



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

ANA TÁLIA PINTO GUILHERME

**UM CATÁLOGO SIMPLIFICADO DE ESTRUTURAS PADRÃO EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DIMENSIONADOS PELO MÉTODO MEDINA
APLICÁVEL À RMF**

**FORTALEZA
2023**

ANA TÁLIA PINTO GUILHERME

UM CATÁLOGO SIMPLIFICADO DE ESTRUTURAS PADRÃO EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DIMENSIONADOS PELO MÉTODO MEDINA
APLICÁVEL À RMF

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Transportes.

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva

FORTALEZA
2023

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)

G974c Guilherme, Ana Tália Pinto.

Um catálogo simplificado de estruturas padrão em pavimentos flexíveis dimensionados pelo método Medina aplicável à RMF / Ana Tália Pinto Guilherme. – 2023.
157 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva.

1. Catálogo de pavimentos. 2. Medina. 3. RMF. 4. DP. 5. MR. I. Título.

CDD 388

ANA TÁLIA PINTO GUILHERME

UM CATÁLOGO SIMPLIFICADO DE ESTRUTURAS PADRÃO EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DIMENSIONADOS PELO MÉTODO MEDINA
APLICÁVEL À RMF

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes do Departamento de 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 de Transportes.

Orientador: Carlos Augusto Uchôa da Silva

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. D. Sc. Carlos Augusto Uchôa da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. D.Sc. Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. D.Sc. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. D.Sc. Antônio Júnior Ales Ribeiro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. D.Sc. Juceline Batista dos Santos Bastos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

AGRADECIMENTO

A Deus, primeiramente, por sempre me abençoar e encorajar a conquistar meus objetivos, e também por colocar pessoas incríveis no meu caminho.

Aos meus pais e minhas irmãs, por acreditarem mais em mim do que eu mesma, e por sempre me incentivarem na concretização dos meus sonhos e vibrar comigo a cada conquista. Vocês são essenciais em minha vida.

Ao meu marido, Alex Medeiros, pelo carinho, companheirismo, incentivo, compreensão e paciência neste período de ausência. Muito obrigada por estar sempre ao meu lado. Com você essa caminhada se tornou mais leve.

Ao meu orientador, Carlos Uchôa, por toda atenção e dedicação, e principalmente pela sensibilidade de entender o momento de um “puxão de orelha” e o incentivo nos momentos de desânimo e cansaço. Grata por todos os ensinamentos e conselhos, e também pela confiança e empenho desde do mestrado.

À Sarah, que foi minha parceira de laboratório, e dividiu os perrengues desde das coletas até os ensaios mais pesados, e ainda foi suporte nas horas de desesperos. Grata pelo tordo carinho e companheirismo.

Ao Assis, técnico de laboratório de solos do LMP-UFC, por compartilhar o conhecimento técnico na área de solos, por propor soluções práticas às adversidades encontradas no laboratório, por auxiliar na coleta dos materiais e no procedimento experimental dessa pesquisa.

Ao Ricardo, laboratorista do grupo de solos do LMP, por ter sido um suporte fundamental para conclusão dos ensaios laboratoriais.

Ao Jardel, Jorge Lucas, Fabiana, Juceline e Lucimar pelas conversas e ensinamentos que contribuíram para a concretização desta pesquisa.

Aos amigos, Daianne, Paulo, Camila, Ada, Ícaro e Raphaele, por tornarem essa caminhada acadêmica mais leve, por me aguentarem falar dos problemas da pesquisa, e por muitas vezes me direcionar para uma solução.

Ao Antônio Júnior, que acompanhou minha trajetória desde do mestrado, e sempre acrescentou ótimas ideias a pesquisa, e agora irá contribuir na participação dessa banca de doutorado.

A todos os professores do PETRAN, por todo o conhecimento transmitido, que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional. Em especial à profa. Suelly e ao prof. Heber, que participaram da banca do meu mestrado, e aceitaram o convite novamente para desempenhar esse mesmo papel nessa nova etapa da minha vida acadêmica.

À Juceline Bastos, que gentilmente aceitou o convite para participar da banca avaliadora. Grata pela disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados.

Ao LMP, por fornecer suas instalações para subsidiar esta pesquisa.

Ao IFCE - Juazeiro do Norte, por auxiliar na execução de alguns ensaios, no momento em que o equipamento da UFC passava por manutenção. Obrigada, Júnior e Assis.

Aos funcionários do DET e CT Asfalto da Universidade Federal do Ceará, pela atenção e carinho dispensados.

À FUNCAP pela bolsa de doutorado concedida

E a todos que contribuíram de alguma maneira para que eu alcançasse mais esta vitória.

RESUMO

No Brasil, o modal rodoviário é responsável pelo transporte de mais de 65% das cargas e por 95% da de passageiros. Destaca-se também que a maioria das rodovias brasileiras são construídas com pavimento flexível, cerca de 99,0% (CNT, 2022). Ciente da significativa importância desse modal e com o propósito de apoiar o desenvolvimento do setor, os Catálogos de Dimensionamento de Pavimentos buscam ampliar as possibilidades na escolha das estruturas dos projetos rodoviários e facilitar o acesso do corpo técnico as novas técnicas desenvolvidas, assim como o próprio método de dimensionamento de pavimentos. Embora o CBR seja o parâmetro de rigidez usado no método de dimensionamento empírico convencional (Souza, 1981) de estruturas dos pavimentos, o Medina (DNIT, 2018) é o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos, de concepção mecanístico-empírica, usa como parâmetros principais de rigidez o módulo de resiliência e a deformação permanente dos materiais. Diante disto, objetivo principal desta pesquisa é desenvolver um catálogo de estruturas padrão de pavimentos flexíveis, dimensionados através do Medina e, baseado no comportamento geotécnico dos solos locais e no tráfego atuante na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Para tanto concebeu-se tanto um esforço amostral, no qual foram coletados solos e britas na RMF, assim como um programa experimental para caracterização física e mecânica (MR e DP) dos materiais coletados. Para reconhecimento do subleito natural e de materiais disponíveis para obras rodoviárias da RMF, foram extraídos solos localizados em Jazidas e taludes naturais dentro do limite da área de estudo. Finalmente, foram produzidas fichas catalográficas a partir de diversos testes e simulações realizadas no *software* MeDiNa. Quanto à classificação da AASHTO, o comportamento dos solos estudados, em sua maioria, foi classificado na classe A-2-4, resultado que valida o modelo de RIBEIRO et. al (2013) com uma taxa de acerto na ordem de 57%, embora a taxa de acerto chegue até de 71%, quanto ao seu provável comportamento como camadas granulares em pavimentos. Quanto ao CBR, os solos analisados apresentaram uma taxa de correlação de 0,56 em relação ao modelo de RIBEIRO et. al (2013). Os solos coletados foram submetidos ao ensaio triaxial e apresentaram módulos médios no intervalo de 380 a 550Mpa, contudo encontrou-se uma baixa correlação direta com o modelo preditivo de Ribeiro (2016). Mas, ajustando o modelo de acordo com as faixas de MR previstas foi possível obter valores de MR mais próximos do real, com variação de mais ou menos 100 MPa. De acordo com os procedimentos, análises e avaliações desenvolvidas, este estudo demonstrou a eficiência da metodologia europeia simplificada de laboratório, para a obtenção e o entendimento da ocorrência de DP em materiais granulares da RMF, reduzindo o tempo de execução dos ensaios e recursos. Os solos ensaiados apresentaram baixas deformações, bem como as misturas estabilizadas com solo e brita. Para simulação das estruturas de pavimento, em função do subleito e do tráfego, o subleito foi classificado de acordo com as classes AASTHO e, o tráfego pela classificação de Bastos (2016). Constatou-se, durante as simulações, que no geral as misturas estabilizadas não agregaram no desempenho do pavimento. Para algumas sub-regiões da RMF, não foi possível obter estruturas com os materiais estudados para o tráfego extremamente elevado, o que foi contornado propondo-se o uso de cinza e cal conforme Vasconcelos (2018). Como resultado final, gerou-se um catálogo simplificado de estruturas padrão, para pavimentos flexíveis, dimensionados pelo Medina para a Região Metropolitana de Fortaleza – CE, sugerindo—se como um guia de referência rápida e preliminar para projetos rodoviários locais.

Palavras chave: catálogo de pavimentos; medina; RMF; DP; MR; CBR; AASHTO.

ABSTRACT

In Brazil, road transport is responsible for transporting more than 65% of cargo and 95% of passengers. It is also noteworthy that most Brazilian highways are built with flexible pavement, around 99.0% (CNT, 2022). Aware of the significant importance of this modal and with the purpose of supporting the development of the sector, the Pavement Sizing Catalogs seek to expand the possibilities in the choice of structures for road projects and facilitate the access of the technical staff to the new techniques developed, as well as the own pavement dimensioning method. Although CBR is the stiffness parameter used in the conventional empirical design method (Souza, 1981) of pavement structures, Medina (DNIT, 2018) is the new method of national design of pavements, of mechanistic-empirical design, uses as main parameters of stiffness the modulus of resilience and the permanent deformation of the materials. In view of this, the main objective of this research is to develop a catalog of standard structures of flexible pavements, dimensioned through the Medina and, based on the geotechnical behavior of local soils and on the active traffic in the Metropolitan Region of Fortaleza (RMF). For this purpose, both a sampling effort was conceived, in which soils and gravel were collected in the RMF, as well as an experimental program for the physical and mechanical characterization (MR and DP) of the collected materials. In order to recognize the natural subgrade and materials available for RMF road works, soils located in natural deposits and slopes within the limits of the study area were extracted. Finally, catalog sheets were produced from various tests and simulations carried out in the MeDiNa software. As for the AASHTO classification, the behavior of the studied soils, for the most part, was classified in class A-2-4, a result that validates the model by RIBEIRO et. al (2013) with a hit rate of around 57%, although the hit rate reaches up to 71%, regarding their probable behavior as granular layers in pavements. As for the CBR, the analyzed soils showed an adaptation rate of 0.56 in relation to the model by RIBEIRO et. al (2013). The collected soils were submitted to the triaxial test and presented average modules in the range of 380 to 550Mpa, however, a low direct correlation was found with the predictive model by Ribeiro (2016). But, by adjusting the model according to the predicted MR ranges, it was possible to obtain MR values closer to the real ones, with a variation of more or less 100 MPa. According to the procedures, analyzes and evaluations developed, this study demonstrated the efficiency of the simplified European laboratory methodology, for obtaining and understanding the occurrence of DP in granular materials from the FMR, reducing the execution time of the tests and resources. The tested soils showed low deformations, as well as the mixtures stabilized with soil and gravel. For the simulation of pavement structures, depending on the subgrade and traffic, the subgrade was classified according to the AASTHO classes and the traffic according to the classification of Bastos (2016). It was found, during the simulations, that in general the stabilized mixtures did not add to the performance of the pavement. For some sub-regions of the RMF, it was not possible to obtain structures with the materials studied for extremely high traffic, which was circumvented by proposing the use of ash and lime according to Vasconcelos (2018). As a final result, a simplified catalog of standard structures was generated, for flexible pavements, designed by Medina for the Metropolitan Region of Fortaleza - CE, suggesting itself as a quick and preliminary reference guide for local road projects.

Keywords: catalog of pavement; Medina, RMF, DP, MR, CBR, AASHTO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do método de estruturação desta pesquisa.....	21
Figura 2: Tensões aplicadas durante o ensaio triaxial de cargas repetidas.....	27
Figura 3 - Topologia do Modelo Neural (MLP) de Ribeiro (2016) para previsão do MR (10:21:1)	28
Figura 4: Fluxograma do Método Proposto.....	30
Figura 5: Mapa de Localização da RMF	32
Figura 6: Mapa do CBR-Energia Normal para RMF	34
Figura 7: Percentuais de CBR-N para a RMF	34
Figura 8 - Mapa da Classificação AASHTO da RMF.....	35
Figura 9: Percentuais dos Grupos TRB da RMF	35
Figura 10 - Mapa dos materiais constituintes dos solos da RMF	36
Figura 11 - Mapa da Classificação geral dos solos (granulares e silte-argilosos) da RMF	36
Figura 12 - Mapa da distribuição espacial das amostras dos solos coletados	37
Figura 13: Amostras de Solos - RMF	38
Figura 14: Pontos amostrais <i>versus</i> Classificação AASHTO - RMF.....	40
Figura 15: Pontos amostrais <i>versus</i> estimativas de materiais constituintes (Ribeiro, 2013)	41
Figura 16: Pontos amostrais <i>versus</i> comportamento dos solos em pavimentação.	41
Figura 17: Valores de CBR para os solos amostrados.	43
Figura 18: Pontos amostrais <i>versus</i> estimativas de CBR – RMF (Ribeiro, 2013)	44
Figura 19: Correlação entre os valores de CBR obtidos no programa experimental e os previstos pelo modelo de RIBEIRO, 2016	45
Figura 20: Valores médios de MR obtidos no programa experimental <i>versus</i> MRs previsto pelo modelo de RIBEIRO, 2016.....	46
Figura 21: Valores médios de MRs obtidos no programa experimental <i>versus</i> MRs previsto pelo modelo de Ribeiro (2016) <i>versus</i> MRs previstos ajustados.....	47
Figura 22: Representação dos deslocamentos sofridos por um corpo de prova submetido ao ensaio de carga repetida.....	51
Figura 23 - Mapa de localização das amostras dos solos coletados	59
Figura 24: Mapa das pedreiras da RMF selecionadas para o estudo.....	60
Figura 25: Fluxograma do Método proposto.....	61

Figura 26: Misturas estabilizadas: Solo-brita	65
Figura 27: Deformação permanente da Amostra do Solo 3. Fonte: Autoria própria, 2023.	66
Figura 28: Deformação permanente da Amostra do Solo 4.	67
Figura 29: Deformação permanente da Amostra do Solo 5. Fonte: Autoria própria, 2023.	67
Figura 30: Deformação permanente da Amostra do Solo 7. Fonte: Autoria própria, 2023.	68
Figura 31: Deformação permanente da Amostra do Solo 9. Fonte: Autoria própria, 2023.	68
Figura 32: Deformação permanente da Amostra do Solo 14. Fonte: Autoria própria, 2023.	68
Figura 33: Deformação permanente da Amostra do Solo 15.	69
Figura 34: Deformação Permanente - Misturas Solo-Brita.	73
Figura 35: Fluxograma de dimensionamento pelo método mecanístico-empírico.....	85
Figura 36: Divisão da RMF em 3 sub-regiões para fim de estudo	86
Figura 37: Fluxograma do método utilizado	88
Figura 38: Afundamento do trilho de roda - Tráfego leve ($< 3 \cdot 10^6$) – Região Norte.....	93
Figura 39: Afundamento do trilho de roda - Tráfego leve ($< 3 \cdot 10^6$) – Sub-Região Central.	94
Figura 40: Afundamento do trilho de roda - Tráfego leve ($< 3 \cdot 10^6$) – Sub-Região Sul. 95	
Figura 41: Afundamento do trilho de roda - Tráfego médio ($3 \cdot 10^6 - 10^7$) – Sub-Região Norte.	96
Figura 42: Área trincada - Tráfego médio ($3 \cdot 10^6 - 10^7$) – Sub-Região Norte.	96
Figura 43: Afundamento do trilho de roda - Tráfego médio ($3 \cdot 10^6 - 10^7$) – Sub-Região Central.	97
Figura 44: Área trincada - Tráfego médio ($3 \cdot 10^6 - 10^7$) – Sub-Região Central.....	97
Figura 45: Afundamento do trilho de roda - Tráfego médio ($3 \cdot 10^6 - 10^7$) – Sub-Região Sul.	98
Figura 46: Área trincada - Tráfego médio ($3 \cdot 10^6 - 10^7$) – Sub-Região Sul.	98
Figura 47: Afundamento do trilho de roda - Tráfego elevado - Solos (15cm) – Sub-Região Norte.	99
Figura 48: Área trincada - Tráfego elevado - Solos (15cm) – Sub-Região Norte.....	100

Figura 49: Afundamento do trilho de roda - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.....	101
Figura 50: Área trincada - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.	101
Figura 51: Afundamento do trilho de roda – Tráfego elevado – Solo-Brita – Sub-Região Norte.....	102
Figura 52: Área trincada – Tráfego elevado – Solo-Brita – Região Norte.....	102
Figura 53: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.	103
Figura 54: Área trincada - Tráfego elevado - Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.	104
Figura 55: Estruturas propostas – Sub-Região Norte.	104
Figura 56: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita – Sub-Região Norte.....	105
Figura 57: Área trincada - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita – Sub-Região Norte.	106
Figura 58: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.	107
Figura 59: Área trincada – Tráfego elevado – Solo + Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.....	107
Figura 60: Afundamento do trilho de roda das estruturas selecionadas - CA(7,5cm) – Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.	108
Figura 61: Área trincada das estruturas selecionadas - CA(7,5cm) – Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.	109
Figura 62: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.	111
Figura 63: Área trincada - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Região Central	111
Figura 64: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo-brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.	112
Figura 65: Área trincada - Tráfego elevado - Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.	112
Figura 66: Estruturas propostas – Sub-Região Central.	113
Figura 67: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.	113

Figura 68: Área trincada - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.....	114
Figura 69: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Sul.....	116
Figura 70: Área trincada - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Sul.....	116
Figura 71: Afundamento do trilho de roda - Materiais - Tráfego Extremamente Elevado (> 3.10 ⁷).....	118
Figura 72: Área trincada - Materiais - Tráfego Extremamente Elevado (> 3.10 ⁷).....	118
Figura 73: Afundamento de trilho de roda - Cinza-cal - Tráfego Extremamente Elevado (> 3.10 ⁷).....	120
Figura 74: Área trincada - Cinza-cal - Tráfego Extremamente Elevado (> 3.10 ⁷).....	121
Figura 75: Materiais para base e subbase de pavimentos -RMF.....	122
Figura 76: Legenda dos materiais de pavimentação - RMF.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coordenadas geográficas e localização dos pontos amostrais, correspondentes aos solos coletados na RMF.	39
Tabela 2: Classificação AASHTO das amostras coletadas	40
Tabela 3: Classificação dos solos: Laboratório x Estimativa do modelo de Ribeiro (2013)	42
Tabela 4: CBR obtido em laboratório versus CBR estimado pelo modelo de Ribeiro (2013)	44
Tabela 5: Contribuição de cada camada na deformação permanente.....	53
Tabela 6: Principais modelos de deformação permanente para materiais granulares. ...	57
Tabela 7: Reservas utilizadas na produção de pedra britada na RMF.....	59
Tabela 8: Relação dos pares de tensões utilizadas no ensaio de Deformação Permanente dos solos	63
Tabela 9: Características e parâmetros dos solos da RMF.	64
Tabela 10: Características das misturas de Solo-Brita.	65
Tabela 11: Resultados dos Ensaio de Deformação Permanente – Amostras de solos..	70
Tabela 12: Parâmetros de regressão obtidos nos ensaios de deformação permanente das amostras de solos da RMF.....	72
Tabela 13: Deformação permanente Solo x Solo-Brita.....	74
Tabela 14: Resultados dos Ensaio de Deformação Permanente - Solo-Brita	75
Tabela 15: Parâmetros de regressão obtidos nos ensaios de deformação permanente das misturas de Solo-Brita – RMF.....	76
Tabela 16: Resumo das características dos solos – RMF.....	87
Tabela 17: Resumo das características das misturas de Solo-Brita-RMF.	87
Tabela 18: Tipo de Vias com Limites de Tolerância e Confiabilidade	90
Tabela 19: Níveis de tráfego adotados para a RMF.	91
Tabela 20: Desempenho das melhores estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.	108
Tabela 21: Desempenho das estruturas com CA(8cm) - Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.	110
Tabela 22: Dimensionamento das estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.	110
Tabela 23: Desempenho das melhores estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Central.	115

Tabela 24: Dimensionamento das estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Central	115
Tabela 25: Desempenho da estrutura S14 (40 cm) – Tráfego Elevado – Sub-Região Sul.	117
Tabela 26: Dimensionamento das estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Sul....	117
Tabela 27: Dimensionamento das estruturas – Tráfego E.E. – Sub-Regiões Centro e Sul.	119
Tabela 28: Dimensionamento das estruturas – Tráfego Extremamente Elevado.....	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Informações - Catálogos Internacionais.	81
Quadro 2: Classificação dos subleitos adotada para a RMF.	92
Quadro 3: Ficha catalográfica – Sub-Região Norte da RMF.	123
Quadro 4: Ficha catalográfica – Sub-Região Central – RMF.	124
Quadro 5: Ficha catalográfica – Sub-Região Sul – RMF.....	125

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Problema de Pesquisa	20
1.3	Justificativa	20
1.4	Objetivos	20
<i>1.4.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	20
<i>1.4.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.5	Método de Pesquisa	21
2	ANÁLISE COMPARATIVA: PROGRAMA EXPERIMENTAL <i>VERSUS</i> MODELO NEURAL PREDITIVO PARA CLASSIFICAÇÃO AASHTO, CBR E MR DE SOLOS NA RMF	22
2.1	Introdução	22
2.2	Caracterização de solos aplicada à Pavimentação	24
<i>2.2.1</i>	<i>Classificação AASHTO</i>	24
<i>2.2.2</i>	<i>CBR (Califórnia Bearing Ratio)</i>	25
2.3	Módulo de Resiliência (MR)	25
<i>2.3.1</i>	<i>Modelo de previsão de MR - Ribeiro, 2016</i>	28
2.4	Materiais e Método	28
<i>2.4.1</i>	<i>Materiais</i>	29
<i>2.4.2</i>	<i>Método</i>	29
2.5	Caracterização da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF)	32
<i>2.5.1</i>	<i>Considerações iniciais</i>	32
<i>2.5.2</i>	<i>Mapeamento Geotécnico dos solos – RMF realizado por modelagem preditiva</i>	33
2.6	Apresentação e Análise de Resultados	37
<i>2.6.1</i>	<i>Esforço Amostral</i>	37
<i>2.6.2</i>	<i>Programa Experimental</i>	39
<i>2.6.2.1</i>	<i>Classificação AASHTO</i>	39
<i>2.6.2.2</i>	<i>CBR</i>	43
<i>2.6.2.3</i>	<i>Módulo Resiliente (MR)</i>	45
2.7	Considerações finais	47
3	AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DOS MATERIAIS GRANULARES DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA – CE	49

3.1	Introdução	49
3.2	Deformação permanente em pavimentos flexíveis	51
3.2.1	<i>Fatores que influenciam a deformação permanente nas camadas granulares</i>	53
3.2.2	<i>Modelos de previsão de deformação permanente</i>	57
3.3	Materiais e método	58
3.3.1	<i>Materiais</i>	58
3.3.2	<i>Método</i>	60
3.4	Apresentação e Análise de Resultados	64
3.4.1	<i>Quanto aos Materiais granulares</i>	64
3.4.2	<i>Avaliação da Deformação permanente (DP)</i>	66
3.5	Considerações finais	76
4	UM CATÁLOGO SIMPLIFICADO DE ESTRUTURAS PADRÕES, BASEADO NO MEDINA, PARA PAVIMENTOS FLEXÍVEIS NA RMF	78
4.1	Introdução	79
4.2	Catálogos de pavimentos	80
4.3	Dimensionamento de pavimentos	84
4.4	Materiais e método	86
4.4.1	<i>Área de estudo</i>	86
4.4.2	<i>Materiais - Dimensionamento</i>	87
4.4.3	<i>Método</i>	88
4.5	Apresentação e Análise de Resultados	90
4.5.1	<i>Classificação do tráfego</i>	90
4.5.2	<i>Classificação do subleito</i>	91
4.5.3	<i>Dimensionamento</i>	92
4.5.4	<i>Fichas catalográficas</i>	121
4.6	Considerações finais	126
5	CONCLUSÃO	128
5.1	Considerações finais	128
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	130
	REFERÊNCIAS	131
	APÊNDICE A - CATÁLOGO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	138

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O desempenho adequado das atividades econômicas e sociais de uma região depende do dimensionamento e estado de conservação satisfatórios de sua infraestrutura de transporte, considerando todos os modos existentes. Entretanto, o modal rodoviário, em particular, caracteriza-se pela sua capilaridade, flexibilidade e capacidade de integração com os demais sistemas de transportes. No Brasil, esse modo destaca-se por sua significativa participação na matriz de transporte, sendo responsável por mais de 65% da movimentação de mercadorias e por 95% da de passageiros (CNT, 2022). Denota-se, assim, a sua relevância para o desenvolvimento das cadeias produtivas e para economia em geral.

Ciente da significativa importância desse modal e com o propósito de apoiar o desenvolvimento do setor, os Catálogos de Dimensionamento de Pavimentos surgem como uma das maneiras de reunir os avanços nas técnicas construtivas, assim como o próprio método de dimensionamento de pavimentos. Para a pavimentação, o desenvolvimento de catálogos de dimensionamento de pavimentos busca orientar o ambiente técnico a projetar pavimentos considerando a disponibilidade dos materiais aplicados à pavimentação, suas características físicas e mecânicas, utilizando a análise que melhor represente o comportamento dos materiais e da estrutura projetada.

Para que haja um projeto bem sucedido de pavimento, as características dos materiais, a fisiografia e o tráfego local devem ser observados, quantificados e, por meio dos dados gerados, deve-se estabelecer as relações entre estes. Fica claro assim, que o estudo de pavimentos não envolve somente a caracterização dos materiais, ou mesmo a definição das espessuras das camadas do pavimento, necessita em sua essência do entendimento das relações entre cada item de projeto, coordenando a disponibilidade de materiais, com soluções possíveis.

Os investimentos em pesquisa, tecnologia e projeto na infraestrutura rodoviária contribuem para a alavancagem do desenvolvimento econômico de um estado ou país. O Governo do Estado do Ceará, por meio do Programa de Logística e Estradas, Ceará de Ponta a Ponta, entregou, de 2015 a 2021, cerca de 2849km de malha rodoviária (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2022). O crescente desenvolvimento em

pavimentação no estado do Ceará demonstra a necessidade de mais pesquisas na área, proporcionando o conhecimento dos materiais da região, o avanço de metodologias locais e a criação de bancos de dados para aprimorar as futuras pesquisas, e assim difundir o conhecimento, como, por exemplo, por meio do novo método de dimensionamento dos pavimentos. Assim, o presente trabalho visa contribuir com uma inovação nessa temática, tendo como objetivo principal desenvolvimento de um catálogo de estruturas padrão de pavimentos flexíveis, dimensionados através do Medina e baseado no comportamento geotécnico dos solos locais e no tráfego atuante na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Tal recurso fornecerá com clareza e agilidade aos projetistas responsáveis pelo dimensionamento de pavimentos do estado do Ceará, um manual com estruturas padrão, pré-estabelecidas considerando uma abordagem mecanístico-empírica, o que certamente concorrerá, por meio da facilitação, para a divulgação e massificação do Medina (Método de Dimensionamento Nacional).

No Brasil, o dimensionamento empírico convencional (Souza, 1981) de estruturas dos pavimentos ainda utiliza o CBR (*California Bearing Ratio*) como parâmetro de rigidez. Porém, pesquisas realizadas ao longo do tempo evidenciam que o CBR não representa, de maneira adequada, a natureza das cargas aplicadas aos pavimentos, que são dinâmicas e possuem ciclos de carregamento que variam com a velocidade com as quais operam sobre a rodovia. Diante disso, surgiu a necessidade da adoção de ensaios que mais se aproximem da realidade das cargas às quais, de fato, são submetidos os pavimentos. No estudo de novos métodos de dimensionamento que utilize os conceitos de Mecânica dos Pavimentos, usa-se o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP), que são os parâmetros de caracterização mecânica das camadas dos pavimentos, assim como acontece internacionalmente. Embora bastante eficiente, a obtenção do MR e da DP é relativamente complexa, tanto no que se refere aos recursos humanos quanto aos custos para aquisição do equipamento, o que dificulta o seu emprego.

A partir dessas constatações, este trabalho visa difundir uso o MR e a DP por meio da construção de um catálogo de pavimentos para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), que irá propor de forma racional e simples diversas estruturas de pavimento com base na Mecânica dos Pavimentos e no comportamento geotécnico dos materiais e efeitos locais. Reproduzindo um método bastante utilizado internacionalmente, pretende-se aproximar o estado da arte do dimensionamento de pavimentos no Brasil ao estado da prática.

1.2 Problema de Pesquisa

A alta complexidade e custos envolvidos na obtenção dos parâmetros usados nos métodos de dimensionamento mecanístico-empírico, concorrem para a baixa adesão ao método no Brasil o que culmina num distanciamento entre os estados da arte e da prática. Em adição, não existe ainda, no estado do Ceará e na RMF, uma forma de facilitação, que traga clareza e agilidade ao emprego do Medina ao corpo técnico local, o que possibilitaria o estabelecimento de diferentes combinações dos diversos materiais granulares locais disponíveis para pavimentação.

1.3 Justificativa

A criação de um catálogo de estruturas de pavimentos rodoviários para a Região Metropolitana de Fortaleza – CE, que use os materiais regionais e considere as condições climáticas e o tráfego local, conduzirá à otimização dos projetos de pavimentos flexíveis, sob o ponto de vista de custos financeiros e ambientais, além de popularizar o uso do método mecanístico-empírico no dimensionamento de pavimentos flexíveis, por meio das diversas opções de soluções estruturais tipo que o mesmo deve contemplar.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é propor um catálogo de estruturas padrão de pavimentos flexíveis rodoviários, dimensionados pelo Medina para Região Metropolitana de Fortaleza – CE.

1.4.2 Objetivos Específicos

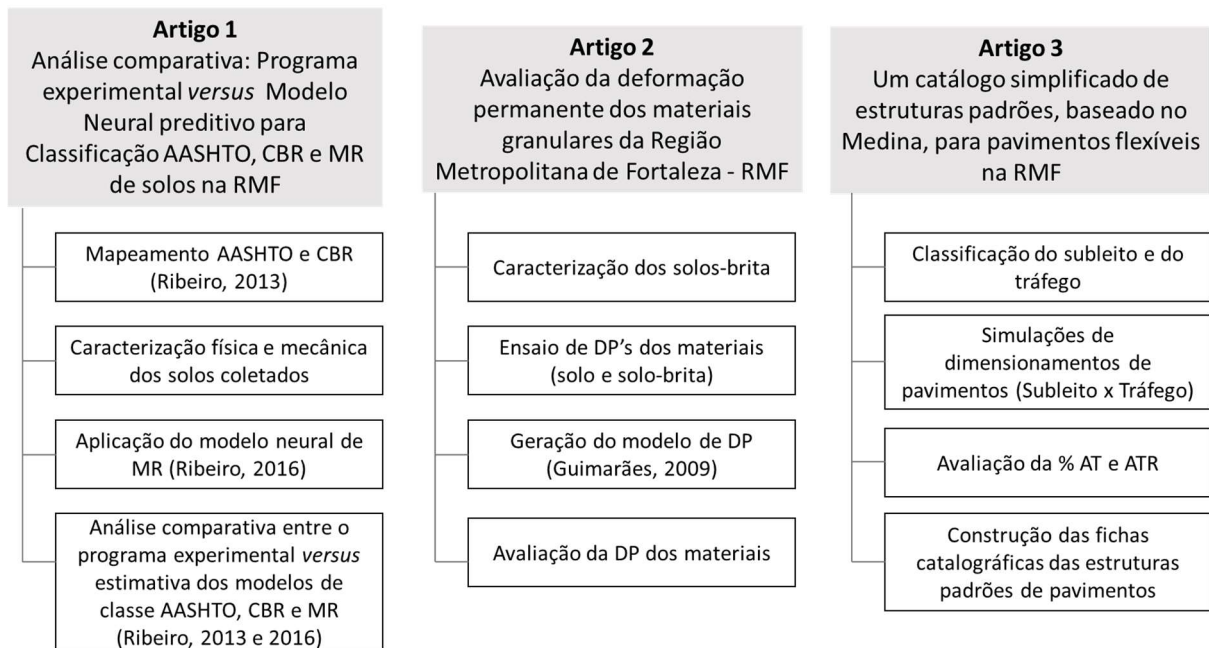
Para atingir o objetivo geral da presente pesquisa, alguns objetivos específicos foram delineados:

- Conhecer o comportamento geotécnico de materiais granulares da RMF;
- Avaliar os modelos preditivos de Ribeiro (2013 e 2016) para os solos da RMF, por meio de uma análise comparativa entre ele e programa experimental;
- Avaliar a deformação permanente dos materiais granulares da RMF;
- Desenvolver um catálogo de estruturas padrão para pavimentos flexíveis para a RMF.

1.5 Método de Pesquisa

A presente Tese foi estruturada em forma de 3 artigos que devem ser submetidos à análise de pares. O trabalho contém cinco capítulos, e referem-se a: Introdução, Artigo 1, Artigo 2, Artigo 3, Conclusões e Referências. A Figura 1 apresenta um fluxograma com as estruturas dos artigos desenvolvidos nesta Tese. Os itens que seguem explicam como as etapas serão desenvolvidas.

Figura 1: Etapas do método de estruturação desta pesquisa



Fonte: Autoria própria, 2023.

2 ANÁLISE COMPARATIVA: PROGRAMA EXPERIMENTAL *VERSUS* MODELO NEURAL PREDITIVO PARA CLASSIFICAÇÃO AASHTO, CBR E MR DE SOLOS NA RMF

RESUMO

Os custos financeiros dos projetos rodoviários, bem como a restrição dos recursos destinados à caracterização e ao controle de qualidade dos materiais empregados nas camadas e no subleito dos pavimentos, têm motivado diversos pesquisadores a buscar correlações e modelos de predição confiáveis das propriedades geotécnicas dos solos, na tentativa de que, por meio dessas propriedades (variáveis explicativas), obtenham-se dados para uso em anteprojeto e projetos rodoviários, de forma mais fácil, rápida e com baixo custo. Os modelos de Ribeiro (2013 e 2016) permitem estimar a classificação AASHTO, o CBR e o MR de solos da RMF (Região Metropolitana de Fortaleza), tendo como variáveis preditoras, características geotécnicas provenientes de ensaios básicos e características biofísicas. A partir dessas constatações, este estudo objetiva realizar uma análise comparativa entre os modelos neurais preditivos das características geotécnicas dos solos da RMF, desenvolvidos por RIBEIRO (2013 e 2016) e um programa experimental realizado em laboratório. Para reconhecimento do subleito natural da RMF, foram extraídos 15 solos localizados em Jazidas e taludes naturais dentro do limite da área de estudo. Foi realizado um programa experimental para caracterização física e mecânica (MR e DP) dos materiais coletados. Quanto à classificação da AASHTO, o comportamento dos solos estudados, em sua maioria, foi classificado na classe A-2-4, resultado que valida o modelo de RIBEIRO et. al (2013) com uma taxa de acerto na ordem de 57%, embora a taxa de acerto chegue até de 71%, quanto ao seu provável comportamento como camadas granulares em pavimentos. Quanto ao CBR, os solos analisados apresentaram uma taxa de correlação de 0,56 em relação ao modelo de RIBEIRO et. al (2013). Os solos coletados foram submetidos ao ensaio triaxial e apresentaram módulos médios no intervalo de 380 a 550Mpa, contudo encontrou-se uma baixa correlação direta com o modelo preditivo de Ribeiro (2016). Mas, ajustando o modelo de acordo com as faixas de MR previstas foi possível obter valores de MR mais próximos do real, com variação de mais ou menos 100 MPa. O uso de tais modelos pode facilitar e incentivar a aplicação dos métodos empírico-mecanísticos de dimensionamento de pavimentos, o que implicaria em menores custos relativos à coleta de material e ao tempo de execução de ensaios mais complexos.

Palavras chave: RMF, CBR, MR, AASHTO.

2.1 Introdução

Apesar de no Brasil ainda se adotarem métodos empíricos para o dimensionamento de pavimentos, como o método pelo CBR (*California Bearing Ratio*), proposto por Souza (1981), baseado em informações mecânicas de cargas estáticas, o estudo da arte mostra que esse parâmetro não representa, de maneira apropriada, a natureza das cargas aplicadas aos pavimentos, que são dinâmicas e possuem ciclos de

carregamento que variam de acordo com a velocidade com as quais passam sobre o pavimento.

Assim, surgiu a necessidade de ensaios que representem a realidade das cargas às quais os pavimentos são submetidos. Internacionalmente, os métodos de dimensionamento empírico-mecanísticos de pavimentos flexíveis, utilizam o Módulo de Resiliência (MR) para caracterização mecânica dos materiais das camadas dos pavimentos e do subleito.

O Módulo de Resiliência é determinado a partir dos ensaios triaxiais de carga repetida, sendo executados em corpos de prova moldados na umidade próxima à ótima de compactação. Com base nesses resultados, são definidos os modelos de comportamento resiliente utilizados nos *softwares* de cálculo de tensões e deformações, que por sua vez determinam o valor do módulo de resiliência em função do estado de tensões vigente. Quando os solos são submetidos à aplicação de carregamentos de qualquer natureza, ocorrem processos bastante complexos. Suas respostas a esses carregamentos dependem de um conjunto de fatores relacionados à mecânica, gênese e física de solos.

O grande obstáculo que dificulta a utilização desse parâmetro nos projetos de pavimentação é a complexidade do ensaio triaxial, tanto no que se refere aos recursos humanos quanto ao equipamento utilizado. Além disso, tem-se problemas relativos aos custos de aquisição do equipamento, o que reflete na pequena quantidade de aparelhos pelo Brasil. Destaca-se que a maioria destas máquinas estão disponíveis apenas nas universidades e centros de pesquisas. Tais fatores são responsáveis por limitar na prática o uso do MR, o que implica numa baixa aplicação dos métodos de dimensionamento empírico-mecanísticos de pavimentos.

Os custos financeiros dos projetos rodoviários, bem como a restrição dos recursos destinados à caracterização e ao controle de qualidade dos materiais empregados nas camadas e no subleito dos pavimentos, têm motivado diversos pesquisadores a buscar correlações e modelos de predição confiáveis do MR com outras propriedades geotécnicas dos solos, na tentativa de que, por meio dessas propriedades (variáveis explicativas), obtenham-se os resultados do MR para uso em anteprojeto e projetos rodoviários, de forma mais fácil, rápida e com baixo custo (RIBEIRO, 2016).

A partir dessas constatações, este estudo objetiva realizar uma análise comparativa entre os modelos neurais preditivos das características geotécnicas dos solos da RMF, desenvolvidos por RIBEIRO, 2013 e RIBEIRO, 2016 e um programa

experimental realizado em laboratório. Os modelos de Ribeiro (2013, 2016) permitem estimar a classificação AASHTO, o CBR e o MR de solos da RMF (Região Metropolitana de Fortaleza), tendo como variáveis predictoras, características geotécnicas provenientes de ensaios básicos e características biofísicas. A ideia é o uso de tais modelos para facilitar e incentivar a aplicação dos métodos empírico-mecanísticos de dimensionamento de pavimentos, o que implicaria em menores custos relativos à coleta de material e ao tempo de execução de ensaios mais complexos.

2.2 Caracterização de solos aplicada à Pavimentação

A caracterização geotécnica de solos na pavimentação consiste em se determinar as propriedades índices, a estrutura dos solos e a resistência mecânica quando submetido a um carregamento estático ou dinâmico. As informações geotécnicas são fundamentais para o desenvolvimento dos projetos de pavimentação e indicam a possível utilização dos materiais nas camadas do pavimento. Embora se reconheça a importância dos outros aspectos envolvidos na descrição da área de estudo, são os dados geotécnicos que têm aplicação direta no processo de dimensionamento de pavimentos.

O dimensionamento de pavimentos necessita de informações sobre o comportamento dos solos que serão aplicados em suas diferentes camadas. Na Engenharia Rodoviária é comum a adoção de um sistema de classificação de solos para prever as suas propriedades. A classificação da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) tem sido aplicada no reconhecimento de solos para construção de pavimentos rodoviários em todo o mundo. Além das características geotécnicas de classificação, as obras viárias necessitam de informações acerca do comportamento mecânico dos materiais. O CBR (*California Bearing Ratio*) e o MR (Módulo de Resiliência) são os dois parâmetros de resistência mais usados no Brasil para dimensionar pavimentos. Para se chegar à classificação AASHTO, bem como aos valores de CBR e MR se faz necessário a realização de sondagens e ensaios de laboratório.

2.2.1 Classificação AASHTO

A classificação AASHTO baseia-se na análise granulométrica por peneiramento e na determinação dos limites de liquidez e de plasticidade para classificar os solos. A proposta é estabelecer uma hierarquização para os solos do subleito a partir da realização

de ensaios simples e realizados de forma corriqueira. Nesta classificação, os solos são divididos de forma geral, em dois grandes grupos: os materiais granulares (% passante na peneira nº 200 \leq 35%) e os materiais silto-argilosos (% passante na peneira nº 200 $>$ 35%).

Através de uma tabela classificatória, os solos são separados em grupos e subgrupos através de processo de eliminação a partir do lado esquerdo para o lado direito e de cima para baixo da referida tabela. O primeiro grupo, a partir da esquerda e de baixo para cima, com o qual os valores encontrados coincidir, será a classificação correta. As classes vão de A-1 a A-7, tendo algumas subdivisões (DNIT, 2006).

2.2.2 CBR (Califórnia Bearing Ratio)

No Brasil, o dimensionamento empírico convencional (Souza, 1981) de estruturas dos pavimentos ainda utiliza o CBR como parâmetro de rigidez. Este parâmetro caracteriza mecanicamente solos e britas naturais ou misturas destes, estabilizadas granulométrica ou quimicamente. A resistência no ensaio CBR é uma combinação indireta entre a coesão e o ângulo de atrito do material. É expresso em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir a penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial. (BERNUCCI *et. al*, 2006). O valor dessa relação, expressa em porcentagem, permite determinar por meio de equações empíricas, a espessura de pavimento flexível necessária, em função do tráfego (DNIT, 2006).

Esse método foi baseado em correlações empíricas, mas ainda é bastante difundido. É um ensaio simples e rápido de executar, que pode ser utilizado em materiais argilosos e arenosos. (COUTINHO, 2011). Este método serviu de referência para o desenvolvimento do método do DNER – Método do CBR, que ainda é o mais usado no meio rodoviário devido a sua simples concepção (LEMOS e SANTOS, 2013).

2.3 Módulo de Resiliência (MR)

Durante a passagem de um veículo sobre o pavimento, ocorre inicialmente o aumento da tensão e das deformações até um valor máximo e em seguida as tensões tendem a diminuir até se anularem, porém, nem todas as deformações são recuperadas (ELLIOT & THORNTON, 1988). Dessa forma, os materiais apresentam dois tipos de deformação: uma permanente e outra reversível ou resiliente. Assim, entende-se por resiliência a capacidade dos materiais de acumular energia, quando aplicada a carga, sem ocorrer sua ruptura, ou seja, a capacidade do material voltar ao estado natural após a aplicação da tensão.

O Módulo de Resiliência (MR) é expresso como a relação entre as deformações resilientes (ε_R) e as tensões provenientes da aplicação de carregamentos repetidos, conhecidas por tensão desvio (σ_d), de acordo com a Equação 1.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad (1)$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência do material;

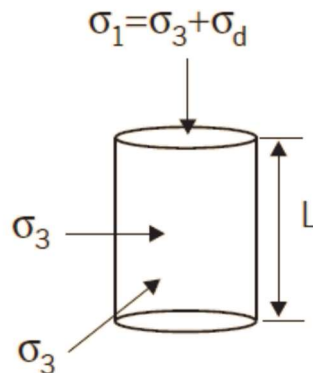
σ_d é a tensão desvio;

ε_R é a deformação resiliente.

Estes parâmetros são determinados a partir do ensaio Triaxial de cargas repetidas, que consiste em determinar o comportamento do material em confinamento e com a aplicação de repetidos ciclos de carga.

O ensaio conta com duas fases, a de condicionamento, que tem a finalidade de eliminar as deformações plásticas iniciais e a fase de registro das deformações. Durante a fase de registro de deformações, são utilizadas diferentes tensões de confinamento (σ_3), que correspondem a pressão de ar injetada dentro da célula do equipamento, e tensões solicitantes (σ_1), totalizando 18 pares de tensões. A Figura 2 representa o esquema de aplicação das tensões durante o ensaio no corpo de prova. No período de repouso apenas as tensões de confinamento permanecem, sendo nula a tensão desvio (σ_d), que equivale à diferença das tensões σ_1 e σ_3 .

Figura 2: Tensões aplicadas durante o ensaio triaxial de cargas repetidas



Fonte: BERNUCCI *et al*, 2006.

2.3.1. Modelo Resilientes de Solos - CE

Como forma de melhor representar o módulo de resiliência para os solos brasileiros, foram elaborados alguns modelos matemáticos. Pezo (1993), por exemplo, apresentou uma forma para representar o MR de materiais granulares de rodovias, testados no estado do Texas, por um modelo que incorporou as tensões desvio e confinante. O modelo ficou conhecido como UT-Austin Model conforme apresentado na Equação 2.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

Onde:

MR é o Módulo de Resiliência do material;

σ_3 é a tensão de confinamento;

σ_d é a tensão desvio;

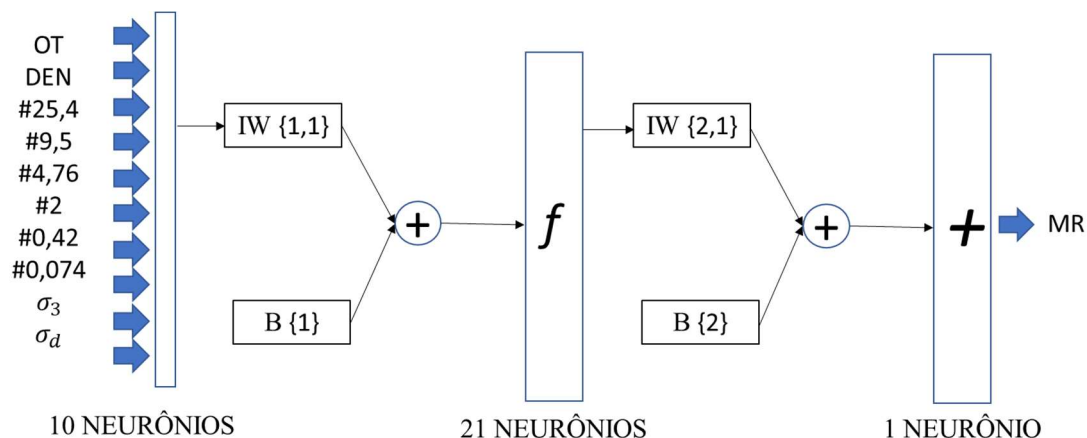
K1, K2 e K3 são os parâmetros da regressão.

O mesmo modelo de Pezo (1993), apresentado na Equação 2, foi trazido para o Brasil por Macêdo (1996), que propôs o seu uso na obtenção do módulo de resiliência para qualquer tipo de material, pois ele considera a influência conjunta das tensões confinante e desvio no cálculo do MR. Esse modelo ficou conhecido no Brasil como Modelo Composto, sendo capaz de eliminar as dificuldades quanto à necessidade de definição prévia do comportamento resiliente dos solos. Esse modelo também foi o que mais se ajustou aos solos do estado Ceará (Souza Júnior, 2005, Gondim, 2008, Araújo, 2009 e Bastos, 2013).

2.3.1 Modelo de previsão de MR - Ribeiro, 2016

Ribeiro (2016) propôs um modelo para previsão do módulo de resiliência de solos para o Ceará a partir de ensaios geotécnicos tradicionais com a seguinte topologia (10:21:1), ilustrada na Figura 3. Os 10 neurônios de entradas são extraídos de apenas dois ensaios, análise granulométrica dos solos e ensaio de compactação, sendo os dados de entradas: umidade ótima de compactação (OT), massa específica seca máxima (DEN), o percentual que passa nas peneiras (25,4 mm, 9,5 mm, 4,76 mm, 2 mm, 0,42 mm, 0,074 mm), tensão confinante (σ_3) e tensão desvio (σ_d).

Figura 3 - Topologia do Modelo Neural (MLP) de Ribeiro (2016) para previsão do MR (10:21:1)



Fonte: Ribeiro, 2016.

Esse modelo, que obteve o coeficiente correlação de 0,9857 e $MSE = 0,004$ para o conjunto de teste. A partir dessa topologia, foi possível extrair os pesos sinápticos (w_{ij}) e os biases (b_k) da camada intermediária e da camada de saída da rede, para então viabilizar o cálculo do MR fora do NNTOOL/MATLAB. O autor deixou esses dados disponíveis, que permitem implementar o modelo em planilha eletrônica.

2.4 Materiais e Método

2.4.1 Materiais

Para atingir o objetivo deste estudo, a comparação entre resultados experimentais de solos locais e a predição da classe AASHTO, do CBR e do MR pelo modelo de Ribeiro (2013 e 2016), foi necessário obter informações sobre os solos da região de estudo.

Para tanto, foi necessário um esforço amostral para coleta e caracterização desses solos. Foram coletadas 15 amostras de solos, de diferentes taludes e jazidas, selecionadas estrategicamente, de forma a estarem distribuídas espacialmente dentro da RMF. A localização de cada amostra foi obtida através do sistema GNSS. Para dar suporte a esta pesquisa, considerando possíveis retrabalho, foram extraídos 300 kg de cada solo coletado. Como o material foi transportado em uma caminhonete simples, o limite de peso da carga do veículo limitava a viagem a apenas duas amostras de solos. Assim, foram necessárias 8 viagens pela região para atender à demanda. O material foi acondicionado em sacos plásticos com etiquetas e armazenado em uma sala do LMP-UFC (Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará).

Para realização do programa experimental foi necessário primeiramente a secagem, o destorroamento dos solos e a remoção de possíveis materiais indesejados. Foram realizados, posteriormente, os ensaios de caracterização física, para determinação da classificação AASHTO e os ensaios mecânicos de compactação, CBR e MR. Todo esse esforço laboratorial culminou num período de aproximadamente 5 meses. Vale ressaltar que alguns ensaios necessitaram novas realizações por problemas operacionais ou mecânicos.

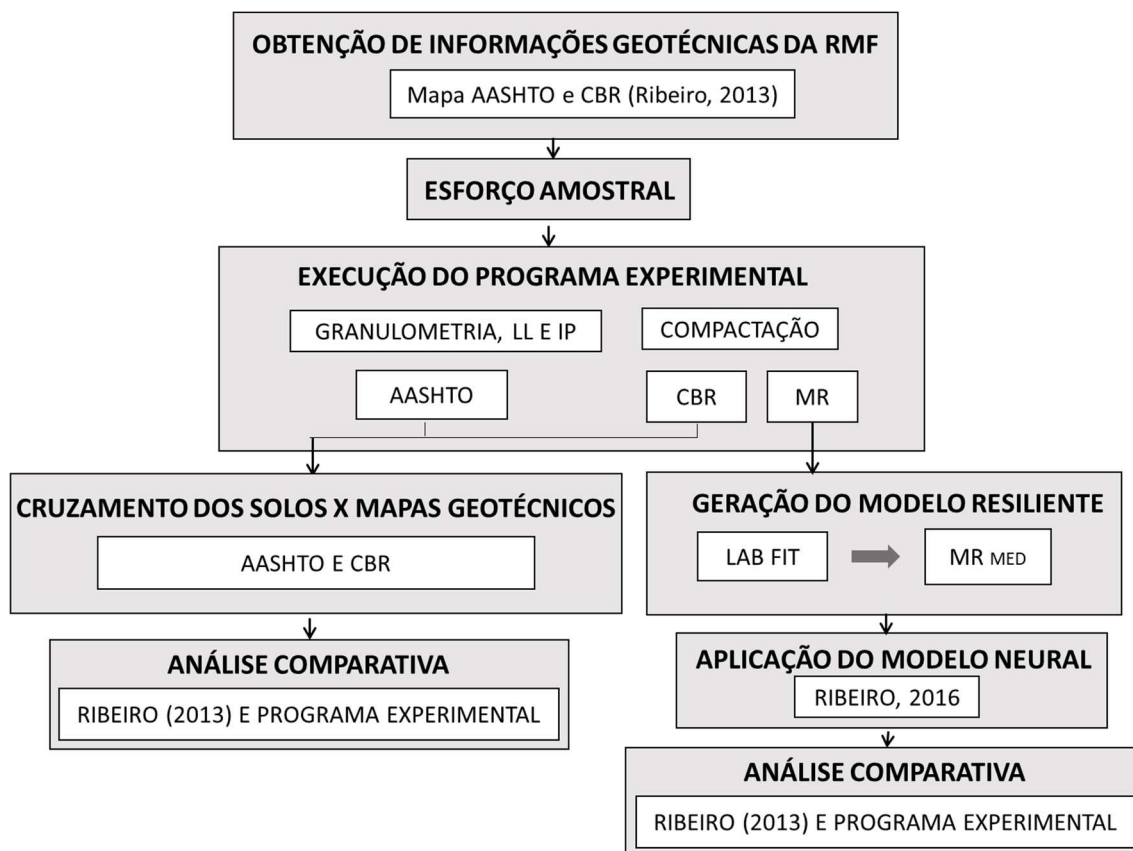
Para inserção dos dados obtidos por meio do programa experimental em um banco de dados georreferenciado, usou-se o *software* livre de SIG Quantum Gis 2.10. Também foi utilizado o *software* LAB Fit para obter dos modelos resiliente dos solos estudados, além do MS Excel para implantação do modelo neural de Ribeiro (2016) e análise dos resultados.

2.4.2 Método

A fim de realizar uma análise comparativa entre os modelos preditivos das classes AASHTO, do CBR e do MR da RMF, desenvolvidos por Ribeiro (2013, 2016) várias etapas foram pré-definidas, baseadas em trabalhos acadêmicos sobre essa temática.

A Figura 4 ilustra, de maneira resumida, a sequência de cada etapa desenvolvida no estudo.

Figura 4: Fluxograma do Método Proposto



Fonte: Autoria própria, 2023.

- Obtenção de Informações geotécnicas da RMF

Nessa etapa buscou-se informações sobre os solos da RMF, principalmente nos estudos de Ribeiro (2013 e 2016) para ilustrar, por meio de mapas, as características geotécnicas da região.

- Esforço Amostral

A coleta de solos para representar a RMF e validar os modelos geotécnicos de Ribeiro (2013 e 2016) foi realizada de forma estratégica, buscando pontos diversos e abrangentes em toda região de estudo, e selecionando jazidas ou taludes de estradas vicinais.

- Execução do Programa Experimental

Os ensaios a serem realizados são baseados nos ensaios de caracterização física e mecânicos aplicados à pavimentação. O programa experimental para os solos, resume nos seguintes ensaios:

- DNER – ME 051/1994 – Análise Granulométrica de solos;
- DNER – ME 082/1994 – Limite de Plasticidade;
- DNER – ME 122/1994 – Limite de Liquidez;
- DNER – ME 162/1994 – Ensaio de Compactação;
- DNER – ME 049/1994 – Determinação do CBR;
- DNIT – ME 134/2010 – Determinação do módulo de resiliência.

- Cruzamento dos solos coletados com os mapas geotécnicos

Nesta etapa foi realizado o cruzamento dos pontos georreferenciados dos solos coletados sobre o mapeamento de comportamento mecânico pelo CBR e da Classificação AASHTO dos solos da RMF, elaborado por Ribeiro (2013), a fim de se verificar a similaridade das características esperadas com as coletadas.

- Geração do Módulo de Resiliência

No ensaio de módulo de resiliência é obtido um valor de MR para cada par de tensão. Assim, após aplicação de todos os pares de tensão é possível obter um MR_{med} . Entretanto a melhor forma de expressar o MR é por meio de uma equação. Desse modo, foi utilizado o software LAB Fit para obter modelos que representam o comportamento resiliente dos solos estudados.

- Aplicação do modelo de Ribeiro (2016)

Ribeiro (2016) desenvolveu um modelo neural para estimar o comportamento resiliente dos solos no estado do Ceará a partir de ensaios geotécnicos convencionais (Análise Granulométrica e Compactação). Como foi disponibilizado os valores dos pesos sinápticos e dos biases entre a camada de entrada, camada intermediária e a de saída do modelo, foi possível implantar o modelo numa planilha de Excel, e assim aplicar aos solos coletados e obter um valor de MR_{med} .

- Análise Comparativa dos modelos de Ribeiro 2013 e 2016 x Programa experimental.

Para verificação da eficácia dos modelos disponíveis para gerar informações de classe AASHTO, CBR e MR foi correlacionado os valores obtidos com os valores esperados para o caso das variáveis numéricas, como é o caso do CBR e do MR. Como a classificação AASHTO é uma variável nominal, a validação foi feita pela taxa de acerto.

2.5 Caracterização da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF)

2.5.1 Considerações iniciais

A Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) está localizada no Nordeste do estado do Ceará, um dos 9 estados do Nordeste Brasileiro, ocupando uma área de 744.005,3 hectares. É formada por 19 municípios: Fortaleza, Caucaia, Maranguape, Pacatuba, Aquiraz, Maracanaú, Eusébio, Guaiúba, Itaitinga, Chorozinho, Pacajus, Horizonte, Trairi, Paraipaba, Paracuru, São Luís do Curu, São Gonçalo do Amarante, Pindoretama e Cascavel (IBGE 2021). A Figura 5 ilustra a localização da RMF.

Figura 5: Mapa de Localização da RMF



Fonte: IBGE, 2023 (Elaborado pela autora).

A RMF ocupa cerca de 5% da área total do estado do Ceará e possui uma população estimada em de 4.167.996 habitantes, o que representa 45,11% da população

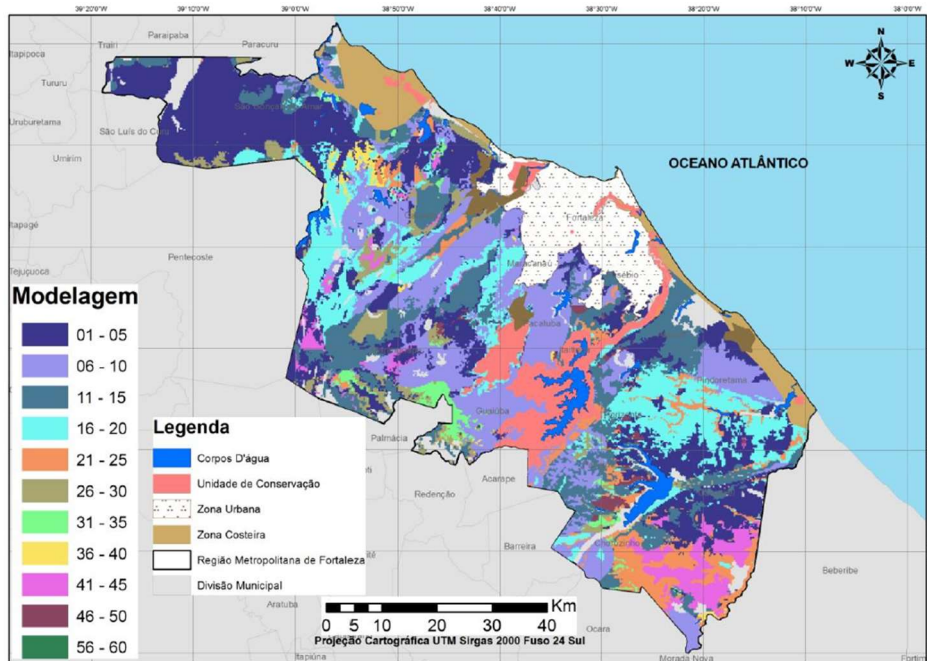
total do estado (IBGE, 2021). Nessa região está inserido o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), nos limites dos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia, bem como os polos industriais de Maracanaú e Horizonte-Pacajus que abrigam a maior parte da produção industrial do estado. A indústria da RMF é diversificada em vários setores, sendo os principais: vestuário, alimentos, metalurgia, têxtil e químico. O turismo é outra atividade bastante representativa na economia da RMF.

2.5.2 Mapeamento Geotécnico dos solos – RMF realizado por modelagem preditiva

Ribeiro (2013) desenvolveu modelos neurais dedicados à estimação da classificação AASHTO e do CBR para RMF. As variáveis preditas e predictoras foram oriundas de *as built*, respectivamente, de estudos geotécnicos de projetos rodoviários executados na RMF e de características biofísicas locais. Com o modelo gerado, o autor estimou tanto a classificação AASHTO, quanto o CBR para toda a RMF, gerando o mapeamento geotécnico dos solos naturais da RMF, da estimação do CBR e da classificação AASHTO, com a mesma precisão dos modelos gerados.

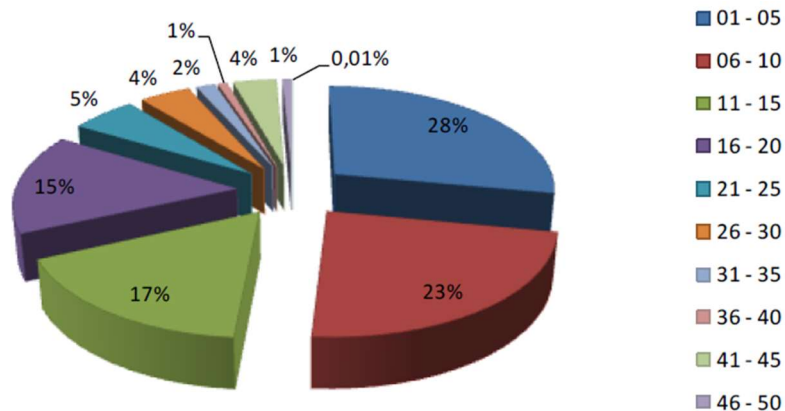
A Figura 6 mostra um mapa da generalização do modelo na RMF para o CBR na energia normal (CBR-N) com precisão de 90%, e a Figura 7 detalha melhor os percentuais por cada valor de resistência mecânica por meio do CBR de solos da região. Observando-se o mapa e o gráfico, gerados por Ribeiro (2013), verifica-se que, aproximadamente, 93% dos solos da RMF têm valores de CBR-N entre 1 e 30%, mas 83% dos solos encontra-se no intervalo de 1 e 20%, de onde foi possível concluir que 17% dos solos ocorrentes na RMF podem ser empregados sem estabilização, em camadas de sub-base de pavimentos, pois podem apresentar valores acima de 20%.

Figura 6: Mapa do CBR-Energia Normal para RMF



Fonte: Ribeiro, 2013

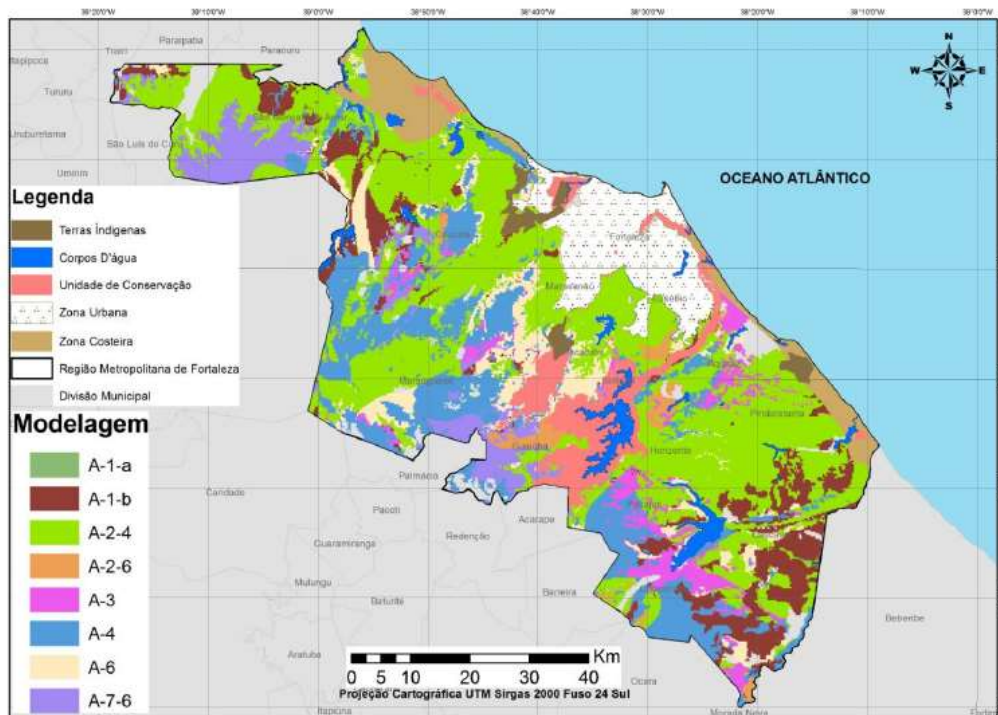
Figura 7: Percentuais de CBR-N para a RMF



Fonte: Ribeiro, 2013

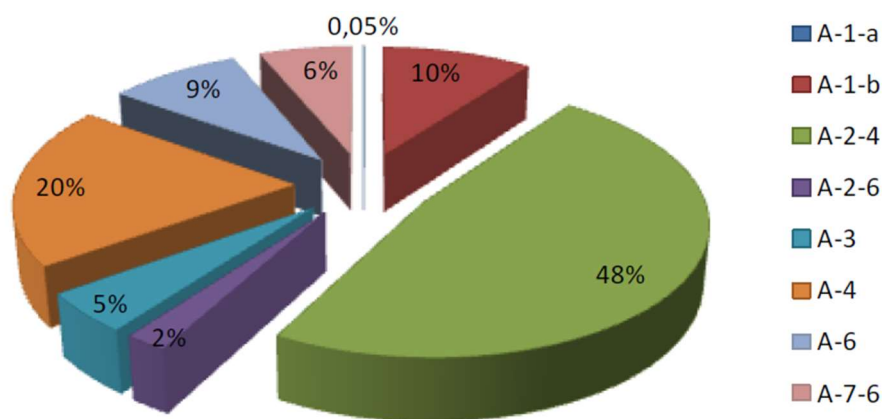
Ribeiro (2013) também gerou um modelo de previsão da classificação AASHTO, com índice de acerto superior a 90% e generalizou as classes AASHTO para a toda a RMF (Figura 8) 838900000013 388300313007 054500435072 000086593412. Na Figura 9, tem-se os percentis atribuído a cada classe, e percebe-se que os solos do tipo A-2-4 têm maior predominância, cerca de 50% do total, ocupando a maior parte da área ante aos demais e que os solos A-1-a tem representação inferior a 0,5%, quase não aparecem, ficando imperceptíveis no mapa.

Figura 8 - Mapa da Classificação AASHTO da RMF



Fonte: Ribeiro, 2013.

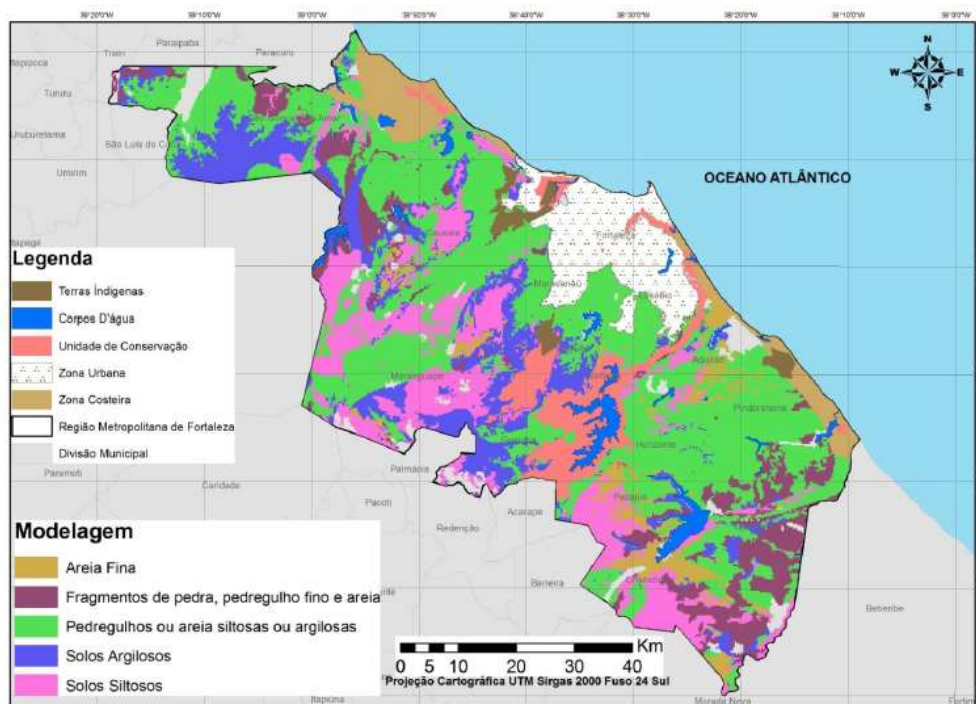
Figura 9: Percentuais dos Grupos TRB da RMF



Fonte: Ribeiro, 2013.

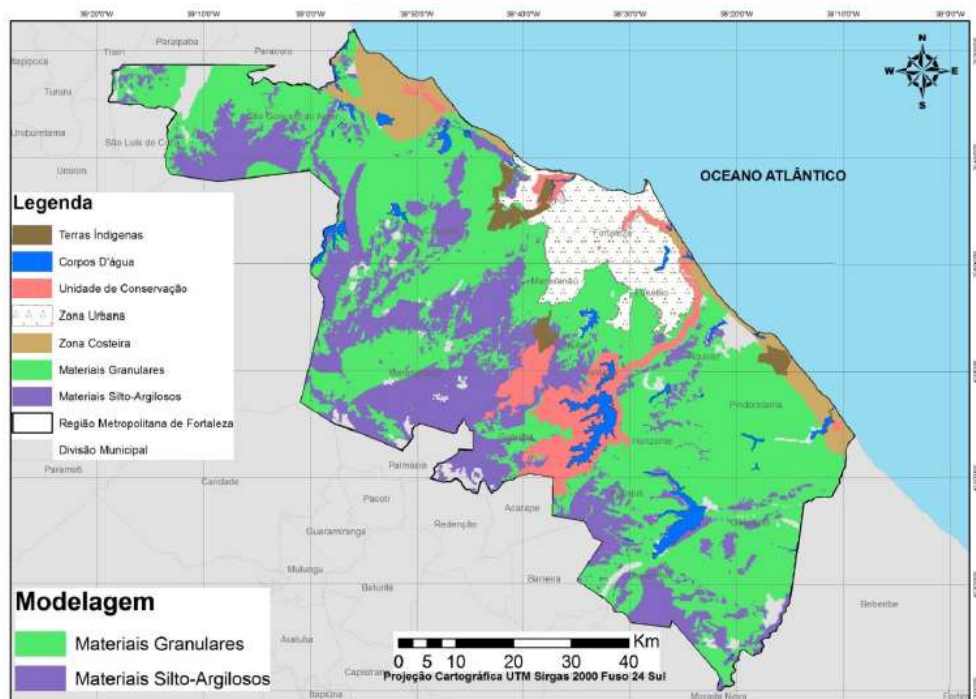
Agrupando-se as classes AASHTO de acordo com os níveis de intervalos informados na tabela de classificação AASHTO, Ribeiro (2013) obteve mapas que representam os materiais constituintes dos solos (Figuras 10 e 11). Assim, tem-se que cerca de 50% dos solos presentes da RMF são constituídos de pedregulhos ou areias siltosas ou argilosas.

Figura 10 - Mapa dos materiais constituintes dos solos da RMF



Fonte: Ribeiro, 2013.

Figura 11 - Mapa da Classificação geral dos solos (granulares e silte-argilosos) da RMF



Fonte: Ribeiro, 2013.

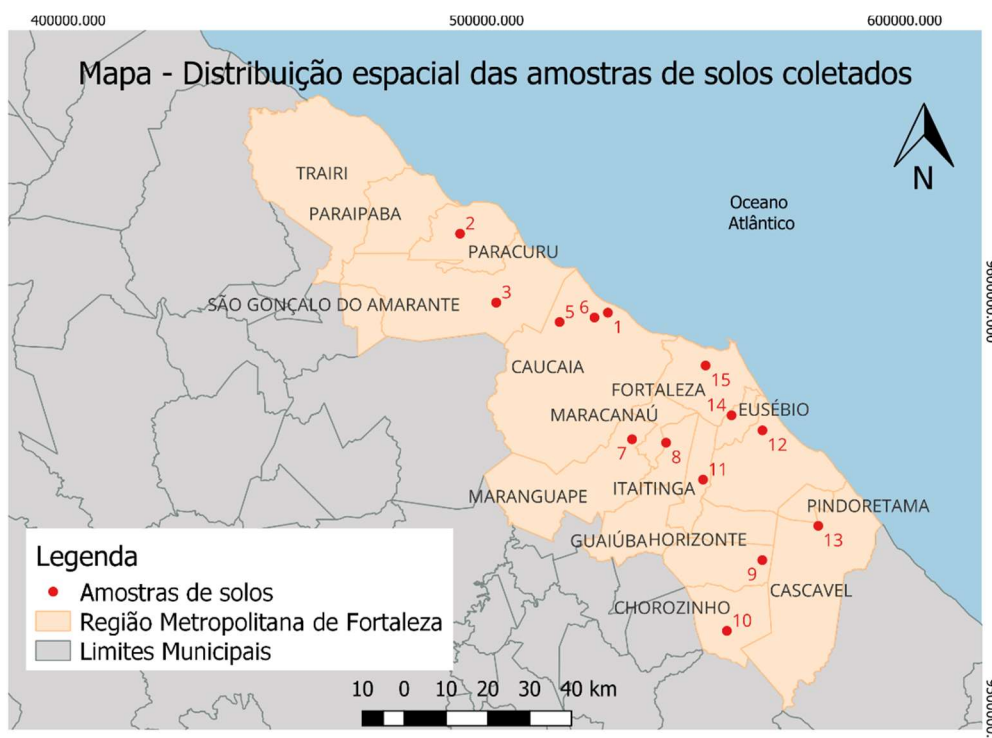
Na classificação geral da AASHTO (Figura 11) observa-se que aproximadamente 65% dos materiais que cobrem a RMF, são materiais granulares, o que reflete no comportamento para pavimentação como subleito de excelente a bom. De maneira geral, pode-se considerar que a partir dessa metodologia, os solos da RMF têm bom comportamento mecânico adequado para serem empregados em camadas de pavimentos de baixo volume de tráfego e até rodovias com tráfego pesado sem necessidade de estabilização e que podem se comportar como subleito de forma bem razoável (Ribeiro, 2016).

2.6 Apresentação e Análise de Resultados

2.6.1 Esforço Amostral

Para subsidio desta investigação foi realizado um esforço amostral, no qual coletou-se 15 amostras de solos, localizados na RMF. As amostras foram extraídas de jazidas ou taludes naturais e sua localização pode ser observada no mapa da Figura 12.

Figura 12 - Mapa da distribuição espacial das amostras dos solos coletados



Fonte: Autoria própria, 2023.

A Figura 13 apresenta o aspecto visual das amostras de solos coletados e a Tabela 1 especifica a cidade de origem do solo, bem como sua posição geográfica, em Sirgas 2000, obtidas por meio de receptor GPS.

Figura 13: Amostras de Solos - RMF



1

2

3



4

5

6



7

8

9



10

11

12



13

14

15

Autoria própria, 2023.

Tabela 1: Coordenadas geográficas e localização dos pontos amostrais, correspondentes aos solos coletados na RMF.

Amostras	Coordenadas		Município
	Latitude	Longitude	
1	3° 38' 33,71"	38° 44' 18,29"	Caucaia
2	3° 28' 19,75"	39° 03' 24,21"	Paracuru
3	3° 37' 15,08"	38° 58' 42,74"	São Gonçalo
4	3° 37' 15,64"	38° 58' 44,66"	São Gonçalo
5	3° 39' 46,91"	38° 50' 32,69"	Caucaia
6	3° 39' 11,18"	38° 46' 02,14"	Caucaia
7	3° 54' 57,59"	38° 41' 10,23"	Maranguape
8	3° 55' 24,01"	38° 36' 46,54"	Pacatuba
9	4° 08' 26,34"	38° 20' 10,05"	Pacajus
10	4° 19' 47,02"	38° 28' 54,04"	Chorozinho
11	4° 00' 11,03"	38° 30' 54,95"	Aquiraz
12	3° 53' 47,92"	38° 24' 19,23"	Aquiraz
13	4° 06' 09,77"	38° 17' 05,80"	Cascavel
14	3° 51' 51,33"	38° 28' 19,03"	Eusebio
15	3° 45' 23,90"	38° 31' 40,42"	Fortaleza

Fonte: Autoria própria, 2023.

2.6.2 Programa Experimental

2.6.2.1 Classificação AASHTO

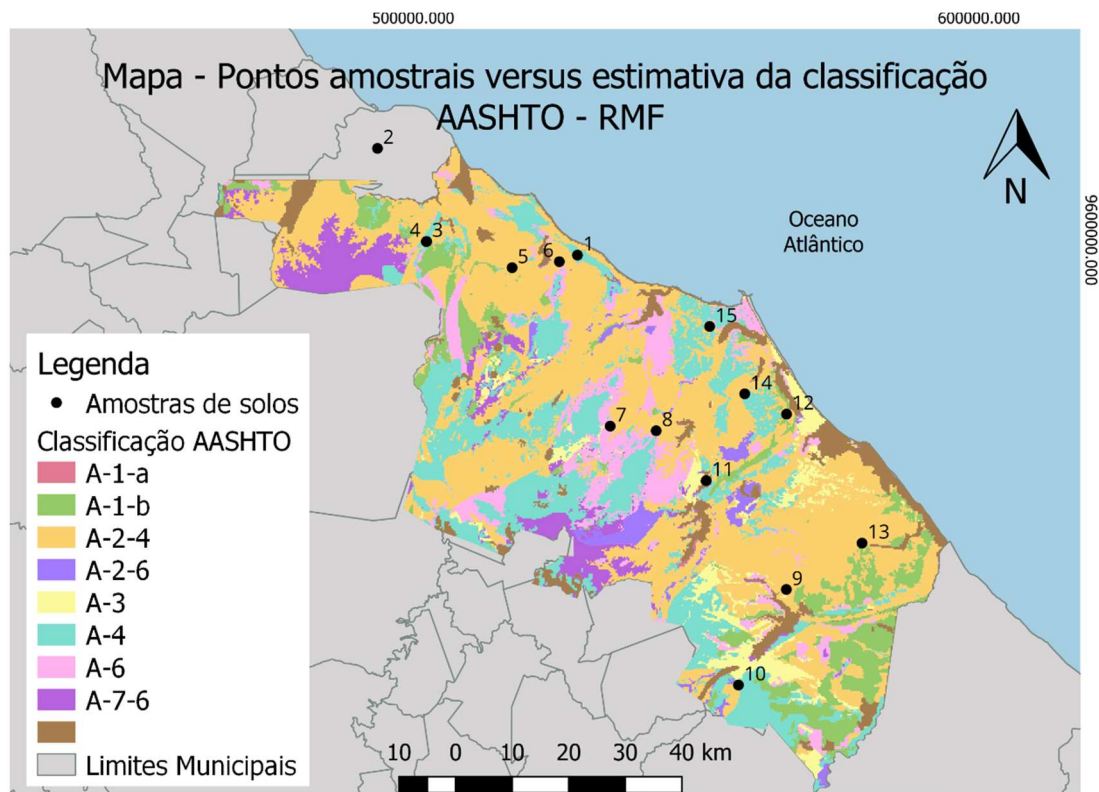
As amostras coletadas passaram pelos ensaios de granulometria e índices de consistência. Assim, foram classificadas de acordo com as recomendações da AASHTO e apresentaram, em sua maioria com cerca de 67%, classificação A-2-4, conforme esperado no estudo de Ribeiro (2013), apresentando ainda a ocorrência de solos A-3(13%), A0-2-6 (6,7%), A-6 (6,7%) e A-7-6 (6,7%), como indicado na Tabela 2.

Paralelo a isso, RIBEIRO (2013) disponibilizou os mapeamentos da classificação AASHTO e do CBR na *web* pela ferramenta *Webmapping*, em dimensão e escalas reais. Assim, esses mapas foram transferidos para um ambiente SIG, no geral foi possível cruzar as coordenadas das amostras coletadas com os mapas. Nas Figuras 14, 15 e 16 é possível observar os mapas da estimativa da classificação AASHTO, dos materiais constituintes e do comportamento dos materiais, com as amostras dos solos coletados. Percebe-se que a amostra 2 ficou fora da zona mapeada, pois após o estudo de RIBEIRO (2013) a configuração da RMF sofreu a inclusão de mais quatro municípios, sendo a amostra 2 referente a um desses municípios.

Tabela 2: Classificação AASHTO das amostras coletadas

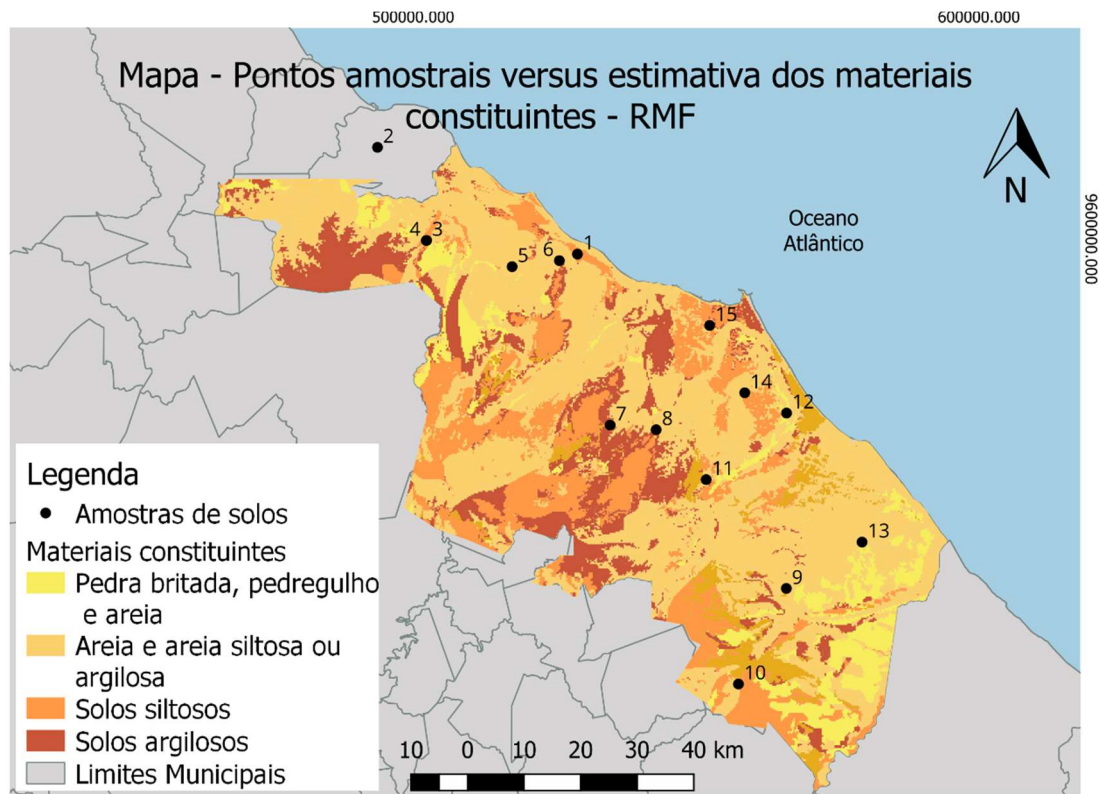
Amostras	Granulometria passante nas peneiras			Limite de Liquidez	Limite de plasticidade	Índice de Plasticidade	Classe AASHTO
	Nº 10 (2,00)	Nº 40 (0,420)	Nº 200 (0,075)				
1	100	95,5	0,06	0	0	0	A-3
2	100	68	6	0	0	0	A-2-4
3	100	100	98	63	26	37	A-7-6
4	21	16	10	32	21	11	A-2-6
5	58	44	32	33	24	9	A-2-4
6	100	88	10	0	0	0	A-3
7	79	50	25	23	19	4	A-2-4
8	82	48	23	0	0	0	A-2-4
9	100	78	25	18	14	4	A-2-4
10	100	89	17	0	0	0	A-2-4
11	98	89	35	0	0	0	A-2-4
12	100	89	12	20	0	0	A-2-4
13	100	86	14	0	0	0	A-2-4
14	98	84	50	33	20	13	A-6
15	89	44	13	0	0	0	A-2-4

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 14: Pontos amostrais *versus* Classificação AASHTO - RMF

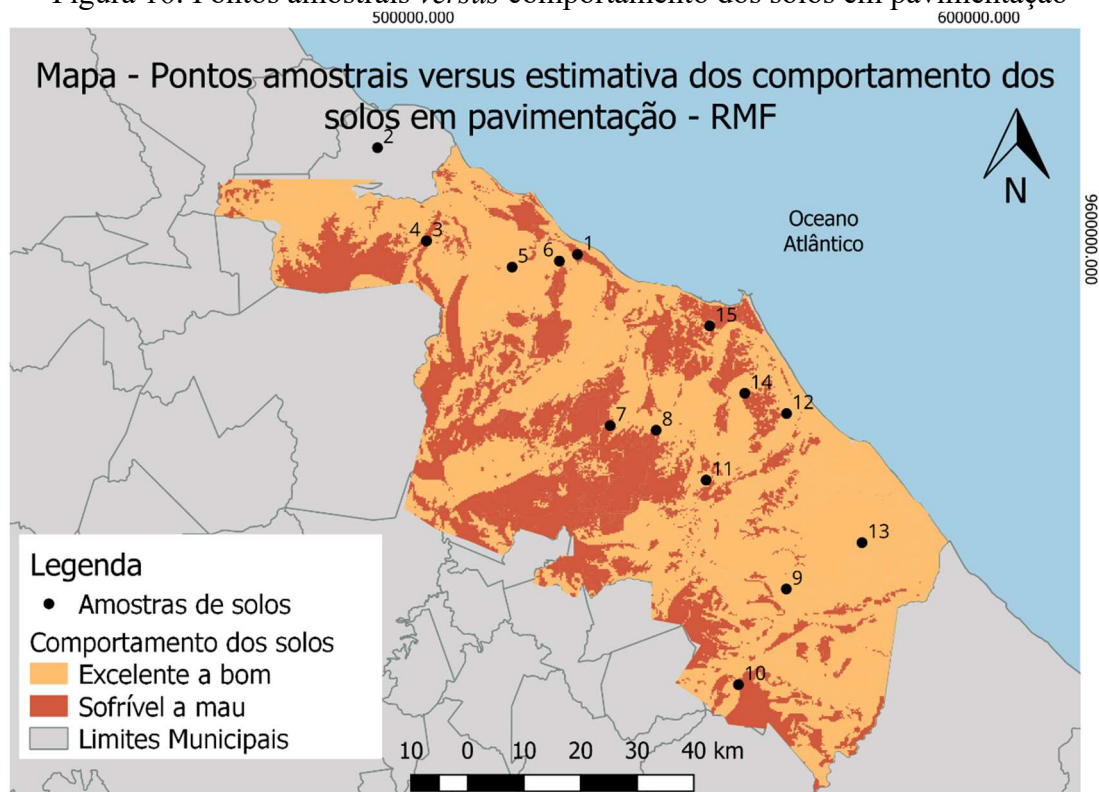
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 15: Pontos amostrais *versus* estimativas de materiais constituintes (Ribeiro, 2013)



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 16: Pontos amostrais *versus* comportamento dos solos em pavimentação



Fonte: Autoria própria, 2023.

De posse do resultado do cruzamento das coordenadas das amostras de solos com os mapas de predição da classificação AASHTO, foi elaborada a Tabela 3, na qual pode-se visualizar as classes definidas pelos ensaios experimentais e as estimadas pelo mapeamento geotécnico preditivo de Ribeiro (2013). Também foi possível associar os materiais constituintes e o comportamento dos materiais para pavimentação.

Tabela 3: Classificação dos solos: Laboratório x Estimativa do modelo de Ribeiro (2013)

Amostras	Laboratório			Estimativa (Ribeiro, 2013)		
	Classe AASHTO	Materiais constituintes	Comportamento	Classe AASHTO	Materiais constituintes	Comportamento
1	A-3	Pedregulho fino	Excelente	A-4	Solos siltosos	Sofrível
2	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	-	-	-
3	A-7-6	Solos argilosos	Sofrível	A-4	Solos siltosos	Sofrível
4	A-2-6	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-4	Solos siltosos	Sofrível
5	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
6	A-3	Pedregulho fino	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
7	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
8	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
9	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
10	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
11	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
12	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
13	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
14	A-6	Solos argilosos	Sofrível	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente
15	A-2-4	Pedregulhos ou areias	Excelente	A-4	Solos siltosos	Sofrível

Fonte: Autoria própria, 2023.

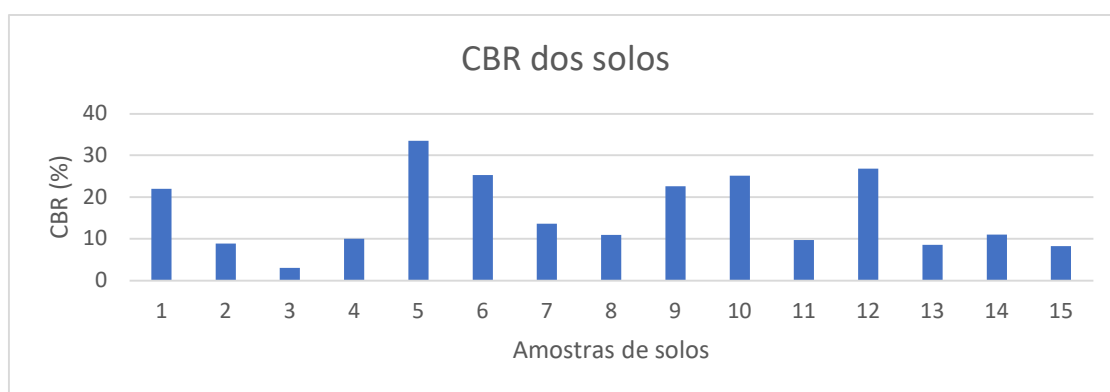
Considerando os dados apresentados na Tabela 3, é possível identificar que 8 das 14 amostras possuem a mesma classificação, tanto pela variação de mais ou menos 100 MPa no procedimento experimental, quanto pela estimativa fornecida pelo mapeamento de Ribeiro (2013), o que representa 57% de acertos. Observa-se que todos os acertos estão associados a classe A-2-4, mas ressalta-se que houve casos onde estimativa deveria ser A-2-4, mas os ensaios de laboratório mostraram classe A-3, assim como amostras consideradas A-2-4 foram estimadas como A-4. Como os erros não foram para classes de mesmo nível de material, o acerto quanto aos materiais constituintes permanece o mesmo, 57%.

Quanto ao comportamento dos materiais, como é considerado material bom a excelente os classificados entre as classes A-1 e A-3, e os demais são considerados sofríveis, a taxa de acerto passou para 71%. Esses erros ocorreram, pois, além dos solos serem materiais heterogêneos, o mapeamento de Ribeiro (2013) foi feito com a mesma precisão do modelo gerado, em média 90%.

2.6.2.2 CBR

As amostras de solo coletadas apresentaram CBR de até 33,5%, mas no geral se apresentaram em duas faixas, uma variando de 8 a 14% e outra de 22 a 33,5%, como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17: Valores de CBR para os solos amostrados.

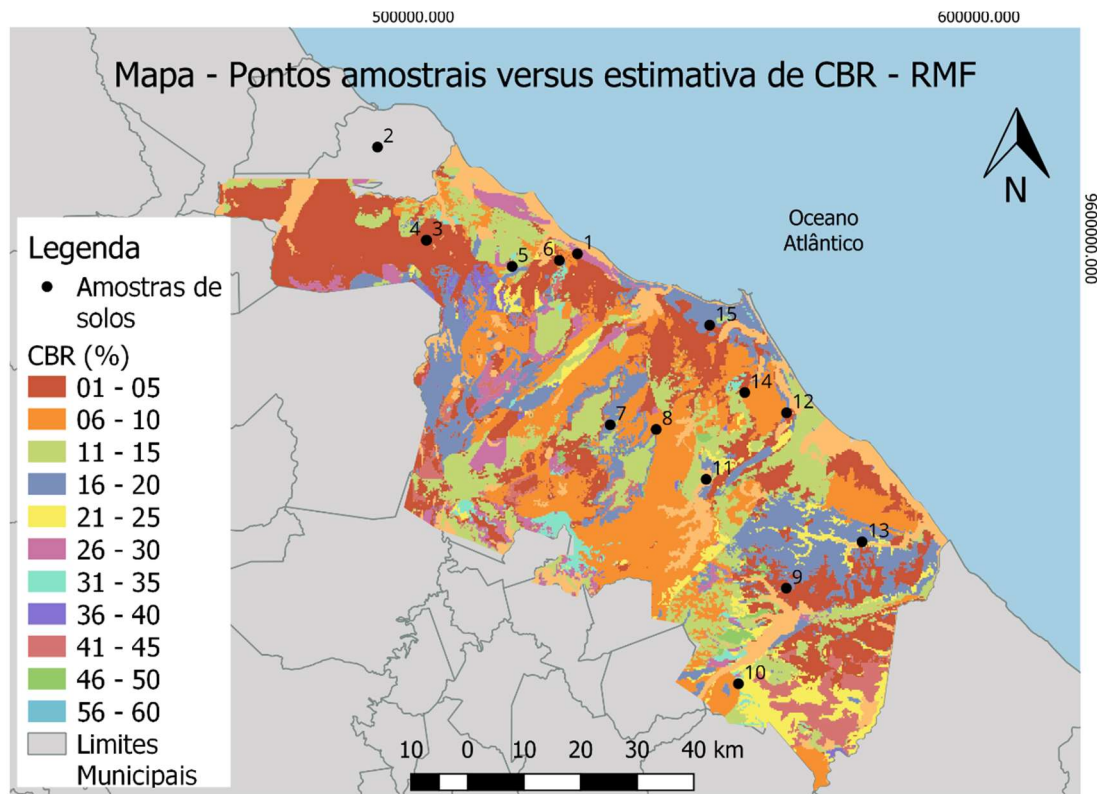


Fonte: Autoria própria, 2023.

Cruzando-se os pontos das amostras de solo com o mapa de predição de CBR da RMF produzido por Ribeiro (2013), como ilustra a Figura 18, foi possível identificar o

valor estimado de CBR para cada ponto de coleta. Na Tabela 4 pode-se observar esses valores estimados associados com os valores obtidos em laboratório. Como o mapa de predição de CBR adota intervalos de até 5%, foi adotado o valor médio de cada categoria.

Figura 18: Pontos amostrais versus estimativas de CBR – RMF (Ribeiro, 2013)



Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 4: CBR obtido em laboratório versus CBR estimado pelo modelo de Ribeiro (2013)

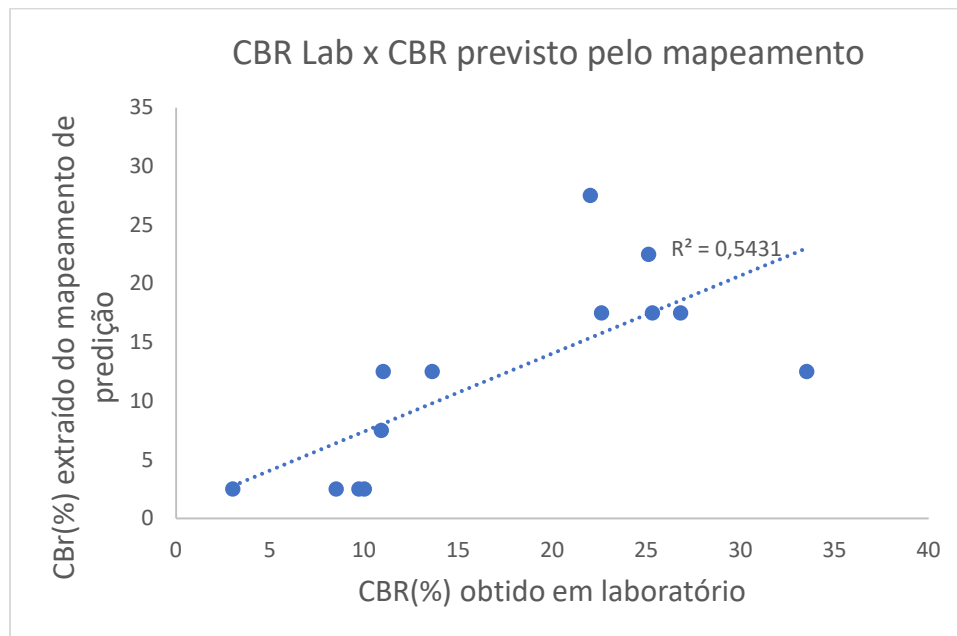
	CBR (%)														
Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Laboratório	22	8,8	3	10	33,5	25,3	13,6	10,9	22,6	25,1	9,7	26,8	8,5	11	8,2
Estimativa	27,5	-	2,5	2,5	12,5	17,5	12,5	7,5	17,5	22,5	2,5	17,5	2,5	12,5	2,5

Fonte: Autoria própria, 2023

Observa-se que, no geral, os valores dos CBR de laboratório apresentaram valores maiores que os estimados. Desconsiderando-se a Amostra 2, que foi extraída de uma área ainda sem este mapeamento geotécnico de predição de CBR, e correlacionando os demais valores de CBR, obtidos em laboratório com os estimados, obteve-se um índice de

determinação de 54%, como ilustra a Figura 19. O resultado se mostrou mais representativo para os solos com CBRs de até 25%.

Figura 19: Correlação entre os valores de CBR obtidos no programa experimental e os previstos pelo modelo de RIBEIRO, 2016



Fonte: Autoria própria, 2023.

2.6.2.3 Módulo Resiliente (MR)

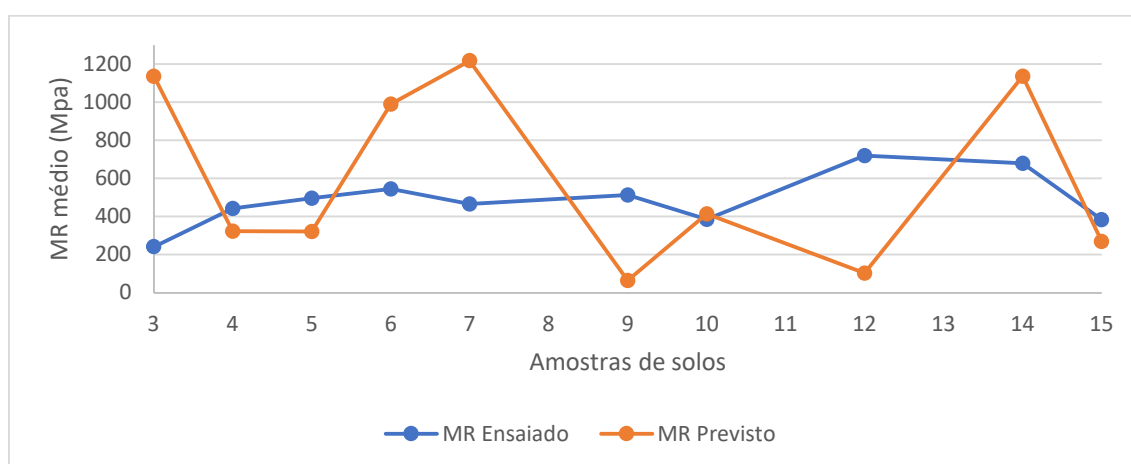
O ensaio de MR conta com duas fases, a de condicionamento, que tem a finalidade de eliminar as deformações plásticas iniciais e a fase de registro das deformações. Durante a fase de registro de deformações, são utilizadas diferentes tensões de confinamento (σ_3), que correspondem à pressão de ar injetada dentro da célula do equipamento, e tensões solicitantes (σ_1), totalizando 18 pares de tensões.

Das 15 amostras de solos em estudo, cinco não passaram pela fase de condicionamento. Aquelas que passaram apresentaram valor médio do ensaio de aproximadamente 490 MPa. Dessas, a maioria foi classificada como A-2-4, e valor médio do módulo ficou próximo ao intervalo típico para esse tipo de solo, segundo RIBEIRO (2016), que desenvolveu um modelo de previsão do módulo de saída do ensaio triaxial, levando em consideração os dados do ensaio de granulometria e compactação, bem como as tensões confinantes e desvio.

Para essas amostras de solos, nos quais foi possível o ensaio de MR, foi verificado se as faixas das características físicas encontravam-se dentro do limite utilizado no modelo

de predição de MR de Ribeiro (2016). Assim foi implantado esse modelo neural de previsão de MR de RIBEIRO (2016) em uma planilha Excel e aplicado aos solos, a partir das características básicas dos solos, obtendo os módulos médios de resiliência. Notou-se, como mostra a Figura 20, que no geral os valores de MR_{med} previstos pelo modelo neural são bem mais elevados que valores obtidos diretamente no ensaio.

Figura 20: Valores médios de MR obtidos no programa experimental *versus* MRs previsto pelo modelo de RIBEIRO, 2016



Fonte: Autoria própria, 2023.

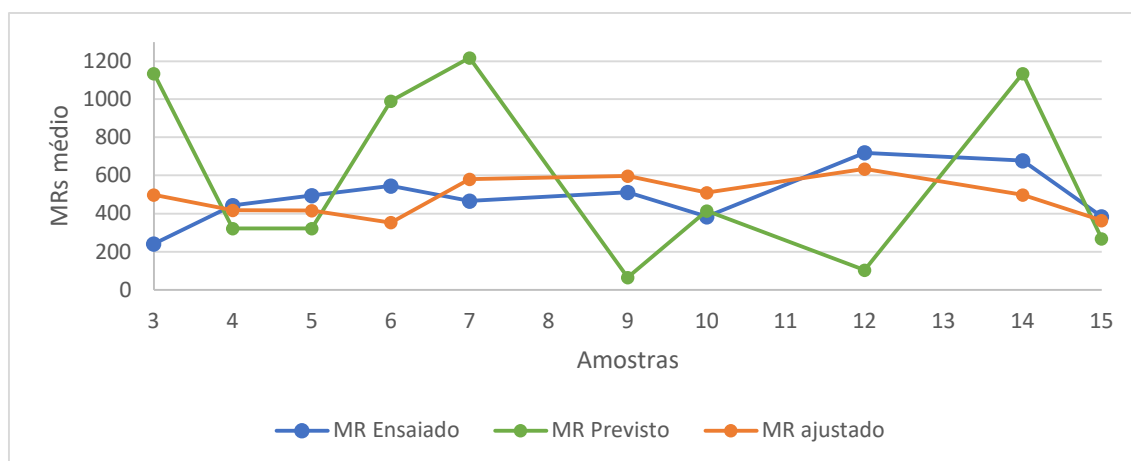
Identifica-se que as principais semelhanças de resultados, entre o MR ensaiado em laboratório e o MR previsto pelo modelo de Ribeiro (2016), ocorreram quando o modelo estima valores de MR entre 200MPa e 415MPa, que é o caso das amostras 4, 5, 10 e 15. Apesar de apresentarem valores mais próximo, principalmente no caso da amostra de solo 10, ainda existe uma diferença média de cerca de 95MPa entre o valor estimado e obtido a partir do ensaio laboratorial. Assim, sugere-se ajustar o modelo acrescentando-se 95MPa ao valor previsto. Ressalta-se que esses solos pertencem à classe AASHTO A-2-4.

Observando os solos 9 e 12, também classificados como A-2-4, mas apresentando previsão de MR abaixo de 120MPa e valor de MR, a partir do ensaio convencional de 500MPa a 720MPa, nota-se uma diferença bem significativa. Essa diferença apresenta valor semelhante entre as amostras, o que pode ser considerado como um erro sistemático para essa ocasião. Assim aconselha-se somar ao valor previsto 530Mpa, que representa a média da diferença entre o MR de laboratório e o estimado pelo modelo neural.

Para os solos que apresentaram valor estimado de MR maior que 1000MPa, como os solos 3, 6, 7 e 14, o MR de laboratório mostrou-se inferior, em média 635MPa. Assim, sugere-se para esses casos a subtração de 635MPa do valor estimado. Vale ressaltar que esses solos apresentaram classificações AASHTO diversas, como A-7-6, A-3, A-2-4 e A-6.

A Figura 21 representa os valores de MR estimado e determinado em laboratório para as amostras de solos, considerando o ajuste sugerido. Para uma melhor visualização e comparação foi adotada a mesma escala. Observa-se ainda uma diferença entre os resultados, na ordem de 100MPa. Tem-se também que, no geral o valor previsto é inferior ao de laboratório, trabalhando assim com uma margem de segurança.

Figura 21: Valores médios de MRs obtidos no programa experimental versus MRs previsto pelo modelo de Ribeiro (2016) versus MRs previstos ajustados



Fonte: Autoria própria, 2023.

Pode-se afirmar então que o modelo de Ribeiro (2016) é mais assertivo para solos da A-2-4, provavelmente por ter sido a maioria das amostras no banco de dados que gerou o modelo. A faixa de 200MPa a 415MPa representa o intervalo associado a essa classe, de acordo com Ribeiro (2016), o que justifica serem as amostras com melhor aproximação entre o MR ensaiado e o estimado pelo modelo neural.

2.7 Considerações finais

Para reconhecimento dos solos disponíveis para obras rodoviárias da RMF, foram extraídas amostras de solos em jazidas ou taludes naturais, que ocorrem dentro dos limites da área de estudo. O comportamento desses solos quanto à classificação da AASHTO

(*American Association of State Highway and Transportation Officials*), conforme esperado no estudo de Ribeiro (2013), foi, em sua maioria, classificado como A-2-4, tendo também ocorrência de solos A-3 e A-7, com uma taxa de acerto na ordem de 70%.

Os solos estudados apresentaram CBR que variaram de 8 a 33%, obtendo-se um coeficiente de correlação de 0,54 em relação ao modelo de RIBEIRO (2013), o que certamente ratifica que a maioria das amostras coletadas refletem o comportamento previsto no seu mapeamento.

As amostras de solos coletadas e ensaiadas, quando submetidas ao ensaio triaxial de cargas repetidas, apresentaram MR médios no intervalo de 380MPa a 550MPa. Adicionalmente, analisou-se o modelo de previsão de MR de Ribeiro (2016), para o qual pode-se afirmar que o modelo que representou melhor os solos classificados como A-2-4. O modelo neural de Ribeiro (2016) mostrou-se satisfatório, porém com limitação quanto ao uso de acordo com as faixas de MR previsto e uma variação de cerca de 100MPa.

Essa diferença obtida após a análise do modelo deve-se à precisão com a qual o modelo foi gerado, e o fato dos solos serem materiais heterogêneos. Para aumentar a capacidade preditiva desse modelo, recomenda-se que sejam inseridas outras amostras de solo da região, como as que aqui foram coletadas.

3 AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DOS MATERIAIS GRANULARES DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA – CE

RESUMO

De acordo com a pesquisa da CNT (2022) 75,3% da extensão rodoviária brasileira, sob gestão pública, apresentou algum tipo de problema, sendo considerados como regular a péssimo. Dentre os principais defeitos, destaca-se a deformação permanente, que prejudica o conforto ao rolamento e causa risco à segurança. O novo método de dimensionamento nacional de pavimentos, Medina (DNIT, 2018), baseia-se na concepção mecanística-empírica e utiliza como parâmetros principais de rigidez o a deformação permanente dos materiais. Diante disto, objetivo principal desta pesquisa é estudar a DP de solos em misturas de solo-brita da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Para tanto concebeu-se tanto um esforço amostral, no qual foram coletados solos e britas na RMF, assim como um programa experimental para caracterização física e mecânica (MR e DP) desses materiais. Os solos foram ensaiados de acordo com a norma brasileira (DNIT 179/2018) e as misturas estabilizadas com solo e brita foram ensaiadas conforme a norma europeia (CEN 13286-7/2004). De acordo com os procedimentos, análises e avaliações desenvolvidas, este estudo demonstrou a eficiência da metodologia europeia simplificada de laboratório, para a obtenção e o entendimento da ocorrência de DP em materiais granulares da RMF, reduzindo o tempo de execução dos ensaios e recursos. Os solos ensaiados apresentaram baixas deformações, bem como as misturas estabilizadas com solo e brita. O modelo de deformação permanente proposto por Guimarães (2009) demonstrou-se eficaz para descrever o comportamento dos materiais da região estudada, com a maioria dos solos com valores de R^2 acima de 0,90. O estudo da DP em camadas granulares ainda é pouco difundido no Brasil, devido ao ensaio ser um processo longo e oneroso, conforme instruções do DNIT (2018). Mas espera-se que os resultados desse trabalho possam contribuir com os órgãos rodoviários e profissionais da área de infraestrutura de transporte da RMF na metodologia de obtenção dos parâmetros de DP.

Palavras chave: DP, Medina, RMF.

3.1 Introdução

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2022) as rodovias brasileiras são as principais responsáveis pelo transporte de cargas e de pessoas no país, concentrando, aproximadamente, 65% da movimentação de mercadorias e 95% da de passageiros. Nesse estudo, foi avaliado o estado dos pavimentos brasileiros, que mostrou que 75,3% da extensão rodoviária brasileira, sob gestão pública, apresentou algum tipo de problema, sendo considerados como regular a péssimo (CNT, 2022).

Os defeitos mais frequentes nos pavimentos flexíveis brasileiros são o trincamento do revestimento e as deformações permanentes. O trincamento se desenvolve pela flexão alternada da camada de revestimento apoiada nas camadas granulares subjacentes, em

geral, bastante deformáveis elasticamente (Oliveira e Motta, 2021). Por sua vez, as deformações permanentes, que se refletem no defeito de afundamento de trilha de roda (ATR), podem receber contribuição de todos os materiais das camadas e também do subleito, e são associadas principalmente às camadas granulares. Admite-se que, se a dosagem da mistura asfáltica for feita corretamente, a contribuição da camada de revestimento será desprezível (Medina e Motta, 2015).

As camadas granulares têm uma importante função no comportamento global da estrutura do pavimento. Para estabelecer métodos de dimensionamento mais eficientes e critérios construtivos adequados, é indispensável o entendimento do desempenho das camadas subjacentes ao revestimento sob a ação do tráfego para a implementação de pavimentos (CABRAL, 2021).

No Brasil, a grande maioria dos pavimentos ainda são dimensionados, empiricamente levando-se em consideração informações pouco representativas da realidade estrutural das camadas de solo frente às solicitações das cargas dos veículos, pois os esses dados são obtidos por ensaios de aplicação de cargas estáticas. O Medina (Método de Dimensionamento Nacional), novo método de dimensionamento de pavimentos apresentado pelo DNIT em 2018, permite dimensionar pavimentos incluindo dados mecânicos, obtidos em ensaios dinâmicos. Um dos fenômenos relevantes no estudo do comportamento estrutural do pavimento é a deformação permanente (DP), cujo somatório acumulado nas camadas favorece a análise do defeito de afundamento de trilha de roda (ATR), um dos principais processos de deterioração dos pavimentos flexíveis, além do trincamento por fadiga.

O estudo da DP em camadas granulares ainda é pouco difundido no Brasil, devido ao ensaio ser um processo longo e oneroso, conforme instruções do DNIT (2018). Para a obtenção dos valores de deformação, os materiais do pavimento são geralmente caracterizados por meio de estudos em laboratório, nos quais as condições de carga e ambientais frequentemente experimentadas pelo material no campo são simuladas a partir dos ensaios triaxiais de carga repetida, em que condições representativas de compactação do material, teor de umidade ótima e uma ampla variedade de condições de tensões é reproduzida.

Segundo Guimarães (2009), o estudo da DP deve ser feito para as diferentes configurações de cargas que solicitam o pavimento incluindo-se os veículos pesados. Os dados obtidos a partir desses estudos são utilizados para desenvolver equações

constitutivas e modelos matemáticos, que podem prever o comportamento mecânico dos materiais (Salour e Erlingsson, 2015).

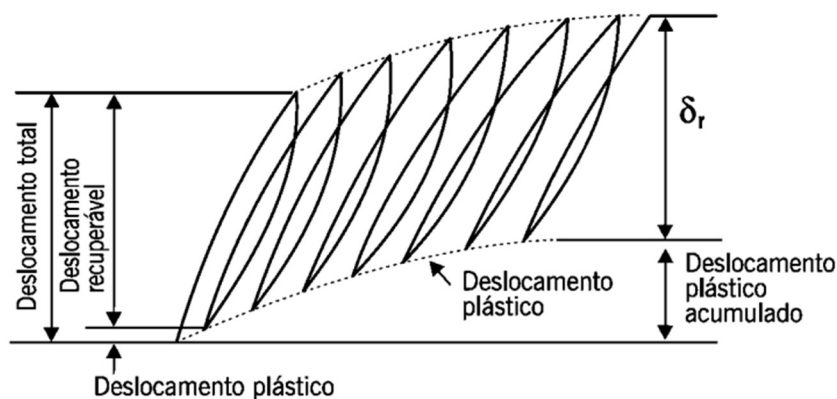
Pelo exposto, neste estudo, pretende-se investir no conhecimento do comportamento dos materiais granulares pelos parâmetros de Deformação Permanente da RMF e testar a realização dos ensaios com redução no número de ciclos, conforme Cabral (2021) sugeriu, quando estudou os solos da microrregião de Mossoró.

3.2 Deformação permanente em pavimentos flexíveis

A deformação total que ocorre nos pavimentos flexíveis devido à ação de cargas repetidas pode ser dividida em duas parcelas: deformação recuperável (resiliente) e a plástica (permanente). O afundamento recuperável é a ocorrência mais estudada e utilizada em alguns modelos de dimensionamento mecanístico-empíricos de pavimentos, usando-se como parâmetro o Módulo de Resiliência (MR) do material. Já a deformação plástica apresenta o afundamento não recuperável ocorrido nas camadas do pavimento, causando danos definitivos na estrutura.

Segundo Yoder e Witczak (1975), a deformação permanente é a combinação de dois mecanismos distintos: as deformações cisalhantes repetidas e a redução do volume (densificação). A deformação permanente é a parcela do deslocamento plástico que não retorna à posição inicial após cessar a aplicação de carga (Figura 22). Essas deformações são acumulativas ao longo da vida do pavimento, dependem do estado de tensões e provocam a variação da espessura da camada, formando assim o defeito ATR (Guimarães, 2001; Medina e Motta, 2015; Lima, 2020).

Figura 22: Representação dos deslocamentos sofridos por um corpo de prova submetido ao ensaio de carga repetida



Fonte: Bernucci *et al.*, 2010.

O ATR é fortemente indesejável em uma estrutura de pavimento por diversos motivos, tais como: acúmulo de água ao longo da trilha de roda podendo ocasionar aquaplanagem, possibilidade de saturação das camadas subjacentes do pavimento, dificuldade de ultrapassagens de veículos ao longo da via, desgaste prematuro dos pneus e acréscimo no consumo de combustíveis (Guimarães, 2009).

Esses defeitos influenciam diretamente na redução dos níveis de segurança e conforto das estradas, aeroportos, ruas e avenidas, como também elevam os custos de manutenção e reabilitação do revestimento e das camadas subjacentes dos pavimentos.

De acordo com LEKARP e DAWSON (1998), apesar da deformação permanente ser apenas uma parte da deformação total resultante da aplicação de um ciclo de carga, a repetição de carga pode levar ao acúmulo de um grande número destas pequenas deformações plásticas, até que o pavimento tenha uma eventual ruptura resultante de afundamentos de trilhas de roda excessivos.

Os parâmetros da DP se configuram como um importante parâmetro em projetos de pavimentos flexíveis. Conforme Rodrigues (1997), um modo de se obter um dimensionamento menos conservador contra deformações plásticas, que o proposto por métodos tradicionais é prever o ATR que deve ocorrer durante o período de projeto, através do somatório das deformações em cada camada ou subcamada.

Um projeto de pavimento exige que os materiais constituintes sejam eficientemente selecionados em relação às suas características de resistência e rigidez. Os ensaios triaxiais de carga repetida são os que melhor representam o comportamento dos materiais geotécnicos nas camadas do pavimento, em relação à deformabilidade elástica e plástica. Estes ensaios também fazem parte do novo método de dimensionamento nacional (Medina) de pavimentos asfálticos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), lançado em 2018.

Para este novo método de dimensionamento, quando se refere à deformabilidade da estrutura de um pavimento, é de fundamental importância o conhecimento das relações entre tensões e deformações dos materiais, expressos pelos valores de módulo de resiliência (MR) e de deformação permanente (DP).

A pavimentação brasileira está em um momento de transição, onde cada vez mais a importância de ensaios de laboratório para prever o comportamento de materiais está

sendo levada em conta. Porém, ainda tem sido pequena a utilização destes ensaios de DP para fins de dimensionamento de pavimentos brasileiros, especialmente para solos e britas.

Para WERKMEISTER *et al.* (2001), uma concepção bem-sucedida de um pavimento é torná-lo capaz de resistir à acumulação de deformação permanente dos materiais granulares ou outros materiais sem chegar a apresentar deformações irreversíveis acentuadas na superfície do pavimento.

As camadas do pavimento contribuem com alguma parcela para a DP total da estrutura e, portanto, para estimar a profundidade dos ATR é necessário se conhecer o mecanismo da deformação de cada uma das camadas (MOTTA, 1991). Huang (1993) apresenta, percentualmente, a contribuição de cada camada para a DP total medida na superfície do pavimento, determinados em pista experimental da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), conforme apresentado na Tabela 5. De acordo com esse estudo, 68% da DP ocorre nas camadas granulares da estrutura do pavimento.

Tabela 5: Contribuição de cada camada na deformação permanente.

Camada do pavimento	Contribuição da deformação permanente total (%)
Revestimento em concreto asfáltico	32
Base de brita graduada	14
Sub-base	45
Subleito	9

Fonte: Huang, 1993.

A acumulação da deformação depende de muitas variáveis, com diferentes graus de importância. Os principais fatores que influenciam são: estado de tensão, número de ciclos de cargas, teor de umidade, compactação e características do material (LEKARP *et al.*, 2000, Guimarães, 2001 e Lima, 2016). A seguir são discutidos alguns desses fatores.

3.2.1 Fatores que influenciam a deformação permanente nas camadas granulares

A ocorrência de danos no pavimento devido às rupturas em sua estrutura é causada por um conjunto de fatores quando esse é sujeito à ação do tráfego de veículos. Conforme diversos autores, tais como Werkmeister *et al.* (2004), Guimarães (2009), Acikgöz e Rauf (2010) e Lima (2016) os principais fatores que influenciam no surgimento e na

intensificação das DP são: (a) características do carregamento; (b) estado de tensão; (c) condições de umidade e (d) características geotécnicas dos materiais.

a) Características do carregamento

As deformações permanentes e resilientes do solo são fortemente influenciadas pela magnitude do carregamento, ou seja, pelo estado de tensões presente. Os danos ocorridos no pavimento, quando submetido ao carregamento repetitivo são acumulativos e graduais em pequenos incrementos.

O número de ciclos de aplicação de carga também contribui para o aumento da DP e é importante quando está associada à magnitude das cargas, permitindo o estudo da tendência ao acomodamento ou à ruptura, exercendo especial influência no comportamento dos materiais e na determinação dos parâmetros dos modelos de DP (Barksdale, 1972).

A DP acumulada apresentada por um determinado material granular, ainda pode proporcionar um aumento expressivo mesmo após um elevado número nas repetições de carga (Barksdale, 1972). De acordo com Paute *et al.* (1996), o acúmulo da DP em materiais granulares, sujeitos às cargas repetidas estabilizam-se, de modo que é possível determinar um valor limite para a deformação permanente total. Motta (1991) indica que quando a taxa de acréscimo da DP se aproximar de zero, o ensaio poderá ser concluído.

b) Estado de tensões

O estado de tensões ou a ordem de aplicação da carga relaciona-se com a magnitude e com o número de ciclos, podendo ser observado após cada ciclo de carregamento pelo acúmulo da DP. O efeito dessa condição tem impacto significativo no desenvolvimento das deformações influenciando primordialmente esse fenômeno nos solos. Os ensaios de laboratório simulam a ação das tensões nas diversas camadas do pavimento, buscando reproduzir efeitos similares aos do campo, obtendo parâmetros que possam ser utilizados em análises mecânicas.

Um aspecto importante refere-se à sequência de tensões na qual o solo é submetido. Essa configuração influencia no comportamento quanto à DP e, a definição dessa condição deve ser levada em consideração na análise da deformabilidade acumulada das camadas granulares do pavimento. Nesse sentido, por exemplo, Monismith *et al.* (1975) indicaram que uma série de aplicações de tensões (desvio e

confinantes) na argila siltosa, pode produzir um considerável efeito de enrijecimento do material. Quanto às tensões, presentes no ensaio triaxial de cargas repetidas, essas exercem influência nas deformações axiais, tanto na análise do comportamento resiliente quanto na DP de solos.

Segundo Odermatt (2000) e Guimarães (2001), pode-se considerar que o acréscimo da tensão desvio gera um aumento da DP total. Porém, considerando apenas a influência da tensão confinante, observa-se um aumento da deformação apenas na diminuição dessa. Pinto (2006) relata que a influência da tensão confinante no comportamento dos materiais granulares depende principalmente das características geotécnicas.

c) Condição de umidade

A influência do teor de umidade no processo de ocorrência da DP também é relevante, haja vista que a ação de inserir o volume de água incorreto no material utilizado na execução das camadas, pode causar consequências danosas à estrutura por comprometer a obtenção da compactação desejada (CABRAL, 2021). Ribeiro (2013) relata que a presença da quantidade adequada de água no solo pode influenciar positivamente na coesão dos materiais, contudo, um pequeno aumento na quantidade pode gerar, dentre outras consequências, um aumento importante na DP e uma diminuição no MR.

De acordo com Guimarães (2009), o teor de umidade de um solo das camadas de reforço do subleito, sub-base e base em campo, depende da umidade de compactação e da variação da umidade após compactação. A partir disso, adota-se o teor de umidade próximo da ótima para execução dos ensaios de laboratório para determinação das propriedades tecnológicas dos solos. A experiência de campo mostra que quando não se obedece a essa recomendação há uma aceleração na deterioração do trecho executado, gerando custos não previstos na reexecução.

Ainda que seja admitida uma variação de dois pontos percentuais em torno da umidade ótima, independente da natureza do solo, há o risco de se alterar o comportamento dos materiais que apresentam a curva de compactação mais acentuada e, conseqüentemente, comprometer o grau de compactação e o desempenho pós-execução. Segundo Lekarp (1999), um pequeno acréscimo no teor de água pode causar um elevado acréscimo na taxa de DP.

Um segundo aspecto importante, relativo à quantidade de água numa camada de solo, refere-se à possibilidade de ganho ou perda de umidade de um eventual material já compactado na umidade ótima ou similar, no ambiente no qual está inserido. Essa variação dependerá de outras condicionantes como fatores climáticos, ambientais e técnicos (drenagem). Essas alterações podem modificar o comportamento tensão versus deformação de certos materiais granulares.

d) Características geotécnicas

As características geotécnicas do solo também influenciam no comportamento das estruturas do pavimento quanto à deformação permanente, a partir da ação de cargas repetidas. Os principais parâmetros que indicam maiores efeitos no fenômeno de deformabilidade de uma camada de material granular são: massa específica, método de compactação, curva granulométrica e porcentagem de finos.

Segundo Guimarães (2009), a massa específica aparente seca, ρ_d e o grau de compactação exercem significativa influência no comportamento de solos submetidos à ação de cargas repetidas. A resistência à DP dos solos tende a se elevar com o aumento da massa específica do material.

Barksdale (1972) estudou o comportamento de vários materiais granulares e observou um acréscimo médio de 185% na DP total quando o material atingiu um grau de compactado de 95%, em vez de 100%. Barksdale (1972) e Lekarp (1999) citam que a mudança da compactação, aumentando a energia aplicada, reduz consideravelmente a DP. Esses mesmos autores citam que o maior contato entre as partículas que constituem o material e seu intertravamento, devido ao aumento da massa específica aparente seca, é a maior razão para essa redução.

A influência da granulometria e da porcentagem de finos, ou seja, partículas com dimensões inferiores a 0,074 mm, na ocorrência da DP acumulada podem ser consideradas bastante relevantes, pois possuem a capacidade de alterar diretamente a intensidade das deformações. Lekarp (1999) cita alguns estudos que constataram um aumento na DP acumulada à medida que se aumenta a porcentagem de finos. Tal conclusão não deve ser considerada para solos finos lateríticos brasileiros, que podem apresentar excesso de finos na sua composição e ter excelente comportamento para a pavimentação.

3.2.2 Modelos de previsão de deformação permanente

A deformação permanente como já comentado reflete-se em afundamentos de trilha de rodas manifestadas na superfície dos revestimentos asfálticos. A previsão do afundamento de trilha de rodas (ATR) deve considerar que qualquer camada pode contribuir para esse ATR, sendo um problema considerado complexo. De acordo com HUANG (1993), como ocorre uma contribuição de todas as camadas do pavimento, cada camada irá contribuir com uma parcela representativa da deformação de cada material componente.

Segundo COLLINS e BOULBIBANE (2000), há necessidade do desenvolvimento modelos teóricos que permitam prever a deformação permanente. Em geral, se utilizam modelos de previsão desenvolvidos por estudos em laboratório. Para solos e agregados utilizam-se ensaios triaxiais de cargas repetidas com controle dos corpos de prova a fim de representar ao máximo as características existentes em campo.

As propostas de modelo de previsão relacionam e incluem diversos estados de tensões, tipos diferentes de materiais e suas propriedades, número de ciclos (N) de aplicações de carga, dentre outros. Portanto, é importante o estudo e o desenvolvimento de modelos referentes ao conjunto de fatores pertencentes às rodovias inseridas em regiões específicas em análise. Para isso é necessário tanto uma avaliação das condicionantes regionais, quanto da evolução da deterioração do pavimento com o tráfego/tempo característicos.

Na Tabela 6 são apresentados, de forma resumida, os principais modelos de previsão da deformação permanente para materiais granulares, propostos em Cabral (2021), para os materiais que compõem as camadas granulares da estrutura do pavimento, com algumas de suas características, atributos e condições para validação dessa ferramenta.

Tabela 6: Principais modelos de deformação permanente para materiais granulares.

Autores	Modelos	Parâmetros
MONISMITH (1975)	$\varepsilon_p = A \cdot N^B$	A e B
MAJIDZADEH <i>et al.</i> (1976)	$\frac{\varepsilon_p}{N} = A(D, w) \cdot N^{-m}$	A e m

LENTZ e BALADI (1981)	$\varepsilon_p = \varepsilon_{0,95} \cdot \sigma_{drupt} \ln \left(1 - \frac{\sigma_d}{\sigma_{drupt}} \right)^{-0,15} + \left[\frac{n \cdot \sigma_d / \sigma_{drupt}}{1 - m \cdot \sigma_d / \sigma_{drupt}} \right] \cdot \ln(N)$	<i>n e m</i>
UZAN (1981)	$\varepsilon_{p(N)} / \varepsilon_r = \mu \cdot N^{-\alpha}$	<i>α e μ</i>
BARKSDALE (1984)	$\varepsilon_{1,p} = a + b \cdot \log(N)$	<i>a e b</i>
TSENG e LYTTON (1989)	$\delta_{\alpha(N)} = (\varepsilon_0 / \varepsilon_r) \cdot e^{-(\rho N)^\beta} \cdot \varepsilon_v \cdot h$	<i>ρ e β</i>
GUIMARÃES (2009)	$\varepsilon_p = \psi_1 \cdot \sigma_3^{\psi_2} \sigma_d^{\psi_3} N^{\psi_4}$	<i>$\psi_1 \psi_2 \psi_3 \psi_4$</i>

Fonte: Cabral, 2021.

Diante da análise dos principais modelos de previsão propostos ao longo das últimas décadas, é notória a problemática em se representar adequadamente o comportamento de um solo no tocante à DP, devido ao conjunto de fatores, condições, formulações matemáticas envolvidas nesse processo, quase sempre com variáveis diferentes em cada caso. Guimarães (2009) descreveu que a preocupação com a perfeita modelagem do comportamento obtido em ensaios, não garante a implementação prática de um modelo desenvolvido, caso essas formulações não possam ser associadas aos métodos de dimensionamento.

3.3 Materiais e método

Nesta etapa serão detalhados os materiais utilizados na pesquisa e o método aplicado.

3.3.1 Materiais

A área selecionada para estudo da deformação permanente dos materiais granulares de pavimentação foi a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), composta atualmente por 19 municípios e situada no litoral leste do estado do Ceará.

Para a definição dos materiais foi levado em consideração o mapeamento de Ribeiro (2013) da classificação AASHTO e do CBR da RMF. A partir disso, foram coletadas 15

amostras de solos em diferentes porções da área de estudo, buscando obter solos mais distintos entre si, para se ter uma maior variedade de materiais. Além dos solos foram selecionados também agregados (britas), oriundas de 3 pedreiras diferentes, para possível estabilização de camadas granulares, conforme descrição a seguir:

Para subsídio desta investigação foram coletadas 15 amostras de solos de diversos municípios que compõem a RMF, extraídas de jazidas ou taludes naturais. A localização desses pontos pode ser observada no mapa da Figura 23.

Figura 23 - Mapa de localização das amostras dos solos coletados



Fonte: Autoria própria, 2023.

Visando-se a obtenção de misturas mais rígidas, foram realizadas estabilizações granulométricas utilizando-se os solos e as britas. Assim, investigou-se, ainda, três pedreiras dentro da área de estudo, localizadas nos municípios de Caucaia, Pacatuba e Eusébio. Tal escolha baseou-se na seleção de materiais com características morfológicas distintas e, em locais distantes entre si, contudo dentro do limite da RMF. A Tabela 7 mostra a distribuição litológica associada a cada município e a Figura 24 ilustra a localização geográfica dessas pedreiras selecionadas.

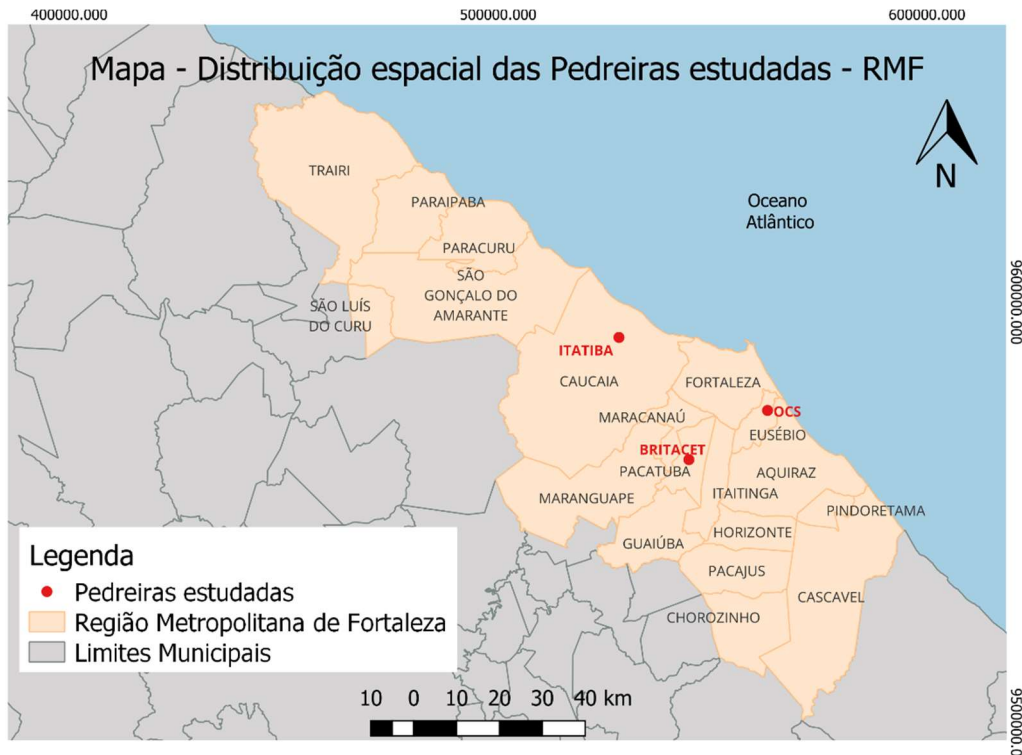
Tabela 7: Reservas utilizadas na produção de pedra britada na RMF

Município	Unidade litológica	Número de áreas	Reservas medida (t)
Itaitinga	Granitóides NPy e NPγ	8	54.839.776

Caucaia	Granitóides NPy e NPy	4	31.735.492
Maranguape	Paragnaisses e granitóides	1	21.350.400
Pacatuba	Paragnaisses e granitóides	3	19.228.756
Eusébio	Vulcânicas alcalinas	1	3.467.525
Maracanaú	Paragnaisses e granitóides	2	11.017.853
Total		19	141.639.801

Fonte: Cavalcanti e Parahyba, 2012.

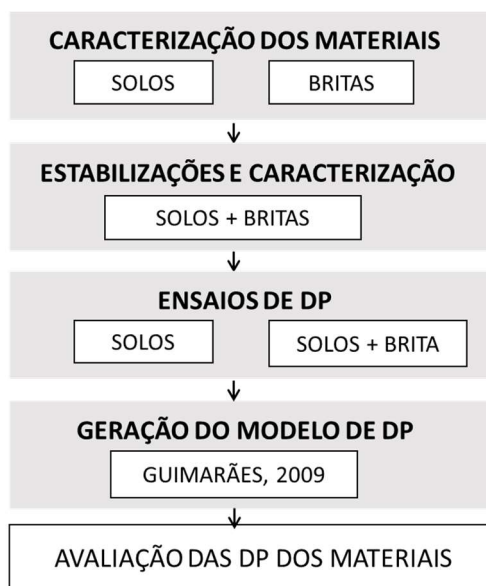
Figura 24: Mapa das pedreiras da RMF selecionadas para o estudo



3.3.2 Método

Buscando-se atingir os objetivos pré-estabelecidos nesta pesquisa, adotou-se uma sequência metodológica composta de cinco etapas, conforme pode ser observado na Figura 25.

Figura 25: Fluxograma do Método proposto.



Fonte: Autoria própria, 2023.

As etapas metodológicas consistiram resumidamente em:

i) Caracterização e estabilização dos materiais

A caracterização física e mecânica dos solos que serão estabilizados foi previamente realizada pela autora no Capítulo 2 desta Tese. Assim, neste artigo serão abordados tanto a caracterização das britas amostradas, quanto a estabilização das misturas realizadas com esses materiais. As proporções usadas na dosagem das misturas aqui realizadas foram baseadas no método gráfico de Rothfuchs, que leva em consideração as curvas granulométricas de cada material e a faixa granulométrica desejada para a mistura.

Considerando que as amostras de solo foram previamente caracterizadas, fisicamente e mecanicamente, resta ainda caracterizar os agregados e misturas. Assim, foram realizados os ensaios básicos de caracterização física, MR das misturas, além do ensaio de DP tanto para os solos, quanto para as misturas de solo-brita.

ii) Ensaio de DP

Baseado no estado da arte, selecionou-se duas metodologias de ensaio para obtenção de dados da DP em solos com ensaios triaxiais de carga repetida, uma demorada (a brasileira com aplicação de no mínimo 150.000 golpes) e outra mais rápida (a europeia com aplicação de 10.000 ciclos). Inicialmente, com o intuito de analisar e entender os diferentes procedimentos, todos os solos foram ensaiados com a norma brasileira. Depois, por praticidade e por perceber que 10.000 ciclos eram suficientes para estabilizar as

deformações, decidiu-se prosseguir nas misturas estabilizadas com solo-brita somente com a aplicação da norma europeia (CEN – EN. 13286–7, 2004).

A norma CEN – EN. 13286–7 (2004), especifica que em cada sequência de ensaios, o corpo de prova (CP) seja submetido a pelo menos três estágios (pares de tensão), para que possa ser gerado um modelo. Todavia, com o intuito de melhor entender as influências das tensões no deslocamento, preferiu-se adotar 6 pares de tensões para os ensaios do solo. Destaca-se que em ambas as normas, as técnicas de moldagem dos CP e arranjo do equipamento de ensaio são os mesmos do ensaio de MR.

O procedimento do preparo das amostras para os ensaios de DP e MR, consiste primeira na homogeneização do material e o acondicionamento em sacos plásticos fechados por um período mínimo de 24 horas. Em seguida a amostra é compactada mecanicamente em cilindro tripartido de dimensões de 10 cm de largura e 20 cm de altura, na energia intermediária de compactação. Depois desmonta-se o cilindro e reveste o corpo de prova com uma membrana de borracha. Assim, o corpo de prova é disposto em uma pedra porosa no equipamento triaxial, o qual é posicionando os LVDT's (transdutor de deslocamento variável linear) para leituras e registros dos golpes e das deformações associadas. O ensaio finaliza ao final do número de golpes desejado ou rompimento do corpo de prova.

Alguns ensaios tiveram que ser interrompidos com número de ciclos inferiores a esse. O principal motivo das interrupções foi o rompimento de alguns CP com o incremento na intensidade das tensões, as quais os solos ou as misturas estabilizadas eram submetidas. O procedimento europeu (CEN – EN. 13286–7, 2004) estabelece a interrupção do teste quando a DP axial atinge 0,5% em cada estágio antes do carregamento total, prosseguindo com o par de tensão seguinte.

Foram testadas 10 amostras de solos que passaram no ensaio de Módulo de Resiliência, e para cada ensaio foi utilizada uma amostra diferente, logo foram moldados pelo menos 60 CP, o que demandou cerca de 120 dias para execução dos ensaios. Ressalta-se, ainda, que muitos CPs precisaram ser refeitos por problema de moldagem ou falha no equipamento, que não permitiram a finalização do ensaio.

Assim como ocorreu para os solos, para as misturas estabilizadas com solo e brita também foi demandado um grande esforço amostral. Devido ao fato que, das 15 misturas propostas, em apenas 7 foi possível concluir o ensaio de MR, só essas foram submetidas ao ensaio de DP. Visto que não era necessário um grande número de golpes, pois as deformações no solo se estabilizaram antes dos 10.000 ciclos. Para os ensaios de DP com

as misturas estabilizadas, adotou-se a norma europeia, que consiste num ensaio mais prático, com apenas 10.000 ciclos. Também foram reduzidos os números de pares de tensões para 4, e utilizada a frequência de 2 Hz. Assim foram analisadas 10 misturas de solo-brita, sendo confeccionados e ensaiados pelo menos 40 CPs, desconsiderando os corpos de prova que tiveram problemas na confecção ou durante o ensaio. Essa etapa ocorreu em cerca de 60 dias.

Para cada amostra de solo foram ensaiados seis pares de tensões, conforme proposto por Lima *et al* (2020). A autora testou diversas combinações de estados de tensões em solos com diferentes classificações MCT, e determinou que as combinações de pares de tensão confinante/tensão desvio com maior acurácia, e logo utilizadas nesse estudo (Tabela 8). No caso das misturas estabilizadas, foram adotados os quatros primeiros pares de tensão dessa Tabela 8.

Tabela 8: Relação dos pares de tensões utilizadas no ensaio de Deformação Permanente dos solos

Tensão (kPa)		Número de ciclos
σ_d	σ_3	
40	40	150000
120		
80	80	
240		
240	120	
360		

Fonte: Autoria própria, 2023.

iii) Geração do modelo de DP

Apesar de existirem diferentes modelos e equações cujo objetivo é descrever a deformação permanente de solos para a pavimentação, optou-se aqui pelo uso do modelo utilizado pela norma DNIT 179/2018-IE, desenvolvido por Guimarães (2009) e representado pela Equação 3, na qual os parâmetros ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , ψ_4 são obtidos com o auxílio do Microsoft Excel, embora possam ser usados diversos *softwares* estatísticos para este fim.

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (3)$$

Onde:

ε_p (%) é a deformação permanente específica;

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

σ_3 é a tensão confinante;

σ_a é a tensão desvio;

ρ_0 é a tensão de referência (tensão atmosférica);

N é o número de ciclos de aplicação de carga.

iv) Avaliação dos resultados de DPs dos materiais:

Esta etapa consistiu na busca de correlações entre os dados obtidos durante o programa experimental, visando-se avaliar a existência de tendências no comportamento dos solos e das misturas estabilizadas com solo e brita.

3.4 Apresentação e Análise de Resultados

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a esta investigação.

3.4.1 Quanto aos Materiais granulares

As amostras de solos foram previamente caracterizadas, tanto fisicamente quanto mecanicamente pela autora. A Tabela 9 mostra um resumo das principais propriedades geotécnicas das amostras de solo, que passaram no ensaio de MR e DP. Ressalta-se que as Amostras de solo 10 e 12 passaram no ensaio de Módulo de Resiliência, mas não no ensaio de Deformação Permanente, por isso não constam na Tabela 9.

Tabela 9: Características e parâmetros dos solos da RMF.

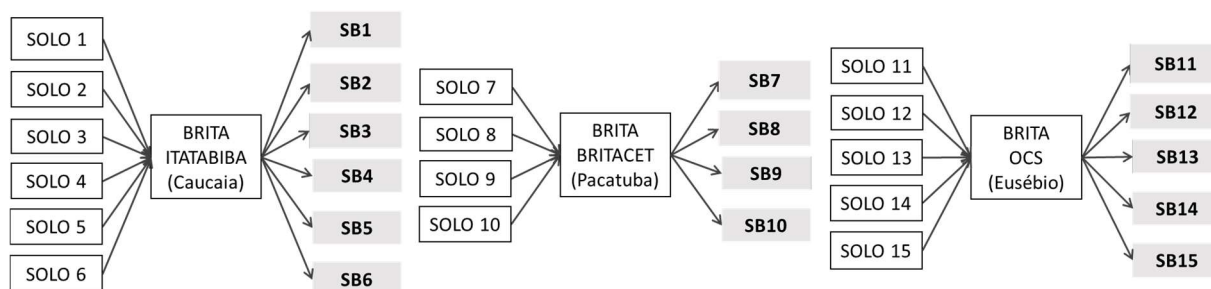
	SOLO 3	SOLO 4	SOLO 5	SOLO 7	SOLO 9	SOLO 14	SOLO 15
DEN	1,638	1,984	1,95	1,995	2,014	1,93	1,95
AASHTO	A-7-6	A-2-6	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-6	A-2-4

CBR (%)	0	20	33,5	13,6	22,6	10	8,2
Mr méd (Mpa)	505	162	495	412	455	872	384
R²	0,916833	0,898905	0,8515	0,949665	0,583096	0,861611	0,359776
K1	3,759743	69,86808	256,6514	21,89342	316,4019	10,42478	608,6629
K2	0,669187	0,184795	0,5826	0,983641	0,291487	-0,11758	0,409949
K3	-2,51865	-0,58361	-0,96792	-2,34218	-0,59489	-1,93084	-0,30936

Fonte: Autoria própria, 2023.

Com o intuito de se obter materiais com maior rigidez para uso em camadas mais nobres do pavimento, foram geradas misturas estabilizadas com as 3 amostras britas e os solos amostrados. Para otimização das composições das misturas foram escolhidas as britas de acordo com a proximidade da localização dos solos, sendo feita a associação representada na Figura 26.

Figura 26: Misturas estabilizadas: Solo-brita



Fonte: Autoria própria, 2023.

As proporções usadas para dosar as misturas de solo e brita basearam-se no método gráfico de Rothfuchs, que resultaram nas porcentagens de materiais descritas na Tabela 10. Reuniram-se a essas composições de misturas, os valores de CBR e MR das misturas que passaram no ensaio triaxial de cargas repetidas para obtenção do MR.

Tabela 10: Características das misturas de Solo-Brita.

Mistura	Solo (%)	Brita (%)	Composição	CBR (%)	MR méd (Mpa)
SB 3	60	40	60S + 40B	2	251
SB 4	60	40	60S + 40B	22	229
SB 5	40	60	40S + 60B	45	219
SB 7	60	40	60S + 40B	79	284
SB 8	60	40	60S + 40B	42	225

SB 11	50	50	50S + 50B	18	221
SB 13	50	50	50S + 50B	106	317

Fonte: Autoria própria, 2023.

3.4.2 Avaliação da Deformação permanente (DP)

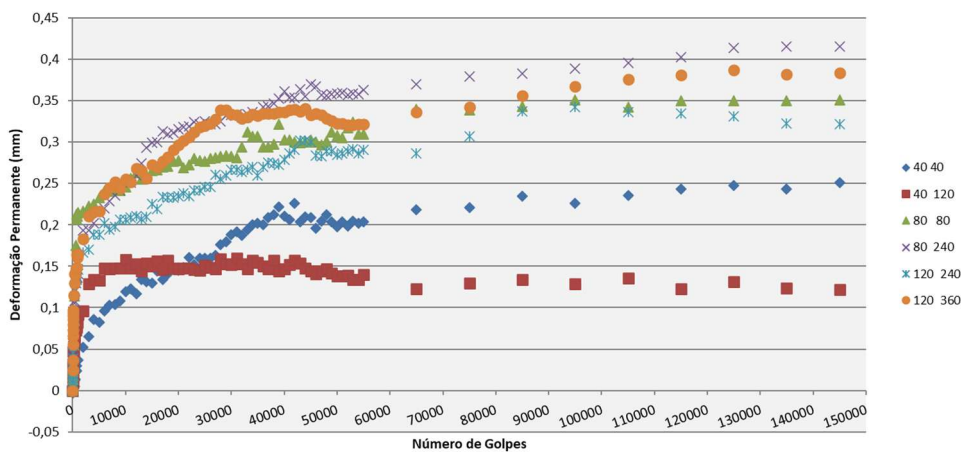
Essa etapa foi dividida em duas partes, de acordo com os materiais ensaiados:

i) Solos

Tem-se, do Capítulo 2 desta Tese, que das 15 amostras de solos ensaiadas no triaxial, 5 delas não passaram da etapa de condicionamento, não podendo ter um valor de MR. Dentre essas amostras, haviam solos classificados com A-3 e A-2-4. As 10 amostras restante de solos, que puderam finalizar o ensaio de MR, foram submetidos também ao ensaio de DP, entretanto apenas 7 amostras obtiveram resultados de pelo menos 3 pares de tensões, o que permitiu gerar um modelo de DP.

Para facilitar a visualização desse fenômeno, os resultados gráficos dos ensaios de DP estão apresentados nas Figuras 27 a 33. Reforça-se que, em alguns casos, houve a necessidade de repetição dos ensaios de DP, quer devido à ocorrência de problemas técnicos durante a execução do ensaio, quer pela obtenção de resultados inesperados.

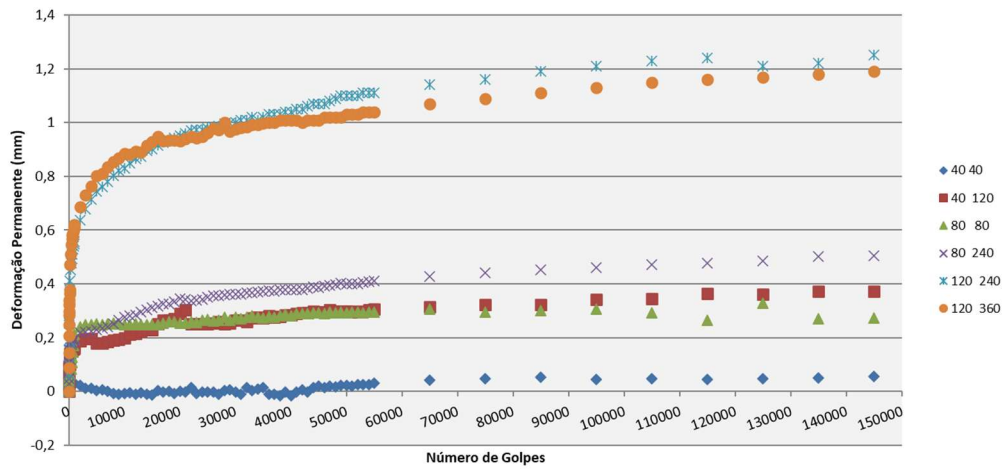
Figura 27: Deformação permanente da Amostra do Solo 3.



Fonte:

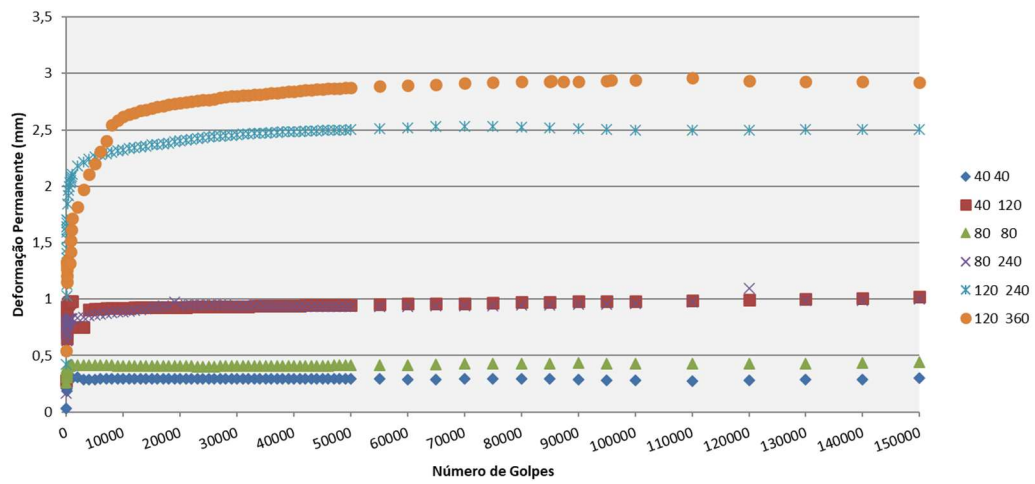
Autoria própria, 2023.

Figura 28: Deformação permanente da Amostra do Solo 4.



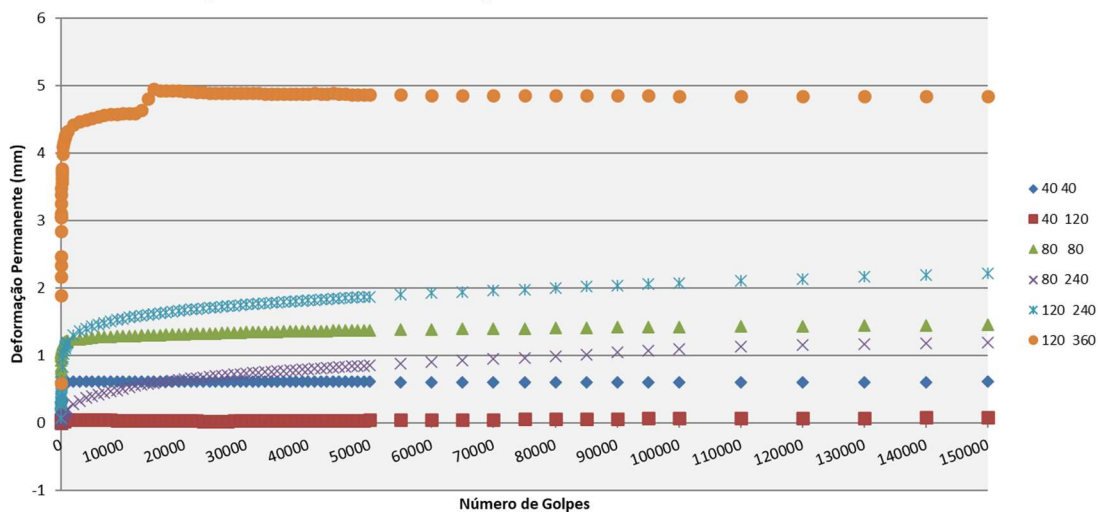
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 29: Deformação permanente da Amostra do Solo 5.



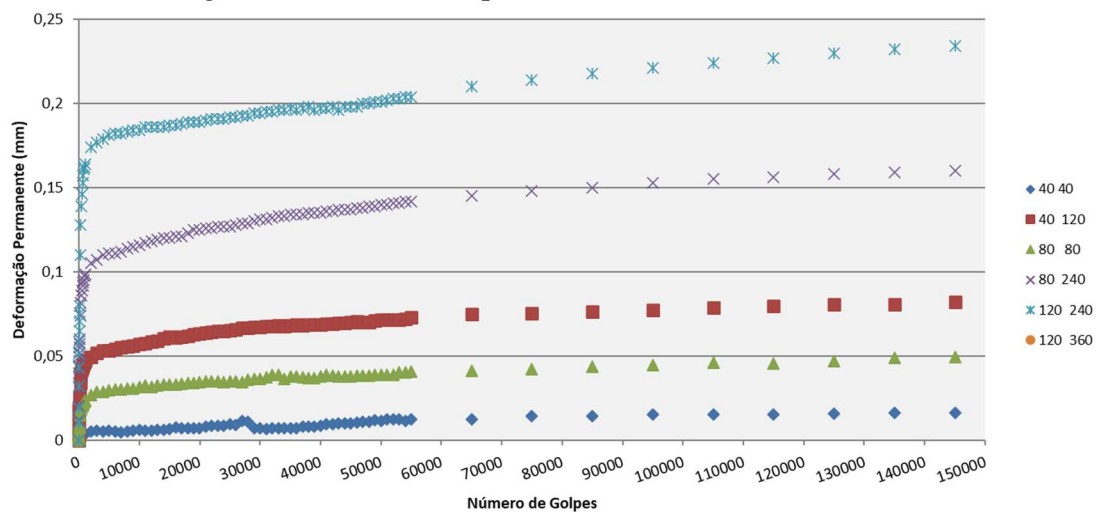
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 30: Deformação permanente da Amostra do Solo 7.



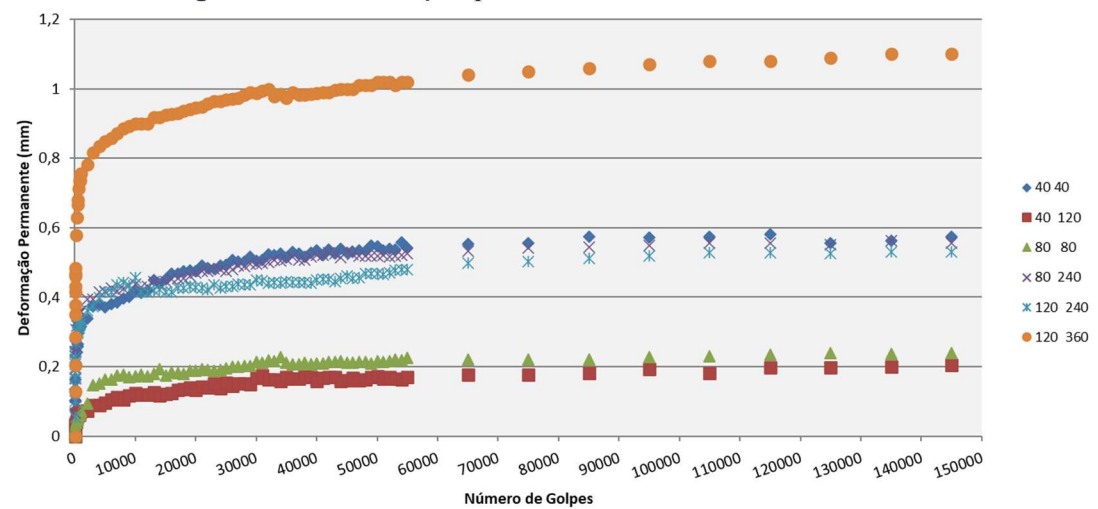
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 31: Deformação permanente da Amostra do Solo 9.



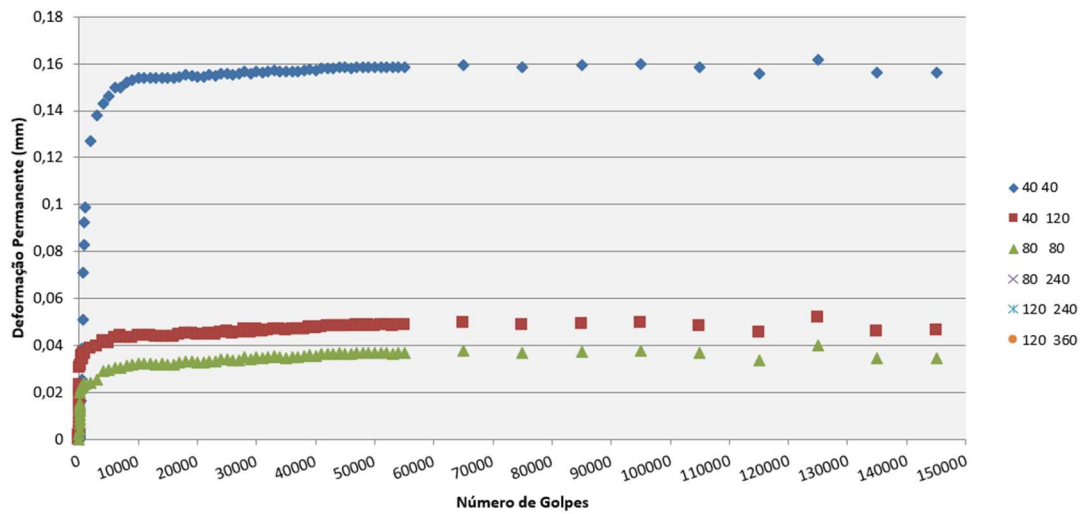
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 32: Deformação permanente da Amostra do Solo 14.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 33: Deformação permanente da Amostra do Solo 15.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A partir dos gráficos de deformação dos solos, percebe-se que os deslocamentos, em geral, foram aumentando à medida que as tensões aumentavam. O último par de tensão (120,360) foi o mais significativo, com uma diferença bem visível em relação aos demais pares. De acordo com Odermatt (2000) e Guimarães (2001), pode-se considerar que o acréscimo da tensão desvio gera um aumento da DP total. Porém, considerando apenas a influência da tensão confinante, observa-se um aumento da deformação apenas na diminuição dessa. Nota-se assim que pares com grande diferença entre as tensões, como 80,240 e 120, 240, também geraram uma grande deformação, resultando na maior curva em alguns casos, como nas Amostras de Solo 3 e 4. A Amostra de Solo 9 não suportou o último par de tensão, mas seu comportamento nos demais pares se assemelhou às demais amostras, por sua vez a Amostra de Solo 15 só suportou 3 pares de tensões, os mais baixos, refletindo a sua fragilidade. A fim de se verificar o desenvolvimento da deformação permanente nas amostras selecionadas de solos foi gerado a Tabela 11.

Tabela 11: Resultados dos Ensaios de Deformação Permanente – Amostras de solos.

SOLO	Tensão (kPa)		ϵ_1 (mm)	ϵ_{10000} (mm)	ϵ_{80000} (mm)	ϵ_{150000} (mm)	$\epsilon_1/\epsilon_{10000}$ (%)	$\epsilon_{10000}/\epsilon_{80000}$ (%)	$\epsilon_{80000}/\epsilon_{150000}$ (%)
	Σd	σ_3							
S 3	40	40	-0,003	0,119	0,221	0,251	-2,51	53,85	88,05
	80		0,012	0,158	0,130	0,122	7,59	121,54	106,56
	80	80	0,001	0,246	0,339	0,351	0,53	72,57	96,58
	240		0,028	0,251	0,379	0,416	11,12	66,23	91,11
	240	120	0,005	0,206	0,307	0,322	2,61	67,10	95,34
	360		0,025	0,255	0,342	0,384	9,65	74,56	89,06
S 4	40	40	0,000	-0,001	0,005	0,005	-59,677	-14,15	88,28
	80		0,002	0,020	0,032	0,037	9,747	61,11	87,10
	80	80	0,001	0,025	0,030	0,027	2,257	84,41	108,06
	240		0,003	0,028	0,044	0,050	10,072	62,59	87,50
	240	120	0,006	0,083	0,116	0,125	7,759	71,55	92,80
	360		0,009	0,088	0,109	0,119	10,124	81,10	91,60
S5	40	40	0,032	0,295	0,292	0,303	10,847	101,03	96,37
	80		0,280	0,923	0,971	1,019	30,336	95,06	95,29
	80	80	0,258	0,410	0,430	0,439	62,927	95,35	97,95
	240		0,168	0,888	0,945	0,998	18,919	93,97	94,69
	240	120	0,425	2,312	2,533	2,505	18,382	91,28	101,12
	360		0,545	2,618	2,929	2,922	20,817	89,38	100,24
S7	40	40	0,112	0,614	0,604	0,607	18,241	101,66	99,51
	80		-0,002	0,036	0,055	0,079	-5,556	65,45	69,62
	80	80	0,277	1,285	1,407	1,451	21,556	91,33	96,97
	240		-0,011	0,499	0,984	1,195	-2,204	50,71	82,34
	240	120	0,072	1,542	1,999	2,211	4,669	77,14	90,41
S9	40	40	0,000	0,006	0,014	0,016	0,197	42,52	88,27
	80		0,003	0,057	0,075	0,082	5,026	75,93	91,71
	80	80	0,001	0,032	0,042	0,050	2,069	75,18	85,28
	240		0,012	0,116	0,148	0,160	10,086	78,38	92,50
	240	120	0,010	0,184	0,214	0,234	5,598	85,98	91,45
S14	40	40	0,000	0,419	0,556	0,574	0,115	75,36	96,86
	80		0,007	0,123	0,176	0,204	5,545	69,89	86,27
	80	80	0,000	0,172	0,221	0,240	0,000	77,83	92,08
	240		0,067	0,438	0,543	0,556	15,251	80,66	97,66
	240	120	0,054	0,457	0,503	0,530	11,904	90,85	94,91
	360		0,128	0,900	1,050	1,100	14,222	85,71	95,45
S15	40	40	0,000	0,154	0,159	0,156	0,311	97,10	101,41
	80		0,002	0,044	0,049	0,046	3,895	90,52	104,75
	80	80	0,002	0,032	0,037	0,035	7,236	87,50	106,36

Fonte: Autoria própria, 2023.

A Tabela 11 dispõe dos valores da DP total, ou seja, após a primeira carga (ϵ_1) e a deformação acumulada com 10.000 ciclos (ϵ_{10000}), 80.000 ciclos (ϵ_{80000}) e 150.000 ciclos (ϵ_{150000}). Consta ainda o acúmulo de deformação permanente em 6,67% das

cargas aplicada ($\epsilon 1/\epsilon 10000$), 53,33% das cargas aplicada ($\epsilon 10000/\epsilon 80000$) e com 100% da carga aplicada ($\epsilon 80000/\epsilon 150000$).

O acúmulo total de deformação permanente concentrou-se em todos os ensaios realizados nas primeiras 80.000 aplicações de carga, o que indica que após este período as misturas tendem a se estabilizar. Observa-se que em praticamente todos os ensaios realizados o acúmulo de deformação permanente com 100% da carga aplicada ($\epsilon 80000/\epsilon 150000$) foi acima de 80%, demonstrando que a deformação permanente se concentrou nos primeiros 10.000 ciclos.

Constata-se, pela observação das tabelas e gráficos apresentados, que os deslocamentos máximos obtidos nos ensaios são considerados baixos e similares a estudos recentes como o de Barros *et. al* (2019), Cabral (2021), Lima (2016), Lima *et al* (2020) e Norback e Motta (2017). Observou-se ainda que entre as amostras de solos que apresentaram menores deformações, havia solos das classes A-7-6 e A-6, e estes estão associados aos maiores MR médios determinados, 500MPa a 870MPa. Essa classificação está associada aos solos argilosos, confirmando os estudos de Monismith *et al.* (1975), que indicaram que uma série de aplicações de tensões (desvio e confinantes) na argila siltosa pode produzir um considerável efeito de enrijecimento do material.

A amostra de solo, com classificação AASHTO A-2-6, também apresentou um deslocamento baixo, mas um MR baixo também. As demais amostras de solos são da classe A-2-4 e apresentam resultados diversos, não tendendo a um comportamento padrão.

Analisando-se as amostras ensaiadas e utilizando o modelo de Guimarães (2009), adotado na instrução de ensaio de deformação permanente do DNIT(2018) e, também no programa MeDiNa, pode-se extrair os seguintes coeficientes do modelo de deformação permanente dos solos, conforme Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros de regressão obtidos nos ensaios de deformação permanente das amostras de solos da RMF.

Amostras de Solos	R ²	Erro	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4
3	0,99	0,00014	0,07133681	0,90050268	0,11114707	0,07180902
4	0,87	0,02567	0,36036167	2,57561603	0,34144565	0,00193091
5	0,70	0,22655	7,33062073	2,29462763	0,27975757	0,00323257
7	0,89	0,05010	0,40704021	0,96595630	1,05494535	0,00195672
9	0,87	0,09743	0,71217585	1,77624987	0,65119002	0,00199112
14	0,67	0,03091	0,18412734	-0,15818640	0,54796247	0,00192039
15	0,99	0,01112	0,06753012	-1,43615953	-1,17015135	0,00199096

Fonte: Autoria própria, 2023.

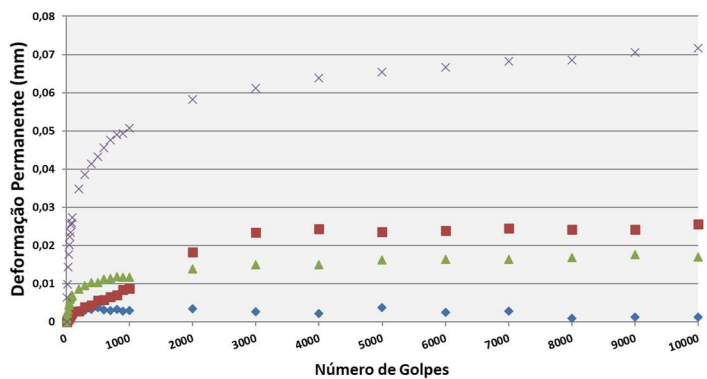
Como pode ser observado os altos coeficientes de determinação (R^2), em geral superiores a 0,87, indicam ajustes bastante satisfatórios, o que parece indicar que o modelo de Guimarães (2009) é capaz de prever o comportamento plástico dos solos locais. Os parâmetros referentes à tensão desvio, Ψ_3 , apresentaram valores, no geral, positivos, assim como o Ψ_2 , referente à tensão confinante, sendo maior a influência deste confinamento em relação aos outros parâmetros. Para o número de ciclos de carga, o Ψ_4 , vê-se que exerce influência muito mais baixa do que a influência das tensões.

ii) Solo-Brita

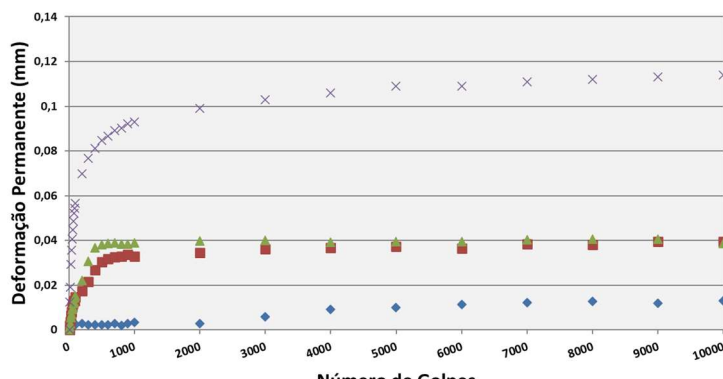
Como constatado no Capítulo 2 desta Tese, das 15 amostras de solos coletadas, foram geradas 15 misturas de solo com brita, contudo, 8 delas possuíam baixa coesão, motivo pelo qual não foi possível finalizar o ensaio para obtenção do MR. Das 7 misturas restante, para os quais obteve-se o MR, 4 foram com amostras de solos que passaram no MR e 3 com solos que não obtiveram desempenho adequados sozinhos, mas quando adicionada a brita, pode ter um resultado mais satisfatório em camadas granulares de pavimentos.

A fim de facilitar a visualização da deformação permanente, os gráficos dos ensaios estão apresentados na Figura 34.

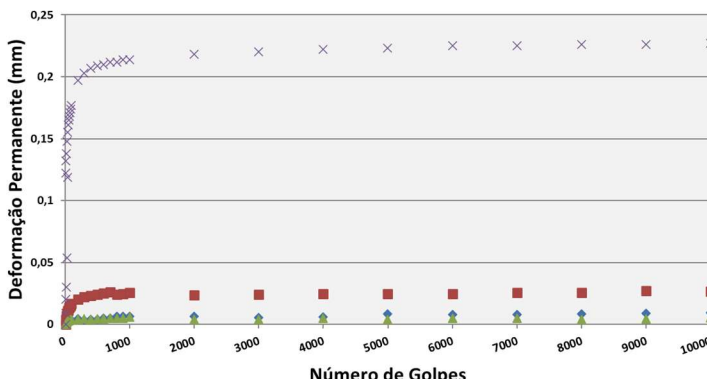
Figura 34: Deformação Permanente - Misturas Solo-Brita.



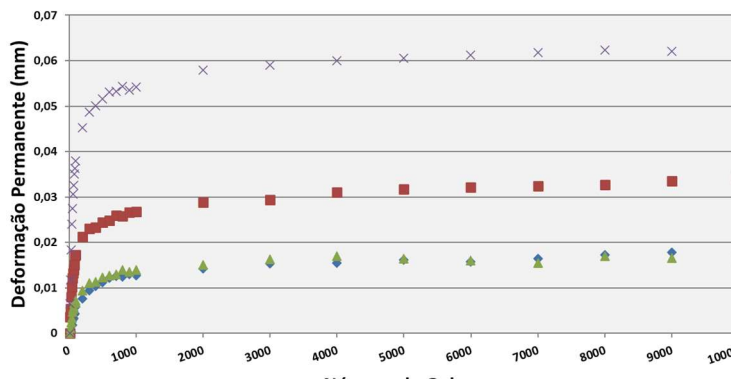
Solo Brita 3



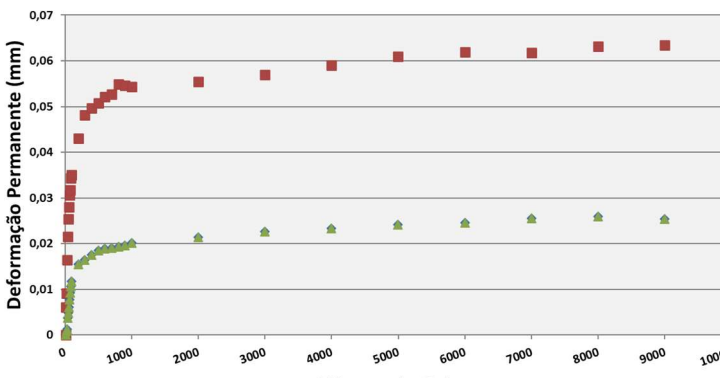
Solo Brita 4



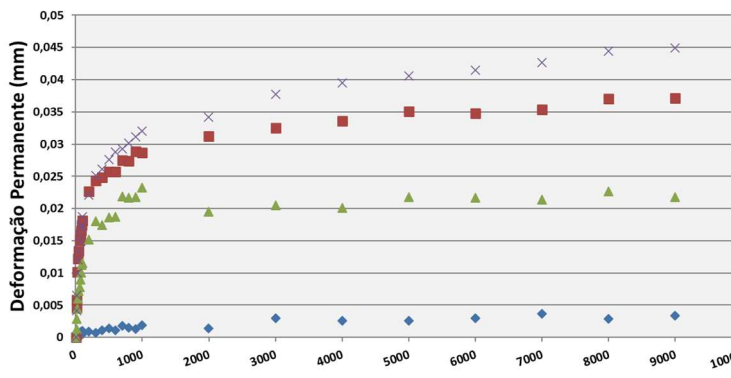
Solo Brita 5



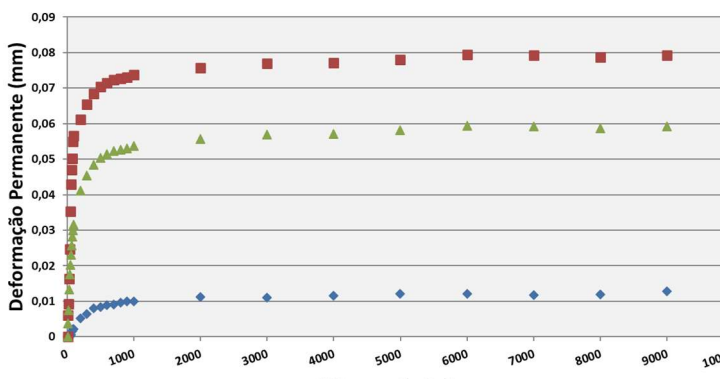
Solo Brita 7



Solo Brita 8



Solo Brita 11



Solo Brita 13

Legenda

- ◆ 40 40
- 40 120
- ▲ 80 80
- × 80 240
- × 120 240
- 120 360

Fonte: Autoria própria, 2023.

A partir dos gráficos de DP, das misturas ensaiadas, observa-se que esses materiais apresentaram uma tendência ao acomodamento das deformações com o acréscimo do número de aplicação de cargas. As maiores deformações foram atingidas com o par de tensão 80, 240, que possui uma relação entre tensões de 3 vezes. As misturas SB8 e SB13 não suportaram essas tensões, finalizando o ensaio com 3 pares, e tendo o maior deslocamento com o par 40,120, que, aliás, também possui uma diferença entre as tensões em 3 vezes. Os deslocamentos máximos dessas misturas variaram de 0,046mm a 0,23mm, valores bem mais baixos que os deslocamentos das amostras de solos.

As Amostras de Solos 3, 4, 5 e 7 foram analisadas tanto isoladamente, adicionadas de brita, assim, pode comparar os valores de deformação permanente para avaliar o desempenho desse incremento de brita. A Tabela 13 resume os valores das deformações correspondentes e a redução ou elevação entre os materiais analisados.

Tabela 13: Deformação permanente Solo x Solo-Brita.

Tensão (kPa)	Σd	σ_3	S3	SB3	Redução	S4	SB4	Elevação	S5	SB5	Redução	S7	SB7	Redução
			(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)
40	40		0,12	0,00	98,87	0,00	0,01	105,21	0,30	0,01	96,81	0,61	0,02	97,18
80	40		0,16	0,03	83,73	0,02	0,04	50,00	0,92	0,03	97,12	0,04	0,03	3,89
80	80		0,25	0,02	93,09	0,02	0,04	35,66	0,41	0,01	98,68	1,29	0,02	98,72
240	80		0,25	0,07	71,43	0,03	0,11	75,79	0,89	0,23	74,44	0,50	0,06	87,45

Fonte: Autoria própria, 2023.

Das 4 amostras de solos estudadas, 3 diminuiram a deformação permanente com o acréscimo de brita e essa redução foi, no geral, maior que 90%. Apenas a Amostra de Solo 4 não se beneficiou com o incremento de brita, e teve uma elevação da DP da mistura. Mas ressalta-se que apesar da diferença em termos percentuais ser alta, todos os valores obtidos ainda não considerados baixos.

Com o intuito de se verificar o desenvolvimento da deformação permanente nas misturas estabilizadas, a Tabela 14 concentra os valores da DP total, após a primeira carga (ϵ_1) e a DP acumulada com 6.000 ciclos (ϵ_{6000}) e 10.000 ciclos (ϵ_{10000}). Consta também o acúmulo de DP em 60% das cargas aplicada ($\epsilon_1/\epsilon_{6000}$) e com 100% da carga aplicada ($\epsilon_{6000}/\epsilon_{10000}$).

Tabela 14: Resultados dos Ensaios de Deformação Permanente - Solo-Brita

SOLO-BRITA	Tensão (kPa)		ϵ_1 (mm)	ϵ_{6000} (mm)	ϵ_{10000} (mm)	$\epsilon_1/\epsilon_{6000}$ (%)	$\epsilon_{6000}/\epsilon_{10000}$ (%)
	Σd	σ_3					
SB 3	40	40	0,000	0,002	0,001	1,45	185,82
	80		0,000	0,024	0,026	1,05	93,00
	80	80	0,001	0,016	0,017	6,05	96,47
	240		0,006	0,067	0,072	9,59	92,89
SB 4	40	40	0,001	0,012	0,013	5,30	87,79
	80		0,002	0,037	0,040	5,40	92,17
	80	80	0,002	0,039	0,039	3,88	101,81
	240		0,013	0,109	0,114	11,56	95,61
SB 5	40	40	0,000	0,008	0,009	4,01	85,55
	80		0,004	0,025	0,027	16,79	93,61
	80	80	0,001	0,005	0,005	10,40	93,19
	240		0,152	0,225	0,227	67,64	99,12
SB 7	40	40	0,000	0,016	0,017	0,00	91,33
	80		0,004	0,032	0,035	11,18	92,77
	80	80	0,000	0,016	0,016	0,38	97,56
	240		0,007	0,061	0,063	10,62	97,76
SB 8	40	40	0,000	0,025	0,031	0,00	80,39
	80		0,006	0,062	0,065	9,79	95,67
	80	80	0,000	0,025	0,031	0,00	80,39
SB 11	40	40	0,000	0,003	0,003	11,80	86,73
	80		0,005	0,035	0,038	13,16	91,10
	80	80	0,001	0,022	0,022	6,13	98,19
	240		0,004	0,042	0,046	9,93	89,83
SB 13	40	40	0,000	0,012	0,013	0,00	90,30
	80		0,006	0,080	0,082	7,62	97,19
	80	80	0,004	0,059	0,060	6,28	99,66

Fonte: Autoria própria, 2023.

O acúmulo total da deformação permanente concentrou-se em todos os ensaios realizados nas primeiras 6.000 aplicações de carga, indicando que após este período as misturas tendem a se estabilizar, como aconteceu com os solos. Utilizando o modelo do Guimarães (2009), pode-se gerar os seguintes coeficientes do modelo de deformação permanente das misturas ensaiadas, conforme Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetros de regressão obtidos nos ensaios de deformação permanente das misturas de Solo-Brita – RMF.

Solo - Brita	R ²	Erro	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4
3	0,87	0,0012	0,3065	1,0395	-0,0093	-0,0243
4	0,84	0,0307	0,0717	-0,8107	2,1290	0,0019
5	0,99	0,0036	0,0180	-1,2229	4,4147	0,0030
7	0,85	0,0086	0,0503	-1,0951	1,7468	0,0019
8	0,75	0,0186	0,0198	-2,8527	0,5218	0,0019
11	0,83	0,0072	0,0440	-1,2932	1,5286	0,0019
13	0,94	0,0066	0,3003	8,5000	-7,4382	0,0012

Fonte: Autoria própria, 2023.

Observa-se que os valores do coeficiente de correlação R² podem ser considerados satisfatórios, apresentando valores acima de 0,75. Os valores de Ψ_2 , referente à tensão confinante, foram, em geral, positivos para os solos e negativos para as misturas de solo-brita, indicando que o confinamento atua de forma diferenciada para os materiais estabilizados, diminuindo a deformação permanente com o aumento do confinamento. Por sua vez, os parâmetros referentes à tensão desvio, Ψ_3 , no geral todos apresentaram valores positivos, como esperado visto que a tensão vertical é a principal responsável pela deformação permanente. Em relação aos parâmetros encontrados para o número de ciclo de carga, o Ψ_4 , todos os valores foram muito próximos, exercendo influência semelhante para os materiais.

A partir disso, pode-se concluir que quando a tensão confinante (parâmetro Ψ_2) resulta em valores negativos, parece indicar uma menor influência nas deformações permanentes, ocorrendo o inverso para a tensão desvio (parâmetro Ψ_3), que exerce maior influência no aumento das deformações permanentes acumuladas, ou seja, quanto maior for a tensão desvio em relação a tensão confinante, maiores serão as deformações permanentes resultantes.

3.5 Considerações finais

O objetivo principal desse estudo foi analisar a deformação permanente de materiais granulares disponíveis para uso em pavimentos da Região Metropolitana de Fortaleza – CE, para o desenvolvimento de modelos a serem usados em métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos de pavimentos.

Diante dos procedimentos realizados, análises e avaliações desenvolvidos, este estudo demonstrou a eficiência da metodologia europeia simplificada de laboratório para obtenção e entendimento da ocorrência de DP em materiais granulares da RMF, reduzindo-se o tempo de execução dos ensaios e recursos. Assim, é possível obter valores de DP da camada de um pavimento para mais pares de tensões em um período de tempo menor. Considerando a frequência de 2Hz, o resultado para cada par de tensão pode ser obtido em cerca de 2 horas, quando utilizado 10.000 ciclos e cerca de 21 horas, quando utilizado 150.000 ciclos.

Quanto aos materiais estudados, observou-se que o material estabilizado apresentou um desempenho mais satisfatório em relação ao solo isolado, mas ambos com valores de deformação baixo. Além disso, percebeu-se que para algumas amostras de solos, não foi possível finalizar os ensaios para obtenção de MR e DP, mas ao serem adicionados de brita, tornaram-se misturas, nas quais foi possível concluir o ensaio. Por sua vez, outras amostras de solos isolados obtiveram resultados satisfatórios, mas ao serem estabilizados, não conseguiram manter o mesmo desempenho, uma vez que a adição de brita deixou os solos menos coeso, logo mais frágil e sujeitos à ruptura. Entende-se então, que o material conveniente para a pavimentação precisa desse equilíbrio entre resistência e coesão, produzindo misturas mais compactas e resistentes.

O modelo de deformação permanente proposto por Guimarães (2009) demonstrou-se eficaz para descrever o comportamento dos materiais da região estudada, com a maioria dos solos com valores de R^2 acima de 0,90. Pode-se perceber também que 4 pares de tensões gera um modelo de equação bastante representativo.

Com a obtenção das equações representativas da DP e do MR, é possível realizar dimensionamentos mecanístico-empíricos de pavimentos rodoviários em programas como o CAP 3D-D e MeDiNa. Para ampliar o conhecimento sobre o comportamento dos materiais que compõe as camadas granulares de um pavimento, esta pesquisa disponibiliza parâmetros de DP de materiais caracterizados físico e mecanicamente. e também, georreferenciados, que parecem ser variáveis independentes (dados de entrada) para dimensionamentos de projetos rodoviários locais mais racionais.

Acredita-se, assim, que os resultados produzidos neste trabalho, tanto são dados essenciais para aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos (Medina), quanto serão de significativa contribuição para os órgãos rodoviários e profissionais da área de infraestrutura de transporte da RMF.

4 UM CATÁLOGO SIMPLIFICADO DE ESTRUTURAS PADRÕES, BASEADO NO MEDINA, PARA PAVIMENTOS FLEXÍVEIS NA RMF

RESUMO

No Brasil, o modal rodoviário é responsável pelo transporte de mais de 65% das cargas e por 95% da de passageiros. Destaca-se também que a maioria das rodovias brasileiras são construídas com pavimento flexível, cerca de 99,0% (CNT, 2022). Ciente da significativa importância desse modal e com o propósito de apoiar o desenvolvimento do setor, os Catálogos de Dimensionamento de Pavimentos buscam ampliar as possibilidades na escolha das estruturas dos projetos rodoviários e facilitar o acesso do corpo técnico as novas técnicas desenvolvidas, assim como o próprio método de dimensionamento de pavimentos. Embora o CBR seja o parâmetro de rigidez usado no método de dimensionamento empírico convencional (Souza, 1981) de estruturas dos pavimentos, o Medina (DNIT, 2018) é o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos, de concepção mecanístico-empírica, usa como parâmetros principais de rigidez o módulo de resiliência e a deformação permanente dos materiais. Diante disto, objetivo principal desta pesquisa foi desenvolver um catálogo de estruturas padrão de pavimentos flexíveis, dimensionados através do Medina e, baseado no comportamento geotécnico dos solos locais e no tráfego atuante na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Para tanto concebeu-se tanto um esforço amostral, no qual foram coletados solos e britas na RMF, assim como um programa experimental para caracterização física e mecânica (MR e DP) dos materiais coletados. E por fim, foram produzidas fichas catalográficas a partir de diversos testes e simulações realizadas no *software* MeDiNa. Para reconhecimento do subleito natural e de materiais disponíveis para obras rodoviárias da RMF, foram extraídos solos localizados em Jazidas e taludes naturais dentro do limite da área de estudo. Os materiais coletados, solo e misturas de solo-brita foram submetidos aos ensaios de caracterização básica e o triaxial de cargas repetidas, o MR e a DP, e assim obtidos os parâmetros necessários para implantação na simulação. Visando um melhor aproveitamento dos materiais locais a RMF foi dividida em três sub-regiões, Norte, Central e Sul. Para simulação das estruturas de pavimento, em função do subleito e do tráfego, o subleito foi classificado de acordo com as classes AASTHO e, o tráfego pela classificação de Bastos (2016). O revestimento utilizado nas simulações foram *default* do programa, sendo utilizado TSD para baixo volume de tráfego e CA de classe 4 para o demais tráfego. Para as camadas granulares foram testados os solos e as misturas de solo-brita. A análise das estruturas baseou-se na avaliação da área trincada e do afundamento do trilho de roda máximo permitido para cada tipo de via estudada. Constatou-se, durante as simulações, que no geral as misturas estabilizadas não agregaram no desempenho do pavimento. Para algumas sub-regiões da RMF, não foi possível obter estruturas com os materiais estudados para o tráfego extremamente elevado, o que foi contornado propondo-se o uso de cinza e cal conforme Vasconcelos (2018). Como resultado final, gerou-se um catálogo simplificado de estruturas padrão, para pavimentos flexíveis, dimensionados pelo Medina para a Região Metropolitana de Fortaleza – CE, sugerindo—se como um guia de referência rápida e preliminar para projetos rodoviários locais.

Palavras chave: Catálogo de pavimentos; Medina, RMF, DP, MR, CBR, AASHTO.

4.1 Introdução

Com o intuito de ampliar as possibilidades na escolha de estruturas para projetos rodoviários e facilitar o acesso do corpo técnico às novas técnicas desenvolvidas, alguns países desenvolvem catálogos de dimensionamento de pavimentos. Um catálogo de pavimentos (CDP) combina informações de tráfego com caracterização dos materiais disponíveis e permite o dimensionamento para várias combinações possíveis dos materiais nas camadas do pavimento. Essas metodologias, baseadas em princípios mecanístico-empíricos, podem ser tão mais ricas quanto forem a quantidade e a qualidade das informações existentes sobre as infraestruturas rodoviárias construídas.

Na Europa, segundo Soares, Moreno e Motta (2009), a tendência é investir na elaboração de catálogos de dimensionamento, para assim facilitar o uso das metodologias analíticas nas quais foram embasados. Países como a Inglaterra, Canadá, Portugal e Espanha são exemplos de nações que reconhecem o valor que os catálogos têm, mas talvez a França seja o maior exemplo desse tipo de iniciativa. O catálogo francês de dimensionamento de pavimentos é um dos mais completos, tanto na proposição de soluções para as camadas do pavimento, como na combinação dessas em estruturas diversas. Ele parte de um profundo mapeamento dos solos que incidem em seu território, assim, ao técnico cabe a responsabilidade apenas da definição da classe de via a ser construída, do tráfego previsto para o período de projeto e dos materiais disponíveis para a construção. Dessa forma a tomada de decisão do técnico é melhor planejada, pois os critérios e as possibilidades de cada solução ficam mais objetivos e claros.

No Brasil, também foram desenvolvidos alguns estudos sobre catálogos, como é o caso das propostas para o município de São Paulo – SP, Rio de Janeiro - RJ e Campo Grande – MS. Sabe-se que a principal fonte de pesquisas em pavimentação do Brasil vem das universidades nacionais ou parcerias entre indústria e órgãos rodoviários (ou concessionárias). Destaque-se que na bibliografia consultada, embora existam muitos estudos de caracterização de materiais granulares locais, não se encontrou estudo que proponha um catálogo de estruturas padrão, baseado em métodos mecanístico-empírico, para as Região Norte e Nordeste do Brasil.

Santiago (2017) realizou uma revisão sistemática pelas pesquisas de doutorado, defendidas no Brasil entre 1990 e 2015. A autora observou que a tendência nacional é de desenvolvimento de pesquisas voltadas para a caracterização de materiais (60% do total). Em segundo plano, ficam as pesquisas referentes ao desempenho de pavimentos, seja

estrutural ou funcional, com 23%. O restante fica dividido entre diversas temáticas, sendo: dimensionamento (4%), fatores ambientais (4%), Gestão de pavimentos (3%), tráfego (3%), automação (2%) e catálogos (1%). Assim, é possível perceber um descompasso no desenvolvimento de pesquisas, quando se considera a importância das várias temáticas citadas dentro do tema geral de dimensionamento de pavimentos.

A busca do equilíbrio acompanha a necessidade de se aprofundar nas diversas frentes. É nesse sentido que a pesquisa aqui apresentada busca, com base em experiência nacional e internacional, desenvolver uma sistemática ou orientação para os técnicos da área da pavimentação da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), em forma de um catálogo, de modo a auxiliar na escolha de estruturas de pavimentos flexíveis, baseado no comportamento geotécnico dos solos locais e do tráfego atuante.

4.2 Catálogos de pavimentos

Os catálogos de estruturas de pavimentos surgem como um procedimento simplificado para a concepção de pavimentos, uma vez que apresentam um conjunto de estruturas tipo, previamente dimensionadas, decorrentes da aplicação de critérios e métodos de dimensionamento de pavimentos, já estabelecidos no estado da arte e até da prática e, desenvolvidos com materiais específicos de um determinado território. Assim, torna-se mais fácil a definição das camadas do pavimento em virtude de uma gama maior de conhecimento de materiais que podem ser utilizados. Deve-se levar em consideração a facilidade de sua aplicação, assim, o manuseio do catálogo deve ser prático.

Um catálogo de pavimentos é uma metodologia que disponibiliza estruturas predefinidas como resposta para variados dados de entrada, quais sejam, as características de subleito e tráfego do local em que serão construídas, são apresentadas, na maioria das vezes, tabelas distintas com soluções de espessuras de camadas de pavimentos, a depender do tipo de material, para análise e escolha.

Historicamente, houve uma evolução no desenvolvimento dos catálogos de dimensionamento de pavimentos. Desde os anos 1970, algumas proposições de catálogos surgiram com destaque na Europa, como é o caso do Francês, do Espanhol e o Português. Esse método de dimensionamento ainda é bastante utilizado na Europa, o que acaba influenciando sua adoção por outros países. Os catálogos já desenvolvidos têm fundamental importância devido a experiência adquirida ao longo dos anos em sua utilização. A fim de contribuir para o desenvolvimento do próprio catálogo, aqui

proposto, buscou-se apresentar as peculiaridades de alguns catálogos internacionais no Quadro 1.

Quadro 1: Informações - Catálogos Internacionais.

País – Nome do catálogo	Principais Características
Alemanha – Diretrizes para normalização de pavimentos em estradas RStO 01 (2001, atualizado em 2011))	<ul style="list-style-type: none"> - Baseado em experiências e cálculos analíticos; - Dados de entrada: tráfego (EP de 10ton, com 7 categorias de tráfego); - Materiais: subleito $\geq 45\text{MPa}$. - Tempo de projeto: 30 anos
África do Sul – SAMPE: Manual de Engenharia de Pavimentos da África do Sul. Capítulo 10: Projeto de Pavimentos. (2014)	<ul style="list-style-type: none"> - Pavimentos flexíveis, rígidos e blocos de concreto; - Metodologia de dimensionamento empírico-mecanicista -Tráfego em função de níveis distintos de serviço, que são definidos em função da importância da estrada (A a D). -Materiais: o subleito, dividido em 3 categorias em função do CBR
Espanha – Norma 6.1-1C Seções de Pavimentos (2003)	<ul style="list-style-type: none"> - Dados de entrada: tráfego (8 categorias de tráfego) e subleito; - Materiais: 3 categorias do subleito, que são representados pelo módulo de compressibilidade; - As soluções para pavimentos asfálticos foram obtidas através de cálculos analíticos.
França - “Catálogo de estruturas tipo pavimentos novos” e “Guia de Dimensionamento de Pavimentos” (Analítico) (2003)	<ul style="list-style-type: none"> - Divide em soluções para rede estruturante e para rede não estruturante; - Dados de entrada: tráfego (representado pelo número de veículos passantes na faixa mais ocupada); - Materiais: 3 tipos de subleito e suas respectivas capacidades de suporte, cujos valores mínimos são tabelados;
Inglaterra - A guide to the structural design of bitumensurfaced roads in tropical and subtropical countries (1993)	<ul style="list-style-type: none"> - Pavimento flexível; - Dados de entrada: tráfego (8 categorias baseada no número N - Materiais: o subleito, dividido em 6 categorias em função do CBR

Quadro 2: Informações - Catálogos Internacionais (Continuação)

País – Nome do catálogo	Principais Características
Itália - Catálogo de pavimentos de estradas (1995)	<ul style="list-style-type: none"> - São 8 tabelas com diferentes tipos de pavimento, categorias de tráfego e 4 classes de subleito; - Dados de entrada: tráfego (representado pelo número de veículos passantes na faixa mais ocupada) e subleito; - Materiais: subleito com determinação do módulo de resiliência (MR) ou na impossibilidade deste o CBR. Os valores devem estar entre 30MPa ou 3% e 150MPa ou 15%; - Soluções obtidas a partir de análise elástico-linear.
Portugal - Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (1995)	<ul style="list-style-type: none"> - São 8 tipos de pavimento (asfáltico, semirrígido, de concreto com e sem armadura); - Dados de entrada: tráfego (8 categorias) e subleito; - Materiais: a capacidade de suporte do subleito é dada pelo Módulo de rigidez em função do valor do CBR; - As soluções do catálogo foram obtidas utilizando um procedimento mecanístico-empírico incorporando resistência a fadiga do revestimento e deformação permanente das camadas granulares. - Tempo de projeto: 20 anos
Reino Unido - Manual de projeto de estradas e pontes (2001)	<ul style="list-style-type: none"> - São fornecidos ábacos nos quais podem ser obtidas as espessuras das camadas em função do tráfego; - Dados de entrada: tráfego (representado por milhões de passagens do EP de 8ton na via de maior volume) e subleito; - Materiais: a capacidade de suporte do subleito em função do CBR, contudo indica usar MR ou resistência ao cisalhamento; - Os ábacos foram obtidos a partir de cálculos analíticos.
Suíça - “Dimensionamento: superestrutura das estradas” – Normas (2001)	<ul style="list-style-type: none"> - Pavimento flexível e rígido; - Dados de entrada: tráfego (6 categorias calculadas em função do EP em um dia médio) e subleito; - Materiais: o subleito, dividido em 5 categorias, pode ser representado pelo módulo de compressibilidade, CBR ou módulo de reação;

Fonte: Autoria própria, 2023.

No Brasil, alguns autores analisaram o emprego de catálogos em diferentes regiões do país. Ramos (2003) estabeleceu os passos necessários para o desenvolvimento de um Catálogo de Pavimentos Flexíveis para o Município do Rio de Janeiro, baseado nas análises da mecânica dos pavimentos e considerando os solos e rochas britadas disponíveis. Foram estudadas 14 amostras de solo, sendo 13 de jazidas e uma na área urbana. Além dos dados de subleito, foi realizada uma caracterização dos materiais das pedreiras, que foram usados para as camadas granulares (base e sub-base). Foram escolhidas 13 pedreiras, já usadas para exploração dos materiais utilizados dentro do município do Rio de Janeiro. Os módulos encontrados dos solos estudados a partir do modelo composto foram de 33 MPa a 759 Mpa, sendo classificados em 4 classes de subleito. As estruturas-tipo foram desenvolvidas com auxílio do programa computacional FEPAVE 2. Os resultados obtidos neste estudo são expressos em tabelas, contendo os dados de saída do FEPAVE, o módulo constante do subleito e a profundidade na qual o módulo de resiliência do subleito se tornou constante. É definido o número máximo de solicitação do eixo padrão, em função da deformação permanente e da vida de fadiga, de forma atender as duas condições simultaneamente.

Bezerra Neto (2004) realizou um estudo focado na comparação entre pavimentos flexíveis dimensionados por meio do método empírico do DNIT e o método mecanístico, sendo realizada a caracterização dos materiais disponíveis no município de Campo Grande (MS). Ao final dos estudos, Bezerra Neto (2004) propôs um catálogo simplificado para a região de Campo Grande (MS).

O subleito investigado contemplou o estudo de 2 tipos de materiais: um solo argiloso e outro arenoso. Quanto ao tráfego, o trabalho de Bezerra Neto (2004) não teve nenhuma consideração e adotou os valores de 10^5 (leve), 10^6 (médio), 10^7 (pesado) e 10^8 (muito pesado) para o número “N” no dimensionamento, adotando as considerações dos métodos empírico e mecanístico da COPPE. Para as estruturas dimensionadas para tráfego leve e médio foi adotado revestimento do tipo Tratamento Superficial (TS), enquanto que para as dimensionadas para tráfegos pesado e muito pesado, revestimento de concreto asfáltico (CBUQ). Bezerra Neto (2004) propôs 24 estruturas para o dimensionamento empírico e 96 estruturas para o mecanístico-empírico. As 96 estruturas do método da COPPE/UFRJ se referem aos diferentes níveis de confiabilidade, utilizadas para o cálculo da resposta estrutural e assim as variáveis de deflexão entre rodas, diferença de tensões na fibra inferior do revestimento e tensão vertical no topo do subleito.

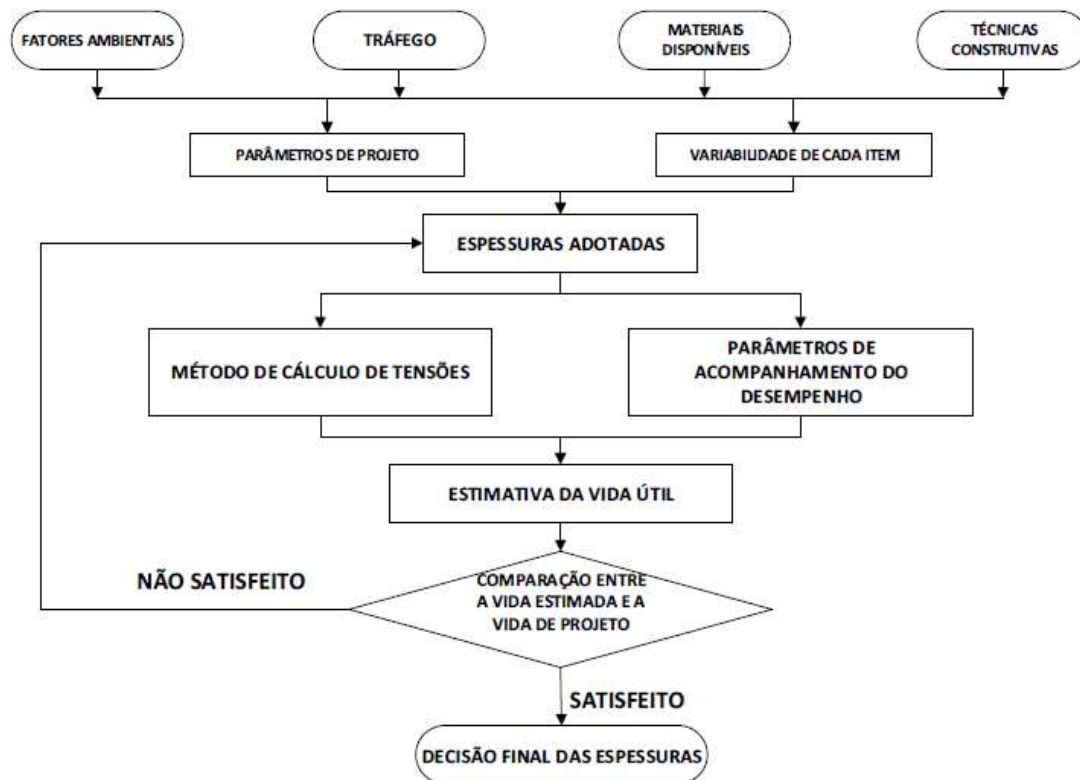
4.3 Dimensionamento de pavimentos

No Brasil, o atual método de dimensionamento de pavimentos asfálticos em vigor pelo DNIT foi desenvolvido pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza, em 1966. O parâmetro *California Bearing Ratio* (CBR) foi largamente utilizado pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos e posteriormente adaptado ao Brasil. No método empírico, para um dado valor de CBR do subleito há uma espessura de pavimento que protege este mesmo subleito de deformações excessivas. Isto é, a espessura total do pavimento a ser definida deverá ser capaz de proteger o subleito quanto à ruptura por cisalhamento e ao acúmulo de deformações constantes. Uma das principais limitações do método empírico é que ele não pode ser difundido para situações distintas àquelas para as quais ele foi desenvolvido, isto é, não é permitida sua generalização para diferentes cargas de tráfego e ainda para diferentes materiais. Além disso, a ruptura por fadiga e a influência do clima não foram considerados nesse método (MOTTA, 1991; FRANCO, 2007; SOARES, MORENO e MOTTA, 2009).

Em 2018 o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – Medina foi publicado pelo DNIT e desenvolvido pelo IPR (Instituto de Pesquisas rodoviárias) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ com a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás – CENPES e de diversas universidades do Brasil.

O MeDiNa é uma ferramenta computacional de dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis de acordo com o método mecanístico-empírico. O *software* é uma atualização do programa SISPAV desenvolvido por Franco (2007). A assistência no dimensionamento da estrutura do pavimento, é realizada usando-se rotinas que calculam as tensões no interior das camadas dos pavimentos, baseado na teoria da elasticidade, e modelos que avaliam o desempenho do pavimento. A estrutura é avaliada pelo equilíbrio entre as cargas atuantes impostas pelo tráfego, e a capacidade resistente dos materiais que as constituem. Para Medina e Motta (2005), o procedimento para qualquer método mecanístico-empírico segue o fluxograma representado na Figura 35.

Figura 35: Fluxograma de dimensionamento pelo método mecanístico-empírico.



Fonte: Medina e Motta, 2005.

O *software* MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) tem a finalidade de realizar a análise e o dimensionamento de estruturas de pavimentos. Os dados de entrada para a utilização do *software* são: (i) os dados do subleito (módulo de resiliência e deformação permanente) obtidos em laboratório; (ii) as mesmas informações devem ser conhecidas também para os materiais a serem utilizados em bases, sub-bases e reforços de subleito; (iii) os materiais fabricados (misturas asfálticas, materiais estabilizados com cimento, entre outros) que podem ser definidos pelo projetista e neste cenário o programa pré-estabelece parâmetros que devem ser apresentados em campo, quando da execução da obra; e por fim (iv) os dados de tráfego definidos pelo número N.

O programa MeDiNa pode realizar uma análise de como a estrutura se comporta com o tráfego e, além disso, o dimensionamento propriamente dito de cada camada da estrutura, sendo permitidas no mínimo três e no máximo oito camadas. Na primeira situação são verificados os critérios de área trincada e deformações permanentes na realização dos cálculos, resultando na apresentação de um resumo com a finalidade de auxiliar no projeto, uma vez que o projetista poderá avaliar melhor a escolha dos materiais. O programa também faz o dimensionamento de um projeto, onde realiza

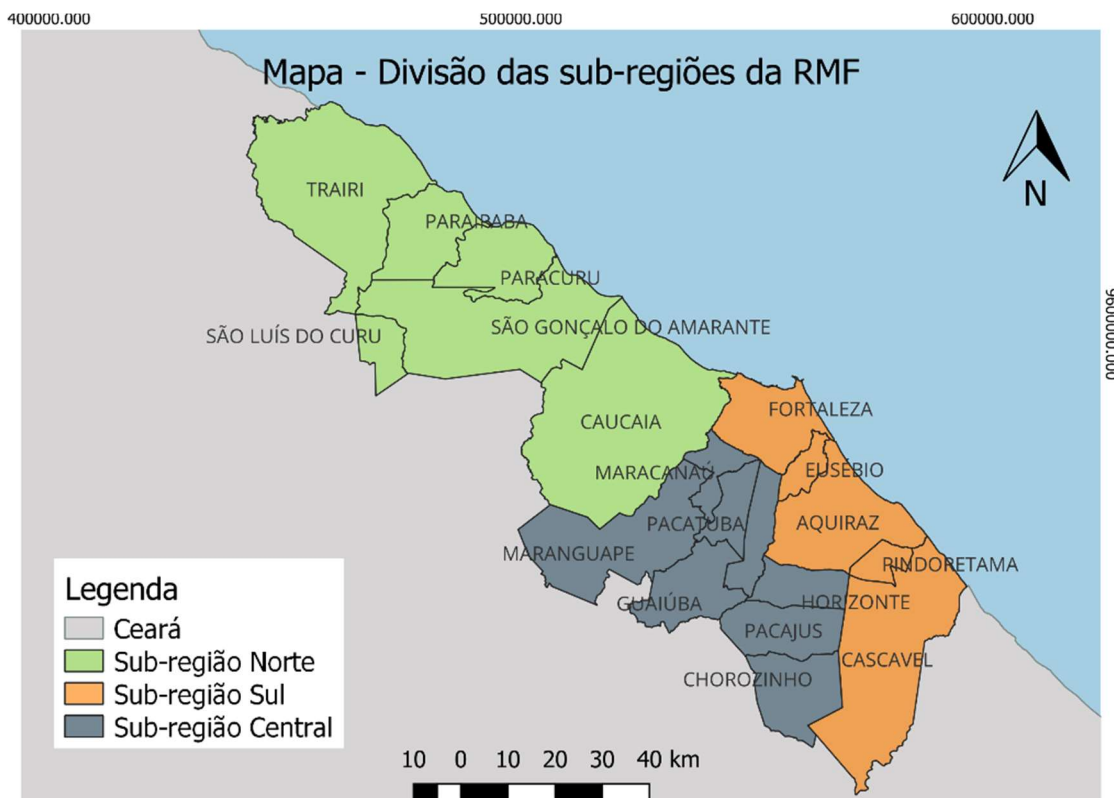
automaticamente a alteração das espessuras das camadas de modo a atender aos critérios da deformação permanente das camadas abaixo do revestimento e fadiga.

4.4 Materiais e método

4.4.1 Área de estudo

Devido à grande dimensão da área de estudo, e visando otimizar o uso de materiais mais próximos à obra, a Região Metropolitana de Fortaleza foi subdividida em 3 áreas, sendo denominadas neste estudo de Regiões Norte, central e Sul. A sub-região Norte abrange 6 municípios: Trairi, Paraipaba, Paracuru, São Gonçalo do Amarante, São Luís do Curu e Caucaia, já a sub-região Central engloba os 7 seguintes municípios: Maracanaú, Maranguape, Pacatuba, Itaitinga, Guaiúba, Pacajus, Chorozinho, e por fim, a sub-região Sul corresponde a 6 municípios: Fortaleza, Eusébio, Aquiraz, Pindoretama, Horizonte e Cascavel. A Figura 36 ilustra essas regiões.

Figura 36: Divisão da RMF em 3 sub-regiões para fim de estudo



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.4.2 Materiais - Dimensionamento

Os materiais granulares utilizados no dimensionamento das estruturas foram os solos e solos-brita, propostos no Capítulo 3 desta tese. As Tabelas 16 e 17 mostram um resumo das principais características dos solos e misturas (solos granulometricamente estabilizados) usados neste estudo.

Tabela 16: Resumo das características dos solos – RMF.

	SOLO 3	SOLO 4	SOLO 5	SOLO 7	SOLO 9	SOLO 14	SOLO 15	
DEN	1,638	1,984	1,95	1,995	2,014	1,93	1,95	
AASHTO	A-7-6	A-2-6	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-6	A-2-4	
CBR (%)	0	20	33,5	13,6	22,6	10	8,2	
Mr méd	505	162	495	412	455	872	384	
R²	0,917	0,899	0,852	0,950	0,583	0,862	0,360	
MR	K1	3,760	69,868	256,651	21,893	316,402	10,425	608,663
	K2	0,669	0,185	0,583	0,984	0,291	-0,118	0,410
	K3	-2,519	-0,584	-0,968	-2,342	-0,595	-1,931	-0,309
R²	0,9997	0,8760	0,7031	0,8938	0,8747	0,6660	0,9891	
DP	ψ1	0,0713	0,3604	7,3306	0,4070	0,7122	0,1841	0,0675
	ψ2	0,9005	2,5756	2,2946	0,9660	1,7762	-0,1582	-1,4362
	ψ3	0,1111	0,3414	0,2798	1,0549	0,6512	0,5480	-1,1702
	ψ4	0,0718	0,0019	0,0032	0,0020	0,0020	0,0019	0,0020

Fonte: A autoria própria, 2023.

Tabela 17: Resumo das características das misturas de Solo-Brita-RMF.

	SB 3	SB 4	SB 5	SB 7	SB 8	SB 11	SB 14	
DEN								
CBR (%)	2	22	45	79	42	18	106	
Mr méd	251	229	219	284	225	221	317	
MR	R²	0,902509472	0,94206	0,943975	0,788545	0,067037	0,847816	0,370605
	K1	133,4453041	841,632	978,1464	39,07974	624,6348	0,253169	228,8176
	K2	0,070983718	0,554795	0,59287	0,597452	0,588929	-0,31488	0,120959
	K3	-0,35676286	-0,10425	-0,05912	-1,61446	-0,39767	-2,24134	-0,289
	R²	0,872263667	0,842573	0,996221	0,846905	0,742177	0,828583	0,940483
DP	ψ1	0,306506002	0,071748	0,018044	0,0503	0,019786	0,044008	0,300331
	ψ2	1,039509821	-0,81067	-1,22293	-1,09513	-2,85275	-1,29324	8,49996
	ψ3	-0,00932307	2,128995	4,414747	1,746757	0,521763	1,528624	-7,43821
	ψ4	-0,02434357	0,001857	0,003013	0,001875	0,001941	0,001873	0,001243

Fonte: A autoria própria, 2023.

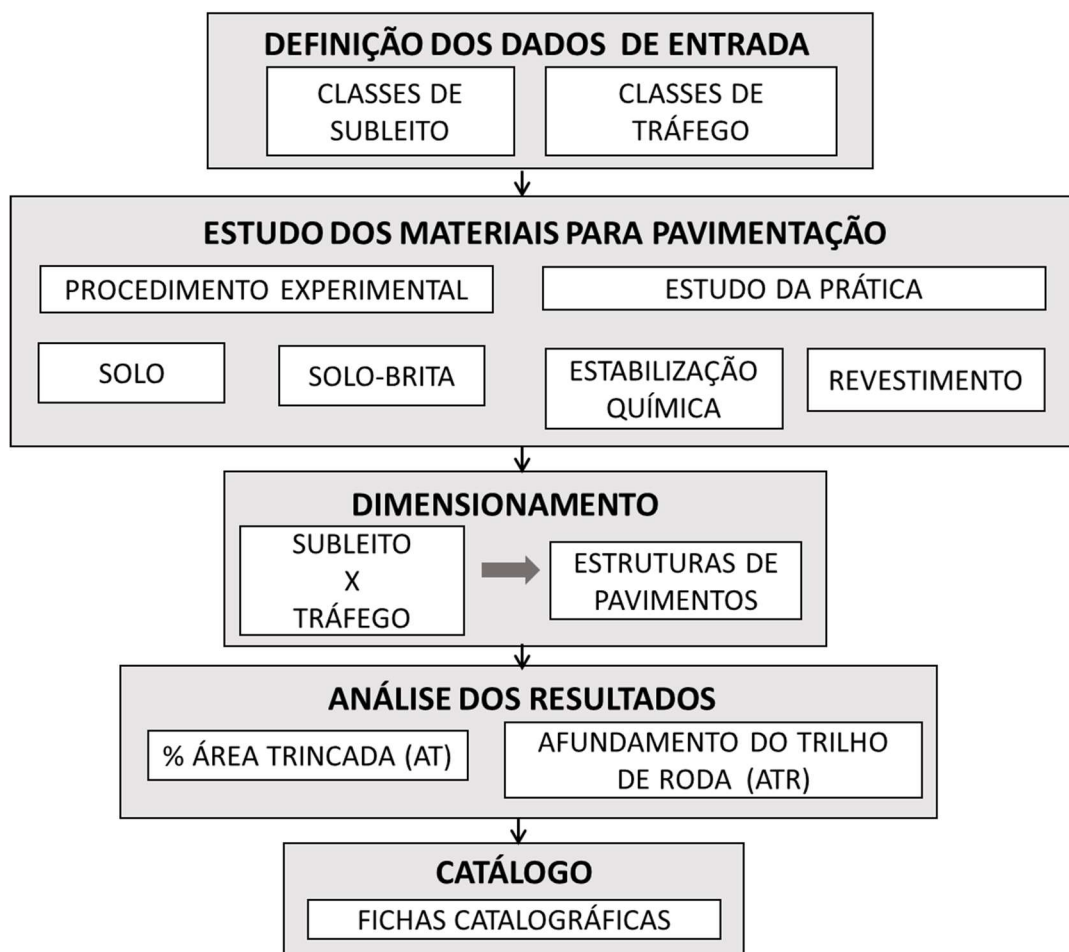
Ressalta-se que o foco deste trabalho reside nos materiais que compõem as camadas granulares e não no revestimento. Assim, o programa experimental aqui desenvolvido, limitou-se aos materiais granulares, usando para o revestimento, as estruturas propostas

e materiais do banco de dados do *software* MeDiNa. No caso foi adotado, em função do tráfego, Tratamento Superficial Duplo ou Concreto Asfáltico de classe 4.

4.4.3 Método

Com o intuito de elaborar um catálogo simplificado de estruturas tipo de pavimentos flexíveis foram definidas várias etapas necessárias, baseado em manuais internacionais e trabalhos na área de pavimentação rodoviária. A Figura 37 ilustra um fluxograma com as etapas desenvolvidas, que são descritas e nos subitens subsequentes.

Figura 37: Fluxograma do método utilizado



Fonte: Autoria própria, 2023.

i) Definição dos dados de entrada

Um catálogo de pavimentos é moldado em função do tráfego e do subleito locais. Assim, é necessário estabelecer, previamente, os limites das classes desses parâmetros, para isso, considerou-se os catálogos visitados, além de uma análise de sensibilidade com as variações dos subleitos locais, a fim de se obter uma classificação mais assertiva.

ii) Estudo dos materiais para pavimentação

Na construção do catálogo, além do tráfego e do subleito, precisam ser analisados os materiais para camadas dos pavimentos. Para este catálogo, o esforço experimental foi limitado apenas para materiais granulares, sendo solo e misturas estabilizada com solo-brita, que foram trabalhadas nos capítulos anteriores. Além disso, foram pesquisados materiais complementares para dar suporte a tráfegos com mais solicitações, nos quais os materiais experimentados não seriam suficientes. Para cada tipo de revestimento foram considerados materiais do banco de dados do *software* MeDiNa.

iii) Dimensionamento

O dimensionamento é a etapa mais importante na elaboração do catálogo de pavimentos por ser a responsável por simular as estruturas propostas, variando o tráfego, o subleito, os materiais e as espessuras, buscando a melhor opção quanto ao custo e desempenho do pavimento. Nessa fase foram simuladas inúmeras possibilidades de estruturas.

iv) Análise dos resultados

O Medina utiliza como critério de desempenho de pavimentos, a ruptura, baseada em danos de deformação permanente ou afundamento do trilho de roda (ATR) e dano de fadiga, pela área trincada (AT). Este método permite o dimensionamento baseado em diferentes tipos de vias, conforme a hierarquia funcional adotada pelo DNIT. Para cada tipo via existem critérios de parada do dimensionamento com limites máximos toleráveis para os parâmetros definidores. A Tabela 18 resume esses critérios e a confiabilidade de cada sistema funcional.

Tabela 18: Tipo de Vias com Limites de Tolerância e Confiabilidade

Tipo de via	Confiabilidade	Área trincada (%)	Def. Permanente(mm)
Sistema Arterial Principal	0,95	0,3	10
Sistema Arterial Primário	0,85	0,3	13
Sistema Arterial Secundário	0,75	0,3	20
Sistema Coletor Primário	0,85	0,3	13
Sistema Coletor Secundário	0,75	0,3	20
Sistema Local	0,65	0,3	20

Fonte: FRANCO; MOTTA (2020).

Segundo Franco e Motta (2020) o *software* MeDiNa considera os seguintes parâmetros em seus projetos:

- a) Deformações permanentes específicas por camadas não podem ultrapassar 5%;
- b) A espessura da camada de revestimento asfáltico deve estar entre 5,0 cm e 15,0 cm;
- c) A espessura das camadas de bases com valores entre 10,0 cm e 40,0 cm;
- d) A espessura de camadas de tratamento superficial duplo (TSD) ou tratamento superficial triplo (TST) é limitada entre 1,5 cm e 3,0cm.
- v) Catálogo

Com as estruturas definidas, a elaboração do catálogo consiste no agrupamento dessas informações de maneira mais rápida e prática, por meio de tabelas resumo, onde são descritos os materiais e as espessuras necessárias para cada subleito e tráfego associado. Para facilitar a leituras, as fichas catalográficas foram divididas por sub-regiões.

4.5 Apresentação e Análise de Resultados

4.5.1 Classificação do tráfego

A hierarquia do tráfego da região foi baseada na classificação sugerida por BASTOS (2016), no qual tem-se as seguintes classes, conforme a Tabela 19.

Tabela 19: Níveis de tráfego adotados para a RMF.

Níveis de Tráfego			
Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
$<3 \times 10^6$	$3 \times 10^6 - 1 \times 10^7$	$1 \times 10^7 - 3 \times 10^7$	$>3 \times 10^7$

Fonte: Bastos, 2016

4.5.2 Classificação do subleito

Nos catálogos visitados, os subleitos foram classificados por intervalos de valores de CBR ou MR, pois o dimensionamento era baseado nesses parâmetros de rigidez. Para elaboração do catálogo de pavimentos desta pesquisa, idealizou-se, *a priori*, classificar o subleito pela variação do MR. Para tanto, foi realizada uma análise de sensibilidade, na qual testou-se uma estrutura padrão com solos de diferentes MR, mas os resultados não foram como esperados, houve uma aleatoriedade nos resultados, no qual se acreditava numa tendência de melhora do desempenho do pavimento com o aumento do MR. Tal fato pode ser justificado pela heterogeneidade dos solos. De acordo com o banco de dados desta pesquisa um determinado valor de MR pode estar associado a diversos tipos de solo, e tais características podem influenciar no comportamento distinto da estrutura do pavimento.

Como o novo método de dimensionamento leva em consideração não só o valor médio de MR, mas os coeficientes do modelo resiliente e de deformação dos materiais, além de outras características, decidiu-se então, agrupar os subleitos com características similares. Para isso, selecionou-se amostras de solos que contivessem todas essas informações, a fim de criar um banco de dados para realizar uma análise de sensibilidade entre eles. Juntou-se os dados das amostras de solos do Capítulo 3 desta tese com alguns dados de estudos anteriores, disponibilizados pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos-UFC, e assim testou-se primeiramente os solos de acordo com a classificação AASHTO, pois ela essa agrupa diversas características dos solos em uma única classe, o que pode refletir também num possível comportamento mecânico similar.

Utilizando uma estrutura padrão, percebeu-se que solos de uma mesma classe tinham resultados semelhantes, exceto com a classe A-2-4. Acredita-se que o ocorrido tenha se dado pela grande variação de valores de MR e DP dentro dessa mesma classe. Assim, foi feita uma subdivisão dessa classe em duas, de acordo com as características mecânicas, e dessa vez não houve oscilações estatísticas significativas no desempenho

final dos pavimentos, resultando assim na seguinte classificação do subleito descrita no Quadro 2.

Quadro 3: Classificação dos subleitos adotada para a RMF.

Classes de subleito	Características
A-2-4 (1)	CBR até 10% MR de 340 a 385Mpa
A-2-4 (2)	CBR maior que 10% MR de 290 a 460Mpa
A-4	CBR até 10% MR até 500Mpa
A-1-b	CBR = 30% MR de 250Mpa
A-6	CBR = 10% MR até 450Mpa
A-3	CBR maior que 10% MR até 400Mpa
A-7-6	CBR até 10% MR de 230 a 500Mpa

Fonte: Autoria própria, 2023

4.5.3 Dimensionamento

Para o dimensionamento, considerou-se o tempo de projeto de 10 anos e uma taxa de 2% de crescimento do tráfego. Parâmetros similares aos utilizados no dimensionamento dos pavimentos da RMF de acordo com alguns projetos rodoviários consultados.

Ressalta-se ainda, que as estruturas obtidas pelo *software* MeDiNa incluíram o uso dos coeficientes dos modelos de deformação permanente e módulo de resiliência dos materiais granulares estudados, e coeficientes de Poisson (ν) extraídos de Bastos (2013). Por sua vez, os dados das misturas asfálticas foram extraídos do próprio banco de dados do programa de análise de dimensionamento.

A região de estudo foi dividida, como já citado, em três sub-regiões, para que se pudesse utilizar materiais mais próximos ao traçado escolhido. Assim, define-se o dimensionamento para cada tráfego com soluções individuais para zona pré-estabelecida da RMF.

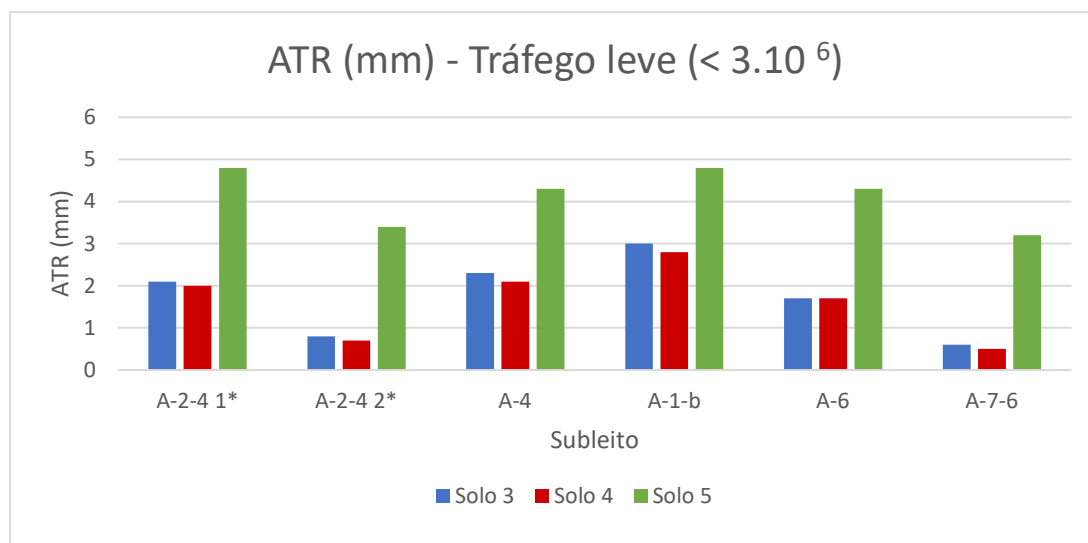
vi) Tráfego leve (10^6)

Para o dimensionamento das estruturas, primeiramente dividiu-se a RMF em três grandes áreas e foram selecionados os materiais geograficamente mais próximos para serem utilizados nas possíveis estruturas, como mostra a seguir:

- Sub-Região Norte

Para a Sub-Região Norte tem-se 3 amostras de solos e 3 misturas estabilizadas de solo e brita com características mecânicas aceitáveis. Para tanto, iniciou-se o dimensionamento testando as estruturas mais simples, visando o menor custo operacional. Assim, foi avaliada, primeiramente, uma camada de solo com espessura mínima (15 cm) e Tratamento superficial duplo (2 cm). A Figura 38 mostra o afundamento do trilho de roda (ATR) ao final do tempo estimado, 10 anos. Pode-se perceber que todos as estruturas apresentam ATR abaixo do limite, que para esse tráfego é de 8 mm. O único critério existente nesse tráfego refere-se a ao ATR, então, pode-se dizer que as estruturas mínimas podem ser utilizadas para essa demanda de tráfego.

Figura 38: Afundamento do trilho de roda - Tráfego leve ($< 3.10^6$) – Região Norte



Fonte: Autoria própria, 2023.

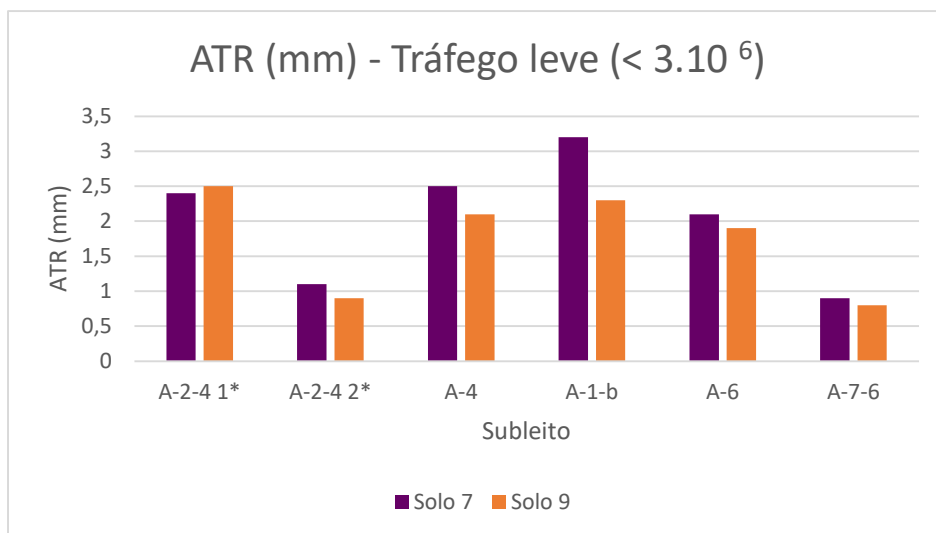
Avaliando os materiais, percebe-se que o ATR da estrutura com o Solo 5 é bem maior que as demais, com deformações de quase 5mm, mas ainda assim abaixo do máximo de 8mm. Por sua vez, as estruturas com os Solos 3 e 4 apresentaram comportamento similar entre si, com ATR de no máximo 3mm. Quanto aos subleitos, observa-se que os melhores desempenho foram com o subleito A-2-4 (2) e A-7-6, com

ATR pouco maior que 3mm para estrutura com o Solo 5 e menos do que 1mm para as demais.

- Sub-Região Central

Para a Sub-Região Central foram adotados 2 solos, que conforme mostra a Figura 39, apresentaram comportamento similar, mas o Solo 9 se mostrou um pouco mais eficiente por, no geral, apresentar um ATR menor. Entretanto, todas as estruturas propostas apresentaram desempenho satisfatório, com ATR de, no máximo, 3,2mm, bem menor que o limite estabelecido. Quanto ao subleito, o comportamento foi similar ao da Sub-Região Norte, sendo os melhores subleitos o A-2-4 (2) e o A-7-6.

Figura 39: Afundamento do trilho de roda - Tráfego leve ($< 3.10^6$) – Sub-Região Central.

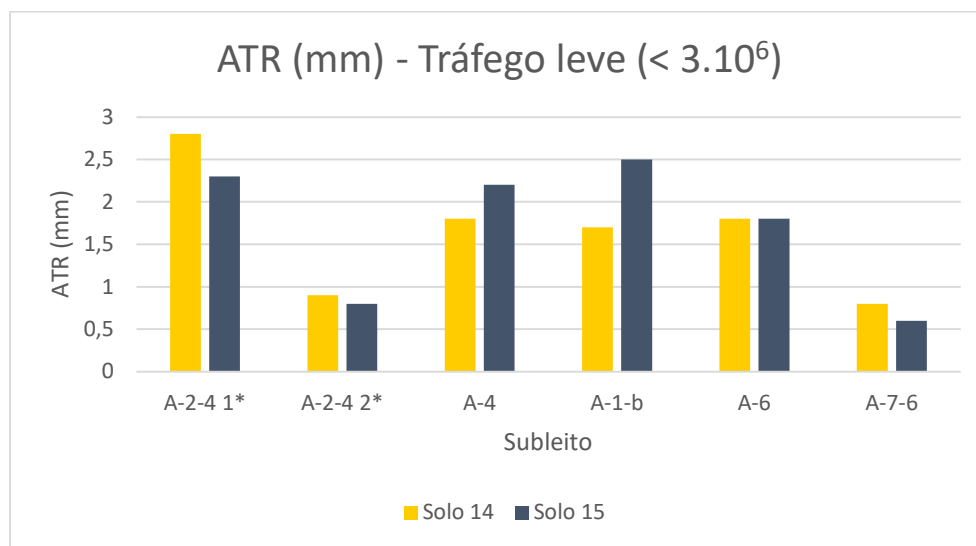


Fonte: Autoria própria, 2023.

- Sub-Região Sul

Para a Sub-região Sul também foram adotados mais dois solos, mas nesse caso não ficou claro qual o material se comportou melhor, visto que houve oscilações de ATR de acordo com o subleito empregado. Mas o ATR máximo de ambas as estruturas não chegou a 3mm (Figura 40), sendo facilmente possível o uso desses solos como único material de base. Pode-se perceber, ainda, a mesma tendência de comportamento dos subleitos avaliados nas outras sub-regiões, sendo os subleitos A-2-4 (2) e A-7-6 os que apresentaram menor ATR, logo um melhor desempenho.

Figura 40: Afundamento do trilho de roda - Tráfego leve ($< 3.10^6$) – Sub-Região Sul



Fonte: Autoria própria, 2023.

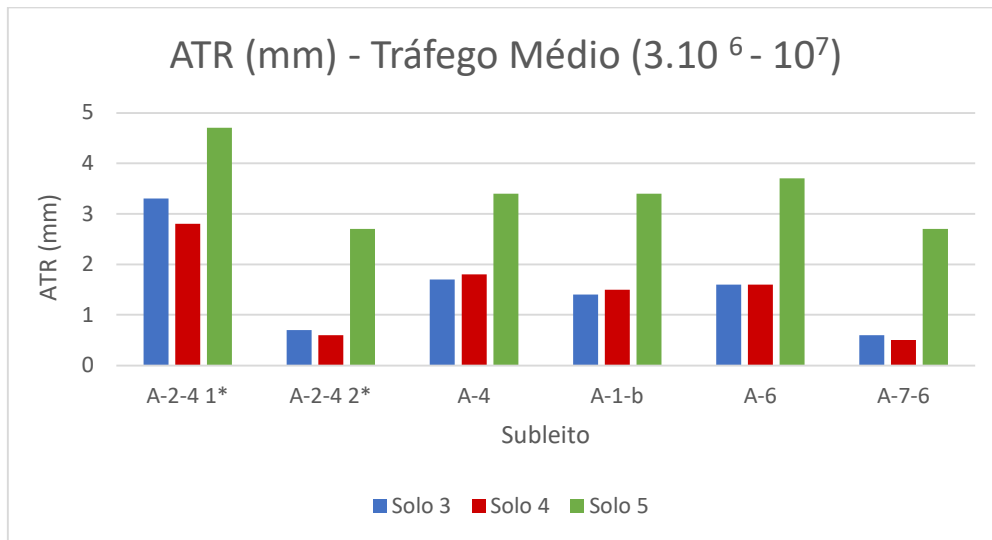
vii) Tráfego médio

- Sub-Região Norte

Para o tráfego médio ($3.10^6 - 10^7$), inicialmente, testou-se também as estruturas mais simples, no caso, uma camada granular de 15cm e revestimento de Concreto Asfáltico (CA) de 5 cm, pois para esse tráfego não é aceitável o tratamento superficial.

Assim, para a região norte, conforme a Figura 41, observa-se que os ATR não chegaram a 5mm, sendo abaixo do limite permitido, nota-se ainda que assim como no caso do tráfego leve, o Solo 5 é o que apresenta maior ATR e os Solos 3 e 4 apresentam valores similares entre si. É possível notar também a mesma tendência de comportamento do subleito, sendo a classe A-2-4 (2) e a A-7-6 a apresentarem estruturas com melhor desempenho.

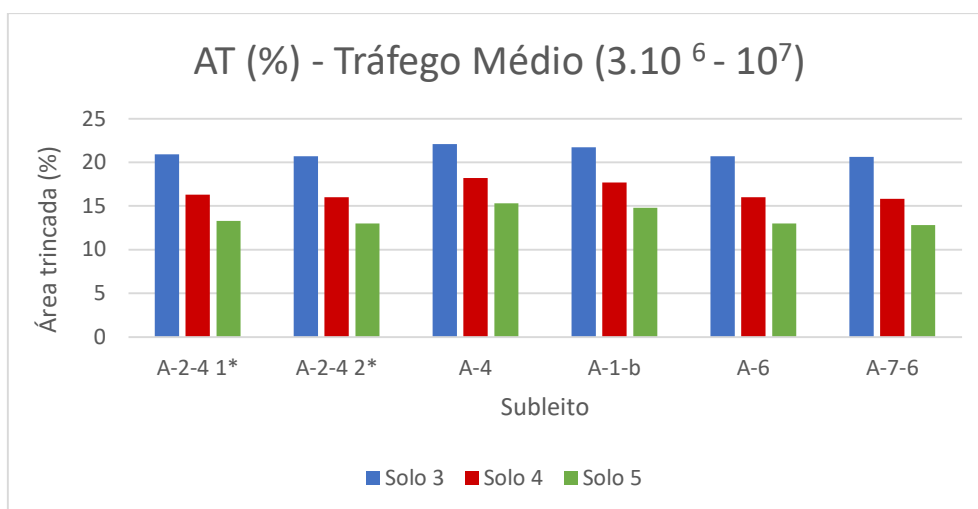
Figura 41: Afundamento do trilho de roda - Tráfego médio ($3.10^6 - 10^7$) – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para esse tráfego é exigida a análise adicional da porcentagem de área trincada, que é limitada a 30%. As estruturas, no geral, apresentaram valores similares entre si, chegando a, no máximo, 22% de área trincada, mas dessa vez a estrutura com a Amostra de Solo 5, que apresentou o maior ATR, teve a menor área trincada prevista. Em seguida tem-se a estrutura com a Amostra de Solo 4 e por último a com a Amostra de Solo 3, como pode ser visto na Figura 42. Assim sendo, todas as estruturas avaliadas são aceitas pelos dois parâmetros estudados.

Figura 42: Área trincada - Tráfego médio ($3.10^6 - 10^7$) – Sub-Região Norte.

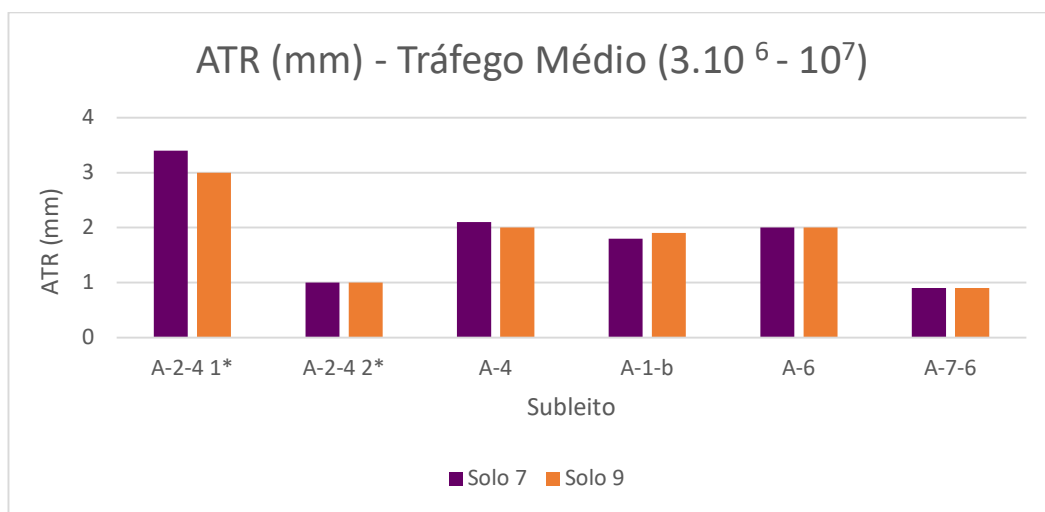


Fonte: Autoria própria, 2023.

- Sub-Região Central

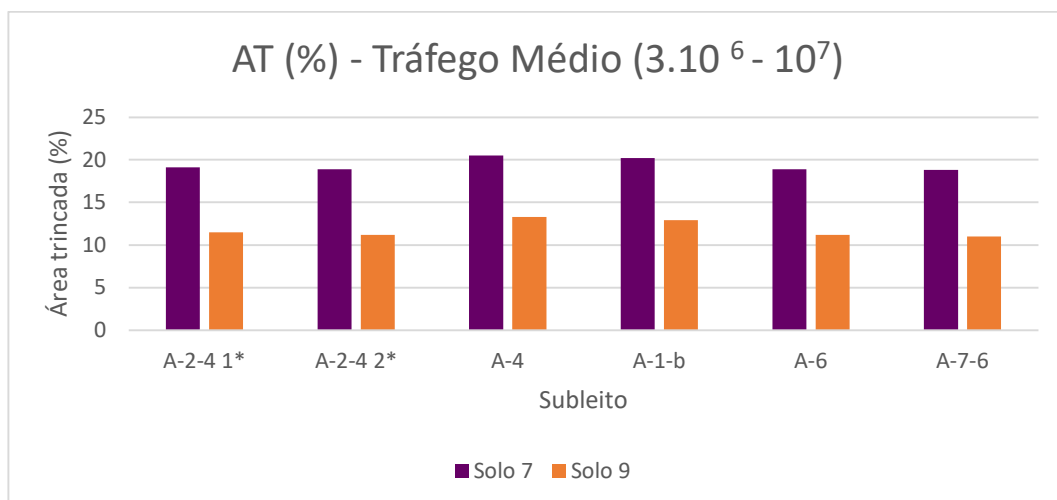
Para a Sub-Região Central foram testadas mais duas estruturas, compostas cada uma por uma camada de solo com 15 cm e uma de revestimento com 5cm de CA. Ambas apresentaram resultados similares de ATR, com afundamento de no máximo 3,4mm, logo inferior aos limites estabelecidos, conforme Figura 43. Já quanto ao percentual de área trincada, tem-se uma mudança mais significativa, como pode ser visto na Figura 44, sendo a estrutura constituída pela Amostra de Solo 9 com menor percentual, com valores entre 11% e 13,3% e a outra estrutura com valores que chegam até 20,5%.

Figura 43: Afundamento do trilho de roda - Tráfego médio ($3.10^6 - 10^7$) – Sub-Região Central.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 44: Área trincada - Tráfego médio ($3.10^6 - 10^7$) – Sub-Região Central.

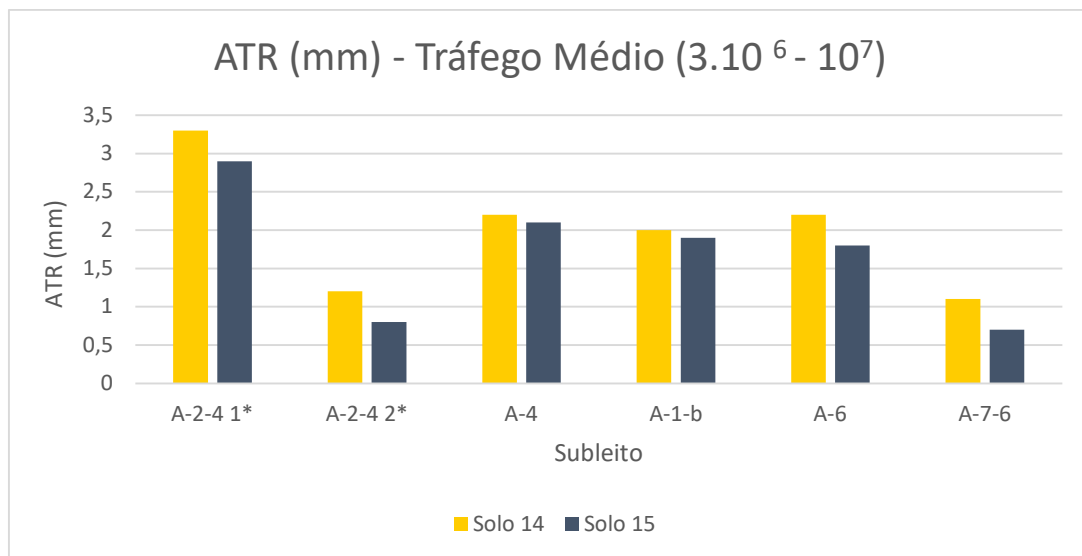


Fonte: Autoria própria, 2023.

- Sub-Região Sul

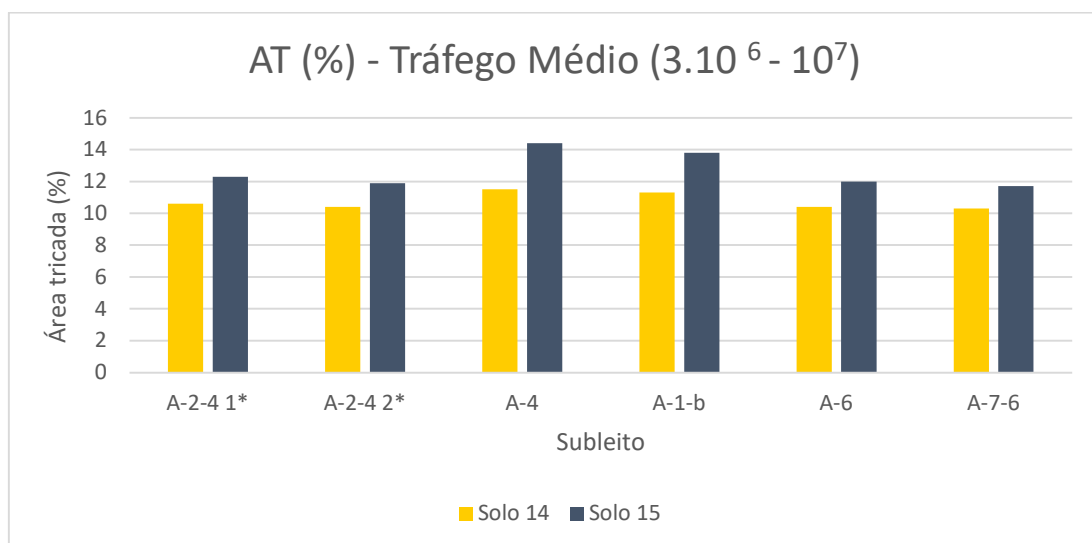
Para a Sub-Região Sul foram testadas mais duas amostras de solos, para os quais os resultados foram similares, tanto de ATR quanto de área trincada, e que apresentaram valores inferiores aos limites estabelecidos. A deformação máxima foi de 3,3mm, de acordo com a Figura 45, e percentual de área trincada ficou entre 10 e 14%, conforme Figura 46.

Figura 45: Afundamento do trilho de roda - Tráfego médio ($3.10^6 - 10^7$) – Sub-Região Sul.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 46: Área trincada - Tráfego médio ($3.10^6 - 10^7$) – Sub-Região Sul.



Fonte: Autoria própria, 2023.

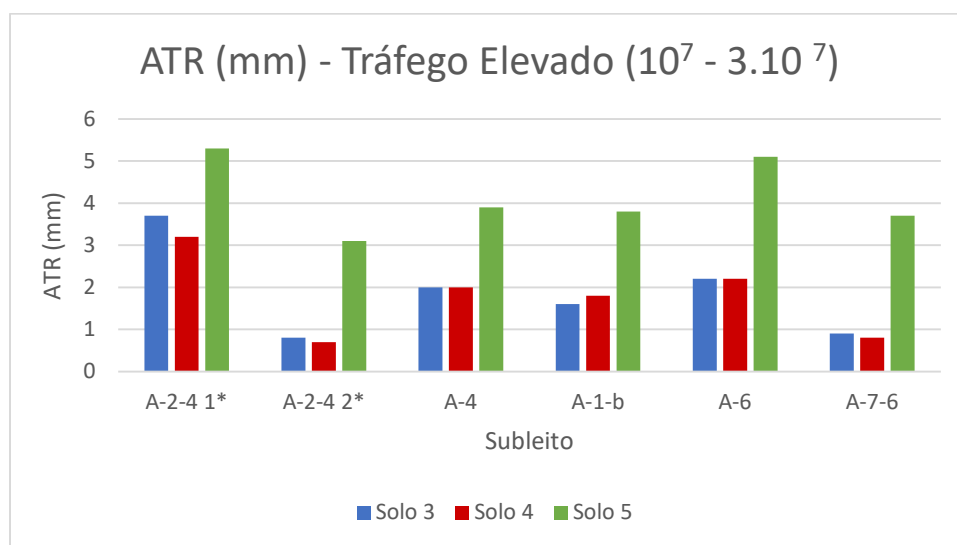
viii) Tráfego elevado ($10^7 - 3.10^7$)

As análises de estruturas para esse volume de tráfego levaram em consideração os mesmos princípios aplicados aos demais tráfegos. Iniciou-se com as estruturas mais simples com espessura mínima, no caso uma camada de solo de 15cm e o revestimento de CA de 5cm.

- Sub-Região Norte

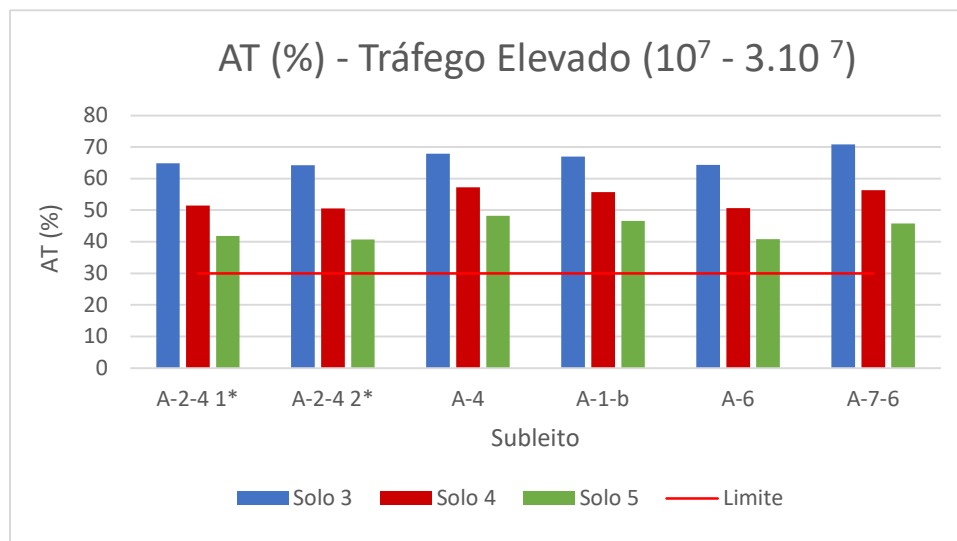
Para a Sub-Região Norte foram testados 3 tipos de solos, que apresentaram deformações de aproximadamente 5mm (Figura 47), sendo o Solo 5 o que mais deformou, repetindo a tendência vista com os outros tráfegos. Assim, a avaliação quanto ao ATR encontra-se com valores aceitáveis para o tráfego estabelecido. Já quanto a porcentagem de área trincada, como ilustra a Figura 48, os valores já não foram satisfatórios, com intervalo entre 40 e 70%, onde o limite é 30%, logo a estrutura estudada deve ser impedida de ser utilizada para esse tráfego.

Figura 47: Afundamento do trilho de roda - Tráfego elevado - Solos (15cm) – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

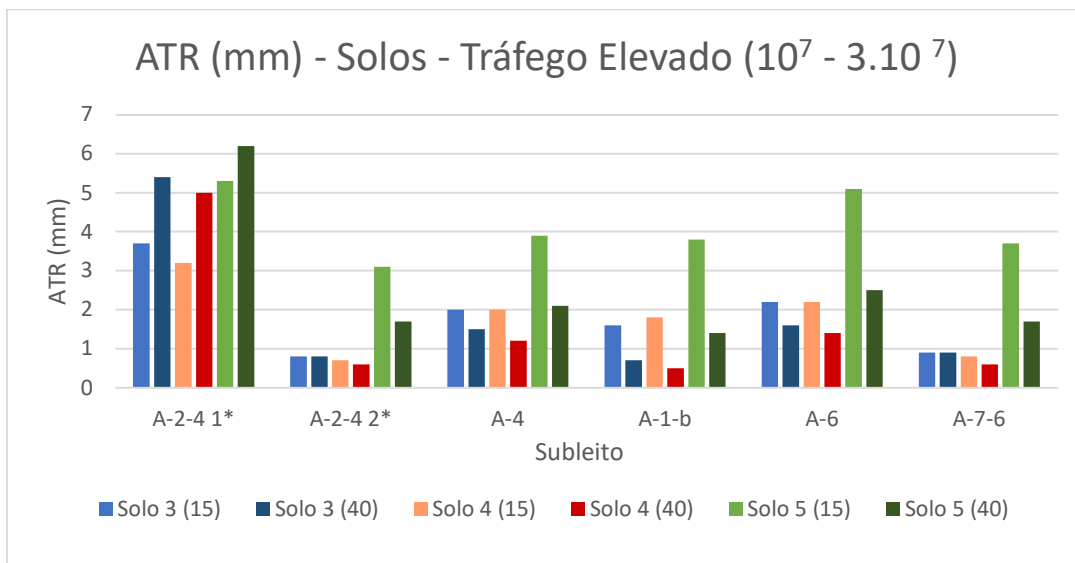
Figura 48: Área trincada - Tráfego elevado - Solos (15cm) – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para tanto, analisou-se ainda, o efeito do aumento da espessura da camada de base, a fim de aliviar as deformações e a área trincada. Pode-se perceber, na Figura 49, que ao aumentar a espessura da camada de base, as deformações ficaram iguais ou diminuíram, exceto no subleito A-2-4 (1), no qual as deformações já eram maiores que as nos demais subleitos e com o incremento de espessura teve-se um aumento de afundamento. Quanto aos materiais de base, observou-se que o Solo 5 foi o que apresentou maior ATR, mas chegando a ter seu valor reduzido em até a metade ao se modificar a espessura da base. As amostras dos Solos 3 e 4 tem valores de deformações próximos, como pode ser observado na Figura 50.

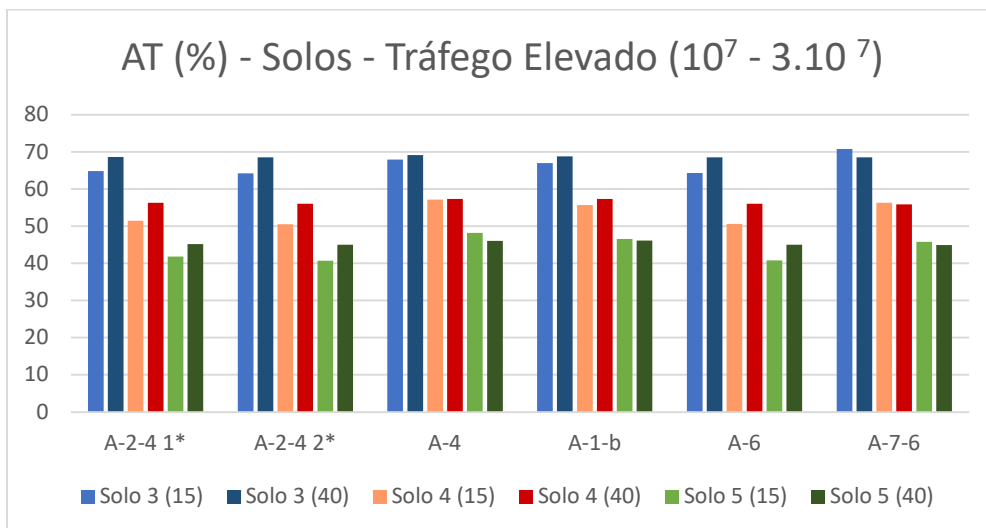
Figura 49: Afundamento do trilho de roda - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Quanto a área trincada, ao modificar a base para uma maior espessura, nota-se que no geral percentual permaneceu o mesmo ou teve-se um pequeno aumento, como pode ser observado na Figura 50.

Figura 50: Área trincada - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.

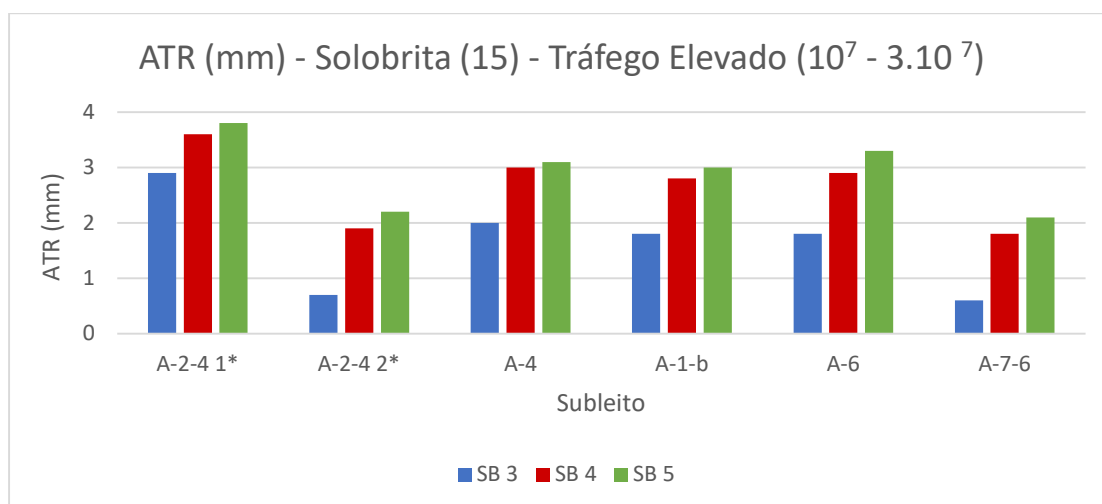


Fonte: Autoria própria, 2023.

Como as estruturas com apenas solo na camada de base, apesar da espessura máxima, não foram suficientes para atender o tráfego elevado (10⁷ - 3.10⁷), testou-se o material estabilizado com solo e brita. Para região norte, foram analisadas três misturas,

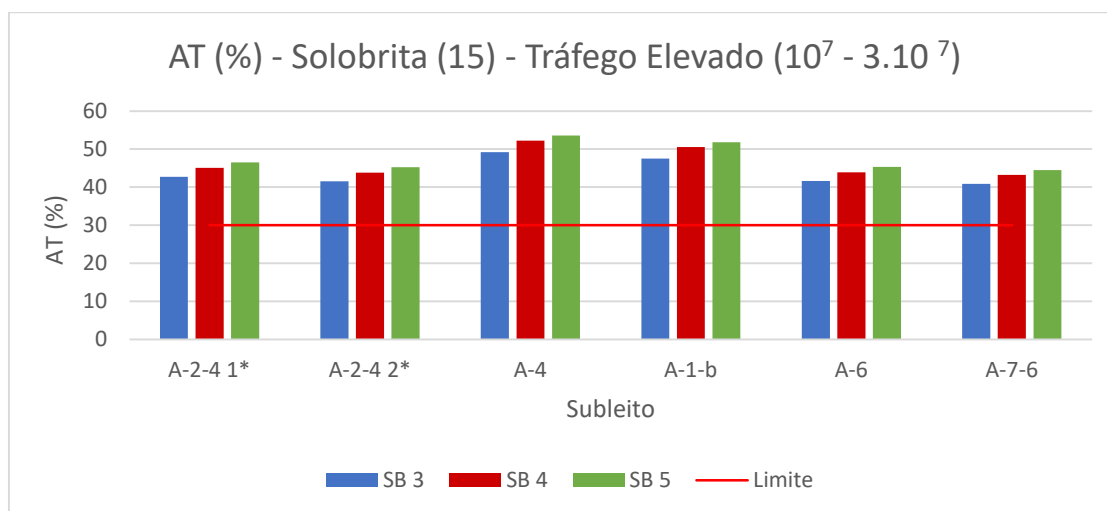
sendo: Solo 3 + Brita (60-40), Solo 4 + Brita (60-40) e Solo 5 + Brita (40-60). O estudo iniciou com a espessura mínima, assim como nos outros casos. Os ATR para essas estruturas ficaram abaixo do limite permitido, sendo todos abaixo de 4mm (Figura 51). A mistura formada pelo Solo 3 e brita foi a que teve menor afundamento, seguida da mistura do Solo 4 com brita e finalmente a do Solo 5 e brita. O percentual de área trincada também seguiu essa mesma tendência, mas os valores foram bem a cima do limite, 30%, variando de 40 a 54%, como pode ser observado na Figura 52.

Figura 51: Afundamento do trilho de roda – Tráfego elevado – Solo-Brita – Sub-Região Norte



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 52: Área trincada – Tráfego elevado – Solo-Brita – Região Norte

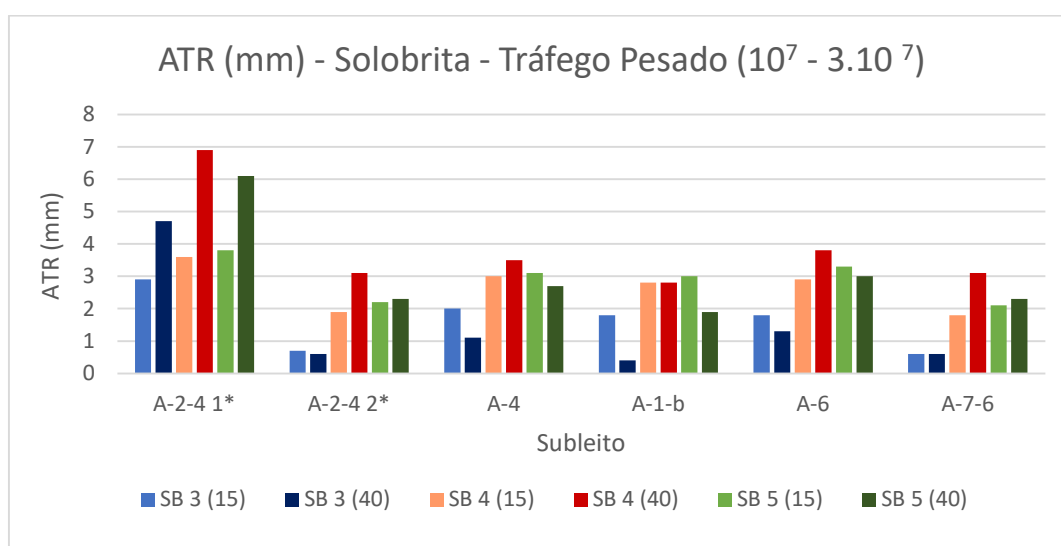


Fonte: Autoria própria, 2023.

Para tanto, analisou ainda o efeito de aumentar a espessura da camada a fim de aliviar as deformações e a área trincada, mas como pode-se ver nas Figuras 53 e 54. Quanto ao ATR, a estrutura com a mistura com Solo 3 obteve desempenho dequado ao

aumentar a espessura da camada da base, pois teve redução de afundamento, exceto para o subleito A-2-4 1*. Já para as outras duas misturas a previsão foi contrária ao esperado, a deformação tendeu a aumentar, exceto para a mistura com o Solo 5 aplicadas aos subleitos A-1-b e A-6. Vale ressaltar que os maiores valores de deformações foram no subleito A-2-4 1*, chegando a ultrapassar o limite permitido para deformação do subleito. O aumento na deformação do pavimento deve-se à sobrecarga que o material causa, e esse valor se mostrou mais acentuado no subleito A-2-4 1* por se tratar de um solo estruturalmente mais fraco.

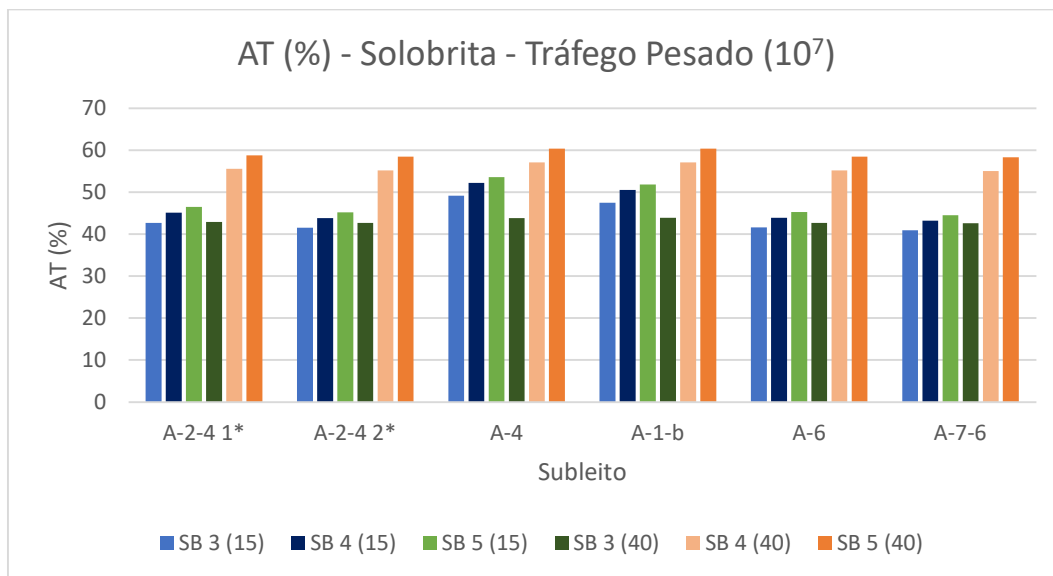
Figura 53: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O aumento da espessura na camada de base das misturas, granulometricamente estabilizadas, não contribuiu significativamente para redução da área trincada do revestimento, conforme pode ser observado na Figura 54. Para as estruturas com o Solo 3 e 5, percebeu-se um aumento de cerca de 3% na área trincada. Apenas para a mistura com o Solo 4 que houve uma redução dessa área trincada, chegando até a 10% de redução quando submetida aos subleitos A-4 e A-1-b, mas mesmo assim os valores são maiores que o limite permitido.

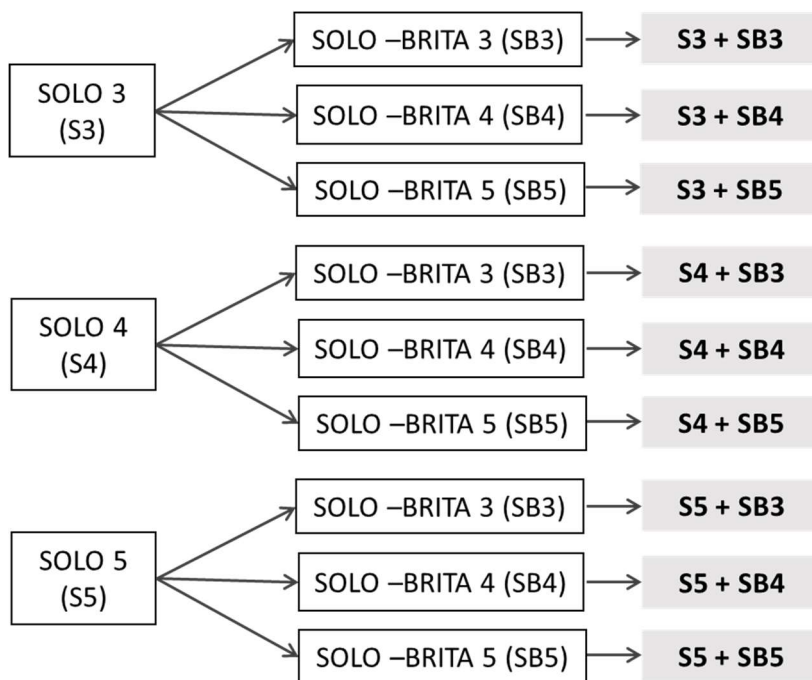
Figura 54: Área trincada - Tráfego elevado - Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A partir da constatação de que as estruturas com os solos isolados não foram suficientes para atender ao tráfego solicitado, foram testadas estruturas compostas por solo na sub-base e solo-brita na base. Os 3 solos e as 3 misturas de solo-brita, resultaram em 9 estruturas diferente quando combinadas, sendo representadas na Figura 55. Essas estruturas com cada subleito, e dispostas com diferentes espessuras, sendo realizadas assim mais de 220 simulações.

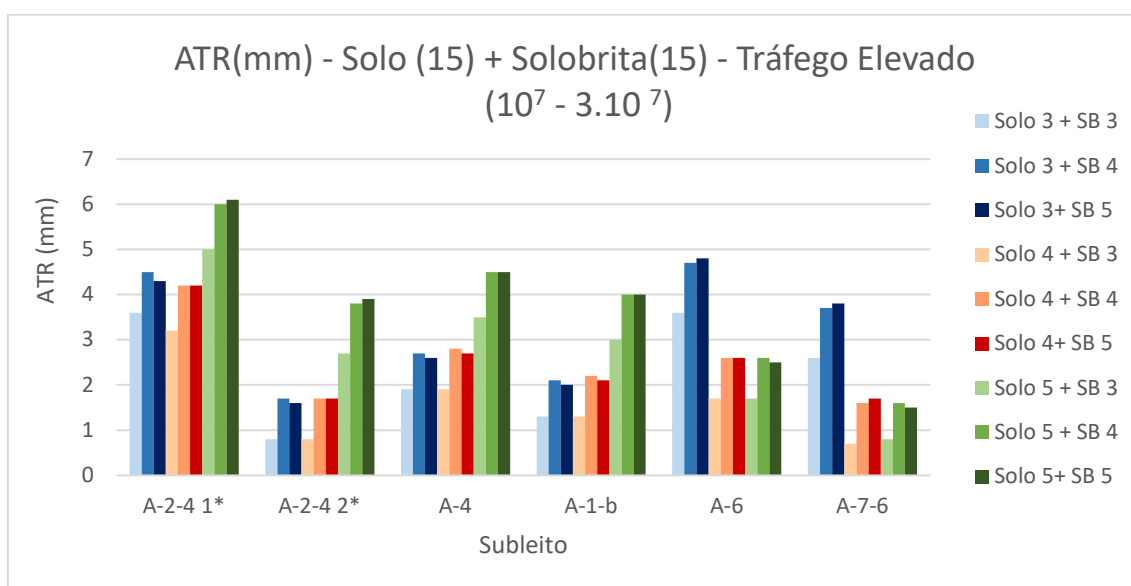
Figura 55: Estruturas propostas – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Simulando-se essas estruturas com cada classe de subleito, tem-se primeiramente os valores do ATR na Figura 56. As colunas azuis indicam as estruturas que usaram Solo 3 na sub-base, as vermelhas as sub-bases como o Solo 4 e as verdes com o Solo 5. E a variação dos tons representam as misturas de solo-brita que completam as estruturas na base, onde o tom mais claro simboliza o Solo-Brita 3, o intermediário o Solo-Brita 4 e o tom mais forte, o Solo-Brita 5. Assim, percebe-se que a previsão de ATR é variável de acordo com o subleito empregado. No caso dos subleitos classificados como A-6 e A-7-6, as estruturas com o Solo 5 apresentaram maior ATR, e as demais tiveram comportamento semelhante entre si. Já para os demais subleitos a estrutura com o Solo 5 foi o que mais sofreu deformação, e as demais estruturas tiveram valores similares entre si novamente. Notou-se também que foi no subleito A-2-4 1* as maiores deformações encontradas. Além disso também foi possível perceber que as estruturas compostas pela base com o Solo-Brita 3 tiveram desempenho melhor quando comparada com as demais.

Figura 56: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita – Sub-Região Norte.

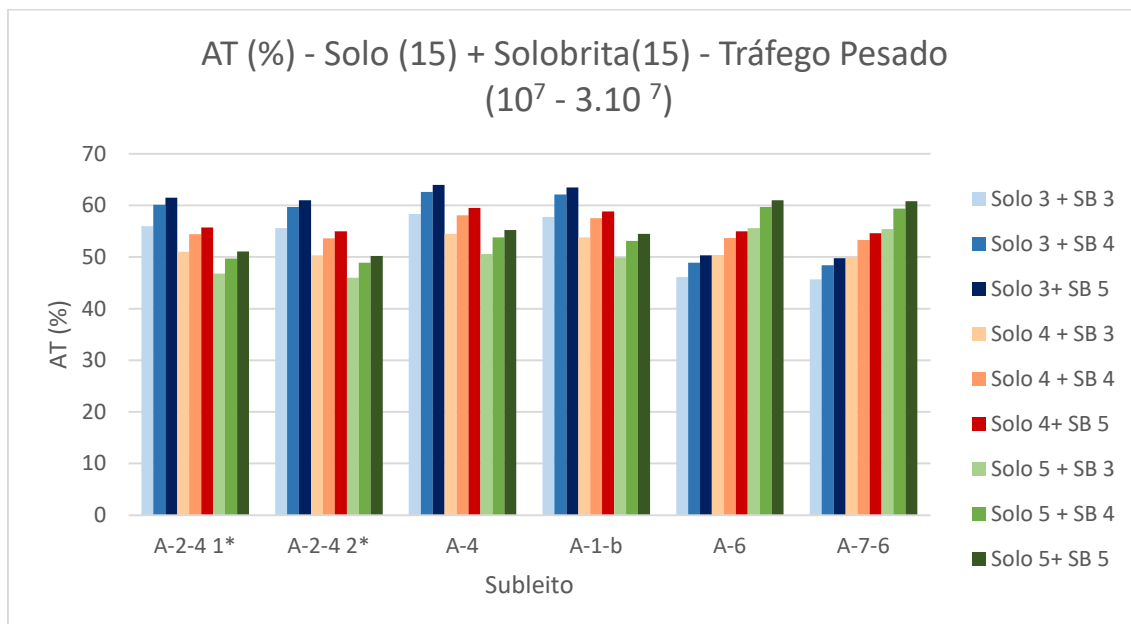


Fonte: Autoria própria, 2023.

Em relação à área trincada a tendência é inversa, para os subleitos A-6 e A-7-6 a maior área trincada é da estrutura com Solo 5, e para os demais subleitos essa área trincada é maior para as estruturas com o Solo 3. Ficando as estruturas com o Solo 4 com um valor

intermediário. Mas todas as estruturas avaliadas tiveram percentual de área trincada acima do limite permitido, 30%, conforme Figura 57.

Figura 57: Área trincada - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita – Sub-Região Norte.

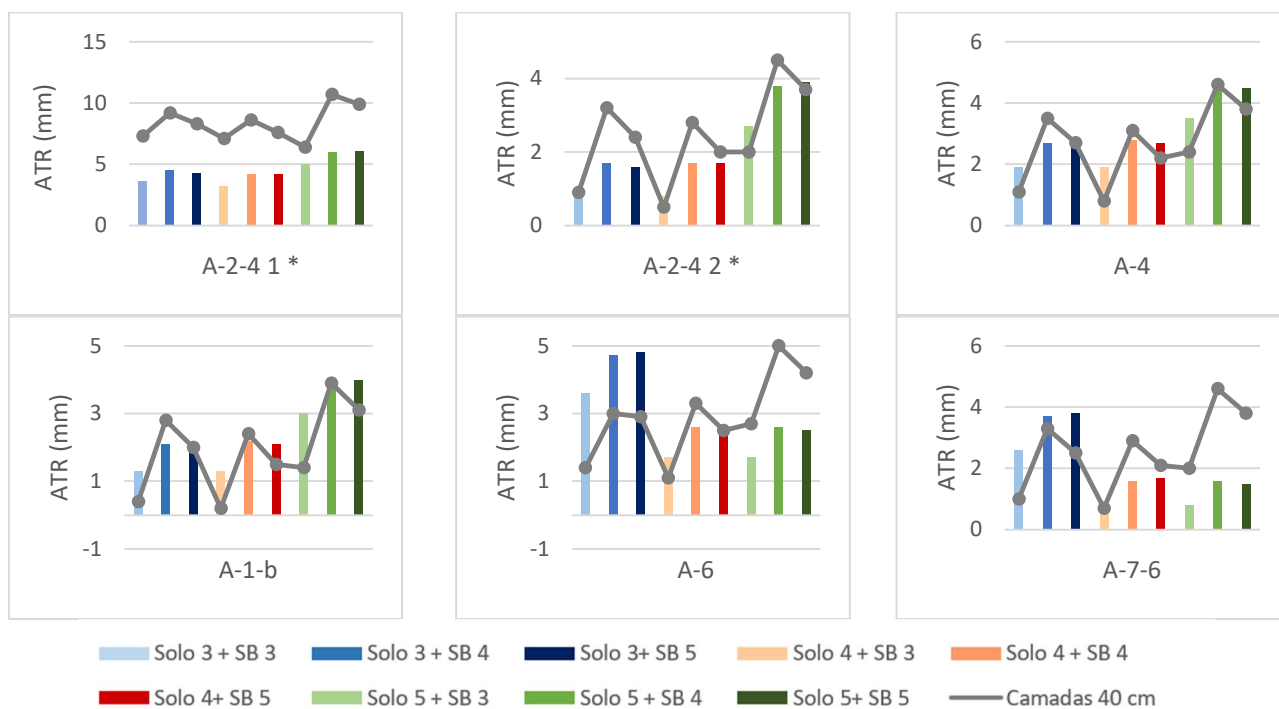


Fonte: Autoria própria, 2023.

Como expectativa de melhora do desempenho das estruturas do pavimento, avaliou-se um acréscimo na nas espessuras de sub-base e base dessas estruturas, onde observou-se na Figura 58 que o ATR, no geral, aumentou, o que indica que esse aumento não está contribuindo para o desempenho do pavimento, podendo ser considerado apenas como sobrecarga na estrutura.

Para o Subleito, classificado como A-2-4 1*, a mudança na espessura das camadas gerou ATR excessivos, chegando até ao dobro dos valores para a espessura mínima. Não se chegou ao limite da deformação geral do pavimento, mas o programa alertou que chegou no limite da deformação do subleito. Para os demais subleitos as mudanças foram mais sutis, e bem variadas. Para algumas estruturas houve ou aumento na deformação e para outras a diminuição. Foi observado também que todas as misturas com a base composta por Solo-Brita 4 tiveram um aumento de deformação em relação a estrutura anterior. As demais misturas mostraram uma redução da deformação, exceto as estruturas com o Solo 5 nos Subleitos A-6 e a-7-6 e a estrutura formada pelo Solo 3 e Solo-Brita 5 no Subleito A-2-4 2*.

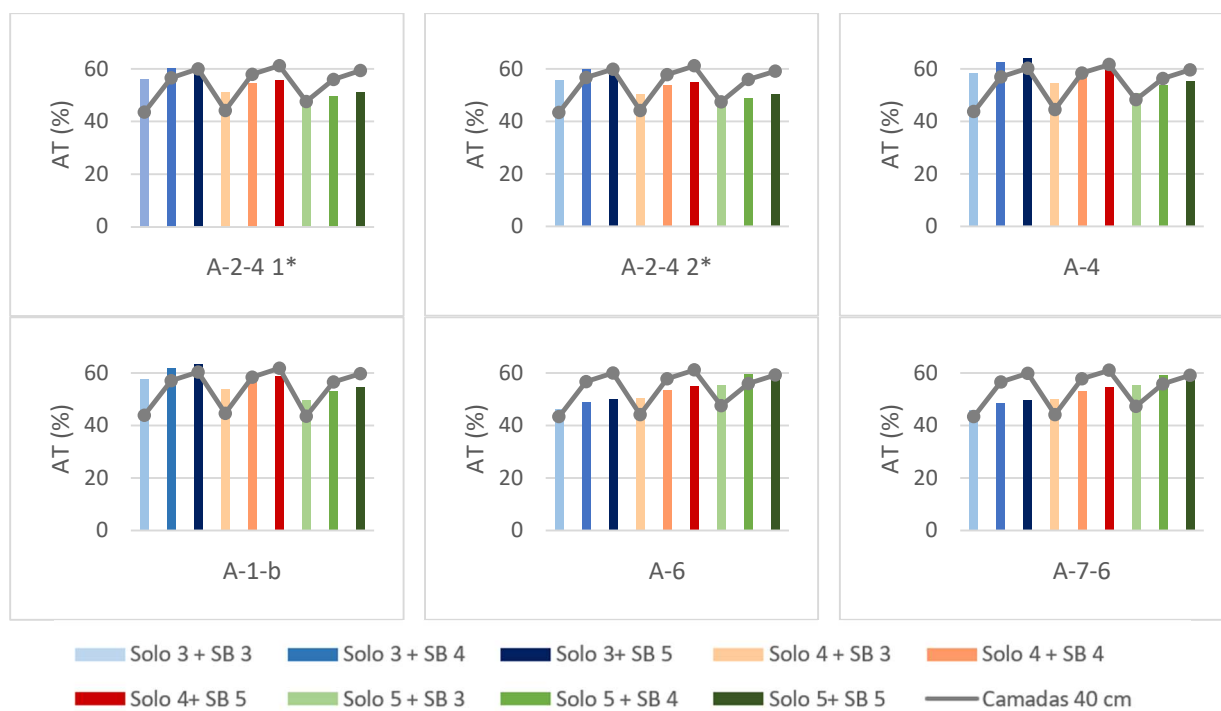
Figura 58: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Quanto ao percentual de área trincada nota-se uma constância nos resultados ao aumentar as espessuras nas camadas granulares, de acordo com a Figura 59.

Figura 59: Área trincada – Tráfego elevado – Solo + Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Os valores variam de 43,4 a 62%, e no geral a porcentagem de área trincada elevou com o aumento das espessuras das camadas, exceto para as estruturas formadas pela mistura de Solo-brita 3. Apesar de não chegar a ser inferior ao limite, foi a menor área quando comparado às outras opções testadas.

Dentre todas as opções de alterações nas camadas granulares possíveis, lista-se as que obtiveram os melhores desempenho na Tabela 20.

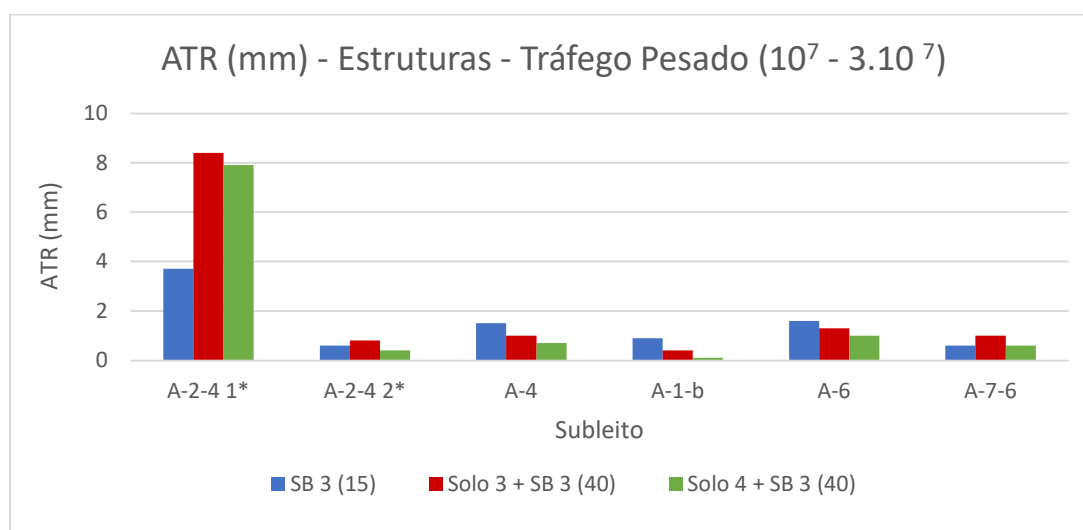
Tabela 20: Desempenho das melhores estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.

Subleito	SB 3 (15)		Solo 3 + SB 3 (40-40)		Solo 4 + SB 3 (40-40)	
	ATR (mm)	AT (%)	ATR (mm)	AT (%)	ATR (mm)	AT (%)
A-2-4 1*	2,9	42,7	7,3	43,5	7,1	44,2
A-2-4 2*	0,7	41,5	0,9	43,4	0,5	44,1
A-4	2,0	49,2	1,1	43,7	0,8	44,5
A-1-b	1,8	47,5	0,4	43,8	0,2	44,6
A-6	1,8	41,6	1,4	43,4	1,1	44,1
A-7-6	0,6	40,9	1,0	43,4	0,7	44,1

Fonte: Autoria própria, 2023.

Como as melhores estruturas ainda não foram suficientes para atender o critério de área trincada, e já foram testadas as camadas granulares com os valores máximos permitido, avaliou-se a influência do aumento na espessura do revestimento no percentual de área trincada, já que o afundamento esteve dentro do limite. Primeiramente alterou-se o valor do revestimento de 5cm para 7,5cm, como mostra a Figura 60.

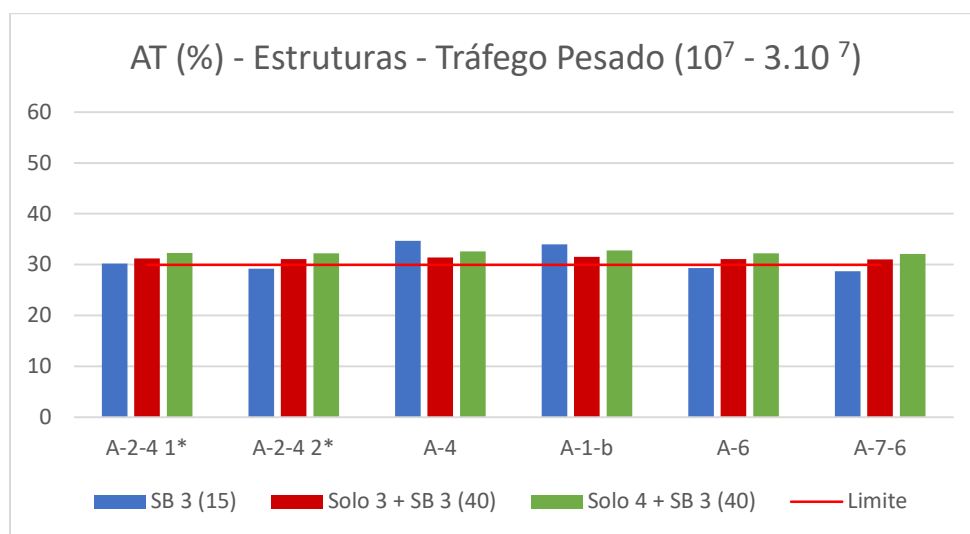
Figura 60: Afundamento do trilho de roda das estruturas seleccionadas - CA(7,5cm) – Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Tem-se que quanto ao afundamento os valores foram todos aceitos quando referido a deformação total do pavimento, mas no caso da segunda e da terceira estrutura quando associada ao subleito A-2-4 1* o *software* MeDiNa acusou a deformação do subleito ser maior que 5mm, logo não podendo ser aceita. Quanto à deformação, encontrou-se soluções de pavimentos aceitas, mas analisando o percentual de área trincada (Figura 61), notou-se que apenas as estruturas com o Solo-Brita 3 obteve valores satisfatórios, embora não tenha sido para todos os casos.

Figura 61: Área trincada das estruturas selecionadas - CA(7,5cm) – Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Os subleitos que podem usar a estrutura composta por solo-brita no tráfego elevado são: A-2-3 2*, A-6 e A-7-6. Para os demais subleitos foram testadas outras possibilidades de estruturas, variando as espessuras dos materiais, e mantendo o revestimento de 8 cm. A Tabela 21 explicita os principais resultados obtidos, onde a estrutura composta apenas pelo Solo-Brita 3 foi aceita para o Subleito A-2-4 1* sem necessidade de mudanças, para o Subleito A-4 precisou aumentar a camada de base para 40cm, e para o Subleito A-1-b não foi aceita, apesar das alterações realizadas. O incremento de 0,5 no revestimento da estrutura composta pelo Solo 3 e a mistura Solo-Brita 3 foi suficiente para atender todos os subleitos. Já a estrutura com Solo 4 e Solo-Brita 3 só foi aceita pelo Subleito A-2-4 1*, e para isso precisou reduzir a espessura da base para 15cm.

Tabela 21: Desempenho das estruturas com CA(8cm) - Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.

Subleito	Área Trincada (%) - Estrutura com CA (8 cm)					
	SB3(15)	SB3 (40)	S3+ SB 3 (40-40)	S4 + SB4 (40-40)	S3 + SB3 (35-15)	S4 + SB4 (40-15)
A-2-4 1*	28,3	29	29,2	30,4	29,9	29,8
A-4	32,5	30	29,4	30,7	31,3	30,6
A-1-b	31,9	30,2	29,6	30,9	31,1	30,8

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para o Subleito A-1-b foi necessária uma estrutura mais robusta. Assim, testou-se outras opções de estruturas mais esbeltas, mas com um revestimento um pouco mais espesso, e chegou-se a seguinte proposta: 15cm de Solo-Brita 3 + 8,5cm de CA. De tal modo que pode-se reunir na Tabela 22 as possibilidades mais atrativas para cada subleito disponível.

Tabela 22: Dimensionamento das estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Norte.

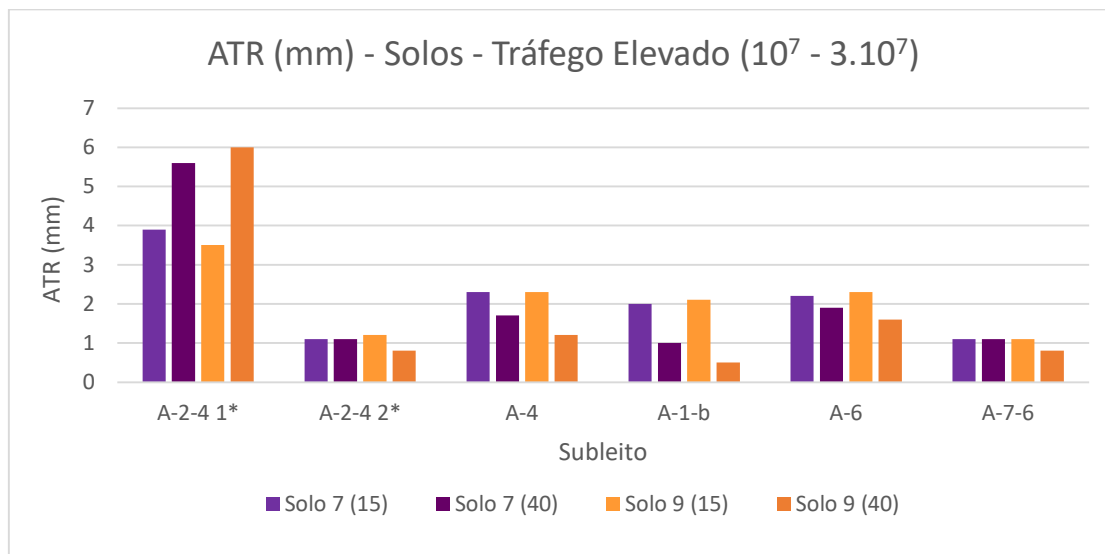
	Subleito						
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6	
Sub-base - Solo 3 (cm)	-	-	-	-	40	-	-
Base - Solo-Brita 3(cm)	15	15	40	15	40	15	15
Revestimento - CA (cm)	8	7,5	8	8,5	8	7,5	7,5
ATR (mm)	3,9	0,6	0,9	0,4	0,7	1,6	0,6
AT (%)	28,3	29,2	30	29,6	30	29,3	28,7

Fonte: Autoria própria, 2023.

- Sub-Região Central

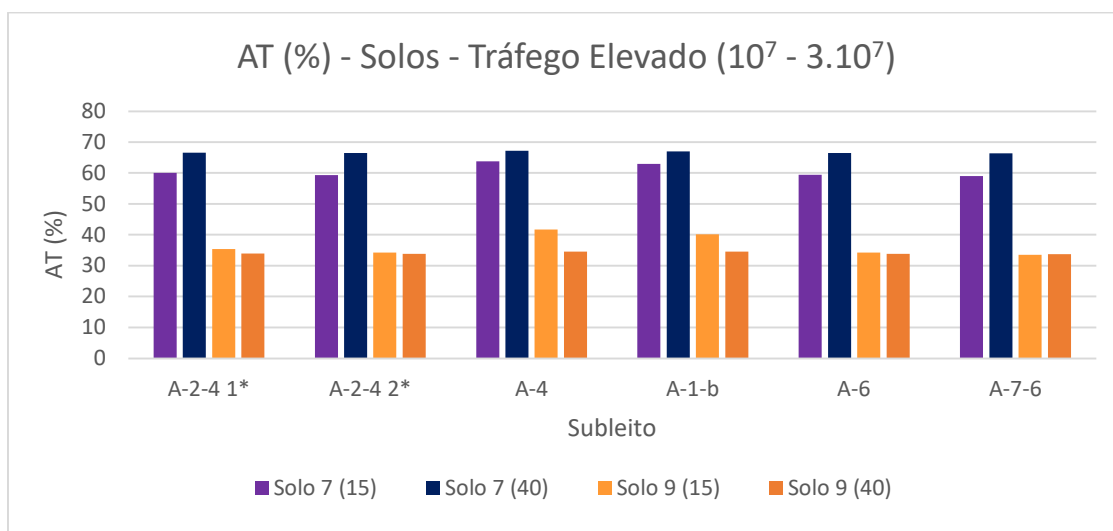
Para a Sub-região Central foram avaliados dois solos, e com eles testou-se a eficiência com estruturas mínimas e máximas, percebe-se que ao se aumentar a espessura da camada de base, o ATR tendeu a diminuir para as duas estruturas em todos os subleitos testados, exceto para o Subleito A-2-4 1*, como pode ser visto na Figura 62. Na Figura 63 observa-se que o percentual de área trincada aumenta em torno de 7 % com o aumento da camada de base do Solo 7. Já nas estruturas com Solo 9 observa-se uma leve diminuição dessa área, em alguns subleitos não havendo mudança significativas, sendo mais notória nos Subleitos A-4 e o A-1-b, com uma redução de 7%.

Figura 62: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.



Fonte: Autoria própria, 2023.

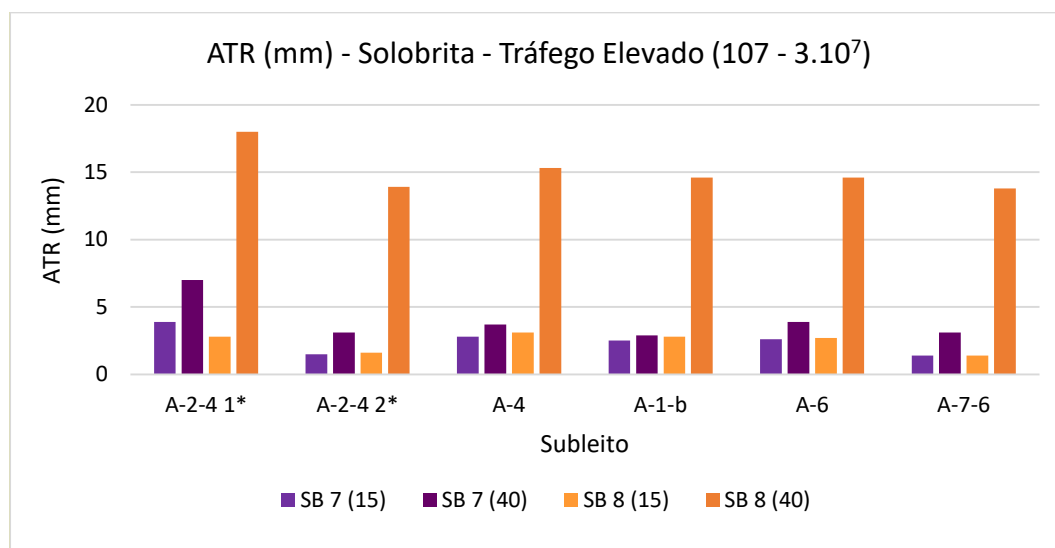
Figura 63: Área trincada - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Região Central



Fonte: Autoria própria, 2023.

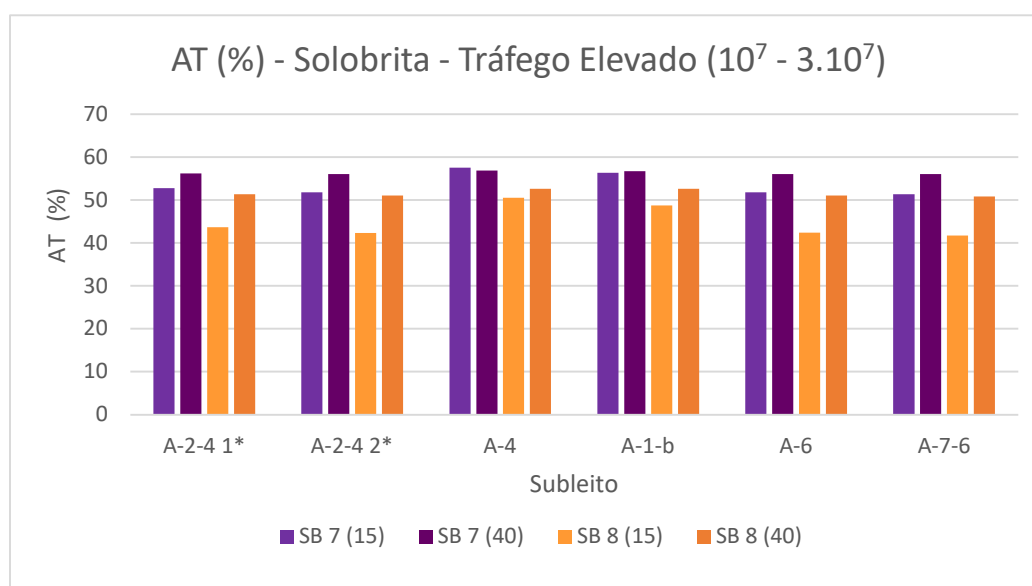
Considerando que usando-se camadas granulares apenas com solos, não foi possível atender ao tráfego dessa região, foram estudadas ainda 2 misturas estabilizadas granulometricamente de solo com brita. Essas misturas foram inicialmente avaliadas com as espessuras mínima e máxima, e notou-se que o aumento da espessura gerou um ATR maior, principalmente para a mistura com o Solo 9, onde chegou-se a 18mm de ATR, conforme pode ser observado na Figura 64. Houve um aumento também no percentual de área trincada com o aumento da espessura da camada de base, chegando até a 56%, invalidando o uso do material, como mostra a Figura 65.

Figura 64: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo-brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 65: Área trincada - Tráfego elevado - Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.

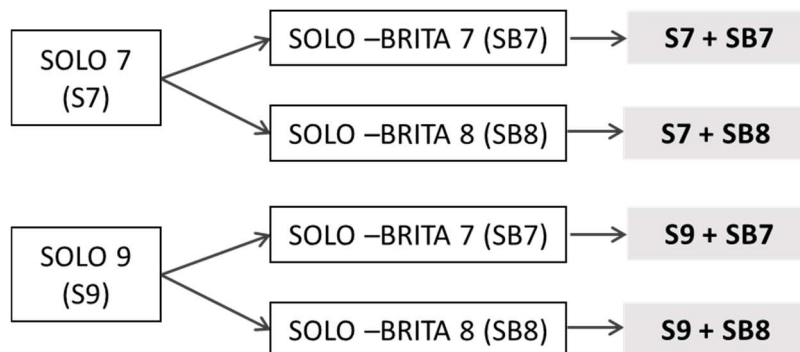


Fonte: Autoria própria, 2023.

Assim como ocorreu para a Sub-região Norte, as estruturas compostas apenas por solo, não foram suficientes para atender ao tráfego solicitado. Assim, testou-se estruturas compostas por solo na sub-base e a base com solo-brita. Como tem-se 2 solos e 2 misturas de solo-britas, gerou-se 4 estruturas diferentes, que foram simuladas para cada subleito,

e dispostas com várias espessuras, totalizando assim mais de 150 simulações. As estruturas analisadas estão representadas na Figura 66.

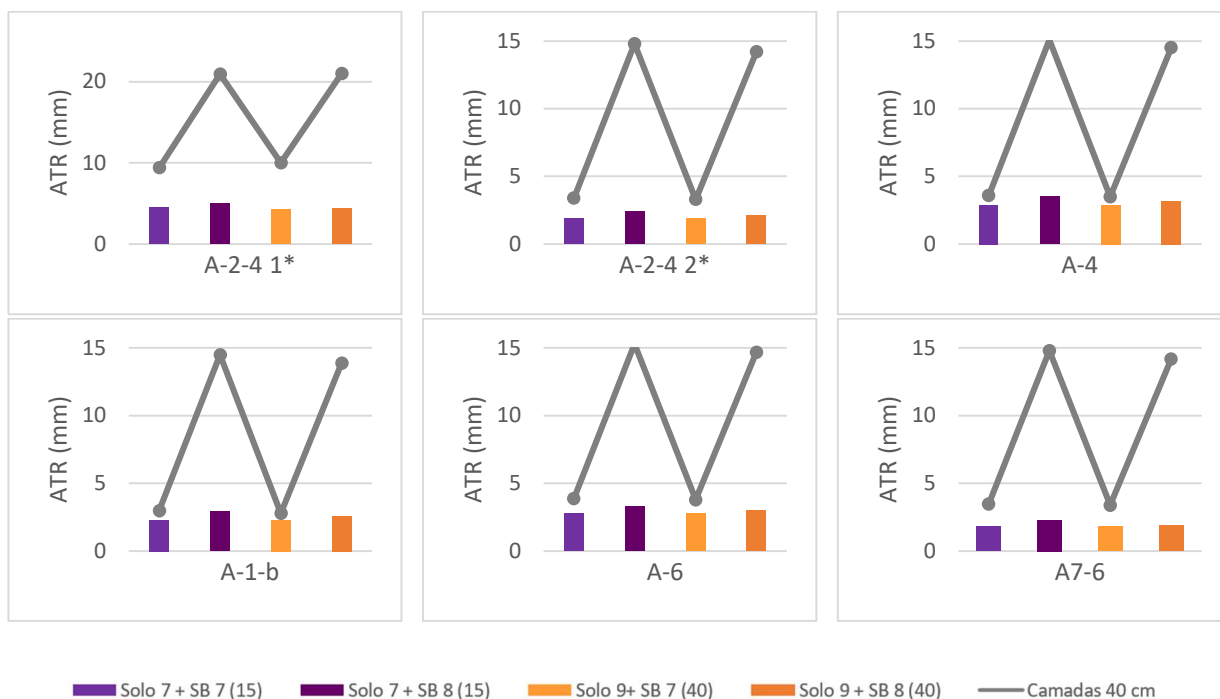
Figura 66: Estruturas propostas – Sub-Região Central.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Foram analisadas as estruturas com camadas mínimas, 15cm, e máximas, 40cm, e observou-se, de acordo com a Figura 67, que o comportamento das estruturas quanto ao ATR, piora com o aumento da estrutura, chegando até a 20mm, no caso do Subleito A-2-4 1*. Nota-se também, que as maiores deformações ocorrem com as estruturas compostas pela mistura de Solo-brita 8.

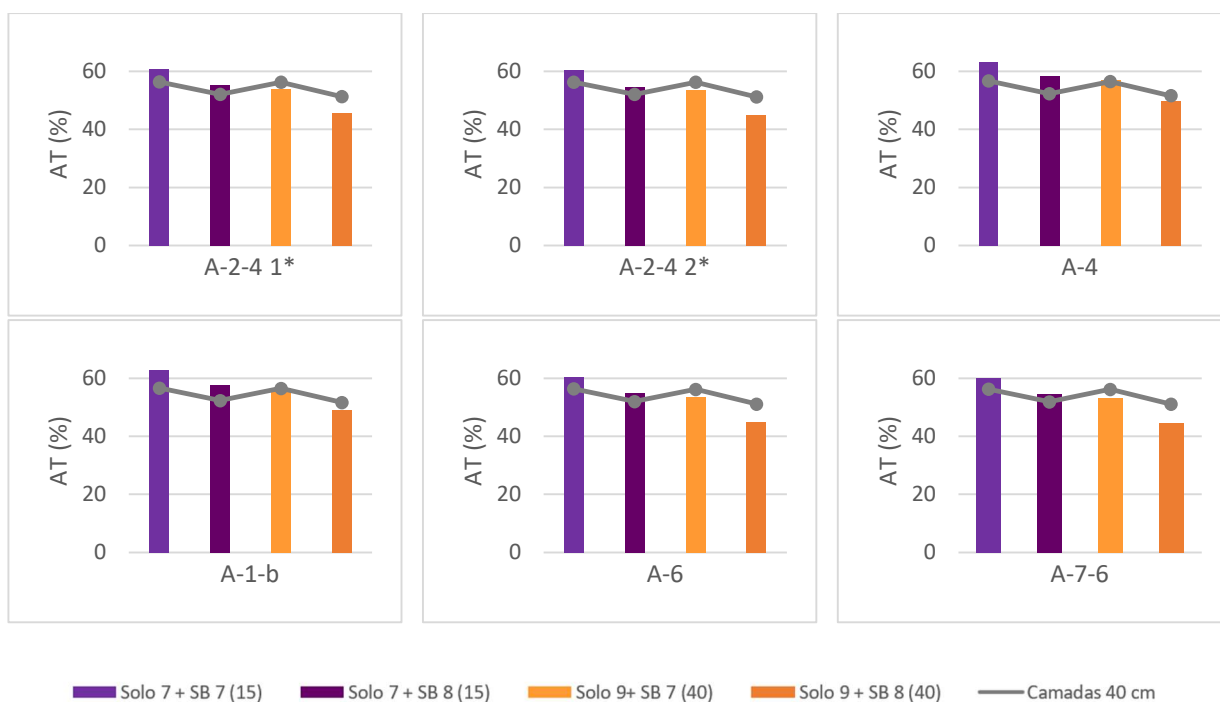
Figura 67: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Quanto ao percentual de área trincada, observa-se que com o aumento na espessura do pavimento, ocorre uma redução da área trincada para as estruturas formada pelo Solo 7, e uma elevação para as realizadas com o Solo 9. Os valores variam de 45% a 63%, ainda acima do limite permitido, 30%, como ilustra a Figura 68.

Figura 68: Área trincada - Tráfego elevado - Solo + Solo-Brita (15cm e 40cm) – Sub-Região Central.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Apesar de todas as tentativas de fornecer uma estrutura mais econômica, com o revestimento na espessura mínima, não foram obtidas estruturas aceitáveis em relação a porcentagem de área trincada. O aumento na espessura das camadas e o incremento de outro material gerou, no geral, valores de deformação de área trincada ainda maiores. Diante das opções simuladas, as estruturas mais simples, compostas apenas pelo Solo 9, obtiveram valores de área trincada menor, mesmo que um pouco acima do permitido. Outra estrutura que também alcançou valores próximos, foi aquela composta apenas por uma camada de 15cm de SB8 (Solo 9 + Brita 8). Pode ver na Tabela 23 o resumo do desempenho desses materiais.

Tabela 23: Desempenho das melhores estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Central.

Subleito	S9 (15 cm)		SB8 (15 cm)	
	ATR (mm)	AT (%)	ATR (mm)	AT (%)
A-2-4 1*	3,5	35,4	2,8	43,6
A-2-4 2*	1,2	34,2	1,6	42,3
A-4	2,3	41,7	3,1	50,5
A-1-b	2,1	40,1	2,8	48,7
A-6	2,3	34,2	2,7	42,4
A-7-6	1,1	33,5	1,4	41,7

Fonte: Autoria própria, 2023.

Diante do exposto, avaliou-se o aumento na espessura do revestimento, e como o esperado, o melhor desempenho, conforme já vinha-se notando, foram estruturas com o Solo 9. Assim, na Tabela 24 pode observar as melhores opções de estruturas para esse tráfego.

Tabela 24: Dimensionamento das estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Central

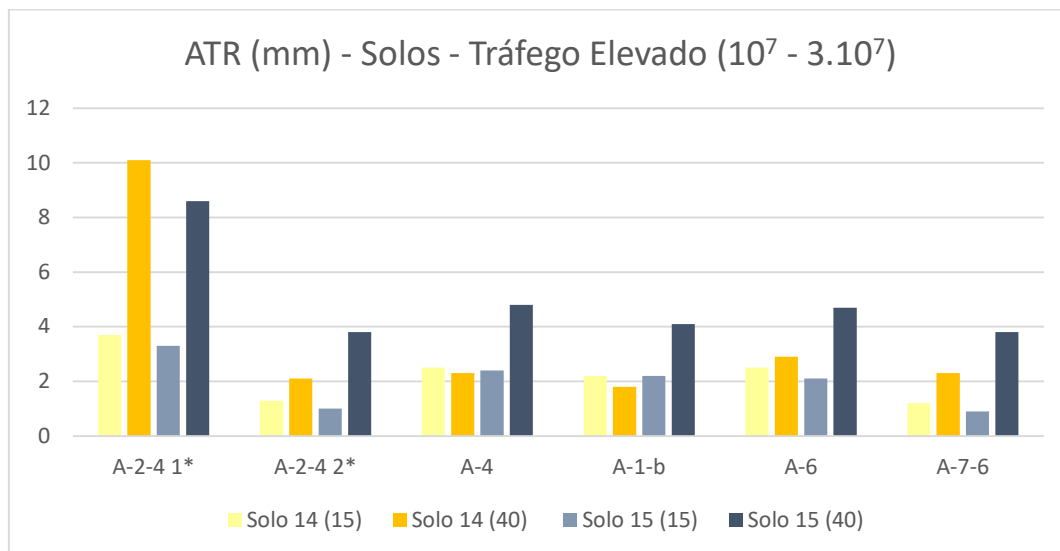
	Subleito.					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 9 (cm)	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	7	6,5	8	8	6,5	6,5
ATR (mm)	3,8	1	1,6	1	2,1	1
AT (%)	28,6	29,4	29,7	29,1	29,5	28,8

Autoria própria, 2023.

- Sub-Região Sul

Na Sub-região Sul, foram testados mais dois solos, onde foi analisado o efeito da espessura mínima e máxima, conforme Figura 69, e observou-se que o aumento da espessura, causou o aumento do ATR, melhor percebido para as estruturas simuladas com o Solo 15. Também identificou-se que no Subleito A-2-4 1*, foram previstos ATR maiores do que o limite máximo, para ambas as estruturas com espessura máxima, o que mostra que o aumento na espessura cause uma sobrecarga, e não um reforço.

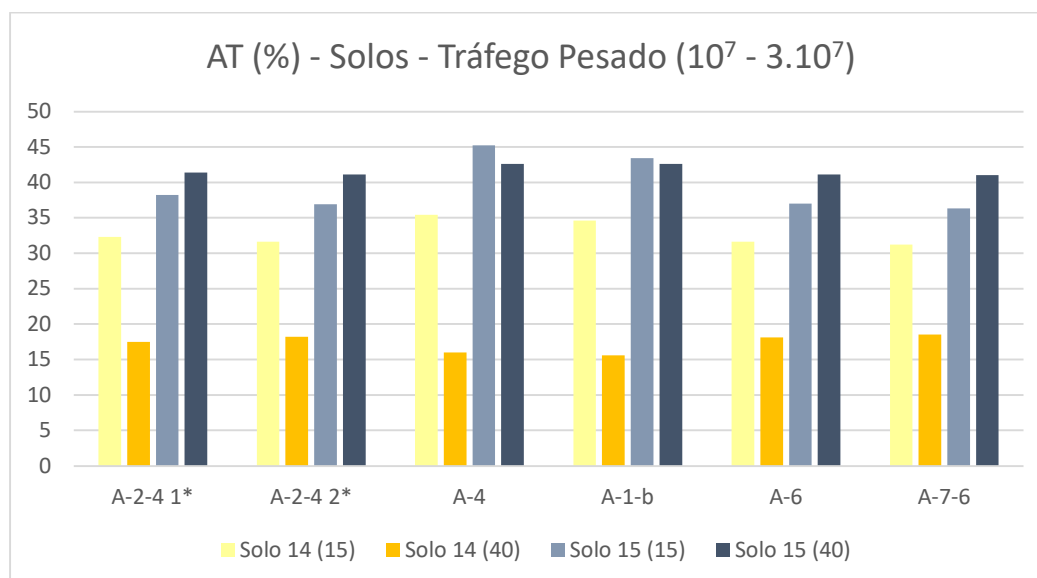
Figura 69: Afundamento de trilho de roda - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Sul.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Quanto ao percentual de área trincada, notou-se que para o Solo 14, houve uma redução em até a metade do valor da estrutura mais esbelta, ficando com valores entre 16 e 18%, ou seja, dentro do limite máximo permitido. Já para o Solo 15 tem-se um pequeno aumento, e os valores ficaram fora da faixa permitida, como pode ser visto a Figura 70.

Figura 70: Área trincada - Tráfego elevado - Solos (15cm e 40cm) – Sub-Região Sul.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A partir das diversas simulações realizadas, observa-se que a estrutura mais simples, com a espessura máxima, atendeu à demanda do tráfego elevado, para quase todos os diferentes subleitos, exceto para o Subleito A-2-4 1*, como pode ser visto na Tabela 25. Apesar do ATR para esse subleito ser menor que o limite para esse tráfego, 20mm, o *software* alertou para um afundamento excessivo no subleito e condenou o uso. Assim, realizou-se outras sequências de simulações para essa situação específica. A solução que melhor satisfez foi a redução da camada de base e aumento no revestimento. Assim, tem-se conforme Tabela 26 as seguintes propostas de estruturas de dimensionamento para a sub-região Sul.

Tabela 25: Desempenho da estrutura S14 (40 cm) – Tráfego Elevado – Sub-Região Sul.

Solo 14 (40 cm)		
Subleitos	ATR (mm)	AT (%)
A-2-4 2*	10,1	17,5
A-6	2,1	18,2
A-7-6	2,3	16
A-2-4 1*	1,8	15,6
A-4	2,9	18,1
A-1-b	2,3	18,5

Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 26: Dimensionamento das estruturas – Tráfego Elevado – Sub-Região Sul.

	Subleitos					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 14 (cm)	15	40	40	40	40	40
Revestimento (cm)	6	5	5	5	5	5
ATR (mm)	3,8	2,1	2,3	1,8	2,9	2,3
AT (%)	29,6	18,2	16	15,6	18,1	18,5

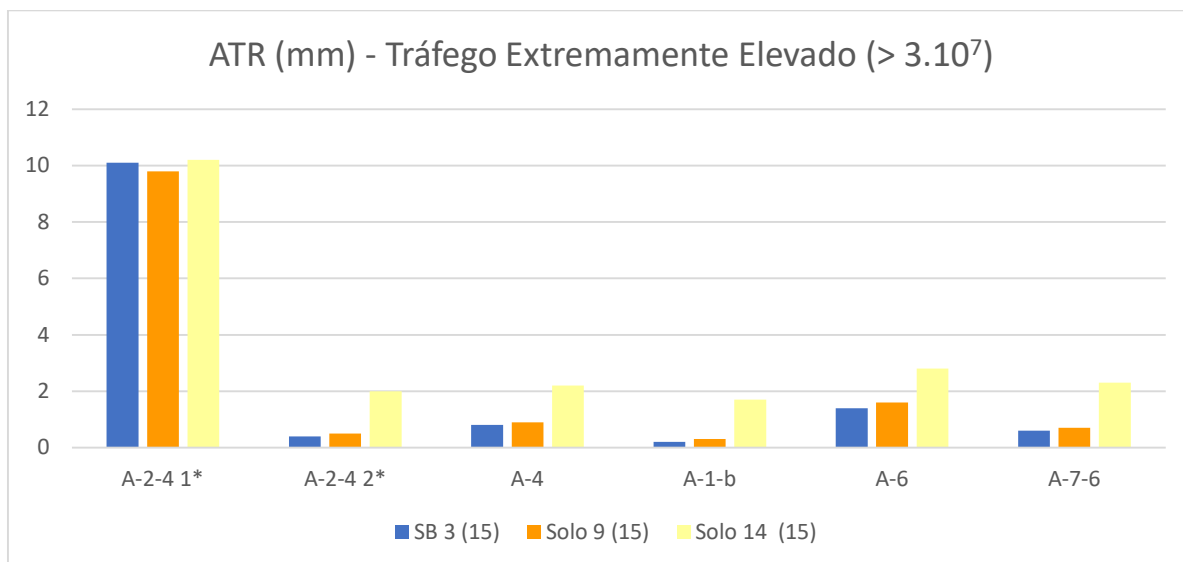
Fonte: Autoria própria, 2023.

- Tráfego extremamente elevado

Considerando que as estruturas simuladas com valores máximos das camadas granulares, não foram suficientes para atender ao tráfego elevado nas sub-regiões Norte e Centro, também não seriam para atender a um tráfego extremamente elevado. Assim, para atender essa demanda foi proposto um acréscimo na camada de revestimento para o valor máximo, 15 cm. Fez-se isso para as estruturas que obtiveram um melhor desempenho para o tráfego elevado nessas regiões. Testou-se também a estrutura adotada

para o tráfego elevado da sub-região sul, e obteve-se os seguintes resultados: Em relação ao ATR, todas as estruturas atenderam o tráfego, exceto para a condição do Subleito A-2-4 1*, conforme pode ser visto Figura 71.

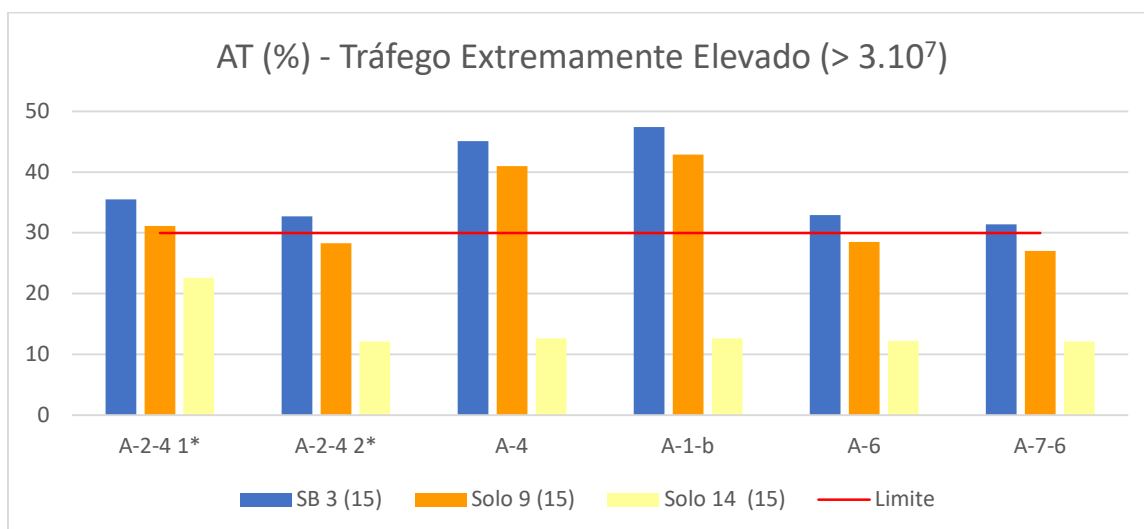
Figura 71: Afundamento do trilho de roda - Materiais - Tráfego Extremamente Elevado ($> 3.10^7$)



Fonte: Autoria própria, 2023.

A porcentagem de área trincada para esses materiais pode ser vista na Figura 72.

Figura 72: Área trincada - Materiais - Tráfego Extremamente Elevado ($> 3.10^7$).



Fonte: Autoria própria, 2023.

Quanto à área trincada, tem-se que a estrutura da Sub-região Norte (Solo-Brita 3) possui valores acima do permitido. Já estrutura da Sub-região sul (Solo 14) possui área de trincamento inferior ao limite, podendo ser usada, exceto para o Subleito A-2-4 1 *. E a estrutura da Sub-região Central (Solo 9), oscila a depender dos subleitos, sendo aceita para os subleitos de classes A-2-4 2*, A-6 e A-7-6, de acordo com a Figura 72.

Um resumo de todas essas possibilidades é apresentado na Tabela 27. Ela fornece as estruturas disponíveis de acordo com a sub-região e o subleito. Vale ressaltar que para a Sub-região Norte não se obteve nenhuma estrutura correspondente a esse tráfego, com os materiais disponíveis, sendo essa uma clara limitação desse estudo.

Tabela 27: Dimensionamento das estruturas – Tráfego E.E. – Sub-Regiões Centro e Sul.

	Subleitos					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Sub-Região Central						
Base - Solo 9 (cm)	-	15	-	-	15	15
Revestimento - CA (cm)	-	15	-	-	15	15
ATR (mm)	-	0,5	-	-	1,6	0,7
AT (%)	-	28,3	-	-	28,5	27
Sub-Região Sul						
Base - Solo 14 (cm)	-	40	40	40	40	40
Revestimento - CA (cm)	-	15	15	15	15	15
ATR (mm)	-	2	2,2	1,7	2,8	2,3
AT (%)	-	12,1	12,6	12,6	12,2	12,1

Fonte: Autoria própria, 2023.

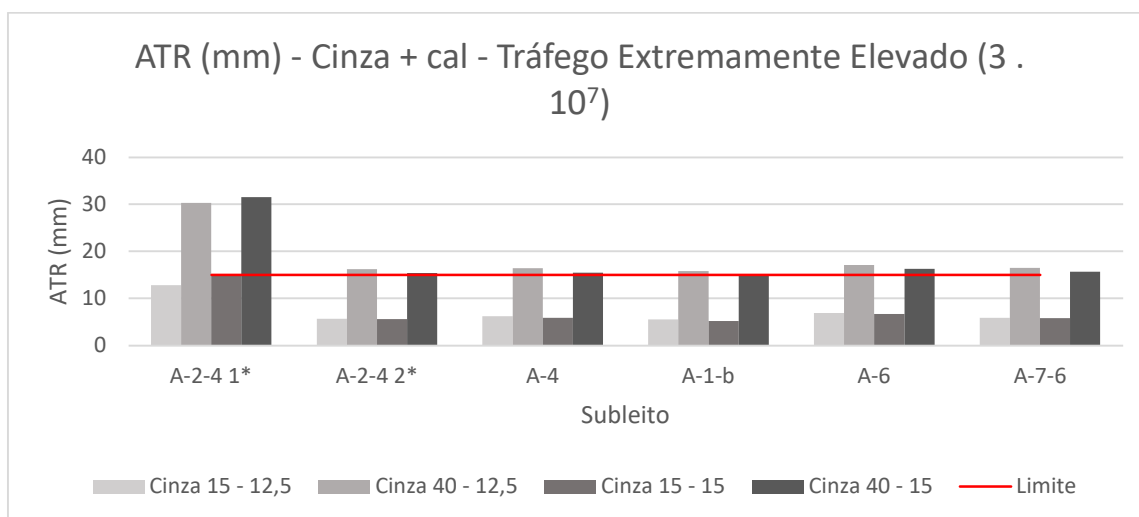
Constatando-se que para alguns casos, mesmo alterando-se a camada do revestimento para o valor máximo, 15 cm, as estruturas ainda não passaram no critério de área trincada inferior a 30% e, na tentativa de se transpor essa limitação, foi necessário buscar na literatura outras opções de materiais. Geralmente para esse tráfego é esperado camadas granulares com estabilizações químicas, devido a maior rigidez que proporcionam à estrutura, então buscou-se na literatura local misturas já testadas, e foi encontrado o estudo de Vasconcelos (2018), que avaliou e aplicou misturas com cinza e cal em um trecho experimental no Pecém.

Destaque-se nessa proposição que, cinzas são resíduos e como tal, seu uso concorre para a diminuição do impacto ambiental de seu descarte, além da redução do custo de estabilização química, uma vez que haverá a diminuição do uso da Cal. A proporção, por usada por Vasconcelos (2018), que obteve um melhor rendimento foi de

95% de cinza e 5 % de cal, então essa mistura foi replicada em laboratório, para se obter os parâmetros desejados no dimensionamento.

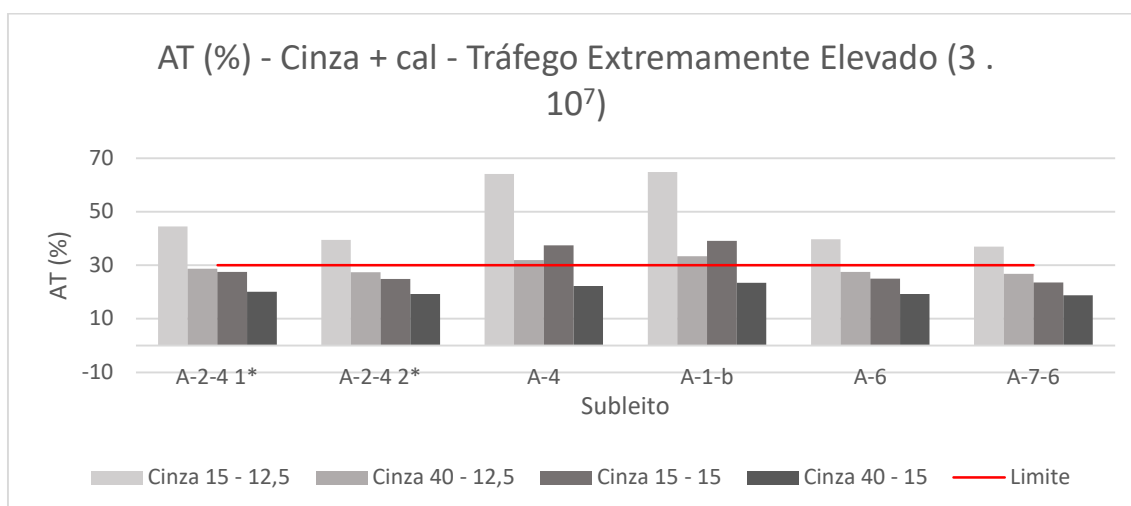
As estruturas mais esbeltas, obtiveram um menor ATR, acredita-se que o aumento da camada gera um sobrepeso, que lhe causa esse maior afundamento, de acordo com a Figura 73. Também é possível observar que a espessura do revestimento é indiferente a esse parâmetro. Entre as 4 soluções propostas, apenas duas satisfazem a esse critério, são as estruturas compostas por 15cm de mistura de cinza e cal e o revestimento com 12,5cm ou 15cm.

Figura 73: Afundamento de trilho de roda - Cinza-cal - Tráfego Extremamente Elevado (> 3.107)



Fonte: Aatoria própria, 2023.

Para a análise do percentual de área trincada, a espessura do revestimento é bem representativa para os resultados, onde tem-se que o aumento da espessura do revestimento pode aliviar a área trincada. Na Figura 74 é possível identificar que a estrutura mais robusta, ou seja, com 40 cm de cinza com cal e 15 cm de revestimento, é a que apresenta menor área trincada, sendo aceita para todos os subleitos nesse quesito, porém não atende ao critério de ATR. As estruturas formadas por 40 cm de cinza-cal e 12,5cm de CA ou 15cm de cinza-cal e 15 cm de CA, no geral, apresentaram valores abaixo do limite, exceto para o subleito A-4 e A-1-b.

Figura 74: Área trincada - Cinza-cal - Tráfego Extremamente Elevado (> 3.10⁷)

Fonte: Autoria própria, 2023.

Porém, ao se analisar essas três misturas, que via de regra, possuem valores que atendem ao critério de área trincada, somente uma se enquadra no parâmetro de ATR, logo, só essa satisfaz aos dois critérios, podendo assim ser utilizada para esse tráfego. Essa estrutura é constituída por 15 cm da mistura de solo com cal e 15 cm de revestimento. Para tanto a mistura tem limitação de uso para os subleitos A-4 e A-1-b. Então executou-se mais simulações, alterando-se os valores de espessura da camada de base, até encontrar um valor que atendesse ambos os critérios de aceitação do dimensionamento. Assim, temos na Tabela 28 as estruturas propostas para atender a esse tráfego associado a cada subleito estudado.

Tabela 28: Dimensionamento das estruturas – Tráfego Extremamente Elevado

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base – Cinza-cal (cm)	15	15	25	25	15	15
Revestimento (cm)	15	15	15	15	15	15
ATR (mm)	14,9	5,6	9,5	8,9	6,7	5,8
AT (%)	27,5	24,8	29,9	29,9	25	23,5

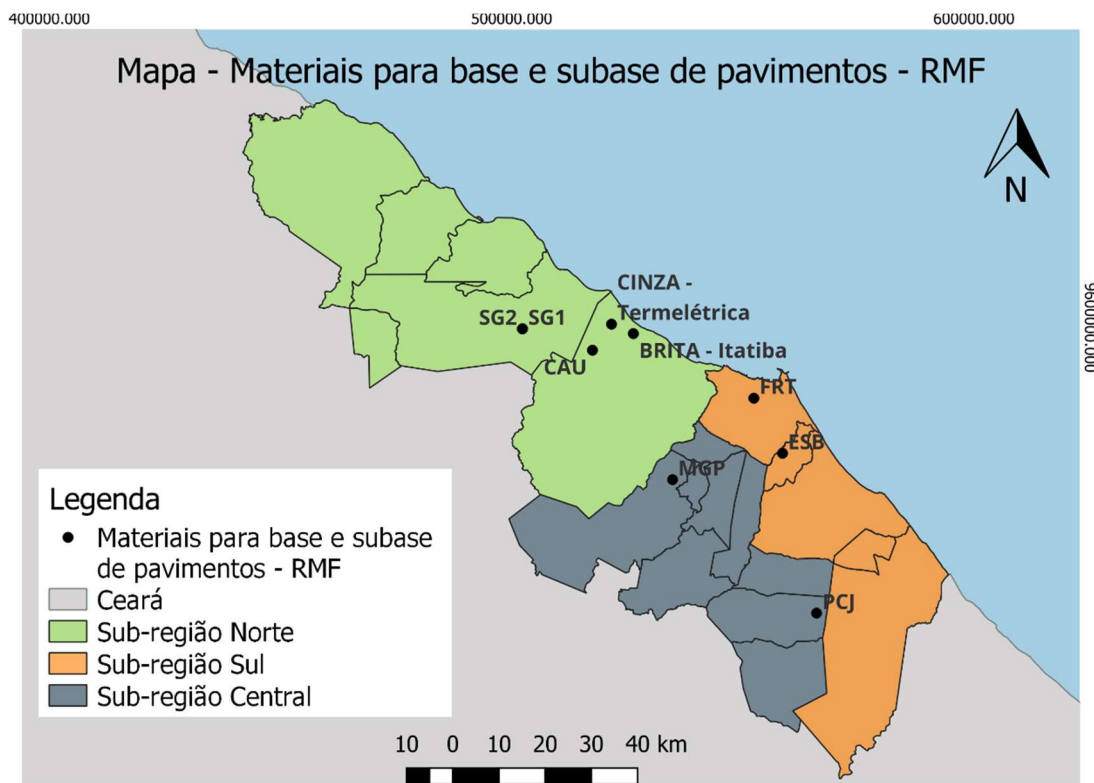
Fonte: Autoria própria, 2023.

4.5.4 Fichas catalográficas

Com o resultado das simulações realizadas, sob diferentes soluções de dimensionamento em função do tráfego e do subleito locais, e associado às Sub-regiões definidas, foi possível reunir essas informações em forma de fichas catalográficas, como

mostram os Quadros 3, 4 e 5. Para facilitar a identificação e localização dos materiais foram atribuídas siglas de acordo com o nome dos municípios, conforme Figura 75 e 76. O catálogo completo pode ser visualizado no Apêndice A.

Figura 75: Materiais para base e subbase de pavimentos -RMF



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 76: Legenda dos materiais de pavimentação - RMF



Fonte: Autoria própria, 2023.

Quadro 4: Ficha catalográfica – Sub-Região Norte da RMF.

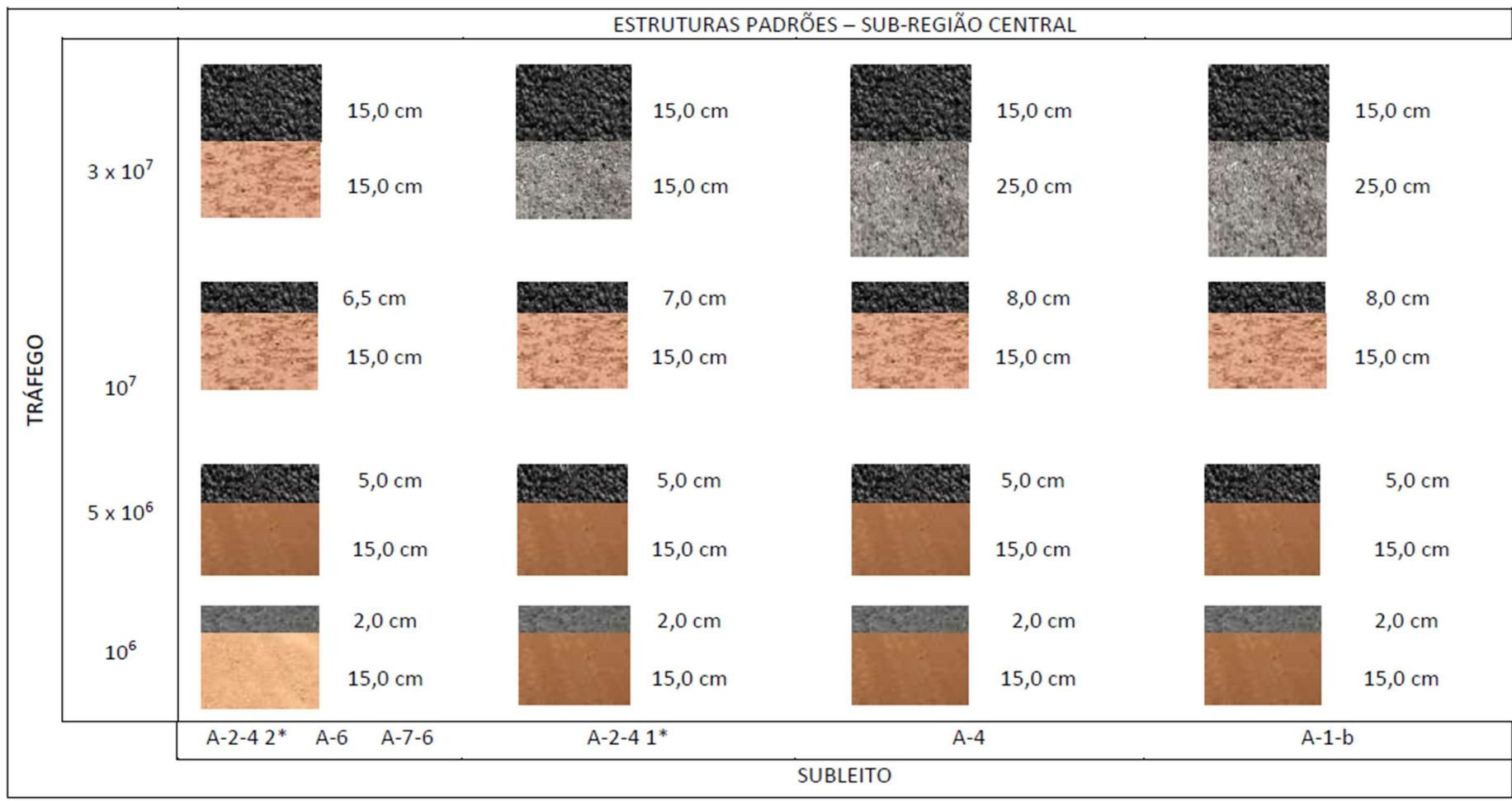
		ESTRUTURAS PADRÕES – SUB-REGIÃO NORTE											
TRÁFEGO	3 x 10 ⁷		15,0 cm		15,0 cm		15,0 cm		15,0 cm		25,0 cm		25,0 cm
	10 ⁷		7,5 cm		15,0 cm		8,0 cm		15,0 cm		40,0 cm		15,0 cm
	5 x 10 ⁶		5,0 cm		15,0 cm		5,0 cm		15,0 cm		15,0 cm		15,0 cm
	10 ⁶		2,0 cm		15,0 cm		2,0 cm		15,0 cm		15,0 cm		15,0 cm
		A-2-4 2*	A-6	A-7-6	A-2-4 1*		A-4		A-6				
SUBLEITO													

Legenda

- TSD
- CA
- Solos SG1, SG2 ou CAU
- Solo-brita CAU-BRITA
- Cinza-cal

Fonte: Autoria própria, 2023

Quadro 5: Ficha catalográfica – Sub-Região Central – RMF.

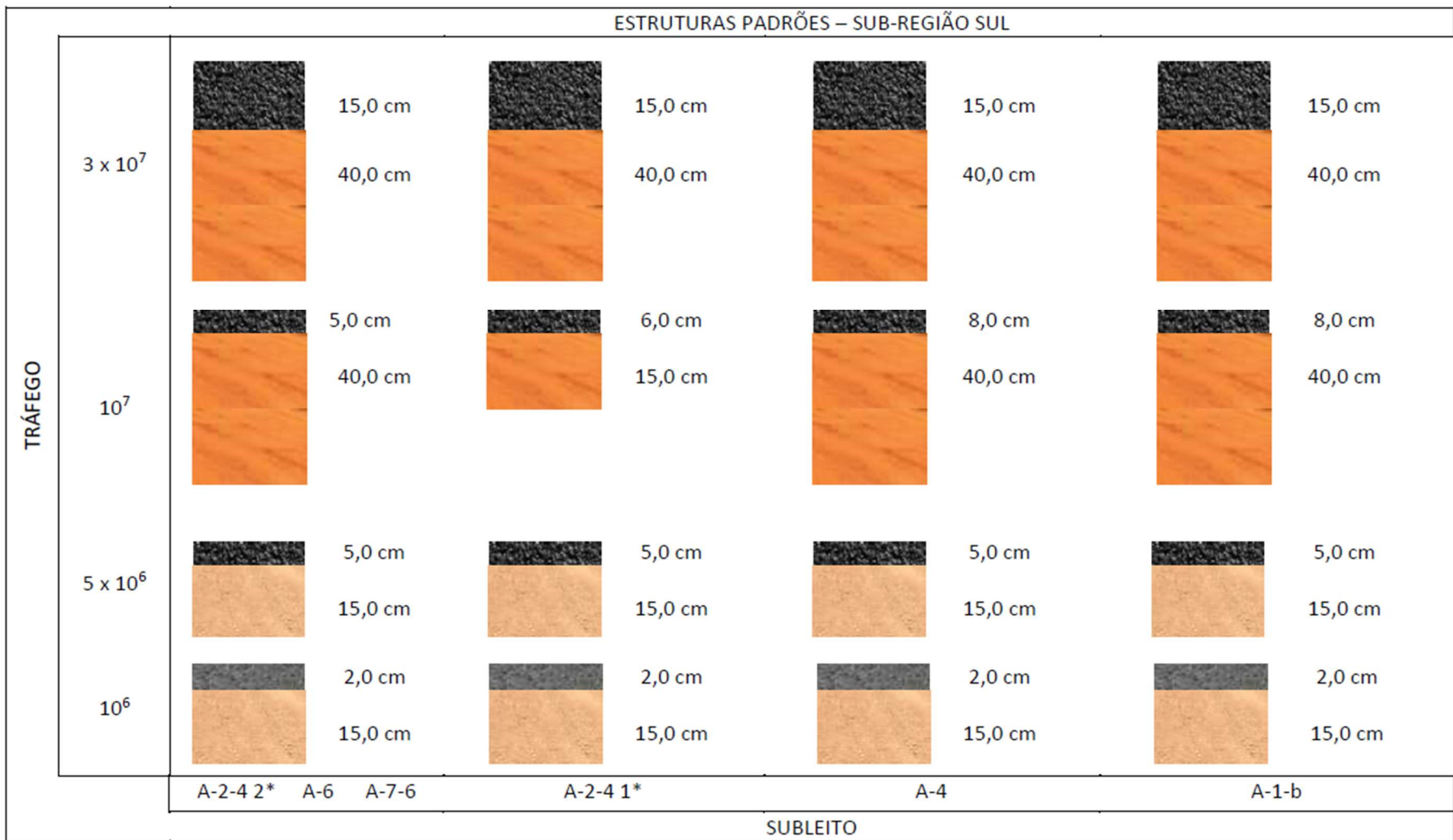


Legenda

- | | | | |
|---|-----|---|------------------|
|  | TSD |  | Solos MGP ou PCJ |
|  | CA |  | Solo PCJ |
| | |  | Cinza-cal |

Fonte: Autoria própria, 2023

Quadro 6: Ficha catalográfica – Sub-Região Sul – RMF



Fonte: Aatoria própria, 2023

4.6 Considerações finais

Visando atingir o objetivo principal desta investigação, qual seja, a construção de um catálogo simplificado de estruturas padrão de pavimentos flexíveis para a RMF, foram realizadas centenas de simulações, usando os solos e britas locais, associados aos diferentes subleito e tráfego. Tentando-se separar os subleitos de acordo com seu comportamento, foi considerada a classificação AASHTO, devido a ela agregar solos com características comuns. Para o tráfego foi considerada a hierarquização proposta por Bastos, 2016.

Analisando-se os materiais estudados e as simulações realizadas, constata-se que as estruturas mais esbeltas, geralmente, obtiveram um desempenho melhor, menor área trincada e menor ATR. Dependendo do material, o aumento na espessura da camada parece gerar uma sobrecarga na estrutura, agravando esses danos, fato ocorrido com os materiais disponíveis nas sub-regiões Norte e Centro. Apenas o material da sub-região sul, Solo 14, obteve melhores desempenhos com o acréscimo da espessura da camada de base. Sendo suficiente para atender todas as demandas solicitadas.

Foi possível observar ainda, que as misturas estabilizadas granulometricamente, não proporcionaram resultados significativamente melhores, quando comparada a camadas apenas com solos, como pode ser observado na comparação entre as camadas apenas com o Solo 5 e o Solo 5 + Brita. Contudo, para outras regiões, estruturas de camadas somente com solo, suportaram até o tráfego extremamente elevado, considerando a espessura máxima da camada de base e de revestimento.

Diferente da sub-região Sul, na qual os materiais naturais atenderam a demanda de tráfego, para as sub-regiões Norte e Central, foi necessário o uso de misturas quimicamente estabilizadas, para suportar o tráfego extremamente elevado. Para ultrapassar essa limitação, simulou-se a alternativa proposta por Vasconcelos (2018), com a união de cinza e cal, na proporção (95-5), que se mostrou eficiente para essa situação. Ressalte-se aqui as contribuições ambiental e econômica dessa solução, uma vez que propõe o uso de resíduos na estabilização química e conseqüente redução da Cal.

Diante dos resultados expostos, foi possível confeccionar fichas catalográficas com opções de pavimento para toda a RMF, em função do tráfego e do subleito considerados. Gerando-se assim um material simplificado, de fácil e rápido manuseio,

expresso na forma de catálogos de estruturas padrão de pavimentos flexíveis, que pode apoiar novos projetos rodoviários no território dos 19 municípios que compõem a RMF.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões deste estudo, descrevendo as principais contribuições e constatações e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Considerações finais

O conhecimento dos materiais locais, apropriados à pavimentação, contribui para seu melhor aproveitamento e aplicação nas estruturas de pavimentos, considerando tanto suas potencialidades, quanto suas limitações. A partir desse contexto, os estudos aqui apresentados contribuíram em diferentes frentes, quais sejam: iniciando com uma maior compreensão das características geotécnicas dos materiais granulares locais (solos, agregados e resíduos, tanto por meio do esforço amostral quanto do programa experimental. Assim, pode-se concluir sobre diversos aspectos da seguinte maneira:

**a) Análise da qualidade preditiva dos modelos neurais de Ribeiro (2013 e 2016):
Classificação AASHTO, CBR e MR**

Pode-se contribuir na análise da qualidade preditiva dos modelos neurais, desenvolvidos por Ribeiro (2013 e 2016), dedicados à estimação de diferentes propriedades físicas e mecânicas dos solos locais, quais sejam: Classificação AASHTO, CBR e MR. Espera-se que os resultados obtidos possam incentivar a execução e novas análises, testes e aplicações. Adicionalmente, o programa experimental executado permitiu a ampliação do banco de dados geotécnicos, existente no LMP/UFC, de modo a dar suporte a novas investigações e proporcionar atualizações ou desenvolvimento de novos métodos e modelos direcionados à pavimentação na RMF.

b) Avaliações tanto de solos como de misturas estabilizadas fisicamente

O Medina (Método de Dimensionamento Nacional) permite dimensionar pavimentos, a partir do conhecimento do seu comportamento estrutural, representado pela Deformação Permanente (DP), obtida por meio de ensaios dinâmicos. O estudo desse fenômeno favorece a análise do defeito de afundamento de trilha de roda (ATR), um dos

principais processos de deterioração dos pavimentos flexíveis, além do trincamento por fadiga.

As camadas granulares têm uma importante função no comportamento global da estrutura do pavimento e seu estudo é imprescindível para a implementação de pavimentos. Todavia, o parâmetro de DP ainda é pouco difundido no Brasil, principalmente devido ao fato do ensaio ser um processo longo e oneroso. Assim, este trabalho proporcionou avaliações tanto de solos como de misturas estabilizadas fisicamente, que demonstraram a eficiência da metodologia europeia simplificada de laboratório para obtenção de DP em materiais granulares da RMF.

Além disso, o modelo proposto por Guimarães (2009) foi capaz de descrever o comportamento dos materiais da região estudada, de maneira geral com R^2 acima de 0,90. Para propagar esse conhecimento, esta tese disponibiliza parâmetros de DP de materiais georreferenciados e caracterizados físico e mecanicamente, que são dados de entrada para dimensionamentos mais racionais de projetos rodoviários locais.

c) Proposta de catálogo simplificado de estruturas padrão para pavimentos flexíveis Região Metropolitana de Fortaleza – CE

Esses materiais estudados, associados às informações de tráfego e subleito, serviram de dados de entrada para as simulações realizadas, tendo como resultado final uma proposta de catálogo simplificado de estruturas padrão para pavimentos flexíveis rodoviários para a Região Metropolitana de Fortaleza – CE, de acordo com as condições regionais e de tráfego, de modo a ser um guia de referência rápida e preliminar para os envolvidos na realização de estudos e projetos rodoviários nos 19 municípios que compõem a RMF.

Soares, Moreno e Motta (2009) alertaram, em seus estudos, sobre as dificuldades de reprodução de catálogos no Brasil. Os países europeus, que adotam essa metodologia, possuem área muito pequena em relação ao território brasileiro, sendo menores que 10% do nosso território. Além disso, a malha rodoviária brasileira apresenta uma baixa densidade em relação à dimensão do país e, há uma alta variabilidade de solos e climas, o que acarretaria em uma elevação de custos para predefinir estruturas que comportem todos os tipos de subleitos existentes. No entanto, a adoção de um catálogo para pequenas

regiões ou estados pode ser vantajosa, haja vista que os problemas quanto à extensão e variabilidade dos tipos de subleitos do território abrangido pelo catálogo serão mitigados.

Espera-se, assim, que este trabalho consiga aproximar o estado da arte do dimensionamento de pavimento no Brasil com o da prática, difundindo o MR e a DP por meio do catálogo de estruturas padrão de pavimentos flexíveis, proposto para a Região Metropolitana de Fortaleza, uma vez que foram geradas de forma racional e simples, diversas estruturas de pavimento, com base no novo método e no comportamento geotécnico dos materiais locais.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

De forma a complementar o estudo desenvolvido nesta pesquisa, seguem algumas sugestões e recomendações para execução de trabalhos futuros referentes a temática abordada.

- a) Coletar materiais diversos dos aqui estudados que ocorrem na RMF;
- b) Estender o estudo para outras regiões do estado do Ceará;
- c) Construir um catálogo de estruturas que use outros resíduos e materiais alternativos.

REFERÊNCIAS

ACIKGÖZ, O.; RAUF, R. **Analysis of Parameters Affecting Permanent Deformation in Road Pavement**. Master's Dissertation presented to the Post-Graduation Program on Road and Traffic from Department of Civil And Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010.

ARAUJO, Arielton Fonteles. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com Cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do Estado do Ceará**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

BARKSDALE, R. D. **Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials**. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 3., 1972, London. Proceedings [...]. London, 1972. p. 161-174.

BARROS, L. M.; LIMA, C. D. A.; NASCIMENTO, L. A. H.; MOTTA, L. M. G. ARAGÃO, F. T. S. **Aspectos dos ensaios de deformação permanente e a perspectiva brasileira para utilização no dimensionamento de pavimentos asfálticos**. *In*: CONGRESSO PESQUISA EM TRANSPORTE - ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. Anais [...]. Balneário Camboriú, 2019. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20I/4_277_AC.pdf. Acesso em: 22 maio. 2020.

BASTOS, Juceline Batista dos Santos. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecânico-empírico**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/23173>. Acesso em: 23 fev. 2020.

BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/5627>. Acesso em: 13 nov. 2020.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. PETROBRAS; ABEDA, 2006.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 4. ed., Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Petrobrás, ABEDA, 2010. 1v.

BEZERRA NETO, Rogério Silveira. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empíricos do DNER e mecânico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**.

2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CABRAL, Wendel da Silva. **Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação Permanente de materiais granulares da microrregião de Mossoró/RN**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CAVALCANTI, V. M. M.; PARAHYBA, R. E. R. **A Indústria de Agregados para Construção Civil na Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: DNPM, 2012.

CEN. European Committee for Standardization. EN. 13286–13287: **Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures**. Brussels: European Standard, 2004.

CNR. Consiglio nazionale delle ricerche. **Catálogo delle pavimentazioni stradali**. Italia, 1995.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2022. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acesso em 25 de Nov de 2022.

COUTINHO, João Camilo Penna. **Dimensionamento de pavimentos asfáltico**: COLLINS, I. F.; BOULBIBANE, M. **Geomechanical analysis of unbound pavements based on shakedown theory**. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol.126. Nº 1, January 2000

Comparação do método do DNER com o método mecanístico – emprico aplicada a um trecho. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica. Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2328>. Acesso em: 17 fev. 2020.

DESTOMBES, M. A. **Catalogue des structures de chaussees. Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien**. França, 2003.

DNER. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME-162**: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994a.

_____. **DNER-ME 049**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia para não amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994b.

_____. **DNER-ME 041**: Solos – preparação de amostras para caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 051**: Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 082**: Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 122**: Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, 1994.

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

_____. **ME 181**: Pavimentação: Material Estabilizado Quimicamente: Determinação do módulo de resiliência: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **IE 179**: Pavimentação: Solos: Determinação da deformação permanente: Instrução de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação. Diretoria de Planejamento e Pesquisa**. 274p Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisa Rodoviárias. 3 ed. –Rio de Janeiro, 2006.

DRT. Department for Transport. **Design manual for roads and bridges**. United Kingdom, 2001.

ELLIOT, R.P., S.I. THORTON, K.Y. FOO, K.W. SIEW, and R. WOODBRIDGE, **Resilient Properties of Arkansas Subgrades**, Final Report, TRC-94, Arkansas Highway and Transportation Research Center, University of Arkansas, Fayetteville, 1988.

ESPAÑA. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. **Norma 6.1 IC**: Secciones de firmes de la Instrucción de Carreteras. Espanha, 2003.

FGSV. Forschungsgesellschaft für strassen und Verkehrswesen. **Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, RStO 01**. Deutschland, 2001.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV**. 2007. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Filipe%20Augusto%20Cinque%20de%20Proenca%20Franco%20_D.pdf. Acesso em: 08 out. 2021.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional**. Manual de utilização. Versão 1.1.4. Rio de Janeiro, 2020.

GONDIM, Lilian Medeiros. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agro polo do Baixo Jaguaribe - Estado do Ceará**. 2008 Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/1704>. Acesso em: 20 fev. 2021.

GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues. **Estudo de deformação permanente em solos e teoria do shakedown aplicada a pavimentos flexíveis**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em:

file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Antonio%20Carlos%20Rodrigues%20Guimaraes%20D_D.PDF. Acesso em: 12 nov. 2020.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama 2021**. Disponível em: Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/panorama>. Acesso em 10 de nov de 2022.

JAE. **“Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional”**. Lisboa, JAE, 1995.

LEKARP, Fredrick. **Resilient and Permanent Deformation Behaviour of Unbound Aggregates under Repeated Loading**. 1999. Thesis (doctorate in philosophy). Division of GeoEngineering, Chalmers University of Technology. Sweden, 1999. Disponível em: <https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/56ADC8DE-A937-48CA-9E88-F72E8F515A96/FinalReport/SBUF%2011319%20Slutrapport%20Doktorsavhandling%20Modellering%20av%20permanenta%20deformationer%20i%20v%C3%A4gkonstruktionens%20obundna%20lager.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2020.

LEKARP, F., DAWSON, A. **Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials**. Construction and Building Materials. Volume 12, Issue 1, 16 April 1998, Pages 9-18. DOI:10.1016/S0950-0618(97)00078-0, 1998.

LEKARP, F., ISACSSON, U., DAWSON, A. **State of the art. II: permanent strain response of unbound aggregates**. Journal of Transportation Engineering ASCE, Vol. 126 (1), Jan/Feb, pp. 76-83, 2000.

LEMOS, Jeanderson Rodrigues. **Desenvolvimento de ferramenta computacional para dimensionamento de pavimentos pelos métodos do DNE e da resiliência**. 2013. 19 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/1722>. Acesso em: 10 mar. 2021.

LIMA, C., MOTTA, L., ARAGÃO, F., GUIMARÃES, A. **Mechanical Characterization of Fine-Grained Lateritic Soils for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design**, Journal of Testing and Evaluation 48, no. 1, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1520/JTE20180890>, 2020.

LIMA, Caroline Dias Amancio de. **Estudo da Deformação Permanente de Duas Britas Graduadas para Uso em Camadas de Pavimentos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MACÊDO, José Afonso Gonçalves de. **Interpretação de Ensaios Deflectométricos Para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – A Experiência com FWD no Brasil**. 1996. Tese (doutorado em ciências em engenharia civil). Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2005.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro, Editora Inter Ciência, 2015.

MONISMITH, C. L, OGAWA, N. FREEME, C. R. **Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading**. *In*: ANNUAL MEETING OF TRB, 54., 1975. Proceedings [...]. Washington, 1975.
Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1975/537/537-001.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2021.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. 1991. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.
Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Laura-Motta/publication/36219069_Metodo_de_dimensionamento_de_pavimentos_flexiveis_criterio_de_confiabilidade_e_ensaios_de_cargas_repetidas/links/583ee4d508ae8e63e6181abf/Metodo-de-dimensionamento-de-pavimentos-flexiveis-criterio-de-confiabilidade-e-ensaios-de-cargas-repetidas.pdf. Acesso em: 21 nov. 2021.

NORBACK, C.; MOTTA, L. M. G. **Deformabilidade permanente e módulo de resiliência de dois solos e uma brita usados em um segmento de rodovia**. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE - ANPET, 32., 2017, Recife. Anais [...]. Recife, 2017. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Infraestrutura/Materiais%20Granulares%20e%20Concreto%20III/6_435_AC.pdf. Acesso em: 18 nov. 2021.

ODÉON, H. El Catálogo Francés de Estructuras-Tipo de Firmes para la Red Nacional de Carreteras (Versión de 1998), **Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera**, Madri, Espanha, n. 108, 2000.

ODERMATT, N. **Permanent Deformation in Fine-Grained Subgrade Materials – Triaxial and Accelerated Pavement Tests**. (Licentiate Thesis). Division of Highway Engineering. Royal Institute of Technology. Suécia, 2000.

ÖFSV. Osterreichischen Forschungsgemeinschaft Strasse und Verkehr. **Oberbaubemessung RVS 3.63**. Österreich, 1998.

OLIVEIRA, N. A. C.; MOTTA, L. M. G. **Influência da variação de umidade pós-compactação na deformação permanente de dois solos típicos de subleitos rodoviários brasileiros**. *In*: CONGRESSO PESQUISA EM Transporte - ANPET, 35., 2021, 100% virtual. Anais [...]. 100%Virtual, 2017. Disponível em:

https://www.anpet.org.br/anais35/documentos/2021/Infraestrutura/Solo%20Concreto%20e%20Materiais%20Alternativos/2_284_AC.pdf. Acesso em: 20 fev. 2021.

OVERSEAS CENTRE, TRL. Overseas road note 31, 4^a edition. **A guide to the structural design of bitumensurfaced roads in tropical and sub-tropical countries.** Crowthorne, Berkshire, United Kingdom, 1993.

PAUTE, J. L., HORNYCH, P. BENABEN, J. P. Repeated Load Triaxial Testing of Granular Materials in the French Network of Laboratoires des Ponts et Chaussées. **Flexible Pavements.** Balkema, Rotterdam, ed. Gomes Correia, p. 53-64, 1996.

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

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos: com exercícios resolvidos.** São Paulo: Oficina de textos, 2006.

RAMOS, Celso Reinaldo. **Estudo para o Desenvolvimento de um Catálogo de Pavimentos Flexíveis do Município do Rio de Janeiro.** 2003. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

RIBEIRO, Antonio. Júnior Alves. **Um método para localização e estimação das características geotécnicas dos solos da região metropolitana de Fortaleza-Ce para fins de pavimentação.** 2013. Dissertação (mestrado em Engenharia de Transportes). Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará Fortaleza, 2013.

RIBEIRO, Antonio. Júnior Alves. **Um modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do Ceará para fins de pavimentação.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará Fortaleza, 2016.

RODRIGUES, R. M. Prediction of fatigue cracking on flexible highway pavements. **Recent developments in Soil and Pavement Mechanics**, Balkema, Rotterdam, p. 381-385, 1997.

SALOUR, F.; ERLINGSSON, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. **International Conference on Transportation Geotechnics**, v.143, p. 300-307, 2016. DOI:10.1080/10298436.2015.1065991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816304775?via%3Dihub>. Acesso em: 12 nov. 2020.

SANTIAGO, Lucimar da Silva. **Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos.** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Departamento de Engenharia de Transportes,

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará Fortaleza, 2017.

SOARES, J. B.; MORENO, A. M.; MOTTA, L. M. G. Aspectos gerais de Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro. **Revista Pavimentação**, v. 17, 2009.

SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY, “**South African Pavement Engineering Manual. Chapter 10: Pavement Design,**” Pretoria, South Africa, 2014.

SOUZA, M.L. Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. **Instituto de Pesquisas Rodoviárias**. Public. IPR 667. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 3. ed. rev e atual., 1981.

SOUZA JUNIOR, Joacy Demétrio de. **O Efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do Estado do Ceará.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará Fortaleza, 2005.

SPW - Mobilité et infrastructures. **Caractéristiques routières et autoroutières: Circulaire, No A/WA/205/91/02685.** Belgique, 1991.

VSS. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, **Dimensionnement: superstructure des routes.** Schweiz, 2001

WERKMEISTER, S., DAWSON, A. R., WELLNER, F. Pavement Design for Unbound Granular Materials. **Journal of Transportation Engineering** ©ASCE/ set/out, 2004.

WERKMEISTER, S., DAWSON, A., WELLNER, F. Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials and the Shakedown Concept. **Transportations Research Record.** n. 1757, p.75-81, 2001.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavements design.** New York: Wiley, 1975.

**APÊNDICE A - CATÁLOGO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

CATÁLOGO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

GUIA TÉCNICO DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA DA
REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

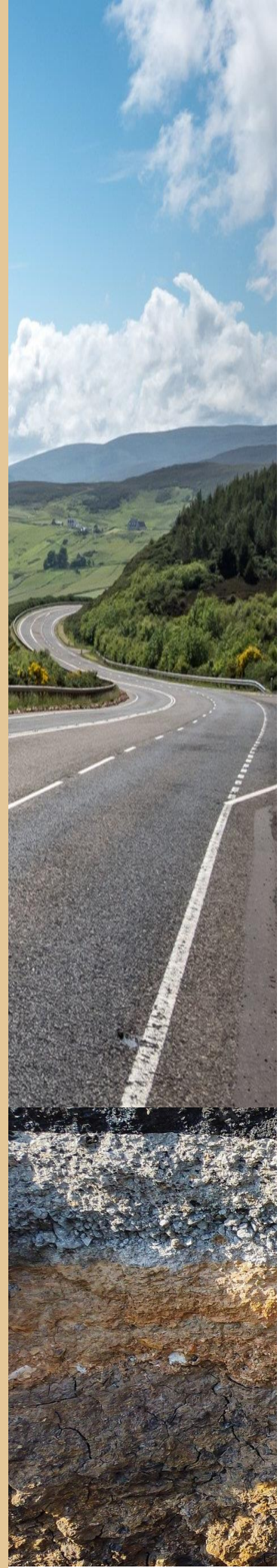


INTRODUÇÃO

Com a finalidade auxiliar o corpo técnico da área rodoviária da Região metropolitana de Fortaleza –CE, foi criado esse catálogo de estrutura padrões para pavimentos flexíveis contendo 48 combinações de estruturas de pavimentos.

Este catálogo abrange toda a RMF, que foi dividida em 3 sub-regiões para facilitar o uso dos materiais locais. As estruturas foram avaliadas e dimensionadas pelo software MeDiNa, considerando 10 anos de tempo de projeto.

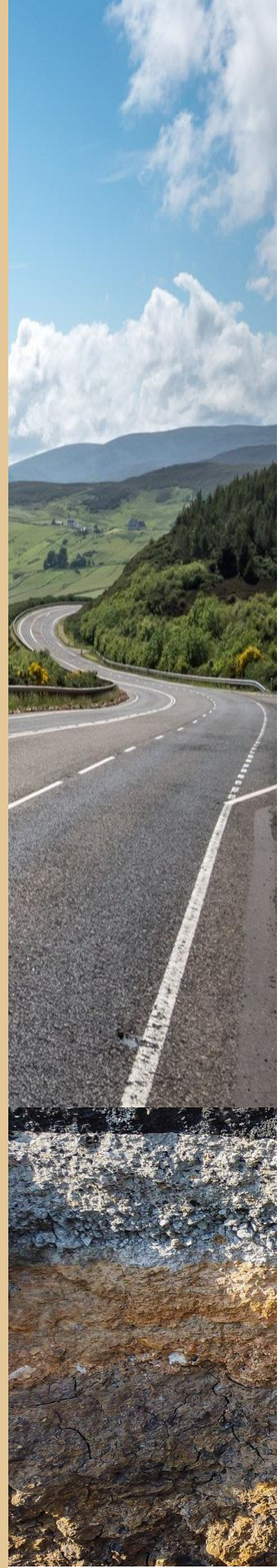
O detalhamento do procedimento e todos os resultados podem ser consultados em GUILHERME (2023).



INSTRUÇÕES

As estruturas foram dimensionadas conforme subleito e o tráfego empregado. O subleito foi dividido de acordo com classificação AASHTO e o tráfego hierarquizado segundo BASTOS et al (2017).

As estruturas padrões estão divididas de acordo com as sub-regiões da RMF, esquematizadas com os materiais e espessuras adotados. Fica disponível as características gerais de cada material empregado, bem como a avaliação de desempenho do pavimento, com valores de afundamento de trilho de roda (ATR) e a porcentagem de área trincada (AT) para cada situação adotada.

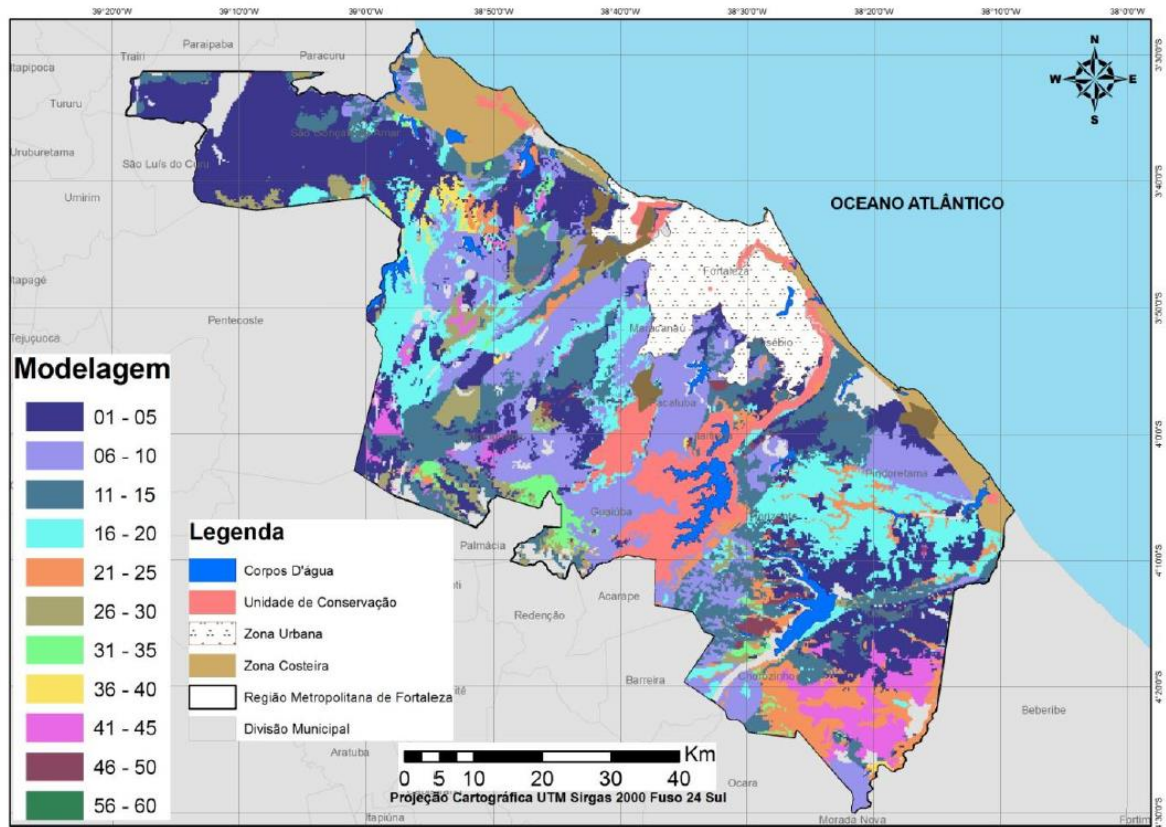


REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA - CE



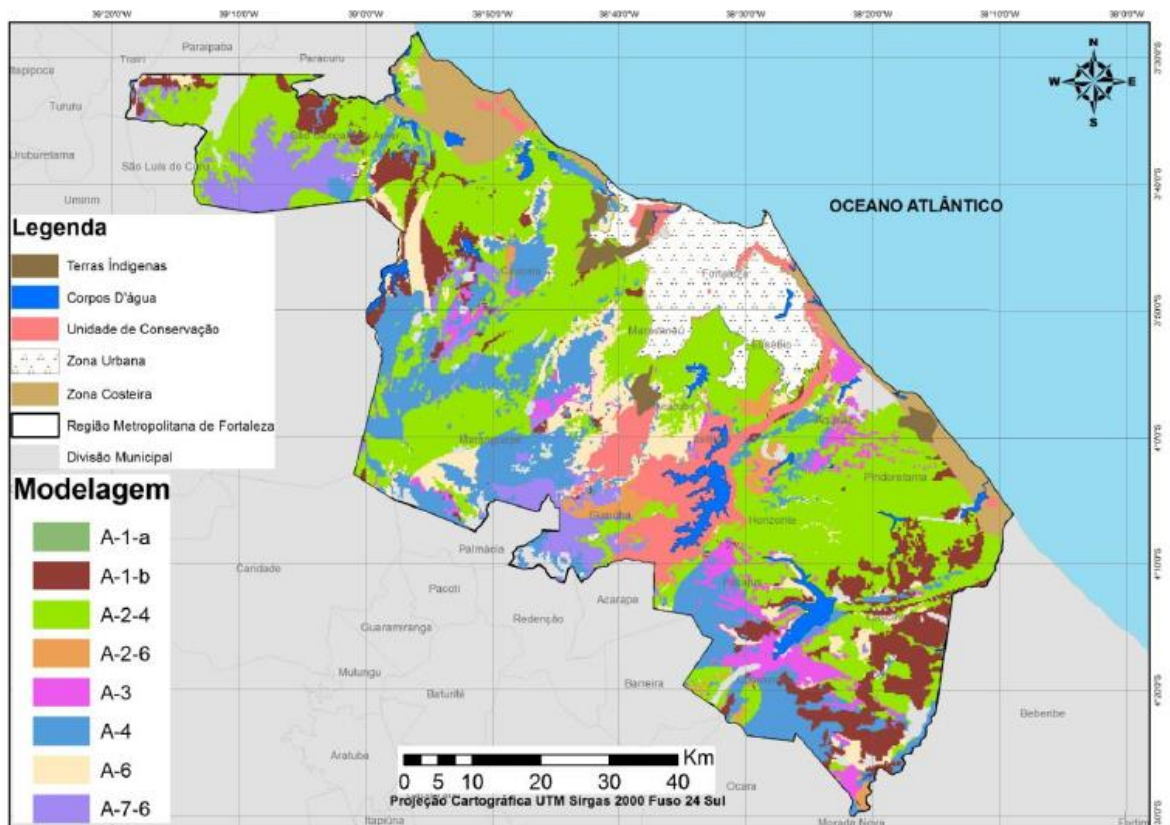
- Unidade federativa: Ceará
- Número de municípios: 19
- Área: 7.440,053 km² (IBGE, 2010)
- População: 4.167.996 (IBGE, 2021)

Mapeamento da estimativa de CBR - RMF



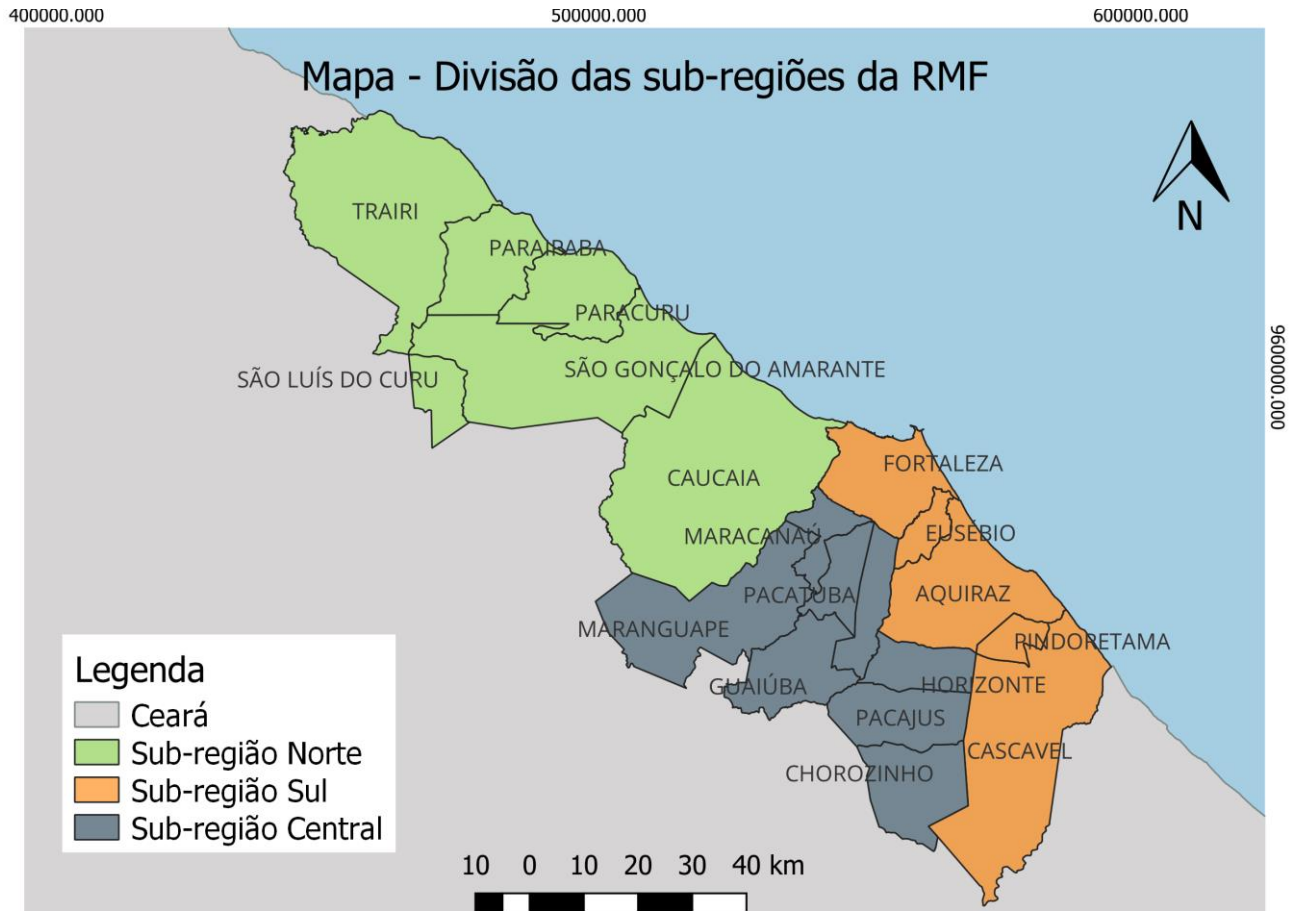
Fonte: Ribeiro, 2013

Mapeamento da estimativa da classificação AASHTO - RMF



Fonte: Ribeiro, 2013

DIVISÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA - CE



- Sub-região: Trairi, Paraipaba, Paracuru, São Gonçalo do Amarante, São Luís do Curu e Caucaia,.
- Sub-região central: Maracanaú, Maranguape, Pacatuba, Itaitinga, Guaiúba, Pacajus, Chorozinho.
- Sub-região Sul corresponde a 6 municípios: Fortaleza, Eusebio, Aquiraz, Pindoretama, Horizonte e Cascavel

TRÁFEGO

Classes de tráfego

Níveis de Tráfego			
Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
$<3 \times 10^6$	$3 \times 10^6 - 1 \times 10^7$	$1 \times 10^7 - 3 \times 10^7$	$>3 \times 10^7$

Fonte: Bastos (2016)

SUBLEITO

Classes de subleito

	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
CBR	< 10%	> 10%	< 10%	$\geq 30\%$	> 10%	< 10%
MR	340 - 385MPa	290 - 460MPa	< 500MPa	≥ 250 MPa	< 400MPa	230 - 500MPa

Características dos subleitos

	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6	
DEN	1,95	2,014	1,91	1,89	1,93	1,638	
CBR (%)	8,2	22,6	7	34	10	0	
MR	R²	0,360	0,583	161,030	2321,750	0,862	0,917
	K1	608,663	316,402	0,150	0,880	10,425	3,760
	K2	0,410	0,291	-0,300	0,010	-0,118	0,669
	K3	-0,309	-0,595	0,880	0,980	-1,931	-2,519
DP	R²	0,989	0,875	0,644	0,423	0,666	1,000
	ψ1	0,068	0,712	0,731	0,445	0,184	0,071
	ψ2	-1,436	1,776	1,167	2,820	-0,158	0,901
	ψ3	-1,170	0,651	0,002	0,002	0,548	0,111
	ψ4	0,002	0,002	0,720	0,950	0,002	0,072

CAMADAS GRANULARES

	SG1	SG2	CAU	MGP	PCJ	ESB	FRT	CAU-BRITA	CINZAL-CAL	
DEN	1,638	1,984	1,950	1,995	2,014	1,930	1,950	1,880	1,180	
AASHTO	A-7-6	A-2-6	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-6	A-2-4	-	-	
CBR (%)	0,000	20,000	33,500	13,600	22,600	10,000	8,200	45,000	250,000	
Mr méd	505,000	162,000	495,000	412,000	455,000	872,000	384,000	219,000	1149,0	
MR	R ²	0,917	0,899	0,852	0,950	0,583	0,862	0,360	0,944	0,470
	K1	3,760	69,868	256,651	21,893	316,402	10,425	608,663	978,146	1430,0
	K2	0,669	0,185	0,583	0,984	0,291	-0,118	0,410	0,593	0,455
	K3	-2,519	-0,584	-0,968	-2,342	-0,595	-1,931	-0,309	-0,059	-0,405
DP	R ²	1,000	0,876	0,703	0,894	0,875	0,666	0,989	0,996	0,990
	ψ1	0,071	0,360	7,331	0,407	0,712	0,184	0,068	0,018	1,080
	ψ2	0,901	2,576	2,295	0,966	1,776	-0,158	-1,436	-1,223	-0,443
	ψ3	0,111	0,341	0,280	1,055	0,651	0,548	-1,170	4,415	0,397
	ψ4	0,072	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002

Obs1: Para todas os materiais granulares foi considerado coeficiente de Poisson de 0,45.

Modelo composto - MR

Deformação permanente

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad \varepsilon_p (\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4}$$

































REVESTIMENTOS

	Coeficiente de poisson	DEN (g/cm ³)	MR (Mpa)	K1	K2
Tratamento superficial duplo	0,25	2,4	1000	-	-
Concreto asfáltico	0,3	2,4	10492	1,91E-05	-1,9

Curva de fadiga

$$N_{fad} = k_1 \varepsilon_t^{k_2}$$

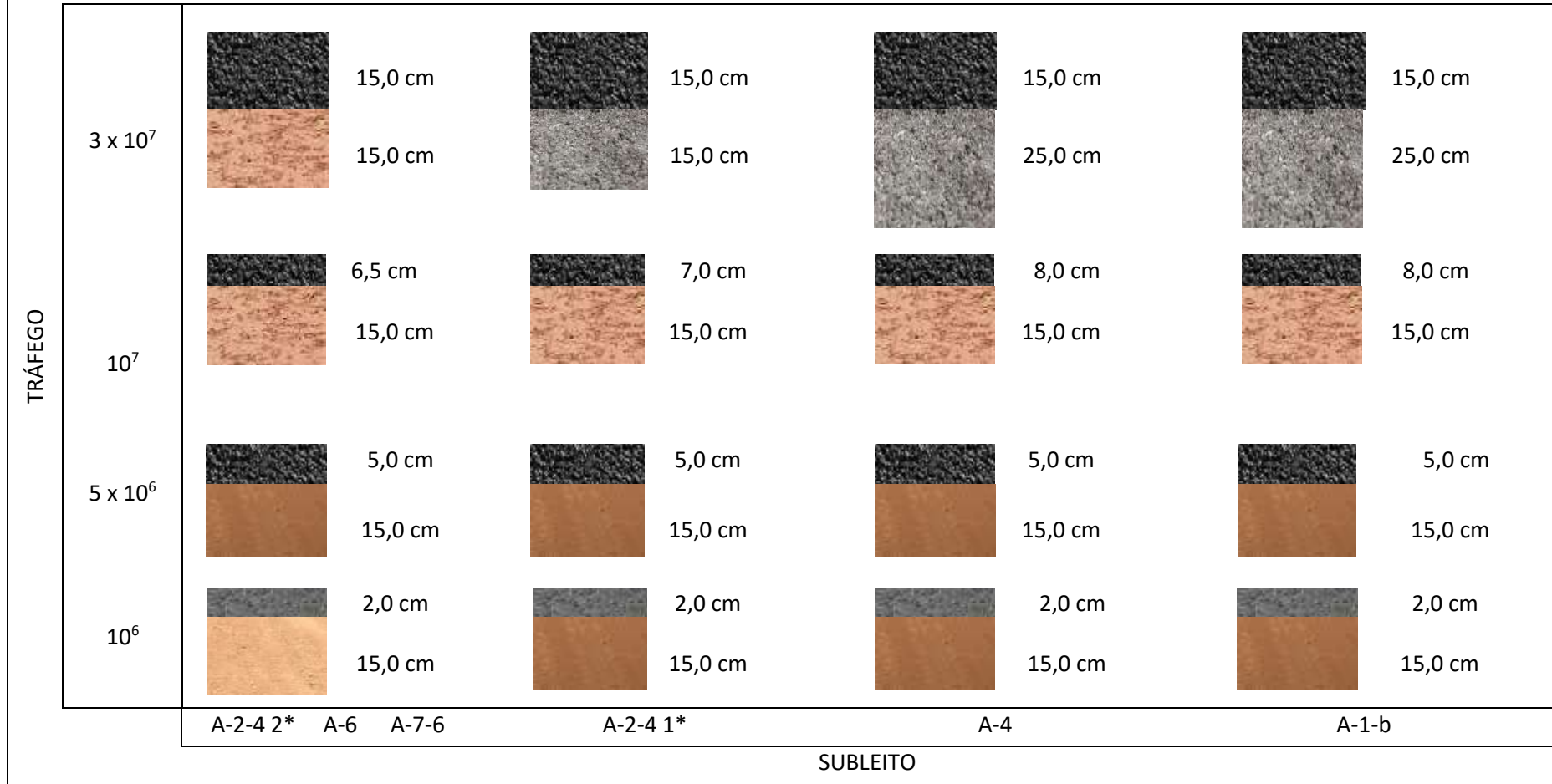
ESTRUTURAS PADRÕES – SUB-REGIÃO NORTE

TRÁFEGO	3 x 10 ⁷	 15,0 cm	 15,0 cm	 15,0 cm	 15,0 cm	 15,0 cm	 25,0 cm	 15,0 cm	 25,0 cm
	10 ⁷	 7,5 cm	 15,0 cm	 8,0 cm	 15,0 cm	 8,0 cm	 40,0 cm	 8,5 cm	 15,0 cm
	5 x 10 ⁶	 5,0 cm	 15,0 cm	 5,0 cm	 15,0 cm	 5,0 cm	 15,0 cm	 5,0 cm	 15,0 cm
	10 ⁶	 2,0 cm	 15,0 cm	 2,0 cm	 15,0 cm	 2,0 cm	 15,0 cm	 2,0 cm	 15,0 cm
	A-2-4 2*	A-6	A-7-6	A-2-4 1*		A-4		A-6	
	SUBLEITO								

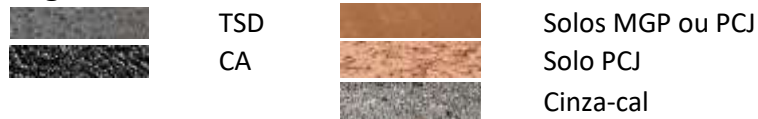
Legenda

-  TSD
-  CA
-  Solos SG1, SG2 ou CAU
-  Solo-brita CAU-BRITA
-  Cinza-cal

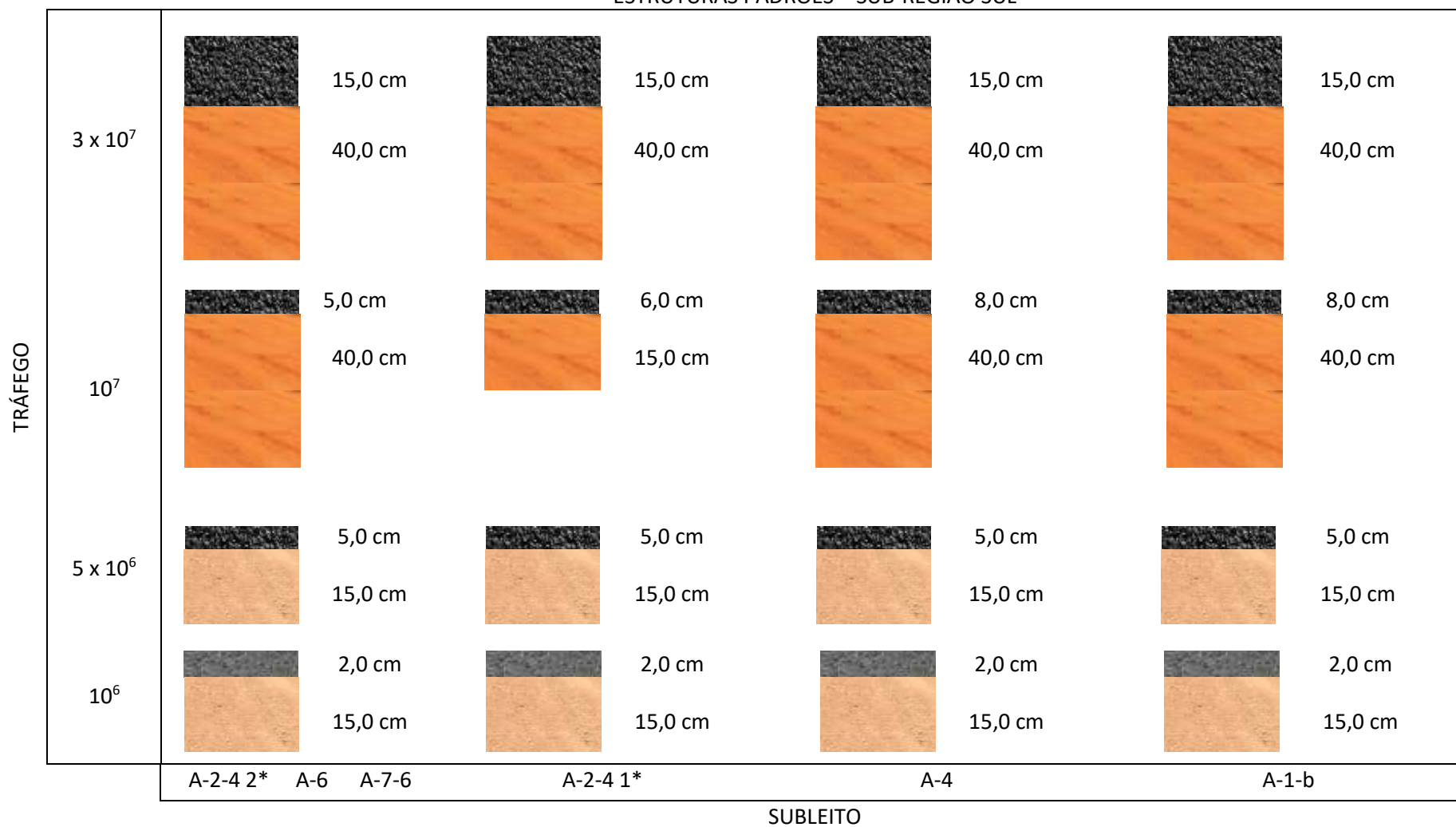
ESTRUTURAS PADRÕES – SUB-REGIÃO CENTRAL



Legenda



ESTRUTURAS PADRÕES – SUB-REGIÃO SUL



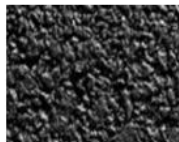
Legenda

- TSD
- Solos FRT ou ESB
- CA
- Solo ESB

LEGENDA



Tratamento superficial duplo - TSD



Concreto asfáltico - CA



Solos de São Gonçalo 1 (SG1), São Gonçalo 2 (SG2) ou Caucaia (CAU)



Mistura do solo de Caucaia com brita Itatiba - CAU-BRITA



Solos de Maranguape (MGP) ou Pacajus (PCJ)



Solo de Pacajus - PCJ



Solos Fortaleza (FRT) ou Eusébio (ESB)



Solo de Eusébio - ESB



Mistura de cinza com cal - Cinza-cal

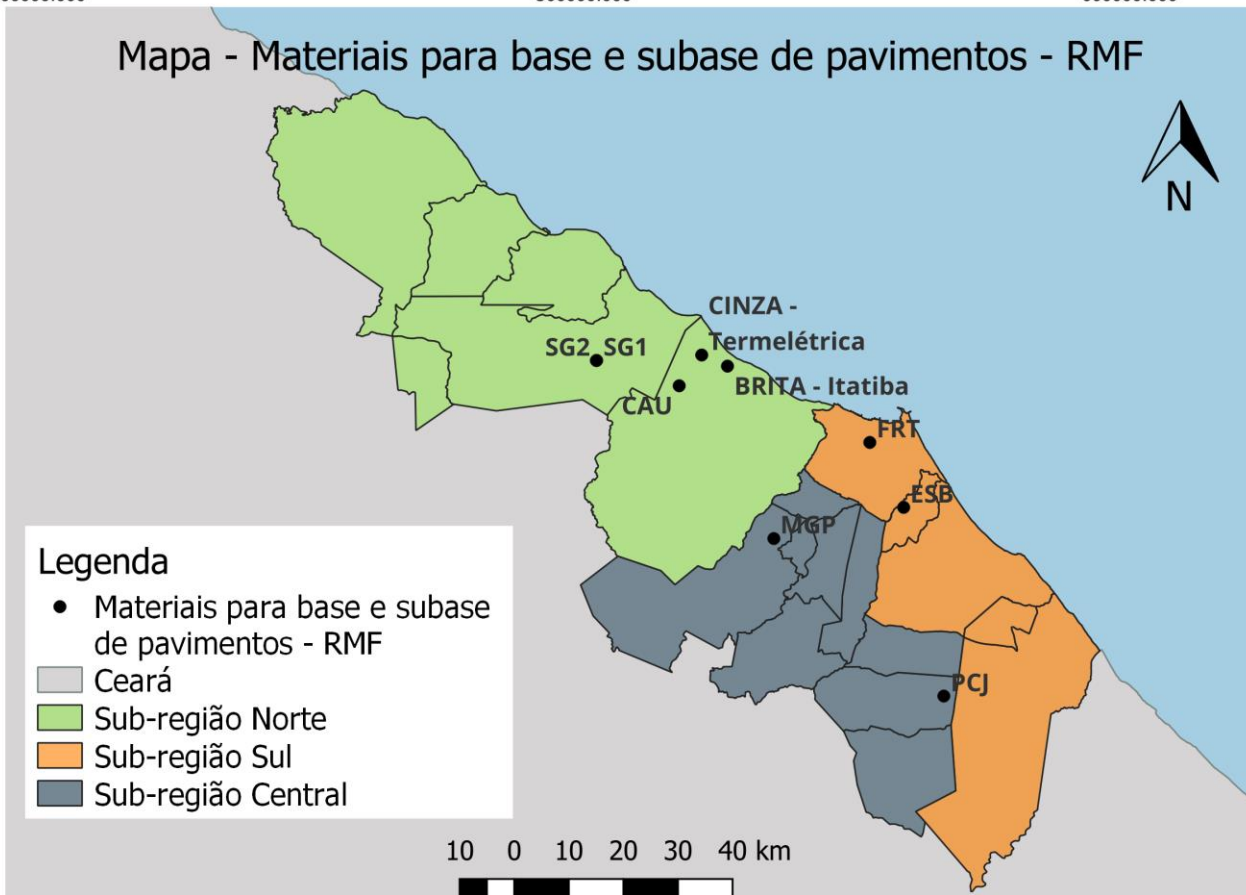
LOCALIZAÇÃO DOS MATERIAIS

400000.000

500000.000

600000.000

Mapa - Materiais para base e subbase de pavimentos - RMF



Legenda

- Materiais para base e subbase de pavimentos - RMF
- Ceará
- Sub-região Norte
- Sub-região Sul
- Sub-região Central

10 0 10 20 30 40 km



9600000.000

DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS – TRÁFEGO LEVE (< 10⁶)

Sub-Região Norte

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 3	15	15	15	15	15	15
Revestimento - TSD (cm)	2	2	2	2	2	2
ATR (mm)	2,1	0,8	2,3	3	1,7	0,6
	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 4	15	15	15	15	15	15
Revestimento - TSD (cm)	2	2	2	2	2	2
ATR (mm)	2	0,7	2,1	2,8	1,7	0,5
	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 5	15	15	15	15	15	15
Revestimento - TSD (cm)	2	2	2	2	2	2
ATR (mm)	4,8	3,4	4,3	4,8	4,3	3,2

Sub-Região Central

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 7	15	15	15	15	15	15
Revestimento - TSD (cm)	2	2	2	2	2	2
ATR (mm)	2,4	1,1	2,5	3,2	2,1	0,9
	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 9	15	15	15	15	15	15
Revestimento - TSD (cm)	2	2	2	2	2	2
ATR (mm)	2,5	0,9	2,1	2,3	1,9	0,8

Sub-Região Sul

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 14	15	15	15	15	15	15
Revestimento - TSD (cm)	2	2	2	2	2	2
ATR (mm)	2,8	0,9	1,8	1,7	1,8	0,8
	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 15	15	15	15	15	15	15
Revestimento - TSD (cm)	2	2	2	2	2	2
ATR (mm)	2,3	0,8	2,2	2,5	1,8	0,6

DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS – TRÁFEGO MÉDIO (3×10^6 - 1×10^7)

Sub-Região Norte

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 3	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	5	5	5	5	5	5
ATR (mm)	3,3	0,7	1,7	1,4	1,6	0,6
AT (%)	20,9	20,7	22,1	21,7	20,7	20,6
	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 4	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	5	5	5	5	5	5
ATR (mm)	2,8	0,6	1,8	1,5	1,6	0,5
AT (%)	16,3	16	18,2	17,7	16	15,8
	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 5	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	5	5	5	5	5	5
ATR (mm)	4,7	2,7	3,4	3,4	3,7	2,7
AT (%)	13,3	13	15,3	14,8	13	12,8

Sub-Região Central

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 7	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	5	5	5	5	5	5
ATR (mm)	3,4	1	2,1	1,8	2	0,9
AT (%)	19,1	18,9	20,5	20,2	18,9	18,8
	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 9	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	5	5	5	5	5	5
ATR (mm)	3	1	2	1,9	2	0,9
AT (%)	11,5	11,2	13,3	12,9	11,2	11

Sub-Região Sul

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 14	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	5	5	5	5	5	5
ATR (mm)	3,3	1,2	2,2	2	2,2	1,1
AT (%)	10,6	10,4	11,5	11,3	10,4	10,3
	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 15	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	5	5	5	5	5	5
ATR (mm)	2,9	0,8	2,1	1,9	1,8	0,7
AT (%)	12,3	11,9	14,4	13,8	12	11,7

DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS – TRÁFEGO ELEVADO

(1×10^7 - 3×10^7)

Sub-Região Norte

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo-brita 5 (cm)	15	15	40	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	8	7,5	8	8,5	7,5	7,5
ATR (mm)	3,9	0,6	0,9	0,4	1,6	0,6
AT (%)	28,3	29,2	30	29,6	29,3	28,7

Sub-Região Central

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 9 (cm)	15	15	15	15	15	15
Revestimento - CA (cm)	7	6,5	8	8	6,5	6,5
ATR (mm)	3,8	1	1,6	1	2,1	1
AT (%)	28,6	29,4	29,7	29,1	29,5	28,8

Sub-Região Sul

	Subleitos					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 14 (cm)	15	40	40	40	40	40
Revestimento (cm)	6	5	5	5	5	5
ATR (mm)	3,8	2,1	2,3	1,8	2,9	2,3
AT (%)	29,6	18,2	16	15,6	18,1	18,5

DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS – TRÁFEGO EXTREMAMENTE ELEVADO ($> 3 \times 10^7$)

Sub-Região Norte

	Subleito					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base – Cinza-cal (cm)	15	15	25	25	15	15
Revestimento (cm)	15	15	15	15	15	15
ATR (mm)	14,9	5,6	9,5	8,9	6,7	5,8
AT (%)	27,5	24,8	29,9	29,9	25	23,5

Sub-Região Central

	Subleitos					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 9 (cm)	-	15	-	-	15	15
Base – Cinza-cal (cm)	15	-	25	25	-	-
Revestimento - CA (cm)	15	15	15	15	15	15
ATR (mm)	14,9	0,5	9,5	8,9	1,6	0,7
AT (%)	27,5	28,3	29,9	29,9	28,5	27

Sub-Região Sul

	Subleitos					
	A-2-4 1*	A-2-4 2*	A-4	A-1-b	A-6	A-7-6
Base - Solo 14 (cm)	-	40	40	40	40	40
Base – Cinza-cal (cm)	15	-	-	-	-	-
Revestimento - CA (cm)	15	15	15	15	15	15
ATR (mm)	14,9	2	2,2	1,7	2,8	2,3
AT (%)	27,5	12,1	12,6	12,6	12,2	12,1

REFERÊNCIAS

BASTOS, J. B. S. Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GUILHERME, A.T. P. Um catálogo simplificado de estruturas padrões em pavimentos flexíveis dimensionados pelo método MeDiNa aplicável à RMF. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, Ceará, 2023.

RIBEIRO, A. J. A. Um método para localização e estimação das características geotécnicas dos solos da região metropolitana de Fortaleza-Ce para fins de pavimentação. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2013.

Realização



AUTORES

Ana Tália Pinto Guilherme – UFC
Carlos Augusto Uchôa da Silva - UFC

Produção Intelectual: documentos inerente
aos Trabalhos de Tese de doutorado de
GUILHERME (2023)

Realização

