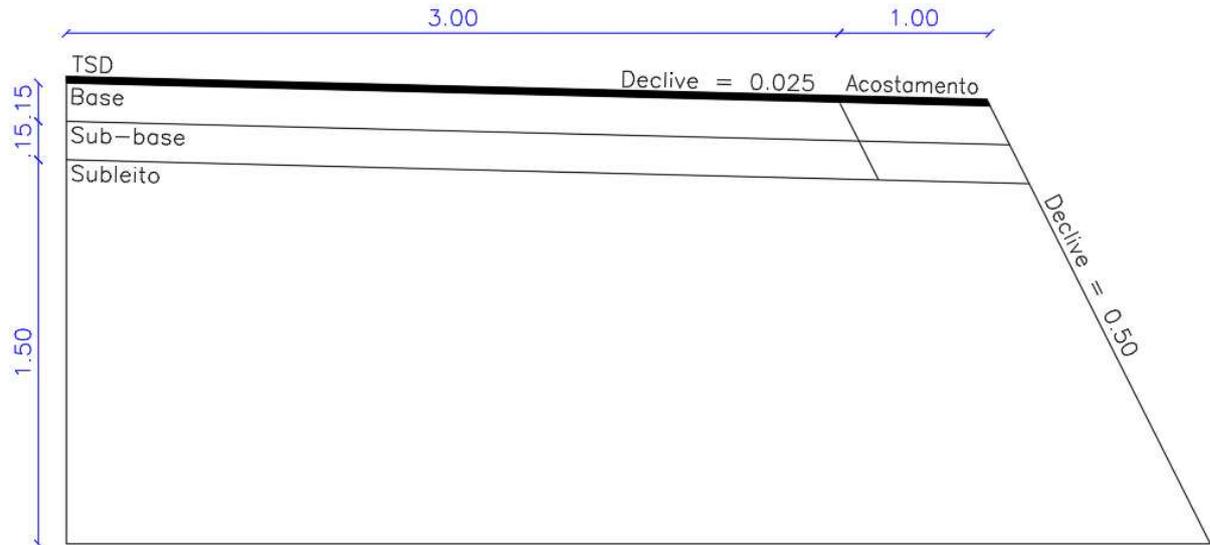
Fonte: Autora (2024).

Figura 45 – Características geométricas da estrutura P-R-05



Fonte: Autora (2024).

Figura 46 – Características geométricas da estrutura P-R-10



Fonte: Autora (2024).

**APÊNDICE C – COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DAS ESTRUTURAS DE
PAVIMENTO SIMULADAS**

Tabela 30 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura sAc (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s /transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
Total:						306.876,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 31 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura A-sR-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C0328	Aterro com compact. mecânica, material de aquisição	Acost.	m³	300,00	104,47	31.341,00
Total:						338.217,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 32 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura A-sR-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	TSD (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C0328	Aterro com compact. mecânica, material de aquisição	Acost.	m³	600,00	104,47	62.682,00
Total:						369.558,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 33 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura A-R-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	TSD (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C0328	Aterro com compact. mecânica, material de aquisição	Acost.	m³	300,00	104,47	31.341,00
C3242	TSS (s/transporte)	Acostamento	m²	1000,00	2,53	2.530,00
Total:						340.747,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 34 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura A-R-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C0328	Aterro com compactação mecânica, material de aquisição	Acost.	m³	600,00	104,47	62.682,00
C3242	TSS (s/transporte)	Acost.	m²	2.000,00	2,53	5.060,00
Total:						374.618,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 35 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura S-sR-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Acost.	m³	300,00	14,08	4.224,00
C0329	Aterro c/ compactação mecânica e controle, material produzido	Acost.	m³	300,00	32,56	9.768,00
Total:						320.868,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 36 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura S-sR-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m ³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m ²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m ³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m ³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	TSD (s/transporte)	Revest.	m ²	6.000,00	7,56	45.360,00
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Acost.	m ³	600,00	14,08	8.448,00
C0329	Aterro c/ compactação mecânica e controle, material produzido	Acost.	m ³	600,00	32,56	19.536,00
Total:						334.860,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 37 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura S-R-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m ³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m ²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m ³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m ³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	TSD (s/ transporte)	Revest.	m ²	6.000,00	7,56	45.360,00
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Acost.	m ³	300,00	14,08	4.224,00
C0329	Aterro c/ compactação mecânica e controle, material produzido	Acost.	m ³	300,00	32,56	9.768,00
C3242	TSS (s/transporte)	Acost.	m ²	1.000,00	2,53	2.530,00
Total:						323.398,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 38 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura S-R-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Acost.	m³	600,00	14,08	8.448,00
C0329	Aterro c/ compactação mecânica e controle, material produzido	Acost.	m³	600,00	32,56	19.536,00
C3242	TSS (s/transporte)	Acost.	m²	2.000,00	2,53	5.060,00
Total:						339.920,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 39 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura P-sR-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unit. (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Acost.	m³	150,00	33,84	5.076,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Acost.	m³	150,00	105,80	15.870,00
Total:						327.822,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 40 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura P-sR-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Acost.	m³	300,00	33,84	10.152,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Acost.	m³	300,00	105,80	31.740,00
Total:						348.768,00

Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 41 – Composição dos custos para execução de 1km da estrutura P-R-05 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Acost.	m³	150,00	33,84	5.076,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Acost.	m³	150,00	105,80	15.870,00
C3242	TSS (s/transporte)	Acost.	m²	1.000,00	2,53	2.530,00
Total:						330.352,00

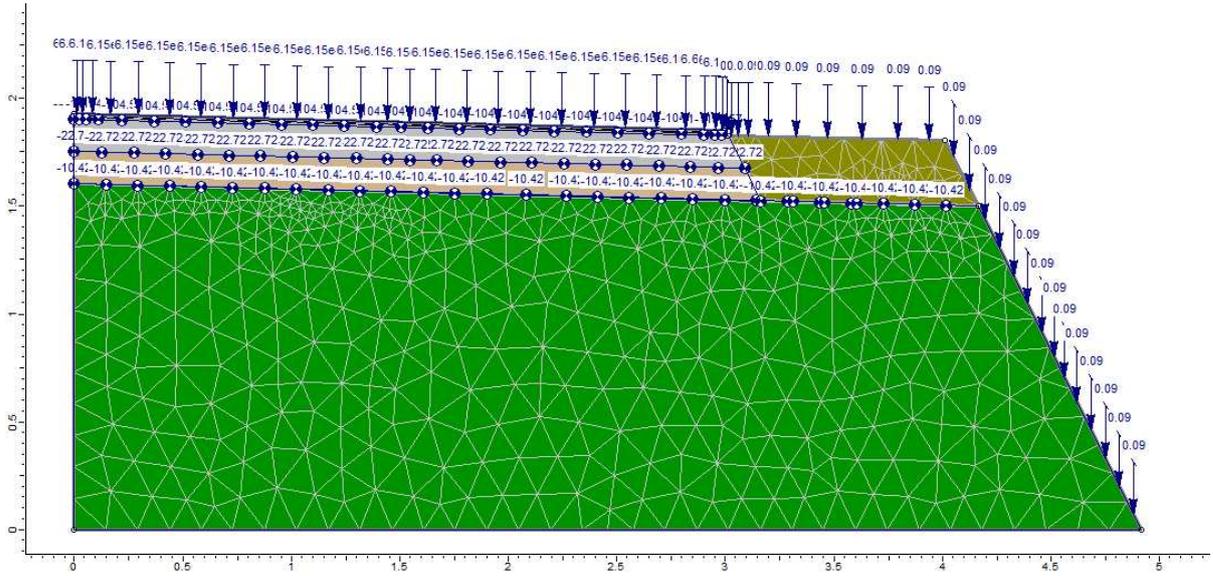
Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Tabela 42 – Composição do custo para execução de 1km da estrutura P-R-10 (Seinfra-CE desonerada, versão 028.1, 84,44% de encargos sociais)

Insumo	Descrição	Camada	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor (R\$/km)
C3181	Escavação, carga e transporte, 1ª cat (801m a 1000m)	Subleito	m³	8.000,00	14,08	112.640,00
C3233	Regularização do subleito	Subleito	m²	8.000,00	2,90	23.200,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Sub-base	m³	900,00	33,84	30.456,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Base	m³	900,00	105,80	95.220,00
C3240	Tratamento superficial duplo (s/transporte)	Revest.	m²	6.000,00	7,56	45.360,00
C3216	Estabiliz. Granul. de solos c/ mistura, s/ transporte	Acost.	m³	300,00	33,84	10.152,00
C3137	Base solo-brita com 50% de brita, s/ transporte	Acost.	m³	300,00	105,80	31.740,00
C3242	TSS (s/transporte)	Acost.	m²	2.000,00	2,53	5.060,00
					Total:	353.828,00

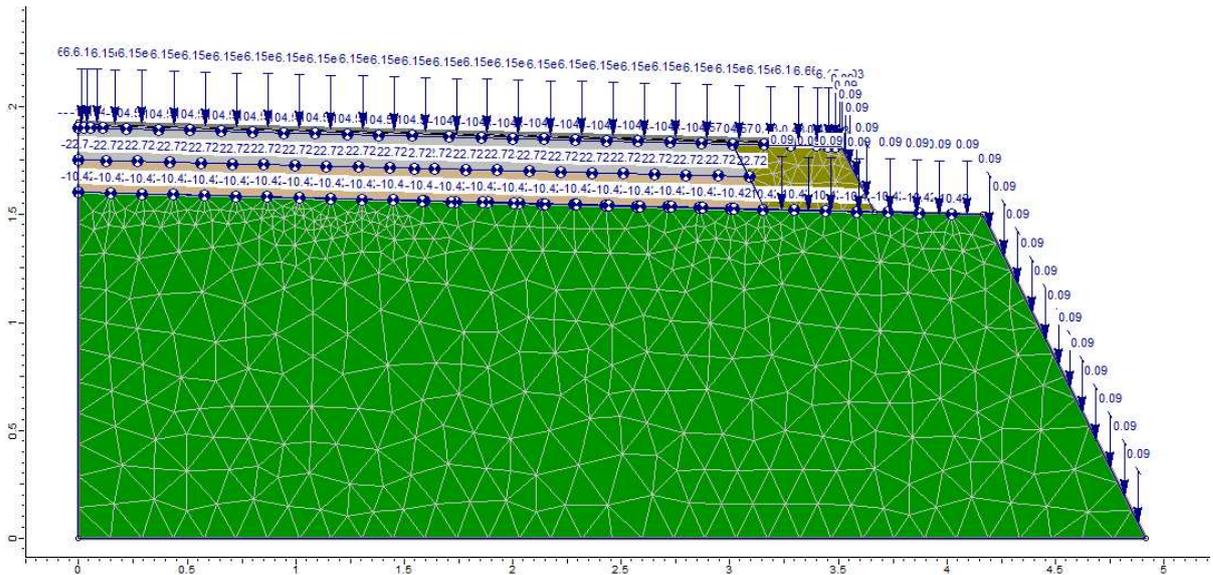
Fonte: Autora (2024) com base em Seinfra (2023).

Figura 49 – Estrutura A-sR-10 discretizada com as condições de contorno iniciais



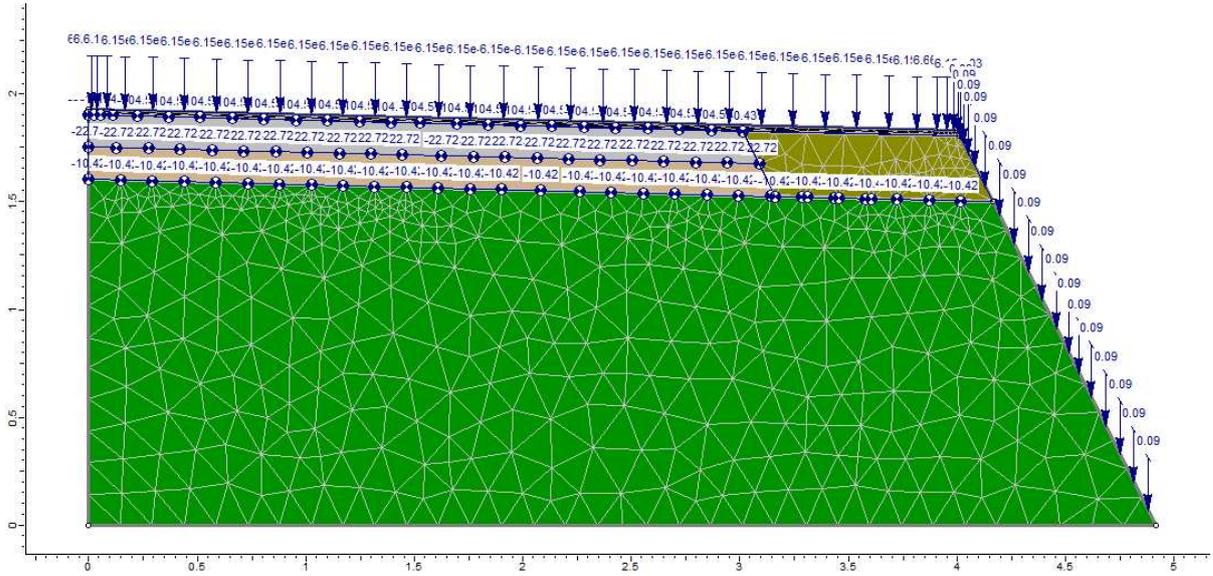
Fonte: Autora (2024).

Figura 50 – Estrutura A-R-05 discretizada com as condições de contorno iniciais



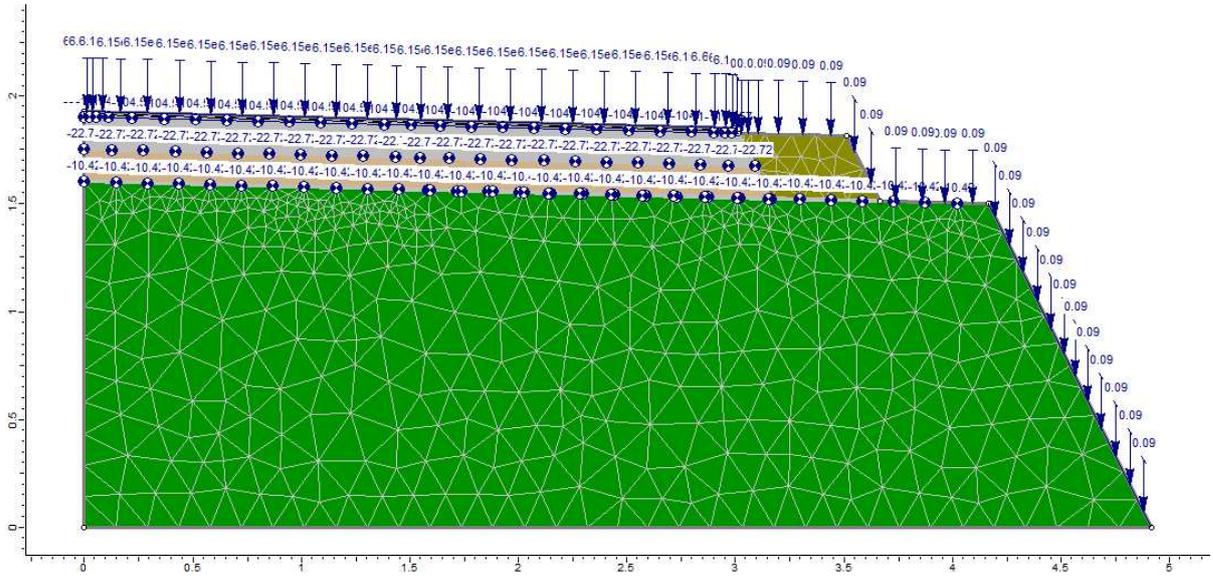
Fonte: Autora (2024).

Figura 51 – Estrutura A-R-10 discretizada com as condições de contorno iniciais



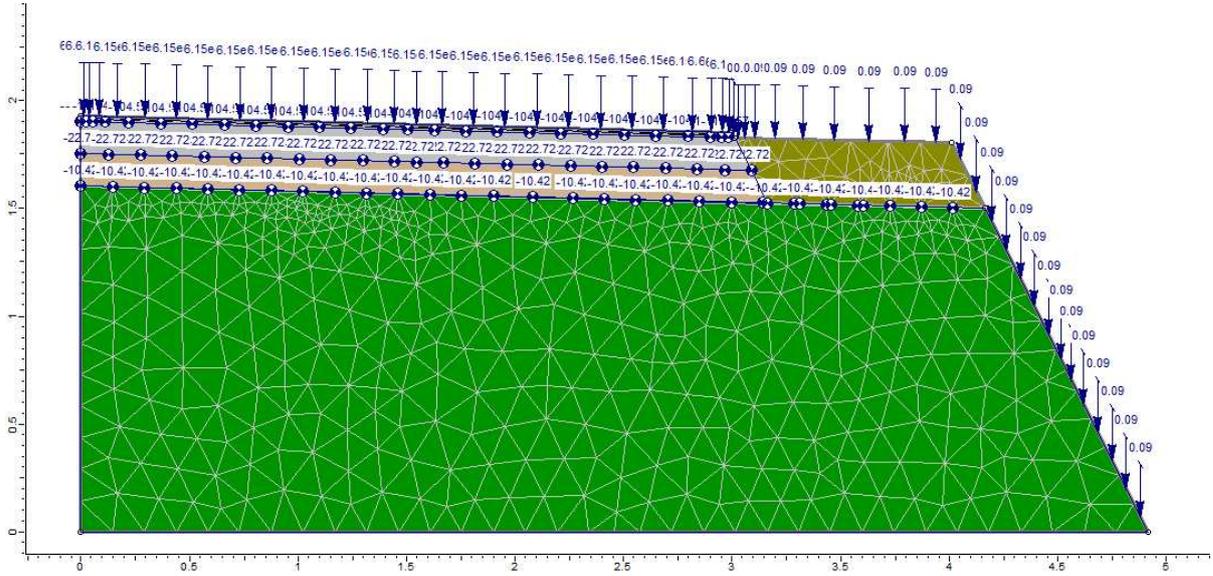
Fonte: Autora (2024).

Figura 52 – Estrutura S-sR-05 discretizada com as condições de contorno iniciais



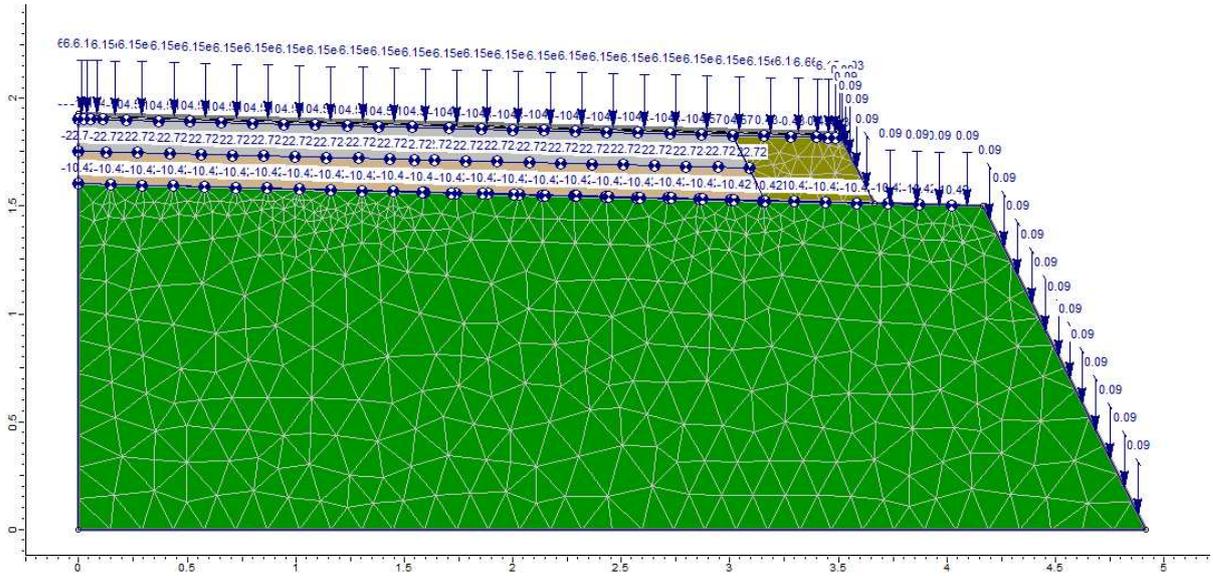
Fonte: Autora (2024).

Figura 53 – Estrutura S-sR-10 discretizada com as condições de contorno iniciais



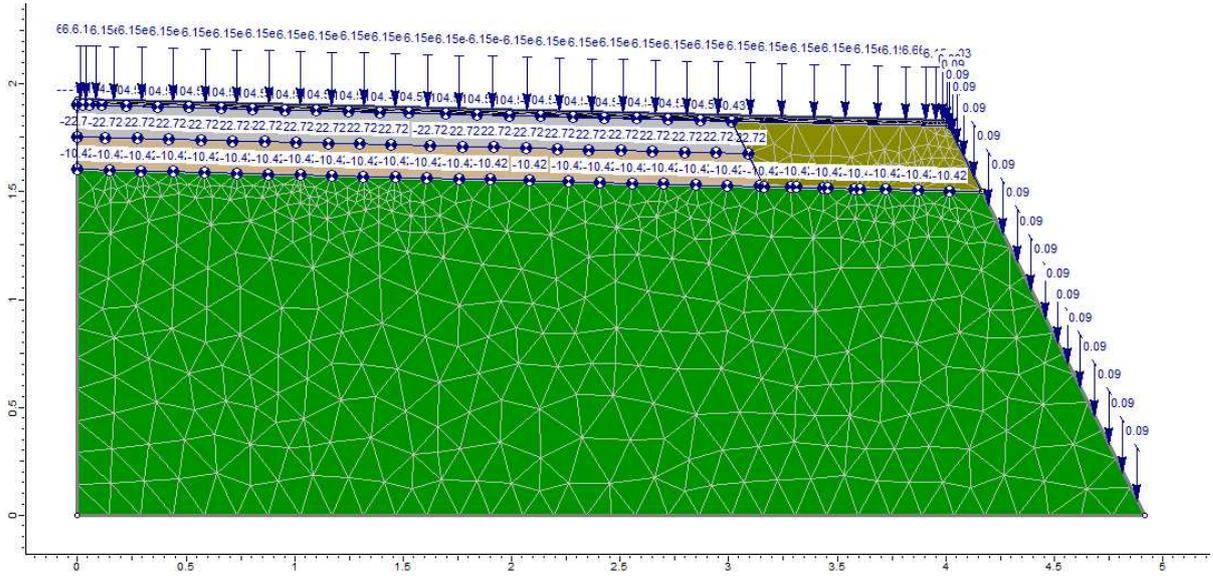
Fonte: Autora (2024).

Figura 54 – Estrutura S-R-05 discretizada com as condições de contorno iniciais



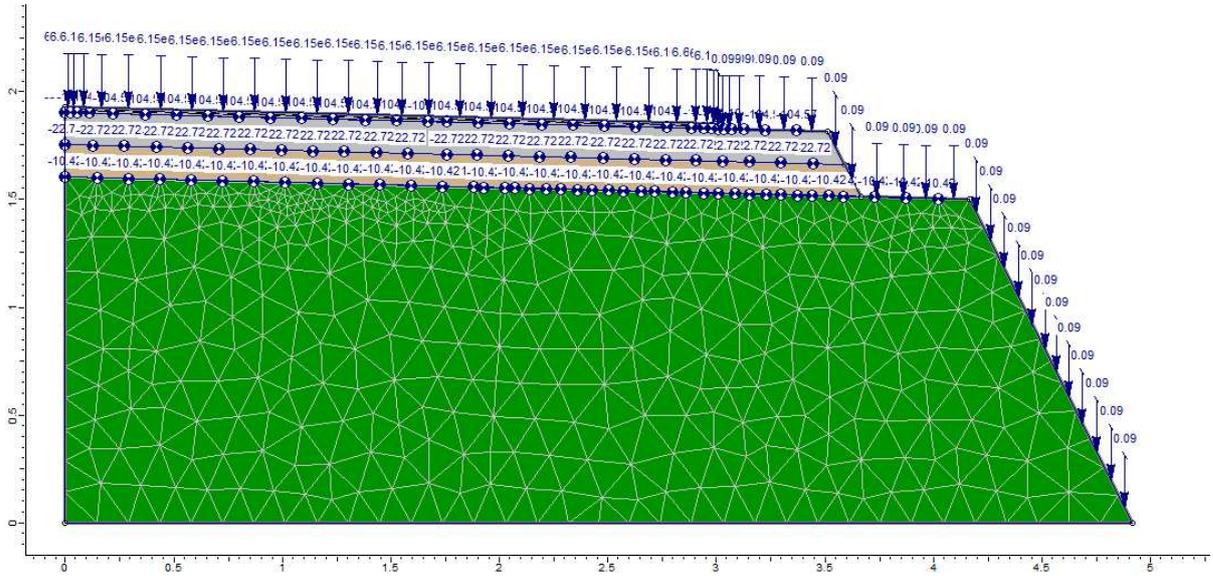
Fonte: Autora (2024).

Figura 55 – Estrutura S-R-10 discretizada com as condições de contorno iniciais



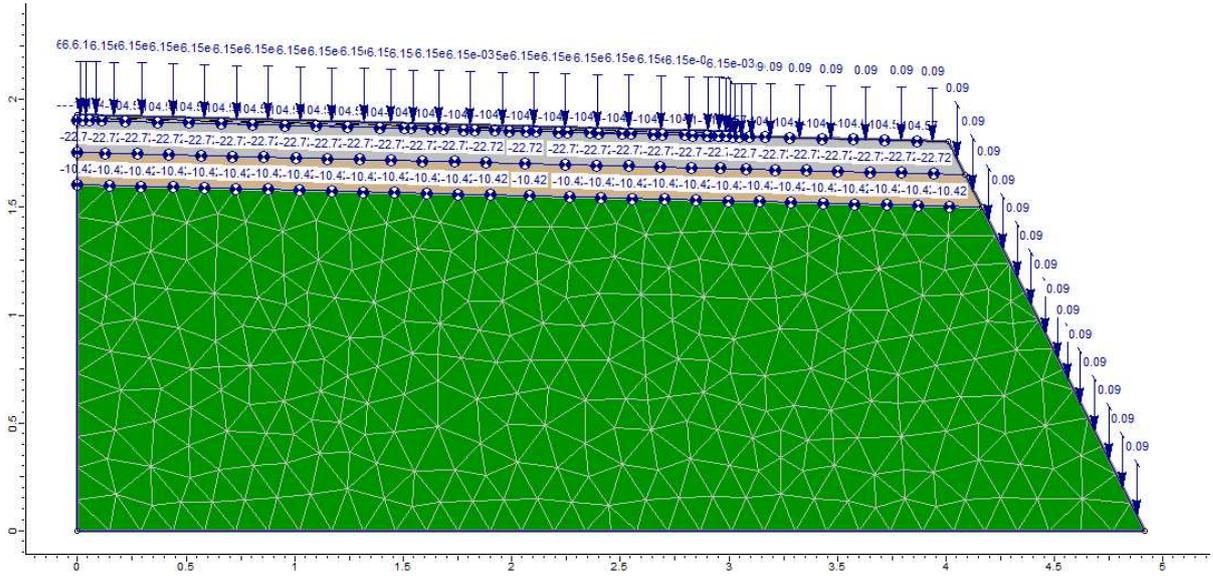
Fonte: Autora (2024).

Figura 56 – Estrutura P-sR-05 discretizada com as condições de contorno iniciais



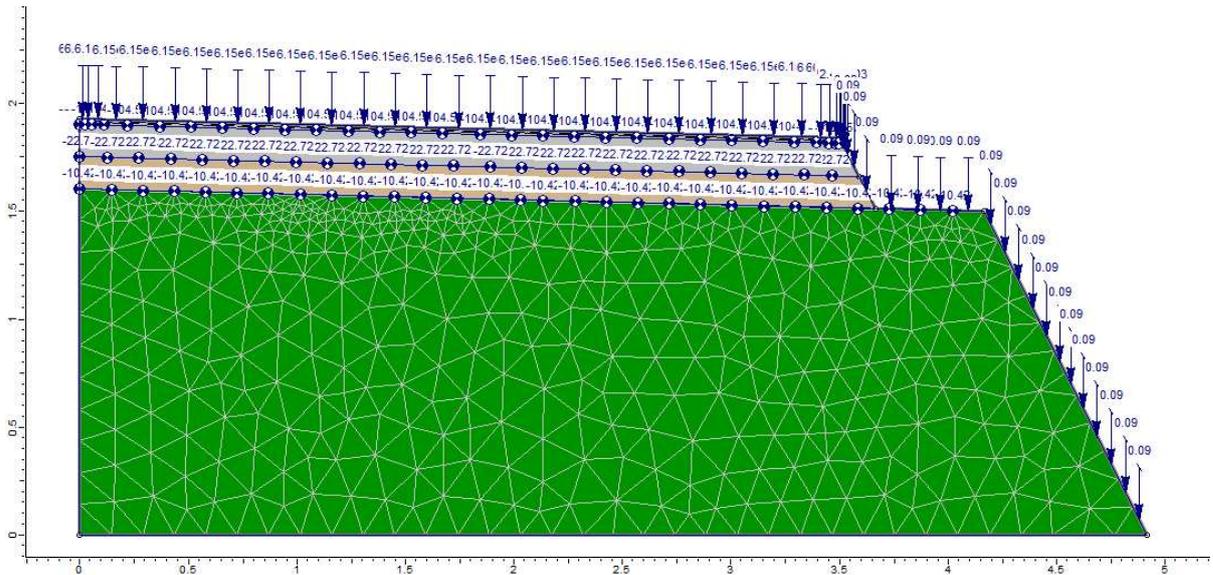
Fonte: Autora (2024).

Figura 57 – Estrutura P-sR-10 discretizada com as condições de contorno iniciais



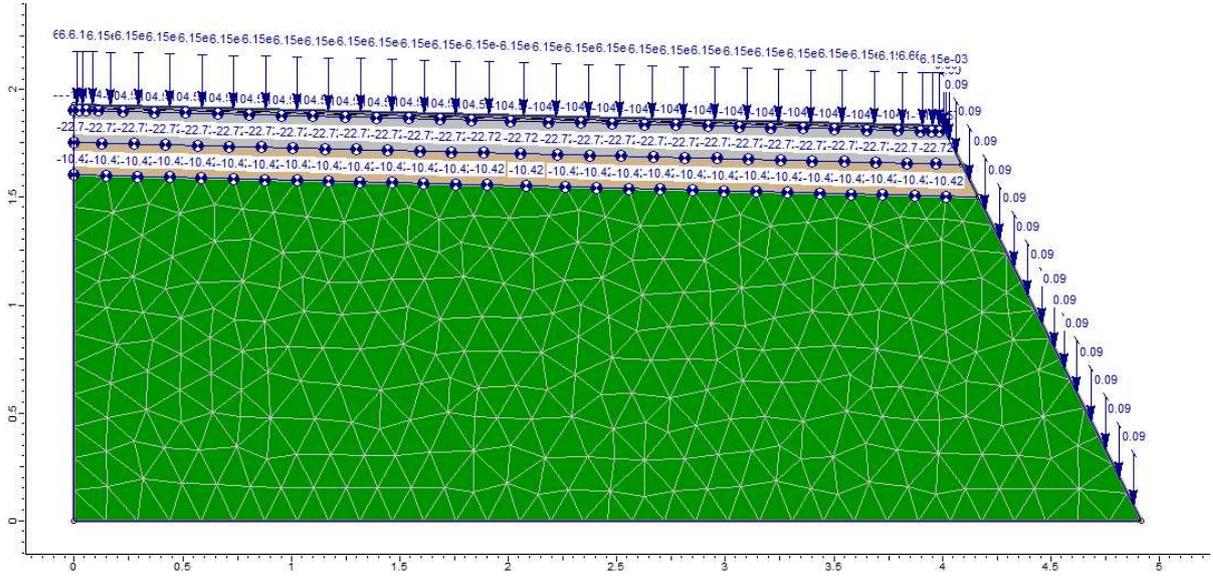
Fonte: Autora (2024).

Figura 58 – Estrutura P-R-05 discretizada com as condições de contorno iniciais



Fonte: Autora (2024).

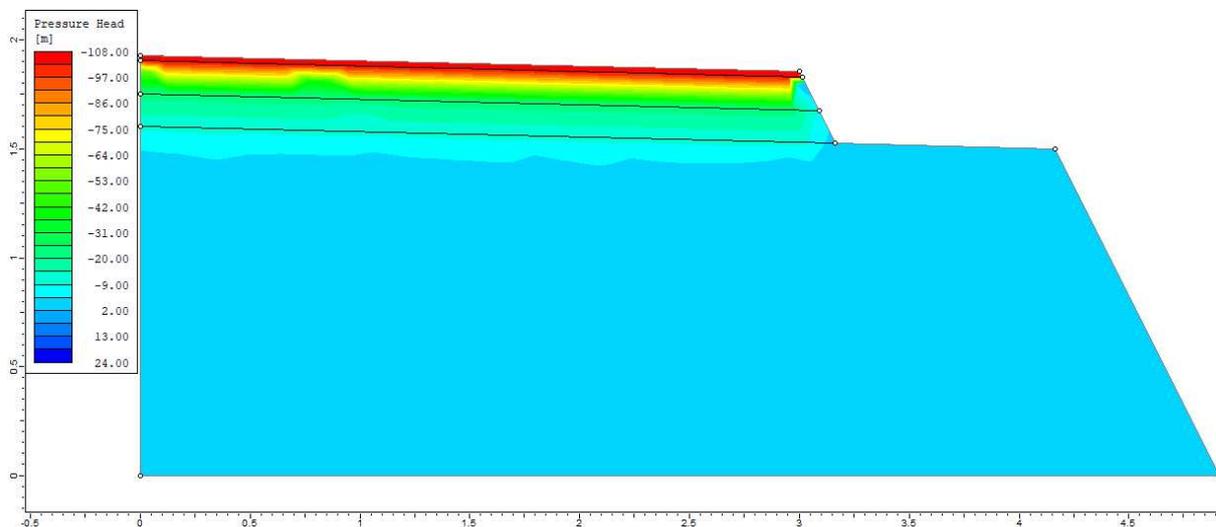
Figura 59 – Estrutura P-R-10 discretizada com as condições de contorno iniciais



Fonte: Autora (2024).

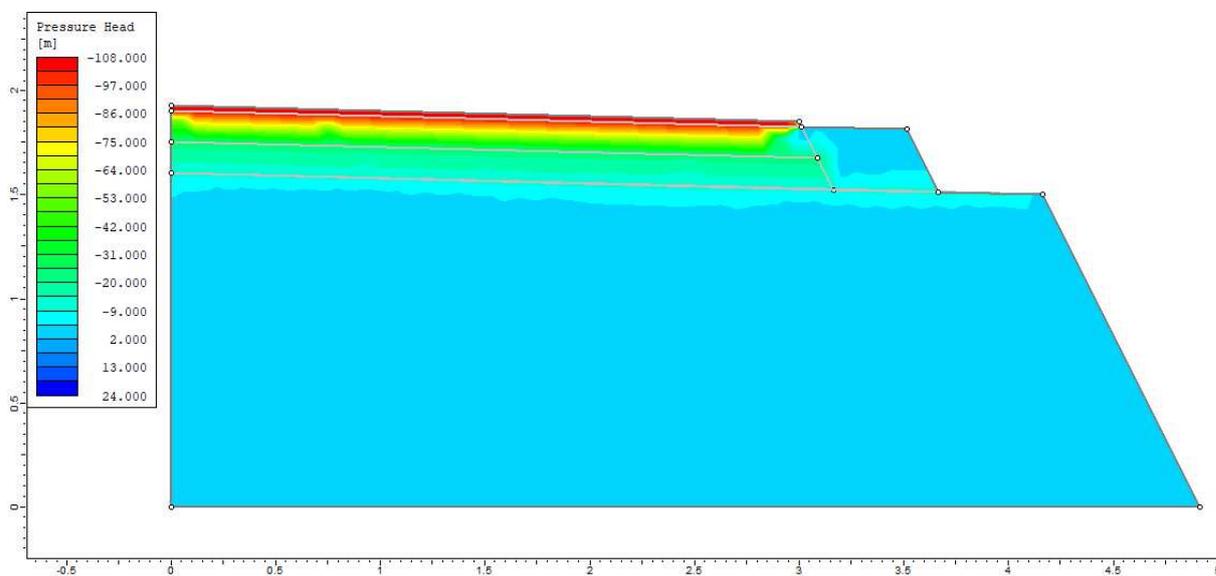
APÊNDICE E – VALORES DE CARGA PIEZOMÉTRICA OBTIDOS DAS SIMULAÇÕES DE INFILTRAÇÃO

Figura 60 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura sAc



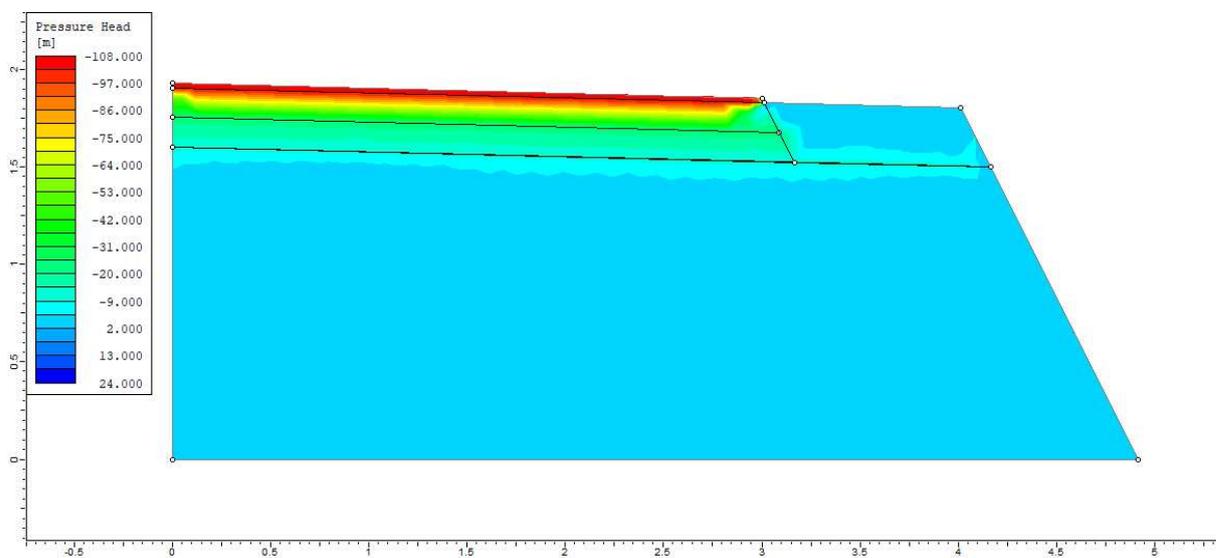
Fonte: Autora (2024).

Figura 61 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura A-sR-05



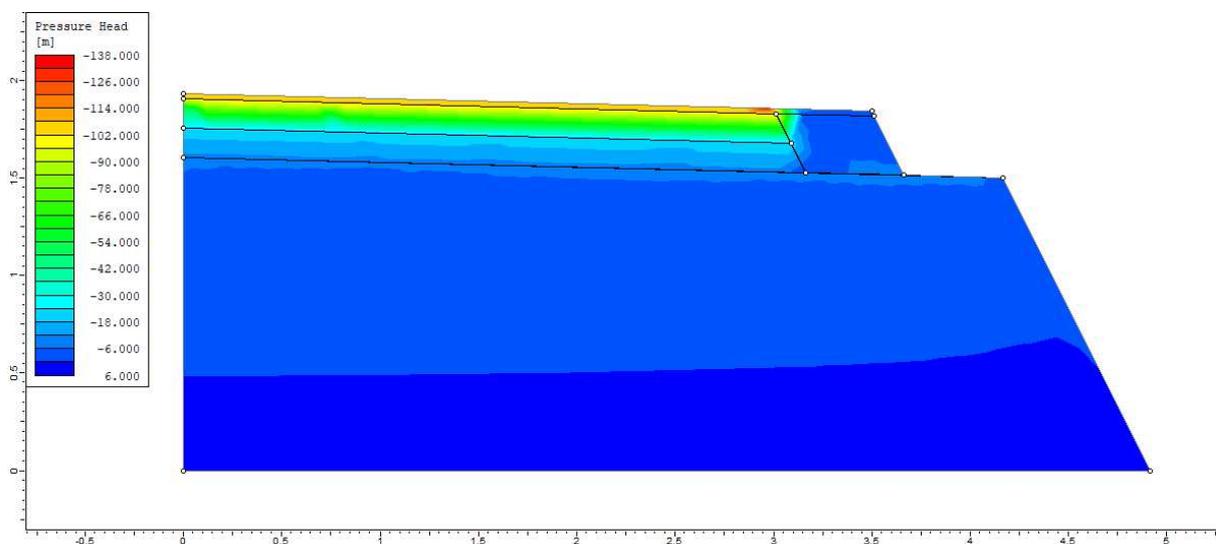
Fonte: Autora (2024).

Figura 62 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura A-sR-10



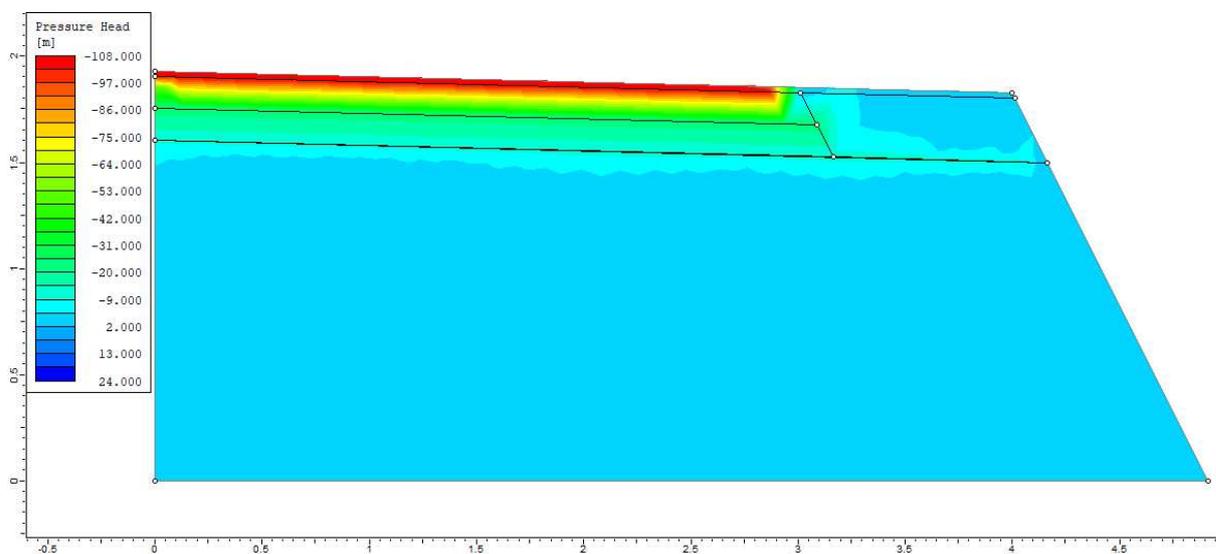
Fonte: Autora (2024).

Figura 63 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura A-R-05



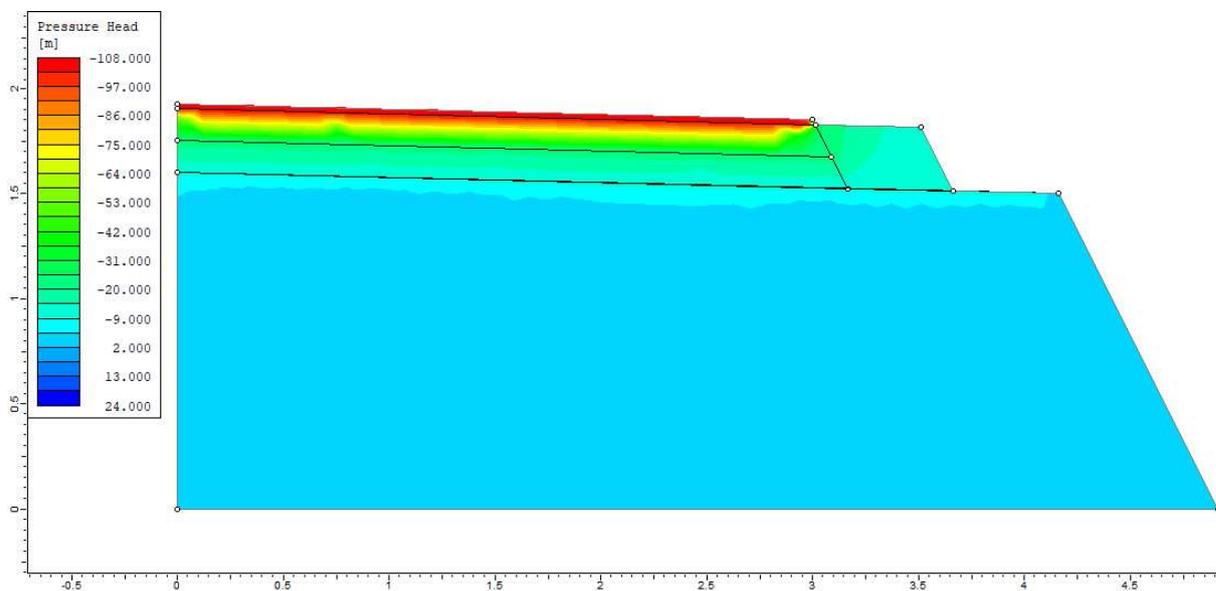
Fonte: Autora (2024).

Figura 64 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura A-R-10



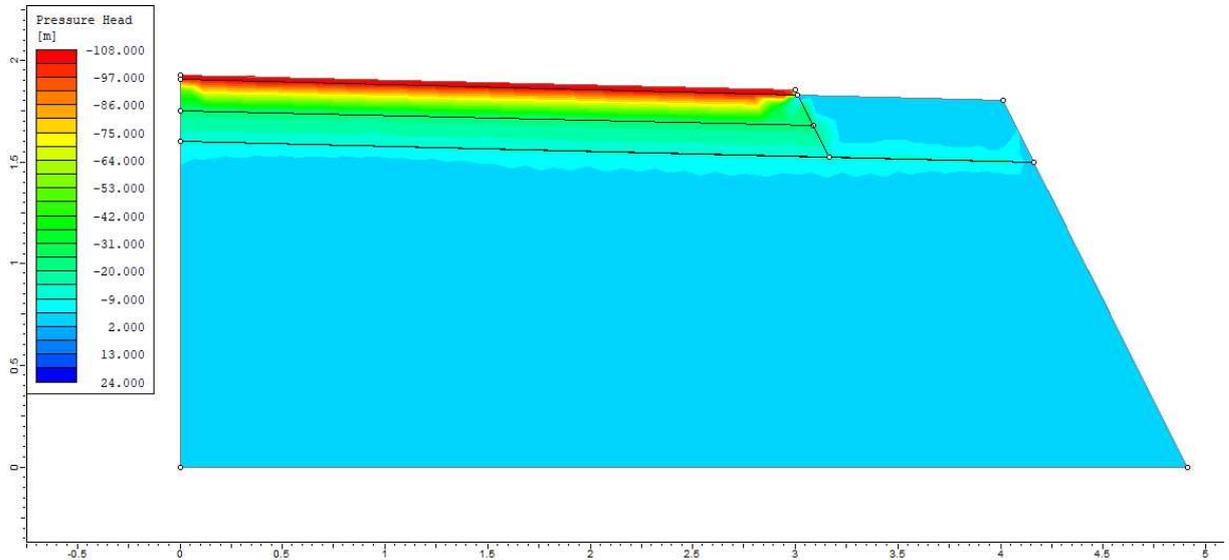
Fonte: Autora (2024).

Figura 65 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura S-sR-05



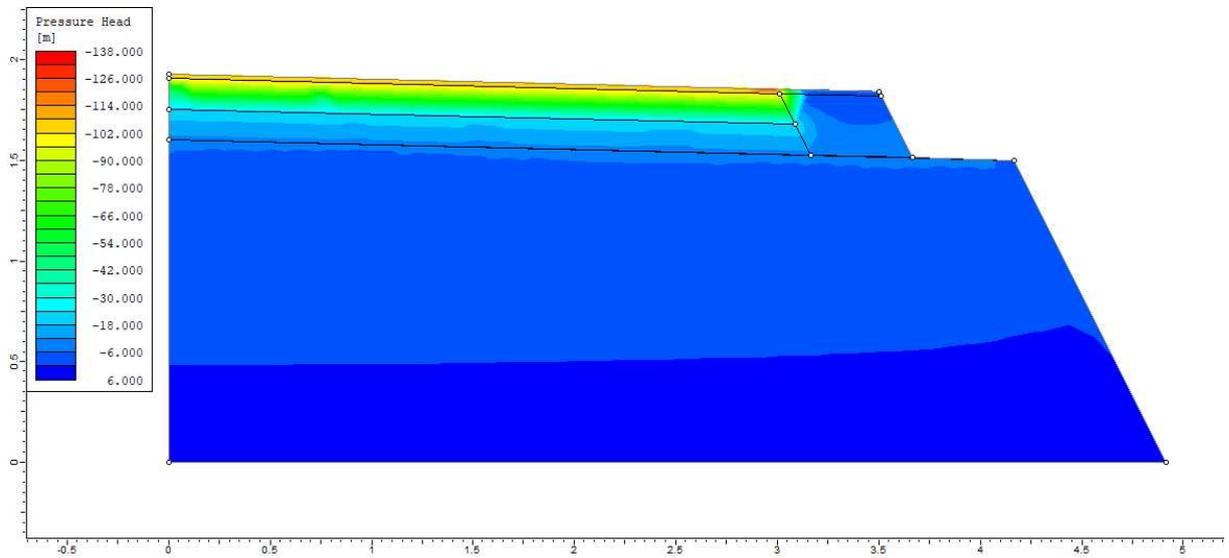
Fonte: Autora (2024).

Figura 66 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura S-sR-10



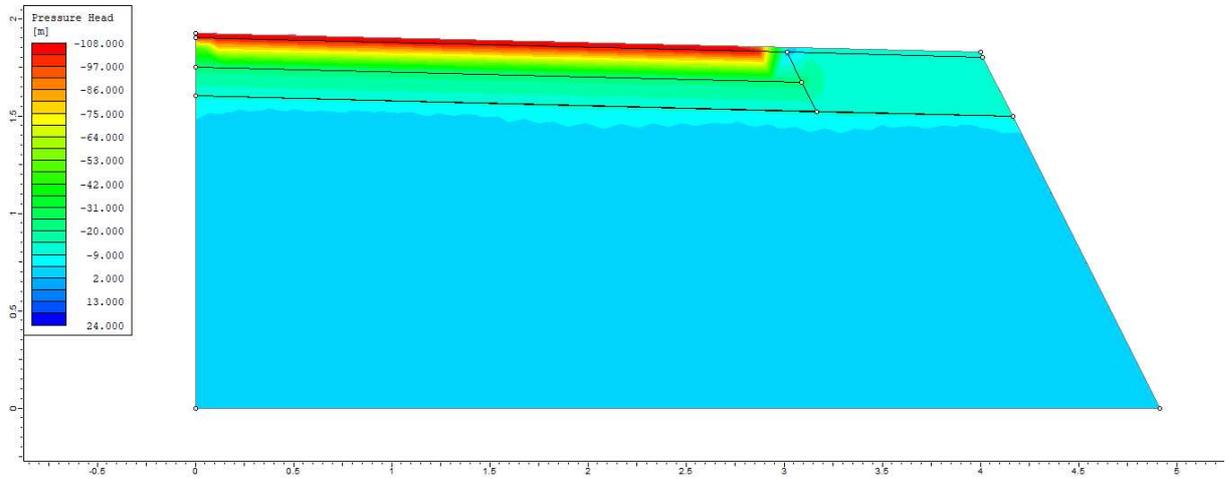
Fonte: Autora (2024).

Figura 67 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura S-R-05



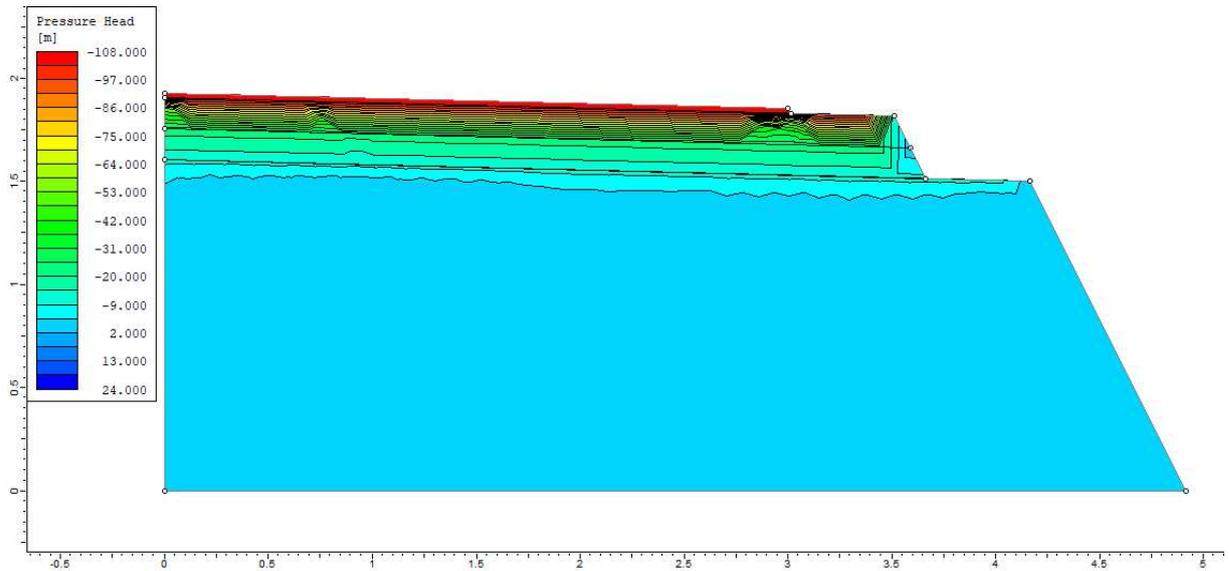
Fonte: Autora (2024).

Figura 68 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura S-R-10



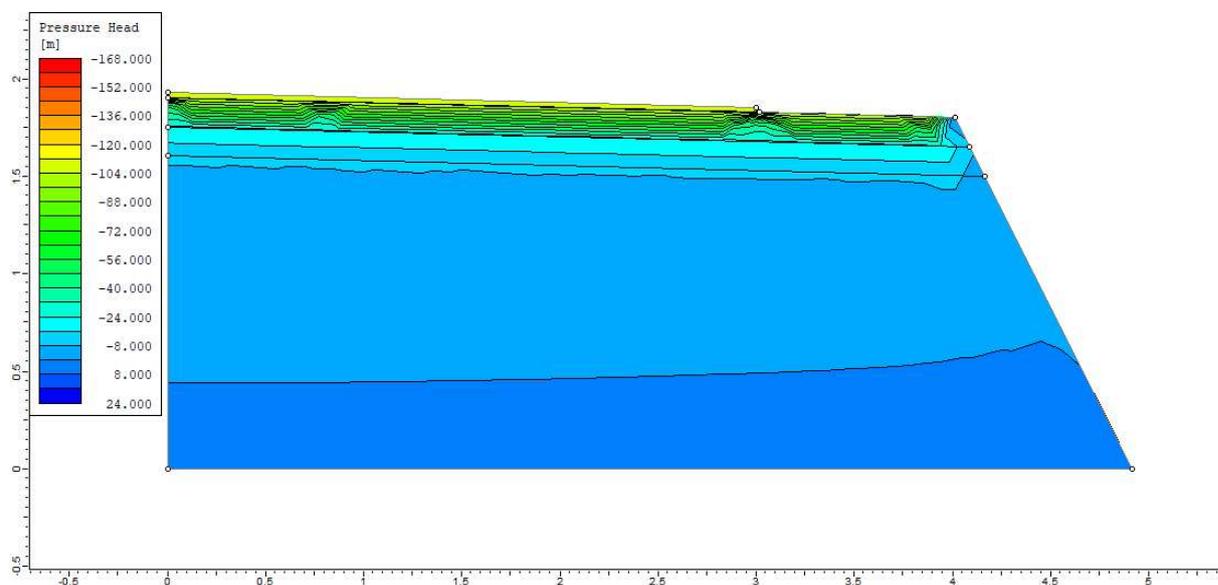
Fonte: Autora (2024).

Figura 69 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura P-sR-05



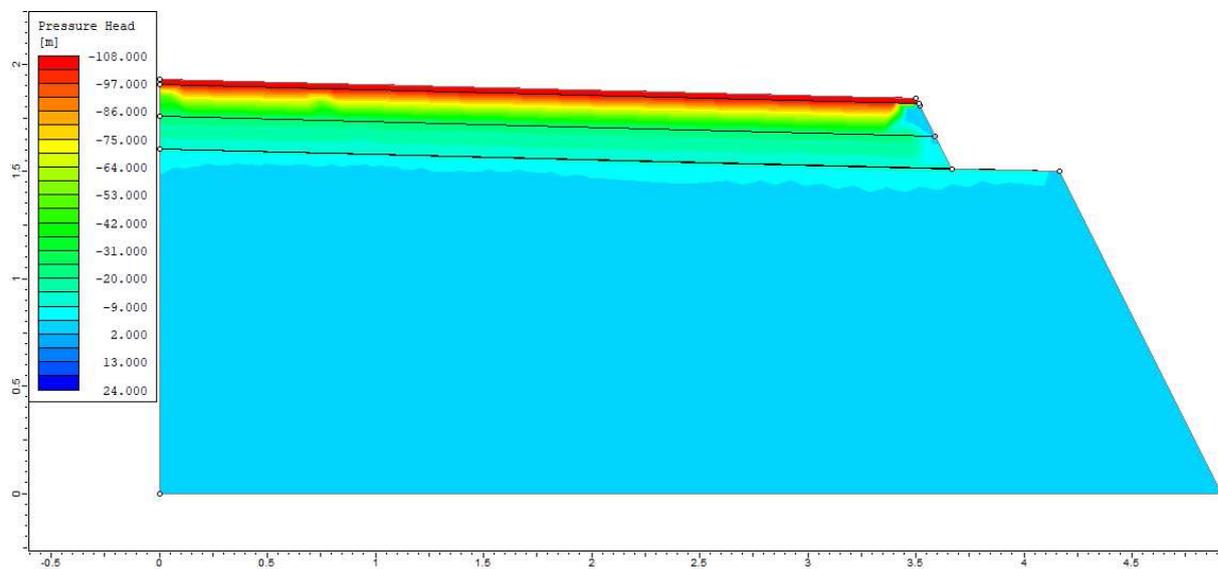
Fonte: Autora (2024).

Figura 70 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura P-sR-10



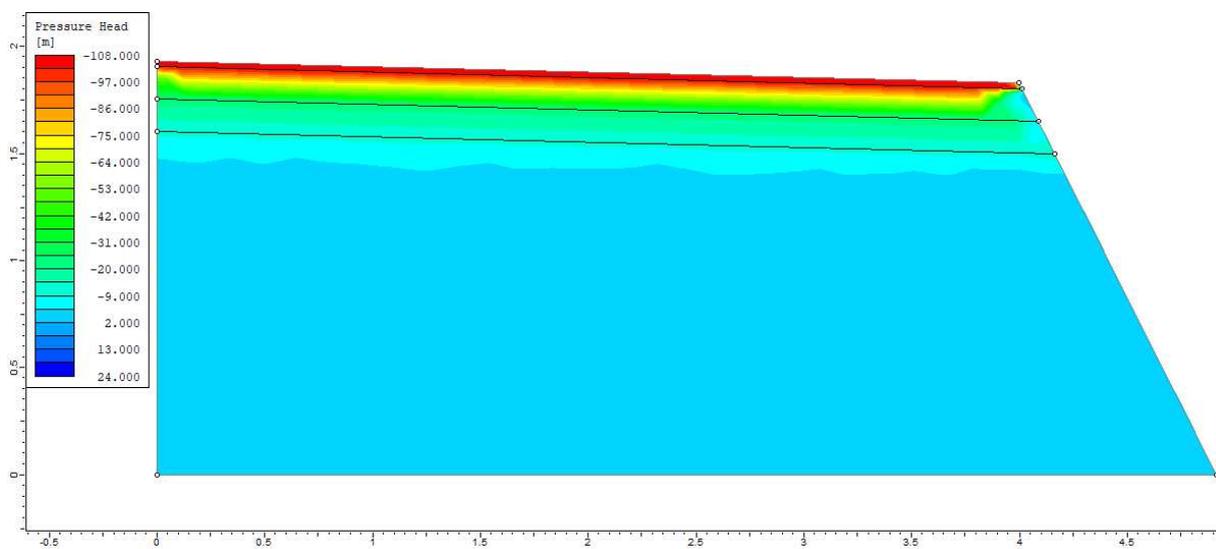
Fonte: Autora (2024).

Figura 71 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura P-R-05



Fonte: Autora (2024).

Figura 72 – Valores de carga piezométrica obtidos da simulação de infiltração da estrutura P-R-10



Fonte: Autora (2024).

**APÊNDICE F – VALORES DE UMIDADE GRAVIMÉTRICA VERIFICADOS PÓS
SIMULAÇÃO DE INFILTRAÇÃO**

Tabela 43 – Valores de umidade gravimétrica, em percentual, verificados pós simulação de infiltração

Estrutura	Camadas		
	Subleito	Sub-base	Base
Referência (hót)	6,37	11,40	9,29
sAc	12,02	12,05	9,77
A-sR-05	10,58	12,12	9,77
A-sR-10	10,24	12,10	9,77
A-R-05	10,58	12,11	9,74
A-R-10	10,20	12,10	9,74
S-sR-05	10,56	12,12	9,77
S-sR-10	10,21	12,11	9,77
S-R-05	10,43	12,07	9,74
S-R-10	9,00	11,83	9,69
P-sR-05	10,39	12,10	9,77
P-sR-10	9,36	12,10	9,69
P-R-05	9,00	12,03	9,69
P-R-10	7,84	11,65	9,62

Fonte: Autora (2024).

Tabela 44 – Valores de incremento de umidade nas camadas do pavimento, em percentual, verificados pós simulação de infiltração com relação à referência

Estrutura	Camadas		
	Subleito	Sub-base	Base
sAc	88,63	5,71	5,12
A-sR-05	66,04	6,36	5,12
A-sR-10	60,75	6,18	5,12
A-R-05	66,04	6,26	4,90
A-R-10	60,09	6,16	4,90
S-sR-05	65,79	6,36	5,12
S-sR-10	60,31	6,22	5,12
S-R-05	63,76	5,90	4,90
S-R-10	41,21	3,76	4,31
P-sR-05	63,06	6,17	5,12
P-sR-10	46,87	6,16	4,31
P-R-05	41,21	5,53	4,31
P-R-10	23,00	2,21	3,54

Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE G – VALORES DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA NAS UMIDADES DE INTERESSE

Tabela 45 – Módulos de resiliência (MRh) nas unidades de interesse (h)

Estrutura	Subleito		Sub-base		Base	
	h (%)	MRh (MPa)	h (%)	MR (MPa)	h (%)	MR (MPa)
Ref	6,37	281,11	11,40	272,78	9,29	454,94
sAc	12,02	23,44	12,05	204,88	9,77	369,08
A-sR-05	10,58	44,15	12,12	198,28	9,77	369,08
A-sR-10	10,24	51,22	12,10	200,08	9,77	369,08
A-R-05	10,58	44,15	12,11	199,29	9,74	372,43
A-R-10	10,20	52,18	12,10	200,31	9,74	372,43
S-sR-05	10,56	44,47	12,12	198,28	9,77	369,08
S-sR-10	10,21	51,85	12,11	199,63	9,77	369,08
S-R-05	10,43	47,07	12,07	202,93	9,74	372,43
S-R-10	9,00	88,56	11,83	225,87	9,69	381,51
P-sR-05	10,39	48,00	12,10	200,20	9,77	369,08
P-sR-10	9,36	75,56	12,10	200,31	9,69	381,51
P-R-05	9,00	88,56	12,03	206,74	9,69	381,51
P-R-10	7,84	147,54	11,65	244,12	9,62	393,61

Fonte: Autora (2024).