

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**ANA CAROLINA PEREIRA MOTTA
ISABELLA MADEIRA BUENO**

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLO ESTABILIZADO COM ESCÓRIA KR E
VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO NO MEDIDA DE TRECHO EXPERIMENTAL
DA BR-101-ES EMPREGANDO ESTA SOLUÇÃO**

**VITÓRIA - ES
MAIO/2021**

**ANA CAROLINA PEREIRA MOTTA
ISABELLA MADEIRA BUENO**

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLO ESTABILIZADO COM ESCÓRIA KR E
VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO NO MEDIDA DE TRECHO EXPERIMENTAL
DA BR-101-ES EMPREGANDO ESTA SOLUÇÃO**

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Civil do
Centro Tecnológico da Universidade
Federal do Espírito Santo, para obtenção
do grau de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof.^a Ph.D. Jamilla Emi
Sudo Lutf Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. Patrício José
Moreira Pires

VITÓRIA – ES
MAIO/2021

ANA CAROLINA PEREIRA MOTTA
ISABELLA MADEIRA BUENO

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLO ESTABILIZADO COM ESCÓRIA KR E
VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO NO MEDIDA DE TRECHO EXPERIMENTAL
DA BR-101-ES EMPREGANDO ESTA SOLUÇÃO**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof.^a Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Rômulo Castello Henriques Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Eng. Civil Flávia Casagrande Bastos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Vitória – ES, 18 de maio de 2021

DEDICATÓRIA

*A Deus
e a todos aqueles que Ele
sabiamente colocou em nossa
estrada da vida, permitindo-nos
enxergá-la de forma mais bela.*

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, em primeiro lugar, a Deus por nos permitir essa realização, nos dar força e sabedoria durante a graduação.

Aos nossos amados pais, que nos apoiaram e incentivaram durante toda formação. Por todo amor, carinho e compreensão por eles oferecidos, que foram fundamentais para a conclusão desse projeto.

Aos nossos amigos, pelas alegrias e dificuldades compartilhadas nessa trajetória e por tornarem os momentos mais leves e divertidos.

Nossa gratidão à professora Ph.D. Jamilla Teixeira, nossa orientadora, por acreditar em nós e sempre nos incentivar, por sua paciência e dedicação nas orientações e por ser para nós um exemplo de profissional. Ao nosso coorientador professor Dr. Patrício Pires por seu empenho na pesquisa e sua disponibilidade.

Nosso agradecimento à Flávia Bastos, mestranda e ao técnico Sidineidy Izoton, do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES, por realizarem a fase de ensaios laboratoriais desse trabalho, por sua generosidade e por compartilharem seus conhecimentos conosco.

Agradecemos também a parceria entre ArcelorMittal, ANTT, Concessionária ECO101 e UFES, por promoverem a pesquisa que utilizamos neste trabalho.

Por fim, a todos que de alguma forma nos ajudaram a atingir essa conquista, nosso muito obrigada.

RESUMO

BUENO, Isabella Madeira; MOTTA, Ana Carolina Pereira. **Caracterização de solo estabilizado com escória KR e verificação de desempenho no MeDiNa de trecho experimental da BR-101-ES empregando esta solução.** 2021. 113p. Projeto de Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2021. Orientadora: Prof.^a Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira. Coorientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires.

Pavimentos são estruturas constituídas de várias camadas, responsáveis por absorver e distribuir a carga do tráfego de veículos. As tensões e deformações às quais a estrutura é submetida dependem, principalmente, das espessuras das camadas e da rigidez dos materiais empregados. As camadas de suporte, em geral, são construídas com materiais granulares como britas e solos naturais, ou materiais estabilizados mecanicamente ou quimicamente. O emprego de resíduos e/ou coprodutos industriais na pavimentação é uma tendência, pois buscam-se novas alternativas econômicas e sustentáveis no setor. Trabalhos recentes mostram que a escória de aciaria originada no Reator Kambara, denominada neste estudo de escória KR, é um coproduto promissor para uso em pavimentação como um melhorador dos solos, apresentando resultados satisfatórios. Em 2020, o DNIT iniciou testes para implementação do novo método mecanístico-empírico de dimensionamento nacional (MeDiNa) de pavimentos, que, dentre outros fatores, inclui diversos modelos para caracterização do comportamento de diversos materiais. Diante da possibilidade de utilizar a escória KR na pavimentação, o presente trabalho visa avaliar o comportamento de um solo estabilizado com este material (solo-KR) em laboratório para posterior previsão de desempenho no MeDiNa comparando os resultados do MeDiNa com dados reais de um trecho experimental construído na BR-101-ES com sub-base de solo-KR. Os resultados de laboratório mostraram que a escória melhora a capacidade de resiliência do solo natural estudado, porém o material resultante apresenta ainda comportamento de um material granular, sem elevada rigidez. As previsões no MeDiNa mostraram uma tendência de comportamento similar às obtidas em campo, mostrando a eficiência do novo método.

Palavras-chave: Dimensionamento de pavimentos; Escória KR; Estabilização de solos; MeDiNa; Pavimentação.

ABSTRACT

BUENO, Isabella Madeira; MOTTA, Ana Carolina Pereira. **Characterization of stabilized soil with KR slag and verification of performance on MeDiNa of a test track on BR-101-ES using this solution.** 2021. 113p. Projeto de Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2021. Orientadora: Prof.^a Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutfi Teixeira. Coorientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires.

Pavements are structures build up in several layers, being responsible for absorbing and distributing the load from the vehicle traffic. The stresses and strains to which the structure is subjected depend mainly on the thickness of the layers and the rigidity of the materials that were used. The support layers, in general, are often made up with granular materials, such as gravel and natural soils, or either mechanically or chemically stabilized materials. The usage of industrial residues and/or by-products in paving is a tendency, since new economical and sustainable alternatives are sought in the sector. Recent works have shown that the steel slag originated from the Kambara reactor, called in this study KR slag, is a promising by-product for paving applications, used as a soil improver, showing acceptable results. In 2020, the DNIT started tests for implementation of a new mechanistic-empirical national pavements design method (MeDiNa), which, among other factors, includes several models for characterization of different materials behaviors. Given the possibility of using the KR slag for paving, this work aims to evaluate the behavior of a stabilized soil with this material (KR-Soil) in laboratory and to verify the performance on MeDiNa, comparing the results obtained from MeDiNa with the real data of a test track built on BR-101-ES with KR-soil sub-base. The laboratory results showed that the slag improves the resilience of the natural soil studied, however the obtained material still shows a granular behavior, with no high rigidity. The predictions on MeDiNa displayed a tendency of a similar performance to the one obtained in the field, showing the efficiency of the new method.

Keywords: Pavement design; KR slag; Soil stabilization; MeDiNa; Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tensões no pavimento flexível.....	24
Figura 2.2 – Tensões no pavimento rígido	24
Figura 2.3 – Tensões no pavimento semirrígido	24
Figura 2.4 – Corte transversal de um pavimento asfáltico	25
Figura 2.5 – Estrutura real de um pavimento flexível	26
Figura 2.6 – Trincas em pavimentos flexíveis	27
Figura 2.7 – ATR em pavimentos flexíveis.....	28
Figura 2.8 – Fluxograma dos materiais componentes de bases, sub-bases e reforços do subleito.....	29
Figura 2.9 – Esquema da mistura do dessulfurante com o ferro gusa	38
Figura 2.10 – Escória KR	38
Figura 2.11 – Propriedades físicas da amostra do coproduto KR	39
Figura 2.12 - Resumo dos valores de ISC para solos e misturas	40
Figura 2.13 - Efeitos da adição de diferentes teores de KR na granulometria do solo	41
Figura 2.14 - Modelo de interação solo-KR.....	42
Figura 2.15 – Distribuição de tensões verticais devido à passagem das rodas dos veículos.....	43
Figura 2.16 – Carregamento uniformemente distribuído em um sistema de duas camadas	44
Figura 2.17 – Ábaco de burmister para cálculo de deflexões em um sistema de duas camadas	45
Figura 2.18 – Distribuição de tensões em um sistema de três camadas	45
Figura 2.19 – Ábaco de dimensionamento.....	52
Figura 2.20 - Espessuras de camada do pavimento	53
Figura 2.21 – Fluxograma de um método mecanístico proposto por motta,1991. ...	55
Figura 2.22 - Tela inicial software MeDiNa.....	57
Figura 2.23 – Exemplo de criação de um novo material e suas propriedades no MeDiNa	59
Figura 2.24 – Ensaio triaxial de carga repetida	61
Figura 2.25 – Dados de tráfego a serem inseridos no MeDiNa.....	64
Figura 2.26 - Categorias de materiais constituintes das camadas.	65

Figura 2.27 - Posição dos pontos utilizados para cálculo da deformação permanente.	68
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do trabalho.....	72
Figura 3.2 – Mapa de localização do trecho experimental	73
Figura 3.3 – Projeto geométrico das quatro pistas que compõem o trecho experimental	74
Figura 3.4 – Simulador HVS utilizado no estudo.....	75
Figura 3.5 – Esquema de treliça metálica para medição de ATR.	77
Figura 3.6 – Gabarito utilizado para marcação das trincas.	77
Figura 3.7 – Estrutura do pavimento da pista 01.....	78
Figura 3.8 – Máquina recicladora utilizada no espalhamento e homogeneização das misturas de solo com KR e solo com cimento	79
Figura 3.9 – Ensaio complementares a serem realizados.....	81
Figura 3.10 - Relação de ensaios realizados	84
Figura 3.11 – Linha de raciocínio para simulação.....	85
Figura 4.1 – Exemplo de ficha de acompanhamento em campo.	86
Figura 4.2 – Exemplo de ficha de acompanhamento em campo.	86
Figura 4.3 - Obtenção dos coeficientes de MR para solo-KR através da plotagem dos resultados no LabFit.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores típicos de coeficientes de Poisson a serem adotados conforme o material utilizado	60
Tabela 2.2 - Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa	65
Tabela 3.1 – Espessura das camadas das pistas experimentais	74
Tabela 3.2 – Características físicas do solo e misturas com solo.	79
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de compactação, expansão e ISC.....	80
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios realizados na camada de revestimento	80
Tabela 3.5 – Resultados do ensaio marshall na camada de revestimento	81
Tabela 3.6 – Representação das camadas no MeDiNa.	85
Tabela 4.1 – Evolução do ATR para pista 01.....	87
Tabela 4.2 - Evolução das áreas trincadas	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Relação entre normas, parâmetros e ensaios para materiais usados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito (1/2)	32
Quadro 2.2 – Relação entre normas, parâmetros e ensaios para materiais usados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito (2/2)	33
Quadro 2.3 - Relação entre normas, parâmetros e ensaios para revestimento asfáltico	36
Quadro 2.4 – Coeficientes de equivalência estrutural.	51
Quadro 2.5 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.	52
Quadro 2.6 – Consideração dos parâmetros experimentais.	67
Quadro 2.7 – Classes de desempenho das misturas asfálticas.	69
Quadro 3.1 – Características do simulador de tráfego móvel (HVS).....	75
Quadro 3.2 – Características adotadas no simulador	76
Quadro 4.1 - Ensaio de módulo de resiliência para o solo do subleito (S1)	89
Quadro 4.2 - Ensaio de MR do solo-KR para 7 dias de cura (CP1) (DNIT 181/2018-ME)	92
Quadro 4.3 - Ensaio de MR do solo-KR para 7 dias de cura (CP2) (DNIT 181/2018-ME)	92
Quadro 4.4 - Ensaio de MR do solo-KR para 7 dias de cura (CP3) (DNIT 181/2018-ME)	92
Quadro 4.5 - Média dos resultados de MR para 7 dias de cura (DNIT 181/2018-ME)	92
Quadro 4.6 - Ensaio de módulo de resiliência para solo-KR com 7 dias de cura (DNIT 134/2018-ME)	94
Quadro 4.7 - Ensaio de módulo de resiliência para a mistura de solo S2 com cimento 3%.....	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Comportamento sigmoidal do módulo de resiliência para materiais estabilizados.	70
Gráfico 4.1 – Evolução do ATR para pista 01.	88
Gráfico 4.2 - Gráfico de MR x tensão desvio para o solo do subleito (S1).....	90
Gráfico 4.3 - Módulo de resiliência x tensão desvio em diferentes dias de cura (DNIT 134/2018-ME)	90
Gráfico 4.4 - Módulo de resiliência x tensão confinante em diferentes dias de cura (DNIT 134/2018- me)	91
Gráfico 4.5 - Tensão vertical x módulo de resiliência para solo-KR com 7 dias de cura	93
Gráfico 4.6 - Gráfico de MR x tensão desvio para a mistura de solo S2 com cimento 3%.....	96
Gráfico 4.7 - Gráfico de ATR x tempo da Pista 02	98
Gráfico 4.8 - Gráfico de ATR x tempo da Pista 01	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AEMC: Análise Elástica de Múltiplas Camadas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANPET: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes

ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres

ATR: Afundamento de trilha de roda

BGTC: Brita Graduada Tratada com Cimento

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CAMB: Concreto asfáltico modificado com borracha

CAMP: Concreto asfáltico modificado com polímeros

CAUF: Concreto asfáltico usinado à frio

CAUQ: Concreto asfáltico usinado à quente

CBR: *California Bearing Ratio*

CCR: Concreto compactado à rolo

CENPES: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello

CNT: Confederação Nacional do Transporte

COPPE: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

DCNs: Diretrizes Curriculares Nacionais

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

EAF: *Electric Arc Furnace*

EAP: Emulsão asfáltica de petróleo

ES: Espírito Santo

FWD: *Falling Weight Deflectometer*

HVS: *Heavy Vehicle Simulator*

IPR: Instituto de Pesquisas Rodoviárias

IRI: *Internationalized Resource Identifier*

ISC: Índice de Suporte Califórnia

KR: *Kambara Reactor*

LA: Lama Asfáltica

LD: *Linz-Donawitz*

MCA: Microconcreto asfáltico

ME: Mecanístico-empírico

MeDiNa: Método de Dimensionamento Nacional

MR: Módulo de Resiliência

PDC: Polímero supressor de poeira

RDT: Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

RT: Resistência à Tração

SC: Solo-cimento

SMC: Solo melhorado com cimento

UFES: Universidade Federal do Espírito Santo

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

USACE: *United States Corps of Engineers*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	Objetivo Geral	19
1.3	Objetivos Específicos	19
1.4	Organização do Trabalho	20
1.5	Inserção do Tema na Formação do Engenheiro Civil	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Pavimentação	23
2.1.1	Estrutura do pavimento flexível	25
2.1.2	Materiais para pavimentação	28
2.1.3	Uso de escória para estabilização de bases e sub-bases	37
2.2	Métodos de Dimensionamento de Pavimentos	42
2.2.1	Métodos de dimensionamento	47
2.2.2	Método empírico do DNER	48
2.2.3	Método mecanístico	54
2.2.4	Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa)	55
3	METODOLOGIA DO ESTUDO	72
3.1	Etapa 1: Trecho Experimental	72
3.1.1	Avaliação em campo do trecho experimental	75
3.1.2	Detalhamento Pista 01	78
3.2	Etapa 02: Caracterizações Experimentais Complementares	81
3.2.1	Considerações iniciais dos materiais para modelagem	82
3.2.2	Relação entre ensaios previstos e realizados	82
3.3	Etapa 03: Simulações no MeDiNa	84

4	RESULTADOS	86
4.1	Resultados da Etapa 01: Desempenho de Campo	86
4.2	Resultados da Etapa 02: Caracterizações Experimentais Complementares	
	88	
4.2.1	Módulo de resiliência do solo do Subleito	88
4.2.2	Módulo de resiliência com Solo-KR	90
4.2.3	Módulo de resiliência do SMC	95
4.3	Resultados da Etapa 03: Simulações no MeDiNa	97
4.3.1	Base: Calibração dos coeficientes de deformação permanente do SMC 3%	97
4.3.2	Sub-base: Avaliação do comportamento do Solo KR	99
4.3.3	Revestimento: Análise da fadiga do concreto asfáltico modificado com borracha	100
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	103
5.1	Sugestão de Trabalhos Futuros	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

1 INTRODUÇÃO

Construído com a finalidade de suportar os esforços advindos do tráfego de veículos e do clima, bem como proporcionar melhores condições de segurança e conforto para as vias rodoviárias e seus usuários, o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, denominada subleito. Dentre os tipos existentes de pavimentos encontram-se os pavimentos flexíveis, cuja camada de revestimento é composta por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), os pavimentos flexíveis, também conhecidos como pavimentos asfálticos, são predominantes no Brasil, compondo mais de 99% da malha rodoviária do país. Sendo assim, seus dimensionamentos de maneira adequada é de extrema importância para atender aos critérios técnicos de segurança, eficiência e economia, bem como evitar a ocorrência de danos em sua estrutura, como trincas e deformações excessivas. Esses danos ocorrem principalmente devido à aplicação de cargas elevadas ou devido ao grande número de repetições de passagem das rodas dos veículos, para as quais os pavimentos existentes, muitas vezes, não foram dimensionados (FRANCO, 2007; NEPOMUCENO, 2019)

Uma pesquisa realizada pela CNT em 2019 mostra que as condições atuais de pavimentação das estradas brasileiras são insatisfatórias, existindo casos de pavimentos projetados para durarem cinco anos que apresentaram desgastes excessivos em menos de sete meses após sua implantação. Na pesquisa foram analisados cerca de 57 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, sendo que deste total 52,4% apresentaram algum tipo de problema, classificando-as, assim, em regular, ruim ou péssima (CNT, 2019).

As simplificações do método de dimensionamento vigente no Brasil para definição das estruturas dos pavimentos, denominado método do DNER, colabora para a deterioração precoce dos pavimentos das rodovias. Este método foi desenvolvido na década de 60 (e atualizado em 1981) com o objetivo de normalizar e uniformizar as técnicas de construção dos pavimentos. O Método do DNER segue sendo o mais utilizado no Brasil até hoje, seu princípio baseia-se em uma análise empírica da capacidade de suporte do subleito, verificada através do ensaio de Índice

de Suporte Califórnia de seus materiais constituintes (DNIT, 2006; FERNANDES, 2016; VENDRUSCULO et al., 2018). Por ser um método empírico, baseia-se em gráficos e tabelas oriundos de experiências realizadas no exterior, onde as condições de tráfego, características dos materiais e fatores climáticos muitas vezes são diferentes daqueles presentes no Brasil. Destaca-se ainda que a maneira generalista que o método agrupa diferentes materiais em um mesmo coeficiente de equivalência impossibilita a análise da contribuição de diferentes soluções no desempenho do pavimento. Além disso, utilizando a metodologia atual, não é possível realizar previsões sobre a evolução do dano nos pavimentos, seja por deformações excessivas ou por fadiga.

O surgimento de novos veículos de carga, materiais mais modernos e a composição atual do tráfego nacional justificam a procura por atualizar os métodos de dimensionamento. Sendo assim, como forma de levar em consideração estes novos fatores e cumprir as carências nas rotinas de projetos atuais (como previsão de desempenho), foi desenvolvido um novo método nacional para dimensionamento de pavimentos, o MeDiNa, levando em consideração o comportamento elástico dos materiais e fazendo uso da teoria elástica de múltiplas camadas numa abordagem mecanística-empírica (CNT, 2017; V, 2018; OLIVEIRA, 2011).

O método MeDiNa é fruto do Termo de Execução Descentralizada celebrado de 2015 a 2018 entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, bem como da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES e de diversas Universidades do Brasil, oficialmente recomendado no Brasil pelo DNIT para dimensionamento de pavimentos em 2018. O método MeDiNa aplica diferentes modelos de cálculo conforme a categoria do material empregado em cada camada, a fim de melhor representar o comportamento deste material como constituinte do desempenho do pavimento, por exemplo materiais estabilizados (Brita graduada tratada com cimento - BGTC, Concreto compactado com rolo - CCR, Solo-cimento - SC, etc.), solos finos e misturas asfálticas. O método foi implementado num pacote computacional de forma a facilitar seu uso e disseminação da cadeia rodoviária e conta com uma ampla base de dados incorporada com informações de materiais ensaiados e que constam em publicações técnicas (FRANCO, 2018).

Considerando que o novo método de dimensionamento nacional traz, além de outros fatores, uma série de avanços no que diz respeito a considerações de características de novos materiais empregados em camadas de pavimento, considerações estas que são aplicadas em modelos de previsão de dano, este projeto foi desenvolvido tanto para capacitar recursos humanos (formandos do curso de Engenharia Civil da UFES) no que diz respeito ao conhecimento e utilização do MeDiNa e sua ferramenta computacional, quanto para avaliar uma solução de trecho experimental contendo solução inovadora empregada na BR-101 no Espírito Santo, uma vez que ainda é desconhecido seu comportamento quando sujeito a esforços repetitivos a curto e longo prazo. A solução proposta, que faz uso de coproduto de aciaria, será apresentada na justificativa e em mais detalhes na revisão de literatura.

1.1 JUSTIFICATIVA

O uso de técnicas de estabilização de solos tem sido cada vez mais frequente dada a carência de materiais naturais não modificados que atendam aos requisitos necessários para uso em pavimentação. Os aglomerantes mais comumente empregados para estabilização de solos são a cal e o cimento. No entanto, uma solução regional estudada pelo grupo de pesquisas em pavimentação da Universidade Federal do Espírito Santo apontou o uso de escória KR como estabilizante de solos como uma alternativa econômica e sustentável.

A escória KR é originada no Reator Kambara (*Kambara Reactor* – KR), ou seja, um coproduto do processo de dessulfuração do ferro fundido, e é composta por óxido de cálcio, dióxido de silício, e óxido de ferro, além de outros constituintes na forma de compostos, como hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio, entre outros. Após seu beneficiamento, tem se mostrado eficiente estabilizante de solos, conforme literatura técnico-científica e recentes experiências nacionais na engenharia geotécnica e de pavimentação. Quando misturada aos solos, pode apresentar aumento no valor de ISC de até 560%, a depender do solo e da proporção de KR na mistura (OLIVEIRA, 2018; BRIDI, 2020).

Por ser uma solução inovadora, ainda não se sabe qual o comportamento deste material frente a diferentes situações de carregamento. Fazer a previsão do comportamento de pavimentos utilizando tais soluções em métodos mecânicos empíricos requer um entendimento do comportamento do material.

Sabe-se que o MeDiNa faz uso de modelos de previsão diferenciados a depender do tipo de solo, em solos granulares o modo de falha se dá por deformação permanente enquanto em solos estabilizados quimicamente o modo de falha se dá por trincamento por fadiga. Para o solo estabilizado com coproduto KR, ainda não se sabe ao certo se seu comportamento tem características mais de um solo granular ou de solo estabilizado quimicamente, ou ainda uma combinação destes comportamentos. Assim, para definir o melhor modelo a ser empregado no MeDiNa, é precisa a determinação de parâmetros físicos e mecânicos, através de ensaios em laboratório, por exemplo.

A fim de averiguar qual modelo estrutural dentre os implementados no MeDiNa representaria melhor o comportamento de um pavimento utilizando a solução solo-escoria KR, este trabalho utilizou como estudo de caso uma solução estrutural de pavimento que está sendo empregada na duplicação da BR-101 no Estado do Espírito Santo. O trecho experimental, objeto de estudo deste trabalho, foi construído com solo estabilizado com coproduto de aciaria KR. Este estabilizante destaca-se quanto ao seu potencial de cimentação quando em contato com a água, resultando no aumento na capacidade de suporte e na resistência dos solos (FURIERI, 2019; NEPOMUCENO, 2019; PIRES et al., 2019)

1.2 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de um trecho experimental construído na BR-101-ES com sub-base estabilizada com escória de aciaria e comparar com resultados obtidos no novo método de dimensionamento nacional (MeDiNa).

1.3 Objetivos Específicos

- Avaliar os efeitos da incorporação de KR nas características resilientes dos solos in natura e com incorporação de KR, a partir do estudo experimental de misturas submetidas ao ensaio de Módulo de Resiliência;
- Compreender os diferentes modelos de previsão de desempenho (deformação permanente e fadiga) implementados no MeDiNa;

- Determinar dentre os modelos de previsão implementados no MeDiNa, qual seria mais adequado para previsão do desempenho de base estabilizada com escória KR;
- Analisar dados de campo existentes de trecho experimental com aplicação da mistura solo-KR, tais como afundamento de trilha de roda (ATR) medido pela treliça metálica e análise periódica de trincas e confrontar estes resultados com as previsões realizadas no MeDiNa.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho apresenta-se organizado em 6 (seis) capítulos da seguinte forma:

- Capítulo 1: Apresenta uma breve introdução sobre o assunto tratado neste projeto, além da justificativa para escolha e breve explanação do tema. Apresenta também os objetivos gerais e específicos deste trabalho;
- Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica sobre a pavimentação no Brasil. Faz uma análise das condições atuais dos pavimentos, estrutura dos pavimentos flexíveis, materiais utilizados e comportamento estrutural, além de tratar também sobre a escória KR e sua aplicação para pavimentação, bem como os métodos de dimensionamento existentes, dando ênfase ao novo método de dimensionamento nacional (MeDiNa);
- Capítulo 3: Aponta a forma como foi pensada a metodologia desse trabalho, a sua divisão em etapas e a descrição do que compõe cada uma destas etapas;
- Capítulo 4: Expõe os resultados obtidos nas etapas descritas no capítulo 4, ou seja, a análise dos dados de campo do trecho experimental, os resultados dos ensaios complementares, bem como os resultados das simulações realizadas no programa que utiliza o novo método de dimensionamento MeDiNa;
- Capítulo 5: Apresenta as conclusões alcançadas ao final do trabalho e sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 6: Apresenta as referências bibliográficas utilizadas.

1.5 Inserção do Tema na Formação do Engenheiro Civil

O transporte é um dos pilares básicos no desenvolvimento de uma sociedade, transportar é essencial, seja passageiros, matéria-prima, mercadorias ou informações. Por isso, esforços são voltados à essa área ao longo de toda história da humanidade.

Na atualidade Brasileira, o modal rodoviário é o que possui a maior participação na matriz de transporte, concentrando, aproximadamente, 61% da movimentação de mercadorias e 95% da de passageiros (CNT, 2019). Contrapondo esses dados estão as péssimas condições da malha rodoviária e o aumento constante da frota de veículos, fatos que ressaltam a carência por investimentos no setor.

O engenheiro civil é o profissional habilitado para atuar desde pesquisas passando por etapas de projeto, execução, logística até manutenção destas rodovias. Diante disso, é de extrema importância que haja em sua formação o contato com esta área de atuação, além de disciplinas obrigatórias, também com possibilidades de pesquisas de extensão e estímulos para se atualizar do que está sendo aplicado.

Dentro do âmbito da pavimentação, o novo método de dimensionamento nacional – MeDiNa se mostra como o futuro do dimensionamento de pavimentos no Brasil, daí a importância da capacitação dos novos engenheiros no entendimento e aplicação deste tipo de ferramenta.

A grade curricular obrigatória do curso muitas vezes é carente de disciplinas que abordem especificamente o dimensionamento de pavimentos, o conteúdo mais próximo deste fica pulverizado, de forma superficial, em outras disciplinas como Técnicas e Economias de Transporte, Estradas de Rodagem e Laboratório de Solos, que constituem a grade curricular da UFES (2008).

O art. 4º das Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) do Curso de Graduação em Engenharia, de 24 de abril de 2019, institui que o curso de graduação em Engenharia deve proporcionar aos seus egressos, dentre outras, as seguintes competências gerais:

[...] II - analisar e compreender os fenômenos físicos e químicos por meio de modelos simbólicos, físicos e outros, verificados e validados por experimentação:

- a) ser capaz de modelar os fenômenos, os sistemas físicos e químicos, utilizando as ferramentas matemáticas, estatísticas, computacionais e de simulação, entre outras.
- b) prever os resultados dos sistemas por meio dos modelos;
- c) conceber experimentos que gerem resultados reais para o comportamento dos fenômenos e sistemas em estudo.

- d) verificar e validar os modelos por meio de técnicas adequadas;
- III - conceber, projetar e analisar sistemas, produtos (bens e serviços), componentes ou processos:
 - a) ser capaz de conceber e projetar soluções criativas, desejáveis e viáveis, técnica e economicamente, nos contextos em que serão aplicadas;
 - b) projetar e determinar os parâmetros construtivos e operacionais para as soluções de Engenharia; [...] (BRASIL, 2019).

Tais recomendações são por meio deste trabalho atendidas, uma vez que o mesmo se propõe a explorar uma nova ferramenta de dimensionamento de pavimentos juntamente à aplicação de uma nova solução de material.

Como percebido, além da busca por melhores formas de dimensionar, existe também a demanda pela utilização de novos materiais na pavimentação, que se justifica no Brasil e no mundo, devido à oferta de recursos minerais cada vez mais escassa, sendo possível alinhar a isso soluções sustentáveis, como a incorporação de coprodutos, por exemplo. O presente trabalho desempenha então o papel de despertar o interesse para os recém formados na busca por tais alternativas, capacitando-os para uma visão crítica e com preocupação ambiental no exercer da sua profissão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentação

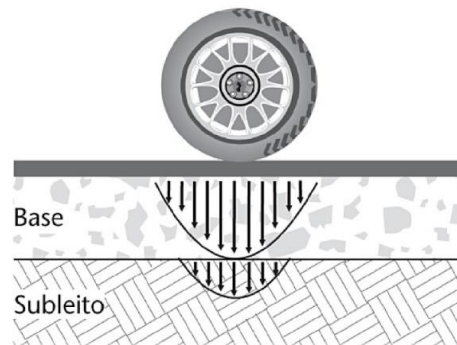
Segundo Balbo (2007), pavimentar é o ato de melhorar as condições operacionais para o tráfego de veículos, a partir da criação de uma superfície de rolamento mais regular, aderente e menos ruidosa, acarretando, assim, em maior segurança, conforto, eficiência e economia para seus usuários.

O pavimento, por sua vez, é uma estrutura não perene composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito, adequada para atender estruturalmente e operacionalmente ao tráfego de maneira durável e econômica. Assim, espera-se que esta estrutura seja capaz de receber os esforços provenientes da passagem de veículos e do clima, transmitindo-os ao longo de sua estrutura, aliviando, assim, as tensões sobre as camadas inferiores. Para seu bom funcionamento, é indispensável o dimensionamento adequado do mesmo, a fim de evitar ruptura ou danificação de forma prematura e inadvertida dos materiais constituintes de suas camadas.

Os pavimentos, em geral, podem ser classificados em dois tipos básicos, rígidos e flexíveis, conforme o material utilizado em sua camada de revestimento. Os pavimentos rígidos, também conhecidos como pavimentos de concreto-cimento, são aqueles cuja camada de revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, que pode ser armada ou não. Já os pavimentos flexíveis, como dito anteriormente, possuem uma camada de revestimento composta por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI et al., 2008).

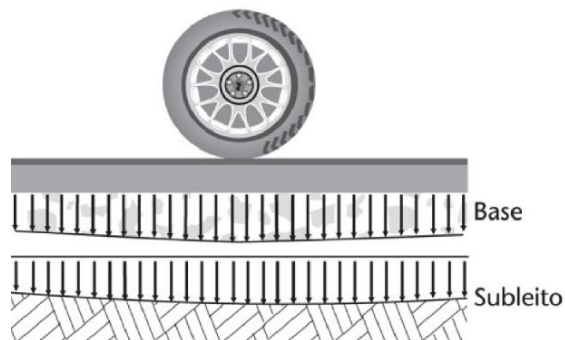
Os tipos de pavimento diferem-se, também, de acordo com a forma de distribuição dos esforços, aos quais são submetidos, sobre a camada de fundação, conhecida como subleito. A carga atuante impõe, sobre o pavimento flexível, um campo de tensões altamente concentrado nas proximidades do ponto onde esta foi aplicada, como mostrado na Figura 2.1. Já nos pavimentos rígidos, a mesma carga provoca um campo de tensões mais disperso e distribuído ao longo de toda a dimensão da placa de revestimento, acarretando menores tensões verticais agindo sobre o subleito, conforme indicado na Figura 2.2 (BALBO, 2007).

Figura 2.1 – Tensões no pavimento flexível



Fonte: Balbo, 2007.

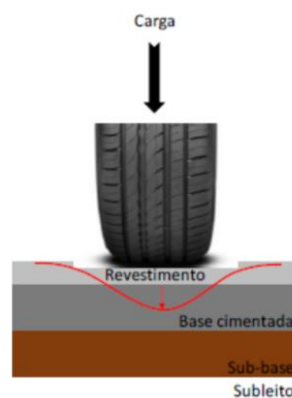
Figura 2.2 – Tensões no pavimento rígido



Fonte: Balbo, 2007.

Pinto e Preussler (2010), porém, adotam uma nova classificação para pavimentos: os pavimentos semirrígidos. Estes apresentam uma camada de revestimento asfáltico e uma camada de base composta por materiais cimentícios, como mostra a Figura 2.3.

Figura 2.3 – Tensões no pavimento semirrígido



Fonte: Departamento de Transportes e Obras de Terra, FATEC-SP (2018).

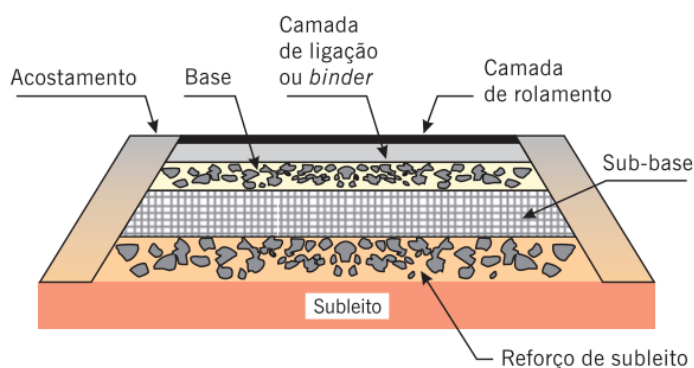
Conforme mencionado anteriormente, mais de 99% da malha rodoviária pavimentada no Brasil faz uso de pavimento flexível, configurando este como objeto de estudo deste trabalho (CNT, 2017).

2.1.1 Estrutura do pavimento flexível

O pavimento deve, acima de tudo, assegurar uma superfície de rolamento que permita o tráfego de veículos com conforto e segurança, durante sua vida útil. Tal fato só é possível devido ao papel estrutural que as suas camadas constituintes exercem. Sendo assim, essas camadas devem ser capazes de resistir aos esforços existentes, sem sofrer degradações que prejudiquem também sua funcionalidade (BRANCO, 2008; PAIS et. al, 2000).

De maneira geral, as camadas de pavimentos flexíveis apresentam-se em ordem decrescente de resistência, tendo como referência a superfície do pavimento em direção ao subleito. Isso acontece devido ao fato de que os esforços solicitantes reduzem à medida que a profundidade aumenta (BRANCO, 2008), como pode ser observado na Figura 2.1. Segundo Bernucci et. al (2008), os pavimentos asfálticos são formados por quatro camadas principais (revestimento, base, sub-base e reforço do subleito), como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Corte transversal de um pavimento asfáltico



Fonte: Bernucci et al., 2010.

A camada de revestimento asfáltico é responsável por receber diretamente os esforços provenientes do tráfego e transmiti-los, de forma mais branda, para as demais camadas, devendo, então, resistir aos desgastes causados pelos mesmos, aumentando a durabilidade do pavimento. Sua função, também, está diretamente

ligada ao fornecimento de melhores condições para circulação dos automóveis e à impermeabilização de toda a estrutura. Balbo (2007) afirma que, por questões técnicas, operacionais ou de custo, a camada de revestimento pode ser subdividida em duas outras camadas. Sendo assim, existiria uma camada de rolamento, em contato direto com as rodas dos veículos, e camadas intermediárias (ou de ligação), denominadas de binder.

A camada de base, localizada abaixo do revestimento, é responsável pelo alívio de tensões nas camadas inferiores e pela drenagem das águas que circulam nas camadas granulares dos pavimentos e no subleito, através de um dreno, evitando, assim, a ocorrência de algumas manifestações patológicas. A sub-base se apresenta como uma alternativa de complementar as funções exercidas pela base. Assim, ao invés de utilizar uma base bem espessa, utiliza-se a camada de sub-base, composta por materiais de características inferiores, gerando uma economia para a construção. O reforço do subleito por sua vez, tem a função de melhorar a qualidade do subleito e regularizar a superfície da sub-base (FRANCISCO, 2012; NEPOMUCENO, 2019; SILVA, 2018).

A Figura 2.5 é a representação real de um pavimento flexível, mostrando sua estrutura dividida em camadas.

Figura 2.5 – Estrutura real de um pavimento flexível



Fonte: Adaptado da página Dr. Asfalto¹.

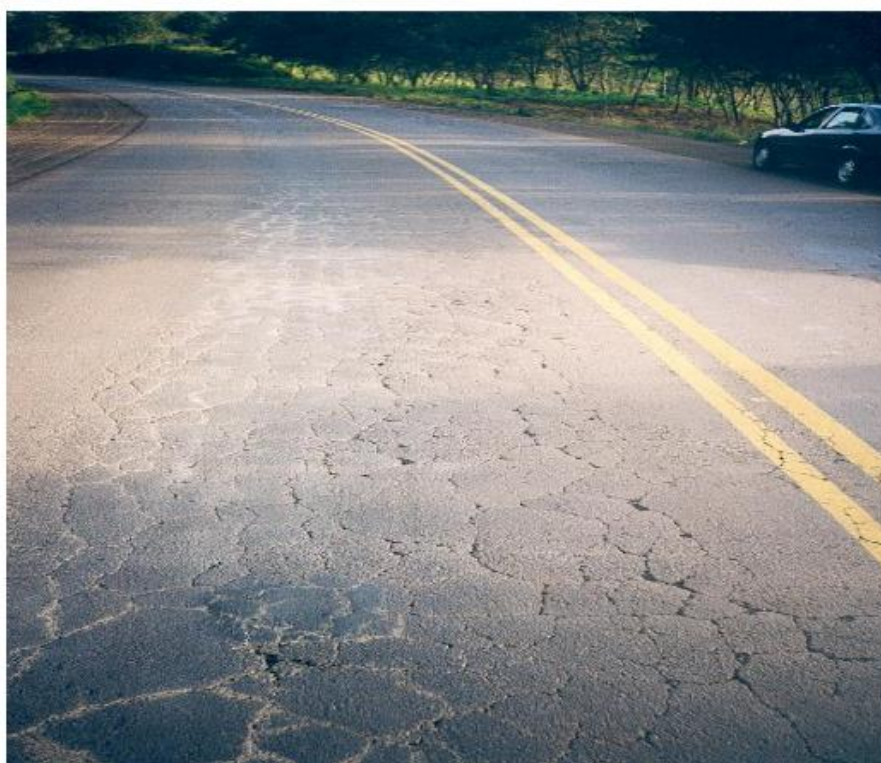
Ao longo de sua vida útil, a integridade estrutural do pavimento pode ser comprometida devido ao surgimento de diversos tipos de mecanismos de

¹ Disponível em: <https://drasfalto.com.br/servicos_especiais>. Acesso em: 16 mai. 2020

deterioração, prejudicando, também, seu bom desempenho. Os defeitos mais graves que ocorrem em pavimentos flexíveis se refletem no revestimento devido a dois tipos de solicitações mecânicas. Uma dessas solicitações é a flexão repetida, responsável pela fadiga dos materiais constituintes, acarretando formação de trincas. A compressão simples é um outro tipo de solicitação mecânica responsável pelo acúmulo de deformações permanentes, como é o caso do afundamento de trilha de roda (ATR) (PINTO, 1991).

Como forma de minimizar os impactos causados por esses mecanismos, é importante que a camada de base apresente uma boa condição de drenagem, evitando que a deterioração do pavimento ocorra de maneira mais rápida devido ao acesso de águas pluviais por toda sua estrutura (GONÇALVES, 1999). As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram esses dois mecanismos de deterioração.

Figura 2.6 – Trincas em pavimentos flexíveis



Fonte: Fontes, 2009.

Figura 2.7 – ATR em pavimentos flexíveis



Fonte: Fontes, 2009.

2.1.2 Materiais para pavimentação

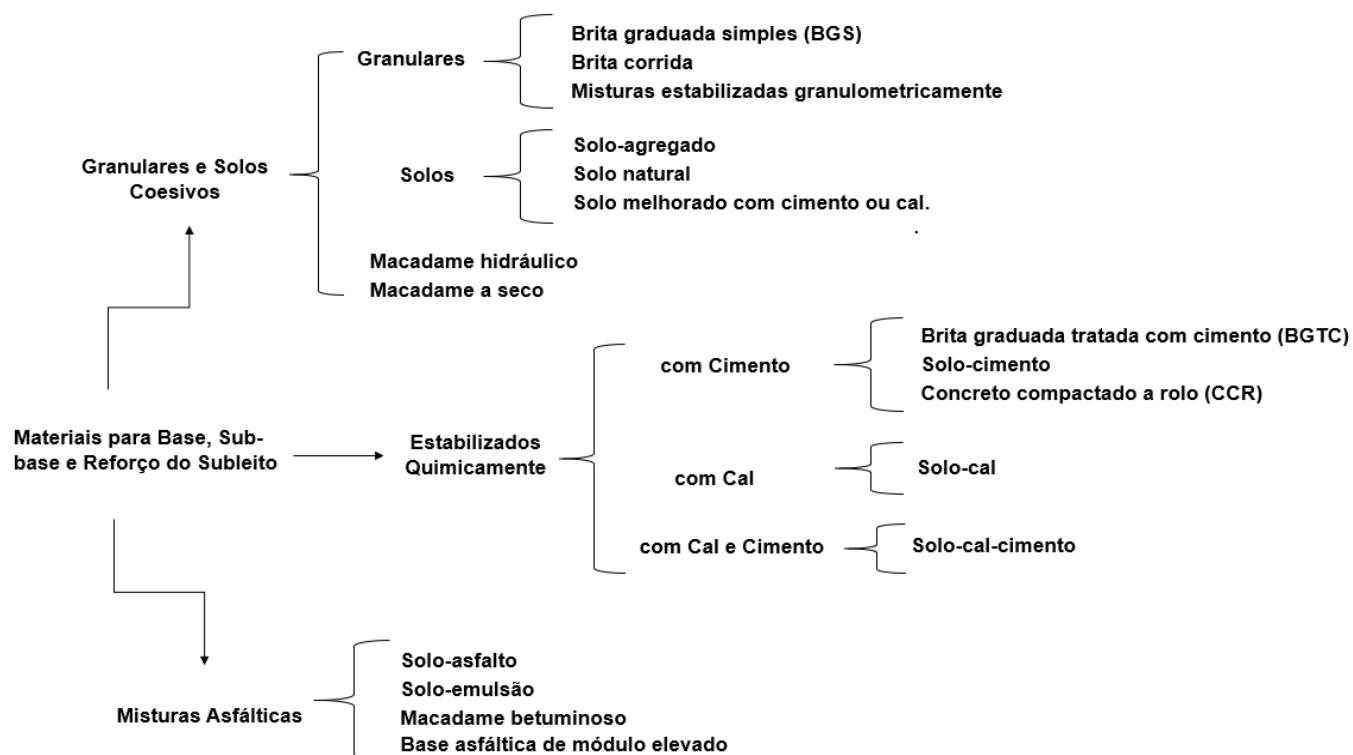
A escolha dos materiais mais adequados para compor cada camada do pavimento se dá a partir do emprego de métodos de seleção e caracterização. A seleção é uma etapa preliminar que consiste em averiguar os materiais disponíveis quanto às características de natureza, que interferem diretamente nas propriedades geotécnicas no estado compactado. Para fins de pavimentação, a caracterização é feita por meio de ensaios em laboratório a fim de verificar se as propriedades dos materiais atendem às especificações vigentes e aos requisitos básicos para o seu uso na estrutura do pavimento, dependendo de sua natureza e aplicação. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI et al., 2008).

Como forma de simplificação, a apresentação dos materiais utilizados será dividida em dois grupos: materiais para base, sub-base e reforço do subleito e materiais para revestimento.

2.1.2.1 Materiais para base, sub-base e reforço do subleito

Os materiais constituintes das camadas de base, sub-base e reforço do subleito são classificados, conforme seu comportamento diante aos esforços solicitantes, em três grupos principais, para fins de uso em pavimentação, conforme mostrado no fluxograma da Figura 2.8.

Figura 2.8 – Fluxograma dos materiais componentes de bases, sub-bases e reforços do subleito



Fonte: Adaptado de Balbo, 2007.

Os solos e materiais granulares são aqueles que pouco possuem resistência à tração, se confinados, resistindo majoritariamente aos esforços de compressão. Estes materiais também não apresentam coesão, com exceção à coesão aparente devido à sucção. Os solos coesivos, no geral, apresentam resistência à compressão e, devido à coesão gerada pela fração fina presente em sua composição, resistem também, em pequena proporção, aos esforços provenientes da tração.

Os materiais estabilizados quimicamente, também conhecidos como cimentados, são no geral solos ou materiais granulares que receberam algum tipo de adição, geralmente de cimento ou cal, com a finalidade de obter-se um acréscimo

significativo de rigidez do material natural e um aumento de resistência aos esforços de tração e compressão.

Por fim, as misturas asfálticas destinadas à camada de base podem ser classificadas como misturas coesivas, cuja ligação entre agregados ou partículas é dada pelo ligante asfáltico e cuja resistência à tração é bastante superior aos solos argilosos.

Vale ressaltar ainda a existência de outros materiais de uso crescente em pavimentação, decorrentes de reutilização e reciclagem, como é o caso da escória de aciaria, do agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições, de rejeitos de extração de rochas ornamentais, mistura asfáltica fresada, entre outros (BERNUCCI et al., 2008).

Como mencionado anteriormente, para a escolha do material adequado é necessária a realização de ensaios de caracterização a fim de verificar suas propriedades. Para o dimensionamento de estruturas de pavimentos e caracterização mecânica dos materiais de base, sub-base e reforço do subleito, é necessária a verificação de diversos requisitos conforme especificados pelas normas do DNIT. No caso de solos estabilizados, as principais que direcionam a escolha de materiais e soluções para base e sub-base são:

- DNIT 98/2007 - ES: Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico;
- DNIT 114/2009 - ES: Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria;
- DNIT 115/2009 - ES: Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria;
- DNIT 139/2010 - ES: Sub-base estabilizada granulometricamente;
- DNIT 140/2018 - ES: Sub-base de solo melhorado com cimento;
- DNIT 141/2010 - ES: Base estabilizada granulometricamente;
- DNIT 142/2010 - ES: Base de solo melhorado com cimento;
- DNIT 143/2018 - ES: Base de solo-cimento;
- DNIT 420/2019 - ES: Sol-Cal – Adição de cal para Estabilização de camada de Base;
- DNIT 421/2019 - ES: Sol-Cal – Adição de cal para Estabilização de camada de Sub-base.

É possível verificar, a partir das normas, que os requisitos e os ensaios necessários se diferenciam conforme o tipo de material e a camada na qual este será utilizado. Sendo assim, a relação entre os parâmetros a serem analisados e as normas consultadas estão apresentados nos Quadros 2.1 e 2.2.

Quadro 2.1 – Relação entre normas, parâmetros e ensaios para materiais usados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito (1/2)

Parâmetros / Ensaios	DNIT 098/2007 - ES	DNIT 114/2009 - ES	DNIT 115/2009 - ES	DNIT 138/2010 - ES	DNIT 139/2010 - ES
Abrasão "Los Angeles"	Desgaste $\leq 65\%$ (agregados retidos na peneira nº10)	Escória: Desgaste $< 40\%$	Escória: Desgaste $< 40\%$		
Ensaio de Compactação	Material compactado com 26 ou 56 golpes por camada, M' todo C	Energia Indicada no projeto ($\geq$ do Método B)	Energia Indicada no projeto ($\geq$ do Método B)	Energia Indicada no projeto ($\geq$ do Método B)	Energia Indicada no projeto ($\geq$ do Método B)
Equivalente Areia	E.A $> 30\%$				
Expansão		Escória: E $< 3\%$ Mistura: E $\leq 1\%$	Escória: E $< 3\%$ Mistura: E $\leq 0,5\%$	E $\leq 1\%$	E $\leq 1\%$
Granulometria	% passante na peneira Nº 200 $\leq 2/3$ da% passante peneira Nº 40. A fração retida na peneira nº 10 deve ser constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico Faixas granulométricas definidas por norma	Solo: $\leq 15\%$ em peso, retido na peneira nº10; Faixas granulométricas definidas por norma	Solo: $\leq 15\%$ em peso, retido na peneira nº10; Faixas granulométricas definidas por norma		A fração retida na peneira nº 10 deve ser constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico
Índice de Grupo				IG $\leq$ do Subleito	IG = 0
Índice de Plasticidade	IP $\leq 15\%$ (material retido na peneira N º40), salvo misturas com materiais de IP $\leq 6\%$, que devem atender os demais requisitos.				
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	ISC $\geq 60\%$, para N $\leq 5 \times 10^6$ ISC $\geq 80\%$, para N $> 5 \times 10^6$	Escória: ISC $\geq 60\%$ Mistura: ISC $> 20\%$	Escória: ISC $\geq 80\%$ Mistura: ISC $> 60\%$	$\geq$ Definido pelo Projeto	ISC $\geq 20\%$
Limite de Liquidez	LL $\leq 40\%$ (material retido na peneira Nº 40)				
Módulo de Resiliência		Escória: MR ≥ 300 Mpa (Na umidade ótima)	Escória: MR ≥ 300 Mpa (Na umidade ótima)		

Fonte: Autoral, 2021.

Quadro 2.2 – Relação entre normas, parâmetros e ensaios para materiais usados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito (2/2)

Parâmetros / Ensaios	DNIT 140/2018 - ES	DNIT 141/2010 - ES	DNIT 142/2010 - ES	DNIT 143/2018 - ES	DNIT 420/2019 - ES	DNIT 421/2019 - ES
Abrasão "Los Angeles"		Desgaste $\leq 55\%$ (material retido na peneira n° 10)				
Ensaio de Compactação		Energia do Proctor Modificado, indicado no projeto	Energia de compactação conforme Método C			
Equivalente Areia		E.A $> 30\%$ (caso LL e IP não sejam atendidos)				
Expansão		E $\leq 0,5\%$	Mistura: E $\leq 0,5\%$			
Fadiga				$\geq$ Definido pelo Projeto		
Granulometria	Agregados retidos na peneira n° 10 devem ser constituídos de partículas duras e duráveis, isento de fragmentos moles, alongados, achatados, material vegetal.	Agregados retidos na peneira n° 10 devem ser constituídos de partículas duras e duráveis, isento de fragmentos moles, alongados, achatados, material vegetal. % passante na peneira N° 200 $\leq 2/3$ da % passante peneira N° 40. Faixas granulométricas definidas por norma	Agregados retidos na peneira n° 10 devem ser constituídos de partículas duras e duráveis, isento de fragmentos moles, alongados, achatados, material vegetal. Faixas granulométricas definidas por norma	Faixas granulométricas definidas por norma	Agregados retidos na peneira n° 10 devem ser constituídos de partículas duras e duráveis, isento de fragmentos moles, alongados, achatados, material vegetal.	Agregados retidos na peneira n° 10 devem ser constituídos de partículas duras e duráveis, isento de fragmentos moles, alongados, achatados, material vegetal.
Índice de Plasticidade		IP $\leq 15\%$ (material retido na peneira N° 40)	Solo: IP $\leq 18\%$ (material retido na peneira N° 40) Mistura: IP $\leq 6\%$			
Índice de Suporte Califórnia (ISC)		ISC $\geq 60\%$, para N $\leq 5 \times 10^6$ ISC $\geq 80\%$, para N $> 5 \times 10^6$	Mistura: ISC $\geq 80\%$		$\geq$ Definido pelo Projeto	$\geq$ Definido pelo Projeto
Limite de Liquidez		LL $\leq 25\%$ (material retido na peneira N 40)	Solo: LL $\leq 25\%$ (retido na peneira N 40) Mistura: LL $\leq 25\%$			
Módulo de Resiliência	$\geq$ Definido pelo Projeto			$\geq$ Definido pelo Projeto	$\geq$ Definido pelo Projeto	$\geq$ Definido pelo Projeto
Resistência à Compressão Simples				$\geq$ Definido pelo Projeto	$\geq$ Definido pelo Projeto	$\geq$ Definido pelo Projeto
Resistência à Tração				$\geq$ Definido pelo Projeto		

Fonte: Autoral, 2021.

Bernucci (2008) afirma ainda que, além dos parâmetros mencionados anteriormente, se faz necessário o emprego de outros ensaios a fim de determinar algumas propriedades mecânicas de materiais de base, sub-base ou reforço do subleito, especialmente no caso de materiais estabilizados quimicamente. Sabe-se que os materiais empregados em camadas de suporte vão estar submetidos a esforços de tração, sendo assim fundamental a verificação da resposta destes a diversas situações de carregamento, sendo os mais comumente aplicados os ensaios de tração, por meio de compressão diametral de corpos de prova. Deve-se ainda ressaltar que em alguns casos, como concreto compactado a rolo ou solo-cimento, pode-se determinar a resistência à tração por flexão em vigotas biapoiadas.

Vale salientar que, atualmente, existem metodologias ainda mais modernas para caracterização dos materiais e verificação de seus desempenhos. Ensaaios triaxiais de carga repetida são realizados para a determinação da relação tensão-deformação dos materiais de pavimentação, observando e modelando comportamento dos módulos de resiliência em diferentes níveis de tensão. Para melhores análises do surgimento das trincas nos pavimentos, bem como a deformação em sua estrutura, são realizados ensaios de fadiga e de deformação permanente, respectivamente (BERNUCCI et. al., 2008).

2.1.2.2 Materiais para revestimento

Com o intuito de garantir os requisitos de projeto, os pavimentos brasileiros, em geral, são constituídos de revestimento composto por uma mistura de agregados minerais de granulometrias diferentes com ligantes asfálticos, em proporções e processamentos adequados e compatíveis com as demais camadas. Os requisitos a serem atendidos estão diretamente relacionados à impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem e resistência à fadiga e ao trincamento térmico, conforme o clima e o tráfego previstos para o local. O material de revestimento, i.e. a mistura asfáltica, pode ser preparada em usina específica ou na própria pista, sendo identificados quanto ao tipo de ligante utilizado, podendo ser o cimento asfáltico de petróleo (CAP) que precisa ser aquecido (temperaturas maiores que 100 °C e que variam de CAP para CAP) para ter viscosidade necessária para sua aplicação, ou emulsão asfáltica de petróleo (EAP) que pode ser aplicada em temperatura ambiente (BERNUCCI et al., 2008). Em geral, os materiais usados para revestimentos asfálticos são:

- Concreto asfáltico usinado à quente (CAUQ), outrora denominado Concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ);
- Concreto asfáltico usinado à frio (CAUF);
- Concreto asfáltico modificado com polímeros (CAMP);
- Concreto asfáltico modificado com borracha (CAMB);
- Microconcreto asfáltico (MCA);
- Lama asfáltica (LA), entre outros.

A escolha do material adequado para uso em camada de revestimento é feita através de ensaios de caracterização e da verificação dos parâmetros estabelecidos por normas, processo realizado de maneira semelhante ao das demais camadas. Os requisitos analisados neste trabalho são especificados pelas seguintes normas do DNIT:

- DNIT 031/2006 - ES: Concreto Asfáltico;
- DNIT 112/2009 - ES: Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending”;
- DNER-ES 385/99: Concreto Asfáltico com Polímero.

É possível verificar, a partir das normas, que os requisitos e os ensaios necessários se diferenciam conforme o tipo de revestimento a ser utilizado. A relação entre os parâmetros a serem analisados e as normas consultadas estão apresentados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Relação entre normas, parâmetros e ensaios para revestimento asfáltico

Parâmetros/Ensaio	Componente	DNIT 031/2006 - ES	DNIT 112/2009 - ES	DNER – ES 385/99
Abrasão "Los Angeles"	Ag. Graúdo	≤ 50%	≤ 50%	≤ 55%
Absorção	Agregados			
Adesão de Areia	Mistura			
Adesividade	Mistura		-	
Coesão Úmida	Mistura			
Durabilidade	Ag. Graúdo	Perda < 12%	Perda < 12%	Perda < 12%
Equivalente Areia	Ag. Miúdo	≥ 55%	≥ 55%	≥ 55%
Estabilidade	Camada de Rolamento	≥ 500 Kgf	≥ 800 Kgf GAP: ≥ 700 Kgf	≥ 500 Kgf
	Binder	≥ 500 Kgf	≥ 700 Kgf	≥ 500 Kgf
Fluência	Mistura			2,0 a 4,5 mm
Granulometria	-	Faixas granulométricas definidas por norma (Diâmetro máx. ≤ 2/3 da espessura do revestimento) A fração retida entre duas peneiras consecutivas não deve ser inferior a 4% do total.	Faixas granulométricas definidas por norma (Diâmetro máx. ≤ 2/3 da espessura do revestimento) A fração retida entre duas peneiras consecutivas não deve ser inferior a 4% do total.	Faixas granulométricas definidas por norma (Diâmetro máx. ≤ 2/3 da espessura do revestimento) A fração retida entre duas peneiras consecutivas não deve ser inferior a 4% do total.
Índice de Forma	Ag. Graúdo	> 0,5	> 0,5	> 0,5
Percentagem de Vazios	Camada de Rolamento	3 a 5	3 a 5 GAP: 4 a 6	3 a 5
	Binder	4 a 6	4 a 6	4 a 6
Perda por Abrasão Úmida	Mistura			
Relação Betume-Vazios	Camada de Rolamento	75 a 82	65 a 78	75 a 82
	Binder	65 a 72	65 a 78	65 a 72
Resistência à Tração por Compressão Diametral	Camada de Rolamento	≥ 0,65 MPa	≥ 0,75 MPa GAP: ≥ 0,50 MPa	7,0 a 12,0 Kgf/cm²
	Binder	≥ 0,65 MPa	≥ 0,65 MPa	7,0 a 12,0 Kgf/cm²

Fonte: Autoral, 2021

2.1.3 Uso de escória para estabilização de bases e sub-bases

As escórias são resíduos obtidos através do processo de transformação de ferro em aço, que ocorre em três etapas: Redução, Refino, e Laminação. O processo de redução, transforma o ferro em gusa, no alto forno, originando as escórias de alto-forno, compostas principalmente por óxidos de sílica, alumina, cálcio e magnésios. Já o processo de refino, dá origem às escórias de aciaria, através da queima das impurezas presentes no material e adição de componentes químicos para melhoria da qualidade, transformando o ferro gusa em aço (BALTAZAR, 2001; GONÇALVES, 2016 apud NEPOMUCENO, 2019).

As escórias de aciaria, por sua vez, também podem ser classificadas conforme o forno empregado no processo de fabricação do aço: a escória LD, proveniente do conversor de oxigênio LD, e a escória EAF, escória elétrica proveniente do forno de arco elétrico (EAF - Electric Arc Furnace) (FREITAS e MOTTA, 2008).

Segundo Gonçalves (2016), o processo de fabricação do aço acarreta a produção de quantidades indesejáveis de enxofre, que são prejudiciais para o material em questão. Sendo assim, é realizado um processo de tratamento do ferro gusa, antes mesmo deste ser submetido aos convertedores LD ou EAF, denominado dessulfuração do gusa, para a retirada do enxofre que se encontra em excesso no aço. Este ocorre em reatores denominados Reatores Kambara (Kambara Reactor – KR) e dá origem a um novo tipo de escória, a escória KR, foco deste trabalho que será melhor abordada no item 3.1.

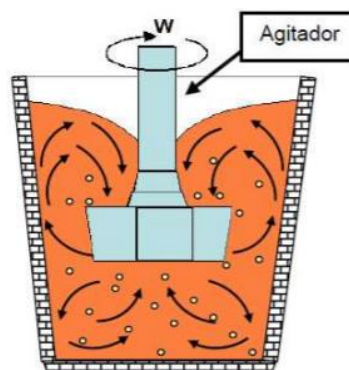
2.1.3.1 Escória KR

Conforme mencionado anteriormente, o processo de fabricação do aço provoca a produção de enxofre, mineral que, em altas concentrações, influencia diretamente a qualidade do aço produzido, reduzindo sua resiliência transversal, tornando-o mais suscetível a trincas longitudinais. Sendo assim, é necessário que seja retirado o excesso contaminante (KIRMSE, 2006).

Segundo Andrade (2018), o processo de pré-tratamento de dessulfuração do ferro gusa pelo método do Reator Kambara, utilizado para retirada do enxofre, gera uma escória específica, comumente chamada de escória KR, obtida a partir da inserção de um material dessulfurante no ferro gusa, geralmente a cal. Após a mistura do agente com o ferro pela agitação de pás rotativas imersas no metal líquido (Figura

2.9), a escória se eleva à superfície de onde é removida por um separador, e é enviada, então, para o pátio de escórias para sofrer os processos de beneficiamento, como britagem, separação metálica através de ímãs e separação granulométrica por peneiras vibratórias (TESSARI e COBE, 2015 apud ANDRADE, 2020). A 3.10 retrata esse coproduto.

Figura 2.9 – Esquema da mistura do dessulfurante com o ferro gusa



Fonte: Kirmse, 2006.

Figura 2.10 – Escória KR



Fonte: Nepomuceno, 2019.

Atualmente, o uso das escórias de aciaria em obras de pavimentação vem ganhando cada vez mais importância, devido às características desejáveis para materiais de pavimentação tais como dureza, durabilidade e resistência mecânica, bem como seu alto poder de cimentação quando em contato com a água (ROHDE, 2002; GONÇALVES, 2016 apud NEPOMUCENO, 2019). Porém, Tessari e Cobe (2015) afirmam que as escórias de aciaria também podem apresentar reações expansivas devido a certos compostos presentes no material, como CaO e MgO,

ocasionando o aparecimento de trincas e fissuras nas camadas de rolamento, comprometendo o pavimento como todo. No entanto, ressalta-se que a escória KR, diferente das escórias LD e EAF, não apresenta grande expansão volumétrica. Pires et al. (2019) mostram o resultado de caracterização de uma amostra de KR, mesmo material empregado no trecho analisado neste estudo. É possível perceber que o valor de expansão volumétrica segundo a norma DNIT 113/2009 - ME foi de 2,7% (Figura 2.11), ou seja, abaixo do limite máximo estabelecido na norma DNER - EM 262/94, que estabelece requisitos gerais e específicos concernentes ao uso de escórias de aciaria em pavimentação.

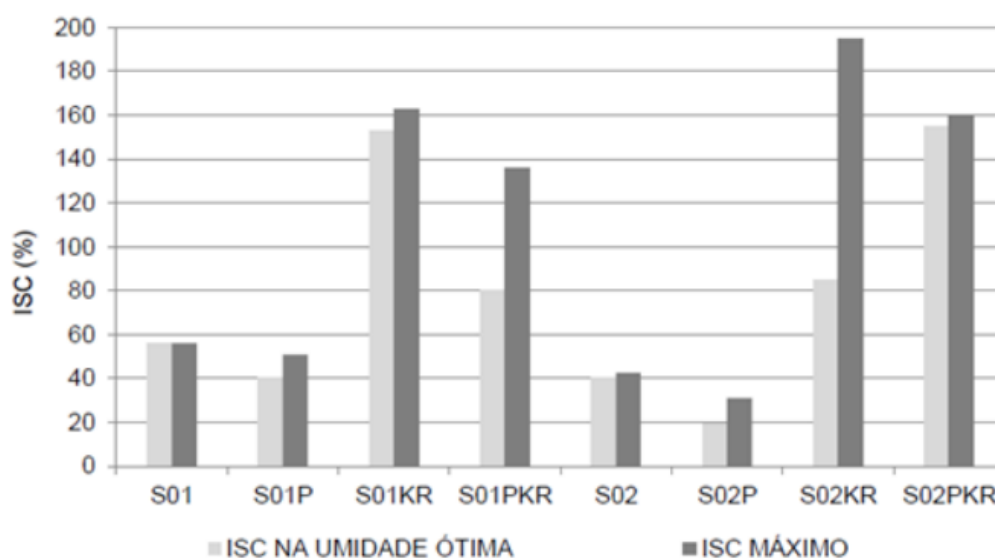
Figura 2.11 – Propriedades físicas da amostra do coproduto KR

Property	Standard procedure	Result	Standard limit (DNER EM 262)
Los Angeles abrasion (%)	ABNT NBR NM 51	24	≤ 25
Durability (%)	DNER ME 089	3.2	≤ 5
Unit mass (kg/dm^3)	ABNT NBR NM 045	1.5	1.5–1.7
Water absorption (%)	ABNT NBR NM 053	6.8	1.0–2.0
Specific mass (g/cm^3)	ABNT NBR NM 053	3.2	3.0–3.5
Level of expansion	DNIT ME 113	2.7	≤ 3

Fonte: Pires et. al (2019).

Em relação ao uso do coproduto KR na pavimentação, ainda há poucas publicações na literatura. Gonçalves (2016) analisou através de ensaios laboratoriais o comportamento de misturas compostas por dois tipos de solos (S1 e S2), coletados próximos à região metropolitana de Vitória e estabilizados pelo coproduto de aciaria KR, pelo polímero supressor de poeira PDC, e pela mistura de ambos. Foi verificado, então, que o uso da escória KR gerou grande aumento na capacidade de suporte e na resistência dos solos analisados, conforme Figura 2.12.

Figura 2.12 - Resumo dos valores de ISC para solos e misturas



Fonte: Gonçalves, 2016.

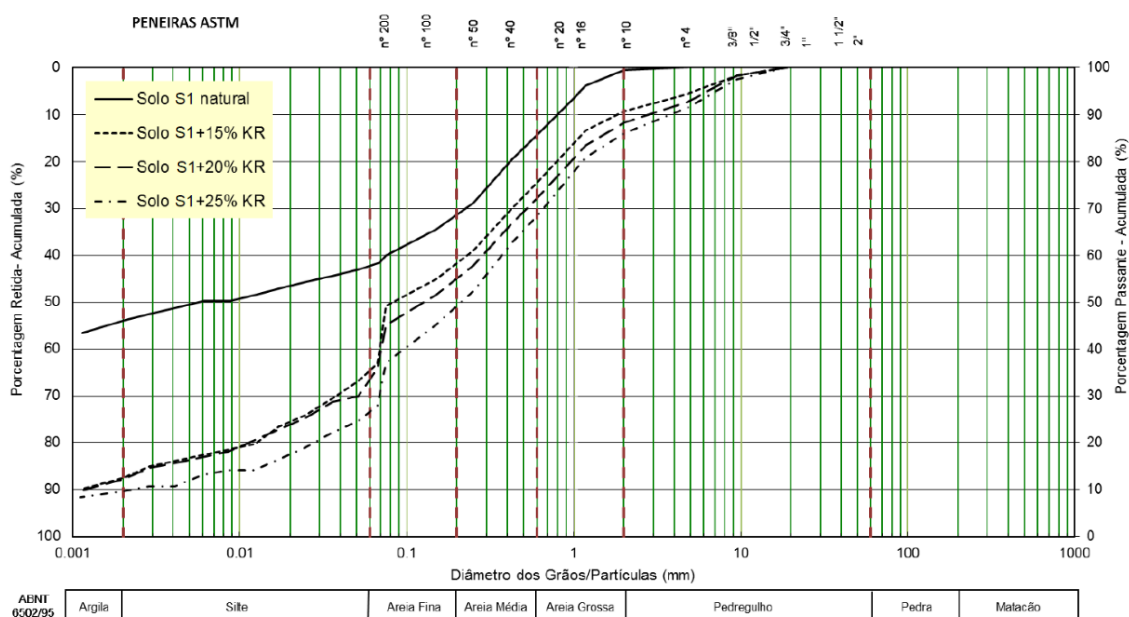
Oliveira (2018), dando continuidade ao trabalho de Gonçalves (2016), procurou entender os mecanismos que levavam a estabilização de solos pelo coproduto de aciaria KR, podendo ser químicos ou mecânicos (por correção granulométrica), avaliando o tipo de solo e percentual de adição de coproduto KR (10%, 20% e 30%) e concluindo que a adição do material promove melhorias na capacidade de suporte para todos os percentuais de adição de KR estudados, e comparáveis aos incrementos de resistência promovidos pela adição de 10% de cimento Portland.

Por fim, Andrade (2018) avaliou a incorporação da escória KR in natura nas proporções de 10, 20, 30 e 40% em Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), verificando que a utilização deste produto é viável tecnicamente, melhorando características de resistência à compressão e módulo de resiliência (NEPOMUCENO, 2019).

Vale ressaltar que, de acordo com o relatório de pesquisa RDT em parceria com a UFES e ECO 101, divulgado pela ANTT (2019), a adição de escória KR à um solo argiloso e altamente plástico permitiu um aumento da massa específica em relação ao solo puro, devido ao ferro presente em sua composição, bem como uma redução de praticamente 50% do índice de plasticidade, tornando o que antes era um material muito plástico (solo natural) em um material de plasticidade média (mistura). Além disso, a adição do coproduto KR tornou a distribuição granulométrica da mistura um pouco mais uniforme em relação ao solo natural, conforme mostra a Figura 2.13,

bem como não provocou aumento na expansão da mistura, tranquilizando a principal questão quando trata-se de escória para estabilização de solos.

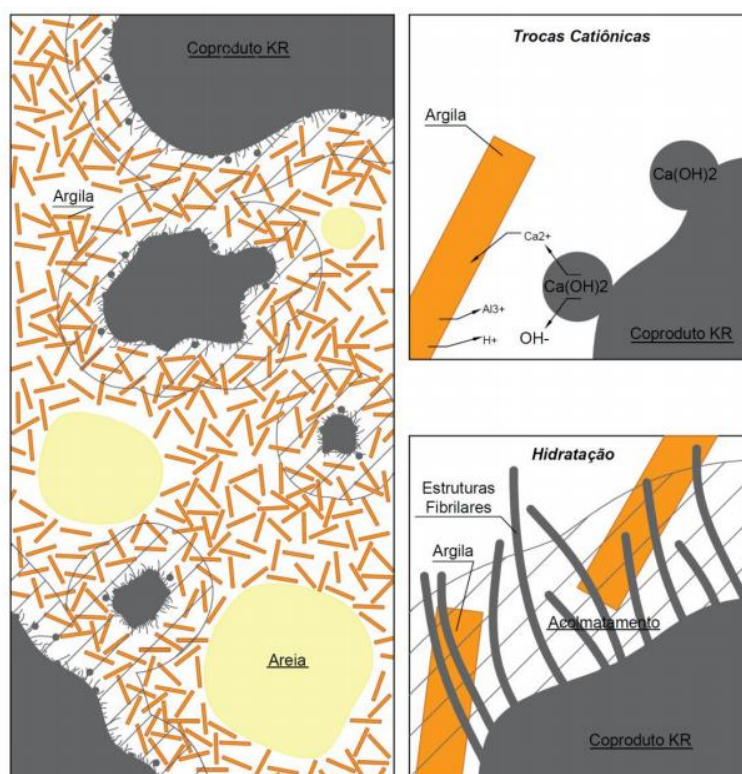
Figura 2.13 - Efeitos da adição de diferentes teores de KR na granulometria do solo



Fonte: ANTT, 2019.

Em pesquisas mais recentes, Bridi (2020) cita que a estabilização, através do coproduto KR, se dá principalmente por mecanismos de trocas catiônicas e de reações de hidratação (devido à alta concentração de carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio), sendo estas últimas responsáveis pela formação de estruturas fibrilares e em formato de agulhas, conforme Figura 2.14. Este cita, ainda, a possibilidade de desenvolvimento de reações pozolânicas, devido ao ganho de resistência e de cimentação promovido pelo material.

Figura 2.14 - Modelo de interação solo-KR



Fonte: Bridi, 2020.

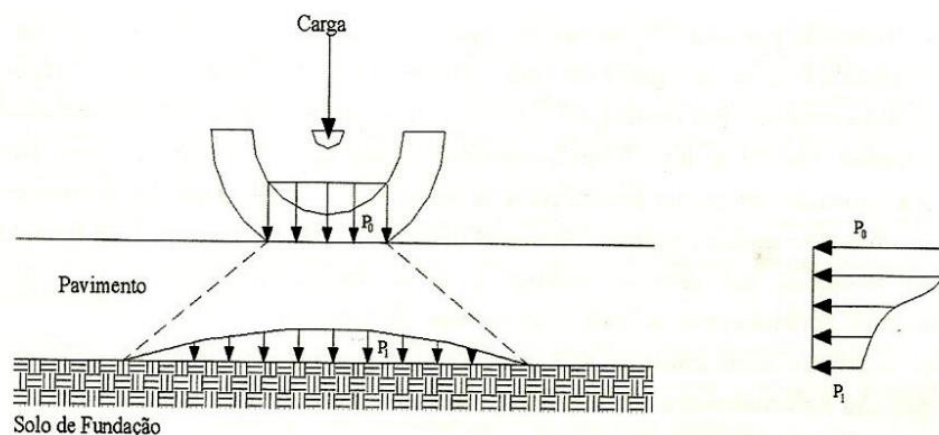
É importante frisar que não se sabe ao certo todos os efeitos promovidos pela utilização deste coproduto como estabilizante a curto e longo prazo. Sendo assim, existe uma grande necessidade de avaliar seu comportamento ao longo do tempo, verificando características como módulo de resiliência, resistência à fadiga, entre outros, a fim de determinar, de forma mais precisa, seu uso como material para pavimentação. Além disso, esta avaliação permitirá, também, a realização do dimensionamento do pavimento de maneira mais adequada por meio de modelos mecanísticos empíricos, principalmente o MeDiNa, já que ainda existem dúvidas sobre o modelo a ser utilizado quando se trata de um solo estabilizado com este material, sendo esta determinação o principal objetivo deste trabalho.

2.2 Métodos de Dimensionamento de Pavimentos

Segundo Franco (2007), a estrutura do pavimento é caracterizada por meio de multicamadas submetidas a um carregamento superficial distribuído em uma área circular, cujas dimensões variam conforme o tipo de veículo que trafega sobre o mesmo (dependem do tipo de pneu, pressão de enchimento e carga exercida pelas

rodas), conforme mostrado na Figura 2.15. Essa estrutura pode ser modelada conforme teorias da elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, desenvolvidas através dos estudos de Boussinesq (1885) e Burmister (1943).

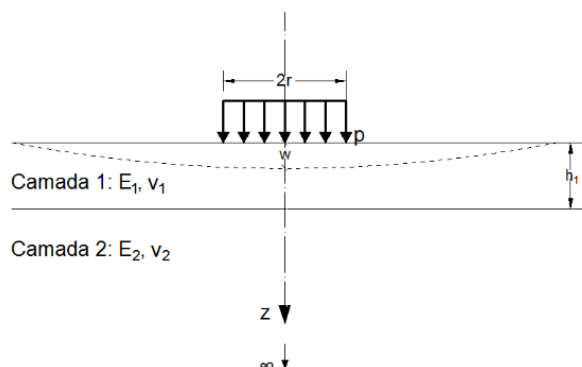
Figura 2.15 – Distribuição de tensões verticais devido à passagem das rodas dos veículos



Fonte: AI, 1981 apud BRANCO, 2006.

Boussinesq (1885) foi o responsável por propor uma das primeiras soluções para estimar a distribuição de tensões, deformações e deslocamentos no pavimento flexível, submetido a um carregamento pontual, por meio de hipóteses de um semiespaço homogêneo, isotrópico e elástico linear. A partir de sua teoria, Donald Burmister, em 1943, apresentou uma série de equações para determinar tensões e deformações em sistemas de duas camadas, conforme mostrado na Figura 2.16, baseando-se em algumas hipóteses, como a de que cada camada é homogênea, isotrópica e elástica linear, perfeitamente aderente e com coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,5, e de que a carga aplicada é estática, uniformemente distribuída em uma área circular e de contato flexível (CORREIA E SILVA, 2014; KAKUDA, 2010).

Figura 2.16 – Carregamento uniformemente distribuído em um sistema de duas camadas



Fonte: Correia e Silva, 2014.

A solução apresentada por Burmister (1943) mostra que os valores de tensão e deslocamento são altamente dependentes da razão entre os módulos elásticos das camadas, sendo assim um fator importante na deformabilidade da estrutura. Para sistemas compostos por duas camadas (revestimento e subleito), percebe-se que quanto maior a razão entre o módulo da primeira camada e o módulo da segunda camada (E_1/E_2), menor é a deflexão (w) no centro da área flexível de carregamento, devido ao menor fator de deflexão (F_w) obtido no ábaco de Burmister, apresentado na Figura 2.17. Essa deflexão pode ser calculada através da Equação 2.1 (CORREIA E SILVA, 2014; KAKUDA, 2010). Pinto (2006) afirma também que as tensões verticais no topo da segunda camada decrescem com o aumento da razão E_1/E_2 , já que, quando a camada superior é bem menos deformável, esta distribui as tensões lateralmente, devido à existência de tensões de tração na camada superior.

$$w = \frac{1,5 p \times r}{E_2} \times F_w \quad (2.1)$$

Onde:

w é a deflexão da superfície no centro do carregamento (m);

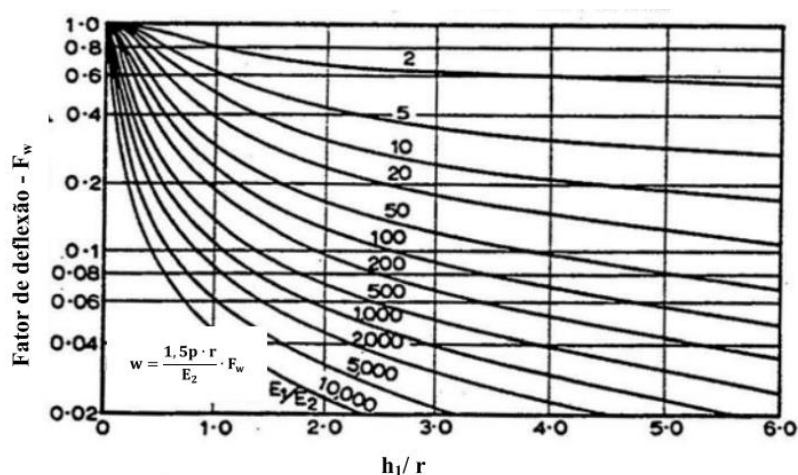
p é a pressão de contato do carregamento circular (MPa);

r é o raio do carregamento (m);

E_2 é o módulo elástico da camada do subleito (MPa);

F_w é o fator de deflexão e é função de r/h_1 e E_1/E_2 .

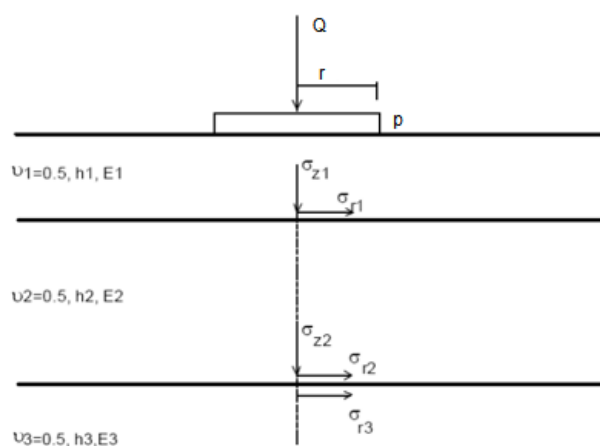
Figura 2.17 – Âbaco de Burmister para cálculo de deflexões em um sistema de duas camadas



Fonte: Correia e Silva, 2014 adaptado de Burmister, 1945 apud Poulos & Davis, 1974.

Em 1945, Burmister estendeu as equações anteriormente propostas a fim de solucionar problemas relacionados à distribuição de tensões em sistemas compostos por três camadas, verificando a existência de tensões verticais (σ_z) e radiais (σ_r) em todas as camadas do sistema, conforme mostrado na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Distribuição de tensões em um sistema de três camadas



Fonte: Adaptado de Burmister, 1945 apud Kakuda, 2006.

As Equações de Burmister (1943 e 1945), soluções para meios estratificados, de duas e três camadas elásticas, representam o primeiro passo para a determinação de tensões, deslocamentos e deformações em problemas de multicamadas (SILVA, 2018). A partir dessas equações, foi possível estabelecer a relação de que a deformação total do pavimento é dada pelo somatório das deformações de cada camada constituinte. Essas equações e teorias de elasticidade em multicamadas

serviram de base para estabelecer os métodos de dimensionamento existentes, bem como prever o desempenho e o comportamento estrutural do pavimento.

Gonçalves (1999) afirma que, para uma avaliação adequada do comportamento estrutural do pavimento é essencial a determinação da variação dos módulos de resiliência de suas camadas tanto em relação à profundidade como no sentido longitudinal da via. Além disso, o comportamento estrutural do pavimento, quando submetido ao carregamento superficial proveniente do tráfego, depende, também, significativamente das características do subleito, já que este recebe uma porcentagem elevada das deflexões que ocorrem na superfície do pavimento. Sendo assim, caso a deflexão na superfície seja critério de projeto, a caracterização adequada do subleito é extremamente necessária, verificando a variação das suas propriedades ao longo do pavimento e ao longo do tempo (variabilidade longitudinal, climática e de sazonalidade).

O comportamento estrutural das camadas granulares (base e sub-base), por sua vez, influencia altamente no desempenho dos pavimentos flexíveis. Como ambas exercem a função de reduzir as tensões oriundas das ações do tráfego e transmiti-las ao subleito, conseqüentemente são responsáveis por minimizar a ocorrência de deformações permanentes, como o ATR.

O desempenho de um pavimento pode ser quantificado a partir de alguns indicadores que usam como princípio tanto a sua condição funcional como o aparecimento de defeitos em sua superfície e de deformações plásticas. Este também pode ser avaliado através da variação do módulo de elasticidade efetivo de uma ou mais camadas com tráfego acumulado. Porém, o desempenho pode ser comprometido por diversos fatores relacionados à carga aplicada, às propriedades dos materiais utilizados, às práticas de manutenção, às condições de drenagem e aos aspectos ambientais. Por outro lado, de acordo com Gonçalves (1999), prever o desempenho de uma seção específica de pavimento é uma tarefa complexa. Ao passo que muitas variáveis influenciam no comportamento dos pavimentos, poucas delas permanecem constantes durante a vida de serviço. Além disso, um tipo de deterioração pode depender de outro, como é o caso do trincamento e dos afundamentos em trilha de roda.

Essa inconstância e dependência natural das variáveis podem tornar o uso de certas simplificações de cálculo inadequadas. Têm-se buscado estabelecer modelos de previsão de desempenho de maneira que se possa prever a ocorrência e a

evolução dos principais mecanismos de deterioração que concorrem para a queda da serventia dos pavimentos ao longo do tempo.

Segundo Franco (2007), o dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico visa assegurar que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não irá causar o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de vida do projeto e, também, garantir que as espessuras das camadas de sua estrutura, bem como suas características, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (acúmulo excessivo de deformação permanente), considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais. Desta forma, no cenário atual destacam-se três métodos de dimensionamento de pavimentos: os empíricos, mecanísticos e teóricos–experimentais.

Vale ressaltar que as consequências do mau desempenho dos pavimentos, bem como de um dimensionamento inadequado, estão presentes nos prejuízos econômicos devido aos altos custos de manutenção corretiva e custos operacionais dos veículos que trafegam sobre a via. Sendo assim, é de extrema importância conseguir prever o desempenho futuro de um pavimento, através de modelos de previsão de desempenho que vêm sendo desenvolvidos e calibrados ao longo dos anos.

2.2.1 Métodos de dimensionamento

a) Métodos empíricos

Segundo NETO (2004), os métodos empíricos são aqueles baseados na experiência acumulada e correlacionam o desempenho do pavimento com algumas propriedades dos materiais já bastante utilizados na construção de rodovias. Utilizam correlações entre parâmetro mensurável, por exemplo a deflexão ou a capacidade de suporte do subleito e a espessura, tendo como base para as análises experiências de desempenho anteriores e avaliações de pistas experimentais (NEPOMUCENO, 2019).

Possuem a vantagem de serem facilmente empregados, pois os ensaios de caracterização são simples e não requerem aparelhagem sofisticada. Entretanto, são bastante limitados pelas condições de contorno, (materiais de construção, clima da região, condições de tráfego, etc.) não permitindo uma generalização adequada para outras regiões, novos materiais e diferentes cargas de tráfego (NETO, 2004).

b) Métodos mecanísticos:

Um método de dimensionamento é dito mecanístico (ou analítico) quando utiliza uma teoria para prever as tensões e deformações provenientes de tráfego e do clima na estrutura do pavimento, e procura compatibilizá-las com as tensões resistentes dos materiais (NETO, 2004).

Por esse tipo de análise, tem-se um panorama de funcionamento da estrutura quando solicitada, possibilitando modificações quanto à natureza dos materiais constituintes, bem como quanto às espessuras das camadas. Ao analisar a estrutura do ponto de vista mecanístico, pode-se alterá-la de modo a proporcionar um desempenho adequado de cada um dos materiais do pavimento, para que o conjunto seja solicitado de forma equilibrada, sem que a solicitação seja demasiada em uma das camadas de modo a levá-la precocemente à ruptura (NETO, 2004).

c) Métodos mecanístico-empíricos:

Adotam as considerações mecanísticas quanto às ferramentas de análise estrutural, quando se calculam relações tensão-deformação, resistência e resiliência, em função do tráfego, do clima e dos critérios de ruptura. São ditos experimentais quando se definem em laboratório as constantes elásticas necessárias ao modelo teórico, as curvas de fadiga e os modelos utilizados para prever as evoluções dos defeitos com a passagem dos veículos no campo (MOTTA, 1991).

2.2.2 Método empírico do DNER

Para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis é disseminado no Brasil o método do DNER. Este se inclui nos métodos empíricos, ou seja, baseia-se na experiência adquirida e faz algumas correlações entre o desempenho obtido do pavimento e certas propriedades dos materiais que integram a estrutura deste pavimento (NETO, 2004).

O método adotado pelo DNER foi proposto pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza na década de 60, com base no critério de ISC, o eixo-padrão de 80 kN e considerando o coeficiente de equivalência estrutural obtido nas pistas da AASHTO (BALBO, 2007; MEDINA, 1997; MOTTA, 1991).

Em 1981, o DNER publicou um novo manual de dimensionamento de pavimentos flexíveis, atualizando alguns pontos do método. Segundo NETO (2004), conclui-se que o método de dimensionamento está dividido em três etapas

fundamentais: a definição dos materiais a serem utilizados, a determinação do tráfego e o dimensionamento propriamente dito. Tais etapas são sucintamente apresentadas abaixo, conforme Souza (1981):

a) Características desejáveis dos materiais:

- Materiais para reforço do subleito: $ISC > ISC \text{ do subleito}$; $Expansão \leq 2\%$;
- Materiais para sub-base: $ISC \geq 20$; $IG = 0$; $Expansão \leq 1\%$;
- Materiais para base: $ISC \geq 80$; $Expansão \leq 0,5\%$; Limite de liquidez ≤ 25 Índice de plasticidade ≤ 6 .

Com isto, a definição dos materiais deve levar em consideração estas e demais observações feitas por Souza (1981), ou seja, respeitar os valores mínimos de algumas características. Isto para que não ocorra a ruptura precoce no pavimento.

b) Determinação do Tráfego

O pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido. O cálculo de N se dá seguindo o roteiro de cálculo descrito pelas Equações 2.2 a 2.8:

1º) Cálculo de V_t :

$$V_m = \frac{V_1 [2 + (P + 1) t/100]}{2} \quad (2.2)$$

Onde:

V_m é o volume médio diário de tráfego, num sentido;

V_1 é o volume médio diário de tráfego no ano de abertura, num sentido;

P é o período em anos;

t é a taxa (%) de crescimento anual do volume de tráfego, em progressão aritmética.

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad (2.3)$$

Admitindo-se uma taxa $t\%$ de crescimento anual em progressão geométrica:

$$Vt = \frac{365 \times V1 \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{\frac{t}{100}} \quad (2.4)$$

Onde:

Vt é o volume total de tráfego, num sentido, durante o período de projeto.

2º) Cálculo de N:

$$N = Vt \times FE \times FC \quad (2.5)$$

$$FE \times FC = FV \quad (2.6)$$

$$N = Vt \times FV \quad (2.7)$$

Onde:

FE é um fator de eixos, isto é, um número que multiplicado pelo número de veículos, dá o número de eixos correspondentes;

FC é um fator de carga, isto é, um número que multiplicado pelo número de eixos que operam, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão;

FV é um fator de veículo, isto é, um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diariamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

Para o cálculo de FR, FC e FV é necessário conhecer a composição de tráfego, pois:

$$FV = \frac{\sum (Pi) \times (FVi)}{100} \quad (2.8)$$

Onde:

Pi são as percentagens individuais de cada categoria de veículo;

FVi são os fatores de veículos individuais de cada categoria.

Ainda é possível levar em consideração influência da variação de umidade dos materiais do pavimento, ao longo das estações do ano, no valor do número N. Para tal, o número N deve ser multiplicado por um coeficiente FR, que na pista experimental da AASHTO, variou de 0,2 (para baixos teores de umidade) a 5,0 (ocasiões de materiais praticamente saturados). O coeficiente final a ser adotado é uma média

ponderada dos diferentes coeficientes sazonais, levando em conta o espaço de tempo em que ocorrem.

No Brasil, como tem sido adotada a embebição dos corpos de prova C.B.R. (amostra saturada), que seria o cenário mais pessimista, como norma geral, fica-se quase sempre do lado de segurança, adotando $FR = 1$

c) Dimensionamento:

Após a definição dos materiais e cálculo do número N, a etapa seguinte é o dimensionamento. Para tanto, faz-se primeiramente necessário a determinação dos coeficientes estruturais de cada camada, que depende das soluções empregadas em cada camada. Os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais construtivos do pavimento estão apresentados no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Coeficientes de equivalência estrutural.

Componente do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência a compressão a 7 dias superior a 45 Kg/cm ²	1,7
Solo cimento com resistência a compressão a 7 dias entre 45 e 28 Kg/cm ²	1,4
Solo cimento com resistência a compressão a 7 dias entre 28 e 21 Kg/cm ²	1,2
Bases de Solo-Cal	1,2

Fonte: DNER 667/22, 1981.

As espessuras a seguir recomendadas, visam, especialmente, as bases de comportamento puramente granular e são ditadas pelo que se tem podido observar, conforme mostrado no Quadro 2.5.

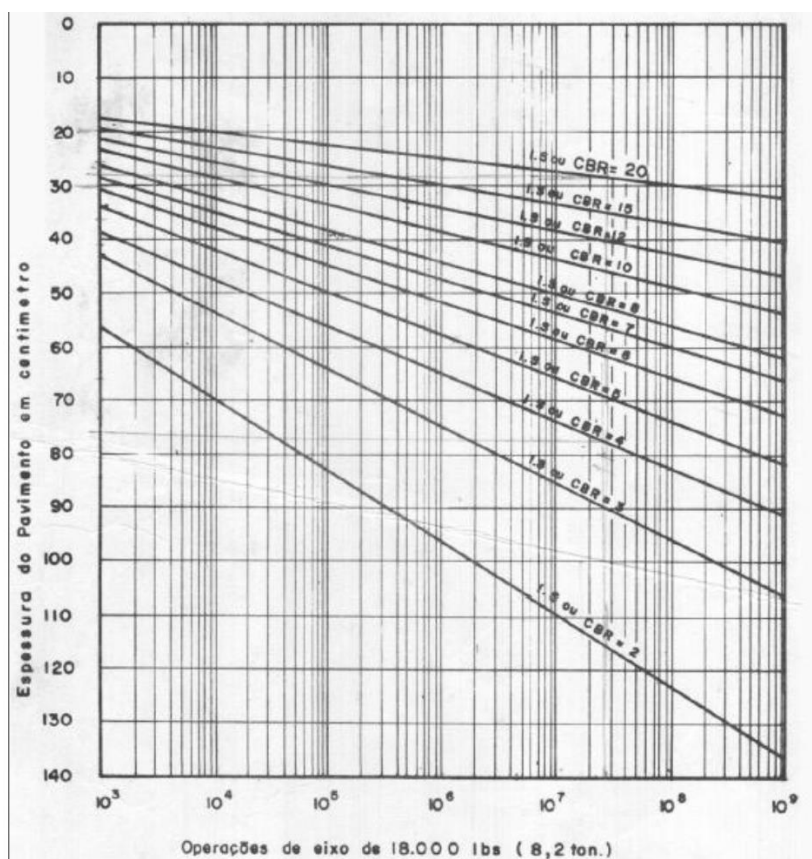
Quadro 2.5 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 \leq N < 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Souza, 1981.

O gráfico constante da Figura 2.19 fornece a espessura total do pavimento em função de N e do ISC. Entrando-se em abscissas, com o valor de N, procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa da capacidade de suporte (ISC) em causa e, procedendo-se horizontalmente, então, encontra-se, em ordenadas, a espessura total do pavimento.

Figura 2.19 – Ábaco de dimensionamento



Fonte: Souza, 1981.

Para a determinação da espessura de cada camada Souza (1981) se utiliza de inequações (2.9, 2.10 e 2.11) que levam em consideração os valores de K dos materiais ponderando, assim, a espessura do pavimento à capacidade estrutural dos materiais:

$$R \times Kr + B \times Kb \geq H20 \quad (2.9)$$

$$R \times Kr + B \times Kb + h20 \times Ks \geq Hn \quad (2.10)$$

$$R \times Kr + B \times Kb + h20 \times Ks + hn \times Kref \geq Hm \quad (2.11)$$

Onde, conforme Figura 2.20:

R é a espessura do revestimento;

B é a espessura da base;

h20 é a espessura da sub-base;

hn é a espessura da camada n;

KR é o coeficiente estrutural do revestimento;

Kb é o coeficiente estrutural da base;

Ks é o coeficiente estrutural da sub-base;

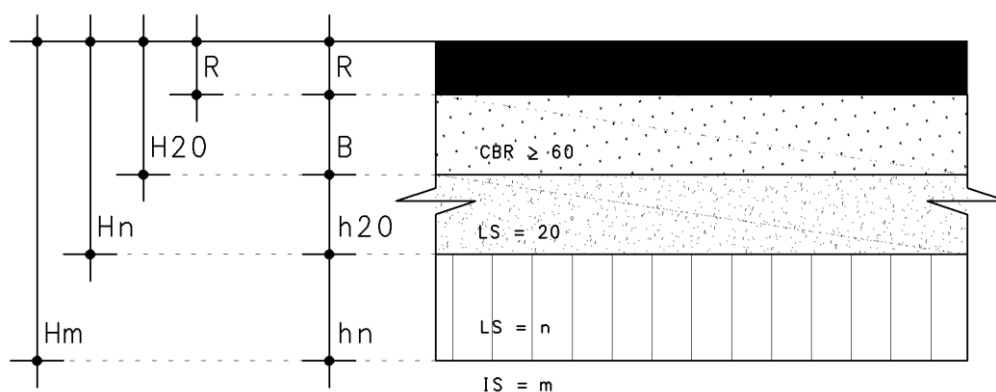
Kref é o coeficiente estrutural da camada n;

H20 é a espessura do pavimento do topo do revestimento até o topo da sub-base;

Hn é a espessura do topo do pavimento até o topo da camada n;

Hm é a espessura do pavimento do topo do revestimento até a camada do subleito.

Figura 2.20 - Espessuras de camada do pavimento



Fonte: Adaptada DNER 667/22, 1981.

2.2.3 Método mecanístico

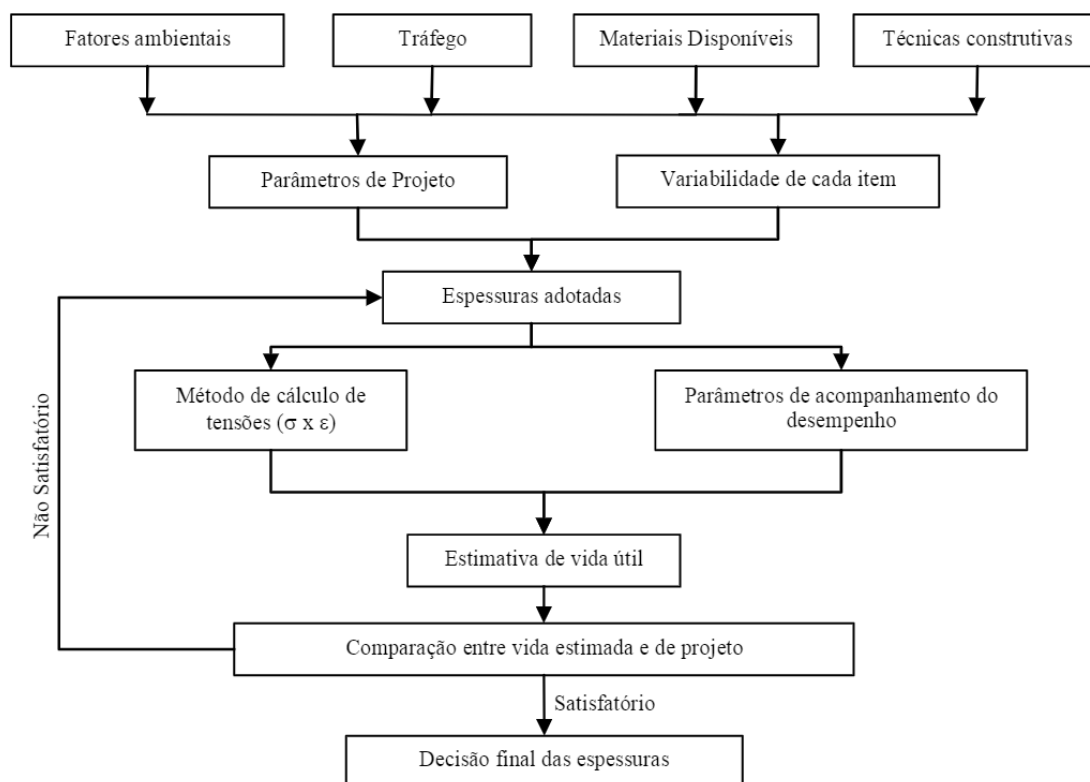
A 1ª Conferência Internacional de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos realizada em 1962, na Universidade de Michigan, é considerada marco do início do desenvolvimento das metodologias de dimensionamento de pavimentos asfálticos, conhecidas como mecanísticas ou mecanicistas. Um método mecanístico de dimensionamento consiste na aplicação dos princípios da Mecânica dos Pavimentos, considerando o pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas, sujeita às cargas do tráfego e do clima (COUTINHO, 2011).

Segundo Franco (2007), o procedimento para dimensionamento mecanístico-empírico consiste basicamente em:

- Reunir os dados referentes aos materiais de pavimentação, ao tráfego e às condições ambientais;
- Correlacionar os dados de resistência dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais e o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento;
- Escolher as espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações considerando as diversas correlações obtidas;
- Relacionar os valores críticos de tensões e deformações com os danos que a repetição das cargas pode causar ao pavimento por meio de modelos de previsão; e
- Verificar se as espessuras escolhidas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

Motta (1991) apresentou em sua tese de doutorado um método mecanístico de dimensionamento de pavimentos flexíveis, consolidando os estudos sobre a Mecânica dos Pavimentos desenvolvidos na COPPE/UFRJ desde os anos 70. A Figura 2.21 apresenta o conceito geral e o fluxograma deste método mecanístico.

Figura 2.21 – Fluxograma de um método mecanístico proposto por MOTTA,1991.



Fonte: Franco, 2007.

No método apresentado por Motta (1991) para dimensionamento de pavimentos flexíveis, a análise mecanística é efetuada utilizando-se um programa computacional, usando um modelo elástico linear para o revestimento asfáltico e elástico não-linear para as camadas subjacentes, verificando-se as tensões e deformações e comparando-as com critérios de aceitação pré-estabelecidos (NETO, 2004).

Métodos mecanísticos serão diferentes entre si por aspectos tais como a técnica utilizada para as análises de tensão-deformação, os critérios de desempenho adotados (parte “empírica”), os fatores campo-laboratório, entre outros (COUTINHO, 2011).

2.2.4 Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa)

Segundo Coutinho (2011), no Brasil os conceitos da Mecânica dos Pavimentos já são conhecidos, estudados e aplicados desde a década de 1970. Ensaio de carga repetida de solos e materiais de pavimentação são realizados desde a mesma época.

Uma primeira proposta de método mecanístico-empírico (ME) de dimensionamento de pavimentos asfálticos foi feita por Motta (1991). Na evolução natural, um método ME automático de dimensionamento foi proposto por Franco (2007), consolidado em uma interface gráfica computacional denominada SisPav.

Em 2013, uma versão atualizada do software de Franco (2007) foi denominada SisPavBR, e através do Termo de Execução Descentralizada celebrado de 2015 a 2018 entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, foi denominado Método de Dimensionamento Nacional. O método recebeu o acrônimo de MeDiNa em homenagem ao professor titular aposentado da COPPE/UFRJ Jacques de MeDiNa (SOUZA JUNIOR, 2018).

O MeDiNa é, dessa forma, uma metodologia de dimensionamento com base mecanicista que possui uma interface amigável computacional. Através do uso de softwares (AEMC, BackMeDiNa e MeDiNa) é possível realizar a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos, por meio de uma rotina de Análise Elásticas de Múltiplas Camadas (AEMC). Esta rotina calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário e aplica modelos de fadiga e deformação permanente para ajustar as espessuras das camadas (FRANCO, 2018).

Os modelos de previsão de defeitos no MeDiNa foram calibrados usando dados de um grande conjunto de pistas experimentais existentes em vários locais do Brasil. Também foram utilizadas informações de outros trechos monitorados da Rede Temática de Asfalto, de várias partes do país. As informações incluídas no conjunto de dados representam uma ampla variedade de condições de campo (tipos de solo de fundação, tráfego e clima), tipos de pavimento, características de projeto e histórico temporal do desempenho do pavimento (NEPOMUCENO, 2019).

Segundo Franco (2018), as hipóteses fundamentais da solução computacional baseiam-se nas mesmas consideradas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, quais sejam:

- Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
- A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;

- As camadas são limitadas na direção horizontal;
- Todas as camadas possuem espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

2.2.4.1 Interface gráfica do método MeDiNa

O método MeDiNa tem sua interface dividida em abas, sendo denominadas: estrutura; modelagem e resultados. A tela inicial do método pode ser visualizada na Figura 2.22, apresentando uma estrutura inicial composta por quatro camadas, incluído o subleito, podendo ser adicionadas ou retiradas camadas da estrutura (são permitidas, no mínimo três e, no máximo, oito camadas, contando com o subleito), bem como alterar o tipo de material que a camada é constituída.

Figura 2.22 - Tela inicial software MeDiNa

MeDiNa - v.1.1.3.0 - set/2019

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Nome do autor ou dos autores do projeto EMPRESA: Nome da empresa projetista

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODOS: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Grasse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Primário

VMD (1º ano): 1370

PV: 1,000

N anual (1º ano): 5,00e+05

% Veículos na faixa de projeto: 100

N Anual da faixa: 5,00e+05

Taxa de crescimento (%): 0,0

Período de projeto (anos): 10

N Total: 5,00e+06

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Franco, 2018.

Na tabela que exibe a estrutura do pavimento são apresentadas informações resumidas das propriedades de cada uma das camadas da estrutura do pavimento, como: material constituinte e o tipo selecionado, espessura, módulo de resiliência (se linear ou sigmoide) e coeficiente de Poisson (FRANCO, 2018).

Antes de preencher os dados do projeto, define-se em qual modo o programa irá tratar os dados. Na versão utilizada apenas dois modos estão disponíveis:

- Pavimento Novo (Nível 1): Modo para elaboração de projetos de pavimentos novos no nível de projeto 1, onde as propriedades das camadas são obtidas por ensaios de laboratório.
- Projeto de Reforço: Modo para elaboração de projeto de reforço, onde as propriedades das camadas existentes são obtidas por meio de retroanálise de bacias deflectométricas.

O modo reforço exige do projetista a entrada dos valores retroanalizados de bacias de campo obtidas com equipamento tipo FWD, pode-se importar as bacias retroanalizadas do BackMeDiNa na opção Importar Retroanálise ou preencher os dados manualmente. Após a importação, o projetista deverá concluir o preenchimento dos dados da camada asfáltica existente, com os dados de percentual de área trincada, IRI, e idade do pavimento, para permitir o programa rodar as análises ou o dimensionamento (SOUZA JUNIOR, 2018).

2.2.4.2 Dados de entrada

A análise de uma estrutura de pavimento ou mesmo o seu dimensionamento requer um conjunto amplo de informações para que os resultados obtidos sejam confiáveis. Sem esse conjunto de informações, completo e preciso, os resultados do programa MeDiNa não devem ser utilizados para elaboração de projetos (FRANCO, 2018).

As informações são necessárias para conhecimento do subleito, de todos os materiais naturais disponíveis para utilização em bases, sub-bases e reforço de subleito, assim como os materiais a serem produzidos em usinas ou centrais, sempre obedecendo aos parâmetros mínimos exigidos pelo programa. Outra informação chave para o correto funcionamento do programa é a definição do Número Equivalente de Eixos, o número N (FRANCO, 2018).

O programa que aplica o método apresenta em seu sistema um grande banco de dados que abrange diversos tipos de materiais a serem utilizados nas camadas do pavimento, bem como suas propriedades principais. Porém, existe a possibilidade de ser adicionado um novo material cujas propriedades serão definidas pelo próprio usuário. Para isso, deverá ser utilizada a opção “projeto” conforme indicado na Figura 2.23. A seguir, serão apresentados os dados de entrada principais que deverão ser informados para uma análise completa da estrutura.

Figura 2.23 – Exemplo de criação de um novo material e suas propriedades no MeDiNa

Propriedades da Camada 1

BASE DE DADOS

Projeto

Classe 1

Classe 2

Classe 3

Classe 4

RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba

RJ CAP 30/45 #19,1mm Sepetiba

RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba

CONCRETO ASFÁLTICO

Material: Projeto

Parâmetros

Espessura (cm): 0,0

Coeficiente de Poisson: 0,00

Contato: Não Aderido

Módulo (MPa)

Modelo Constituinte: Resiliente Linear

Módulo (MPa): 0

Características

Tipo de CAP: ...

Massa específica (g/cm³): ...

Resistência à tração (MPa): ...

Teor de asfalto (%): ...

Volume de vazios (%): ...

Faixa Granulométrica: ...

Abrasão Los Angeles (%): ...

Norma ou Especificação: DNIT ES 31

Curva de Fadiga

Modelo: k1 (et * k2)

Coeficiente de Regressão (k1): ...

Coeficiente de Regressão (k2): ...

Classe de Fadiga: 0

FFM (100µ a 250µ): 0,00

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Fonte: Franco, 2018.

a) Espessura das camadas

O MeDiNa pode ser utilizado tanto para realizar o dimensionamento do pavimento quanto para verificar a estrutura projetada. Sendo assim, ao fornecer a espessura da camada como dado de entrada é possível realizar o dimensionamento da estrutura, onde o programa otimiza a espessura previamente inserida a partir dos critérios de área trincada e deformação permanente. Por outro lado, é possível verificar as dimensões da estrutura proposta, observando se as espessuras inseridas são adequadas para o tipo de projeto (FRANCO,2018).

Vale ressaltar que escolha adequada de espessura para cada camada está relacionada ao valor que corresponde na maior economia para atender ao projeto em questão.

b) Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson, propriedade dos materiais cujo conhecimento é de extrema importância para análise de sistemas de camadas, é dado pelo inverso da relação entre a deformação vertical imposta ao material pela deformação horizontal sofrida no corpo de prova, durante um ensaio de compressão uniaxial. Apesar de sua grande relevância, não é muito comum a realização de ensaio para obtenção desse parâmetro (BALBO, 2007).

Sendo assim, estudos apontam faixas de valores recomendados para o coeficiente de Poisson segundo material a ser utilizado nas camadas de pavimentação, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores típicos de coeficientes de Poisson a serem adotados conforme o material utilizado

Material	Intervalos de valores do Coeficiente de Poisson
Concreto de cimento Portland	0,15 – 0,20
Concreto asfáltico	0,32 – 0,38
BGS, MH, BC	0,35 – 0,40
BGTC, CCR	0,15 – 0,20
SC, SMC	0,20 – 0,30
SCA	0,25 – 0,30
Solos arenosos	0,30 – 0,35
Areias compactadas	0,35 – 0,40
Solos finos	0,40 – 0,45

Fonte: Balbo, 2007.

c) Módulo de resiliência

A deformação elástica ou recuperável das camadas de pavimentos submetidos a carregamentos repetidos é chamada de deformação resiliente. Para se efetuar a análise de deformabilidade de uma estrutura de pavimento, é necessário conhecer as

relações tensão-deformação ou os módulos de resiliência dos materiais que comporão as camadas (NETO, 2004).

Bernucci (2008) define o módulo de resiliência como o módulo elástico obtido em ensaio triaxial de carga repetida, representado pela Figura 2.24, segundo a Equação 2.12:

$$MR = \sigma_d / \varepsilon_r, \quad (2.12)$$

Onde:

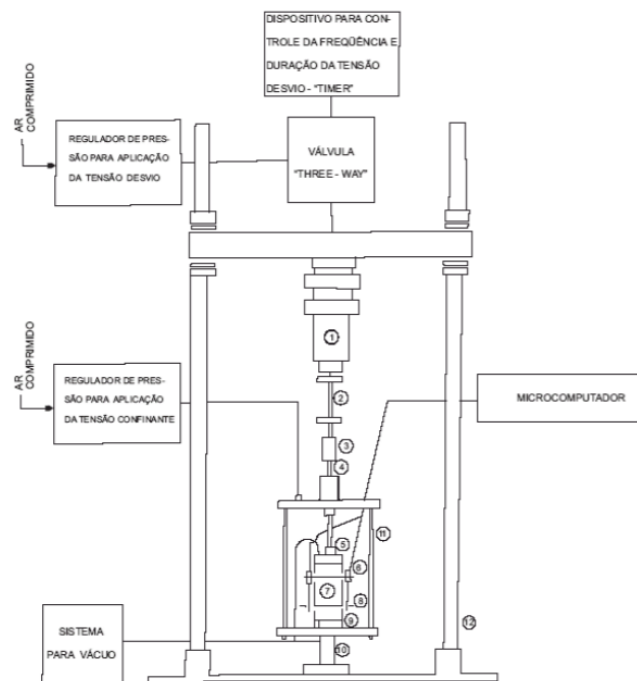
$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial em MPa;

σ_1 é a tensão principal maior em MPa;

σ_3 é a tensão principal menor ou tensão de confinamento em MPa;

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

Figura 2.24 – Ensaio Triaxial de carga repetida



Fonte: DNIT, 2010.

Ferreira (2002) ressalta que as relações entre as tensões e deformações que ocorrem nas camadas do pavimento se diferenciam de acordo com os materiais utilizados em sua composição. Sendo assim, enquanto os sólidos elásticos tendem a uma relação tensão-deformação praticamente linear, os materiais de pavimentação

não tratados quimicamente apresentam uma relação não-linear, com grande dependência em relação ao estado de tensões atuante. Devido a essas diferenças, foram criados vários modelos que expressam MR em função das tensões aplicadas aos materiais, especialmente a tensão desvio (σ_d) e a tensão confinante (σ_3).

Esses modelos matemáticos foram pioneiramente propostos por Hicks (1970) e Barksdale e Hicks (1973) e separados em três equações principais, sendo uma para a utilização em solos de comportamento granular (2.13), e as outras duas para solos de comportamento coesivo (2.14; 2.15).

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (2.13)$$

$$MR = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d), \text{ para } \sigma_d < k_1 \quad (2.14)$$

$$MR = k_2 + k_4 (\sigma_d - k_1), \text{ para } \sigma_d > k_1; \quad (2.15)$$

Onde:

k_1 , k_2 e k_3 são coeficientes de regressão, dados de entrada que também devem ser fornecidos para dimensionamento e/ou verificação da estrutura do pavimento, obtidos através do ensaio de fadiga.

Em 1980, Svenson propôs uma simplificação para o comportamento dos materiais coesivos, representados pela Equação 2.16. Já em 1996, Macêdo foi o responsável por descrever o comportamento dos solos e materiais granulares de base e sub-base através da Equação 2.17. Por fim, em 2004, Macêdo propôs que os solos cimentados ou naturalmente ou artificialmente poderiam ter o seu módulo de resiliência representados por um valor constante, elástico linear, ou seja, $MR = E$.

$$MR = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad (2.16)$$

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2.17)$$

Vale ressaltar que os módulos de resiliência dependem de diversos fatores, como densidade e umidade dos solos, o modo como se arrumam e aglomeram as suas partículas e quantidade de água usada na compactação (MEDINA E MOTTA, 2005).

Segundo Gonçalves (1999), os módulos resilientes dos materiais das camadas granulares e do solo de subleito são parâmetros fundamentais para avaliação do

comportamento estrutural de pavimentos flexíveis. No entanto, para uma caracterização mais adequada desse comportamento, é essencial que se determine a variação da magnitude dos valores dos módulos dessas camadas tanto em relação à profundidade, como no sentido longitudinal da via (variabilidade construtiva), considerando, assim, a não linearidade dos materiais.

A determinação dos módulos de resiliência das camadas do pavimento pode ser efetuada através dos seguintes métodos:

- Ensaios de módulo de resiliência realizados em laboratório, como o triaxial de carga repetida, descrito pela norma DNIT 134/2010 - ME;
- Retroanálise a partir de levantamentos deflectométricos efetuados com o equipamento FWD;
- Estimado a partir de outras propriedades dos materiais componentes das camadas, como granulometria, teor de argila, entre outros;
- Atribuídos com base na experiência adquirida na utilização de solos ou materiais granulares similares.

Vale ressaltar que o módulo de resiliência, bem como os coeficientes de regressão, a serem inseridos como dados de entrada dependem do modelo implementado pelo método de acordo com o tipo de material. Sendo assim, os módulos podem variar entre linear, não-linear e sigmoidal, conforme os modelos a serem apresentados no item 2.2.4.3.

d) Dados de tráfego

Os dados de tráfego a serem inseridos correspondem ao tipo de via onde o pavimento será construído, o volume médio diário de veículos em um período de um ano (VMD), fator de veículos, número N (anual e para o período de projeto), entre outros dados conforme mostra a Figura 2.25.

Figura 2.25 – Dados de Tráfego a serem inseridos no MeDiNa

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1,000
N anual (1º ano):	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06
EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	

Fonte: Franco, 2018.

Segundo Franco (2018), o programa pode ser utilizado para calcular automaticamente o número equivalente de passagens do eixo padrão rodoviário (número N total). Este valor pode ser obtido a partir da inserção do volume médio diário (VMD), em conjunto com o fator de veículo (FV), ambos resultantes de contagens de tráfego. A partir destes dois valores, o método MeDiNa calcula o número anual equivalente de eixos (N anual) automaticamente. Em contrapartida, caso o projetista já tenha o N anual, ele pode entrar direto com o valor na caixa correspondente, acarretando os demais valores sendo calculados por consequência.

Franco (2018) também afirma que é de extrema importância informar o tipo de via a ser analisado ou dimensionado, já que para cada tipo de via incide um critério diferente de parada de dimensionamento, bem como diferentes graus de confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa. Os diferentes tipos de vias foram definidos em conformidade com a hierarquia dos sistemas funcionais publicada pelo DNIT, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa

TIPO DE VIA	CONFIABILIDADE	ÁREA TRINCADA	DEF. PERMANENTE
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

Fonte: Franco, 2018.

2.2.4.3 Modelos implementados

A categoria em que o material melhor se enquadra irá definir como o método MeDiNa irá realizar as análises ou o dimensionamento. As opções disponíveis no são as mostradas na Figura 2.26:

Figura 2.26 - Categorias de materiais constituintes das camadas.

CAMADA	MATERIAL	TIPO
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Nível 4
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Gr
3	CONCRETO ASFÁLTICO CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CONCRETO COMPACTADO A ROLO (CCR) BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) SOLO CIMENTO MATERIAL GRANULAR SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Ar Solo Sil

Fonte: Franco, 2018.

Essas categorias de materiais foram agrupadas conforme as considerações assumidas para módulo de resiliência, deformação permanente e dano por fadiga, resultando em diferentes modelos de cálculo implementados.

Em relação ao comportamento do módulo de resiliência, por exemplo observamos três grupos: Materiais granulares e solos com comportamento elástico linear ou não linear; Misturas asfálticas com comportamento elástico linear; Materiais estabilizados com comportamento sigmoidal.

Tais modelos são a seguir apresentados segundo MeDiNa (2020):

a) Materiais granulares e solos

Os materiais granulares, solos finos, siltosos ou argilosos são representados por seus parâmetros de Módulo de Resiliência e Coeficiente de Poisson e Deformação Permanente.

Estes materiais não são avaliados quanto ao dano por fadiga. O comportamento resiliente dos materiais granulares, solos finos, siltosos ou argilosos é dependente da massa específica, da umidade ou sucção, estrutura do solo e do estado de tensões ao qual o material está submetido. A sua caracterização em laboratório deve garantir as mesmas condições de campo.

Tais materiais apresentam frequentemente uma relação tensão versus deformação elástica não linear. Para estes materiais, o MeDiNa permite caracterizar o módulo de Resiliência como elástico linear ou elástico não linear.

Além do Módulo Constante, que caracteriza o comportamento elástico linear, o projetista pode optar por caracterizar o material pelo modelo constitutivo que melhor representar o comportamento do material. Os modelos constitutivos foram reunidos em apenas uma expressão matemática, a Equação 2.18, e os parâmetros de regressão mostrados no Quadro 2.6.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \times \theta^{k_4} \quad (2.18)$$

Onde:

MR é módulo de resiliência em MPa;

k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são os parâmetros obtidos experimentalmente a partir da regressão estatística dos resultados dos ensaios;

σ_3 é a tensão confinante em MPa;

σ_d é a tensão desvio em Mpa;

θ é o invariante de tensões ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$).

Quadro 2.6 – Consideração dos parâmetros experimentais.

Comportamento	Parâmetros
Dependente da tensão confinante	$k_3, k_4 = 0$
Dependente da tensão desvio	$k_2, k_4 = 0$
Dependente do invariante de tensões	$k_2, k_3 = 0$
Modulo composto	$k_4 = 0$

Fonte: Franco, 2018

Quanto à deformação permanente, os materiais são avaliados conforme a modelagem proposta por Guimarães (2009), com quatro constantes obtidas em ensaios de laboratório e descrita pela Equação 2.19.

$$\varepsilon_p^{esp} = \Psi_1 (\sigma_3)^{\Psi_2} (\sigma_d)^{\Psi_3} (N)^{\Psi_4} \quad (2.19)$$

Onde:

ε_p é a deformação permanente específica (%);

$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4$ são os parâmetros obtidos experimentalmente a partir da regressão estatística dos resultados dos ensaios;

σ_3 é a tensão confinante em kgf/cm²;

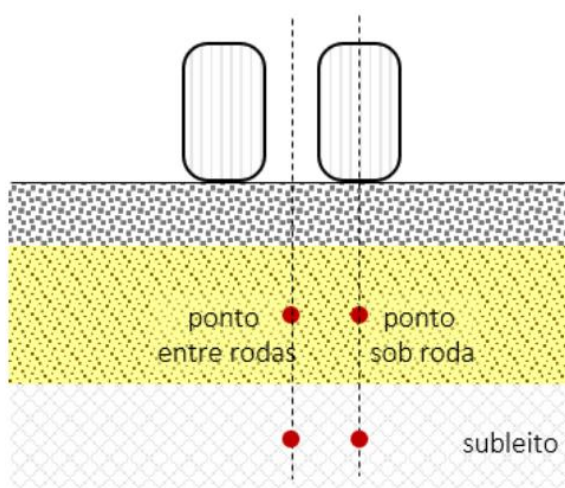
σ_d é a tensão desvio em kgf/cm²;

N é o número de ciclos de aplicação de carga.

Para o cálculo da deformação permanente, o programa MeDiNa utiliza o estado de tensões calculado nos pontos sob a roda e entre as rodas, no centro das camadas, conforme representado na Figura 2.27.

A deformação permanente calculada para cada camada é somada para compor a deformação permanente total utilizada no dimensionamento. Além disso, o programa emite um Alerta quando a deformação permanente de cada camada individual ultrapassar 5% de sua espessura.

Figura 2.27 - Posição dos pontos utilizados para cálculo da deformação permanente.



Fonte: Franco, 2018.

b) Misturas asfálticas

O módulo de resiliência das camadas asfálticas é considerado como Elástico Linear e deve ser obtido por meio de ensaio por compressão direta. As características da mistura como faixa granulométrica, teor de CAP, volume de vazios, abrasão Los Angeles, são lançadas pelo projetista de forma que elas possam ser controladas ao longo da sua execução no campo.

A curva de fadiga das misturas asfálticas é obtida a partir de ensaios de carregamento repetido, à tensão constante, usando o ensaio de compressão diametral de tração indireta. O programa permite apenas as relações do número de ciclos com a deformação específica resiliente de tração, conforme a Equação 2.20.

$$N = k_1 (\varepsilon_t)^{k_2} \quad (2.20)$$

Onde:

N é o número de ciclos;

ε_t é deformação específica resiliente de tração (adimensional);

k_1 e k_2 são os parâmetros obtidos experimentalmente a partir da regressão estatística dos resultados dos ensaios.

A deformação permanente da camada asfáltica no programa MeDiNa é desconsiderada para o cálculo do afundamento de trilha de roda. Mas para que isso

seja efetivamente válido, a mistura asfáltica deve respeitar o critério do ensaio para obtenção da classe de desempenho do Flow Number.

Os limites das classes de desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente estão apresentados no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 – Classes de desempenho das misturas asfálticas.

Classe	Número de Fluxo (FN)	Número N recomendado	
		Condições normais	Condições severas
1	FN ≥ 100 ciclos	$N < 1 \times 10^6$	Não recomendado
2	100 ciclos ≤ FN < 300 ciclos	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$	$N < 1 \times 10^6$
3	300 ciclos ≤ FN < 750 ciclos	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$
4	750 ciclos ≤ FN < 2000 ciclos	$N \geq 1 \times 10^8$	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$
5	FN ≥ 2000 ciclos	-	$N \geq 1 \times 10^8$

Fonte: Franco, 2018.

c) Materiais estabilizados

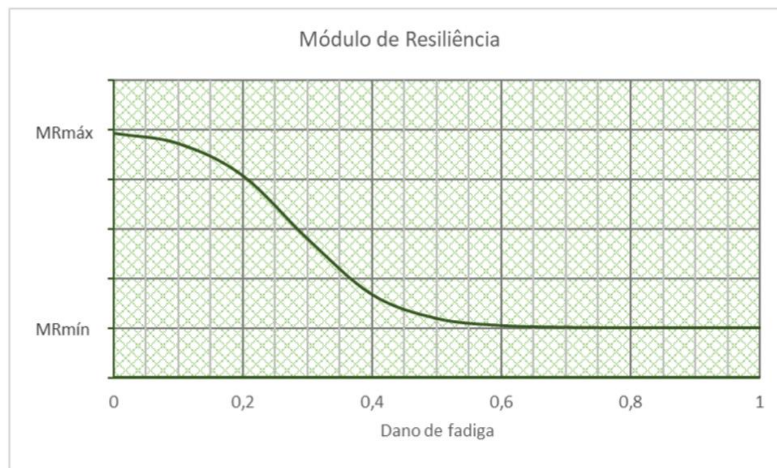
Os materiais estabilizados são tratados no programa MeDiNa como um material que possui propriedades elásticas variável ao longo da vida de serviço. Por isso a análise é realizada mensalmente, considerando um Módulo de Resiliência que decai a cada mês, com comportamento do tipo sigmoidal, variando entre dois limites: O Limite Superior representa a camada nova, que ainda não sofreu nenhum dano de fadiga; e o Limite Inferior que é quando a camada atingiu sua vida de fadiga e está totalmente trincada, com comportamento próximo a de uma camada granular.

O módulo inicial ou o limite superior deve ser obtido por meio do ensaio descrito conforme DNIT 181/2018 - ME. O módulo final ou o limite Inferior deve ser inserido pelo projetista. Recomenda-se, por segurança, um valor de módulo de resiliência semelhante ao material sem o estabilizante.

Assim, o módulo de resiliência das camadas com materiais estabilizados, no caso a brita graduada tratada com cimento, o concreto compactado a rolo e o solo cimento, diminui com o acúmulo e aumento do dano de fadiga, e a representação matemática utilizada no programa é por meio da função sigmoidal ilustrada na Equação 3.21 e no Gráfico 2.1.

$$MR = MR_{\min} + \frac{MR_{\max} - MR_{\min}}{1 + e^{-4 + 14Di}} \quad (2.21)$$

Gráfico 2.1 – Comportamento sigmoidal do módulo de resiliência para materiais estabilizados.



Fonte: Franco, 2018.

O modelo de dano por fadiga considerado no programa MeDiNa é obtido por meio de ensaio de flexão em vigotas com base na relação (%RF) entre a tensão de tração na fibra inferior da camada e a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias. O modelo é representado pela Equação 2.22.

$$N_{fad} = 10^{(k1+k2 \times \%RF)} \quad (2.22)$$

Onde:

N_{fad} é o número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

%RF é a relação entre $st/fctm$;

st é a tensão de tração na fibra inferior da camada;

$fctm$ é a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias;

$k1$ e $k2$ são os parâmetros obtidos experimentalmente a partir da regressão estatística dos resultados dos ensaios.

Além dos modelos de fadiga, o programa MeDiNa faz duas checagens para aprovar a utilização das camadas cimentadas. A primeira é a checagem se o dano de fadiga for muito elevado entre dois períodos de análise consecutivos. Quando o Módulo decaí mais que 25% do valor em apenas um período, o programa, quando analisa o pavimento, emite um Alerta informando que o Módulo decaiu rapidamente. Quando dimensiona, ele aumenta a espessura da camada marcada até o critério ser atendido. Caso não consiga, o mesmo Alerta da análise é emitido.

A segunda checagem é feita a partir da deflexão da camada que apoia a camada cimentada. Nesse caso, quando a camada possuir uma deflexão obtida por fwd teórica superior a 70 (0,01mm), o programa também emitirá um Alerta informando que a estrutura precisa ser revista.

Para efeito de cálculo, o MeDiNa desconsidera a deformação permanente de camadas estabilizadas, por entender que estas camadas, quando bem construídas e mantidas, não contribuem de forma efetiva para a trilha de roda total da estrutura do pavimento.

3 METODOLOGIA DO ESTUDO

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram definidas três etapas metodológicas distintas e complementares (Figura 3.1):

- Etapa 01 (pesquisa descritiva): Análise de dados existentes de levantamentos em campo de um trecho experimental da BR-101-ES estudado pelo grupo do LABGEO;
- Etapa 02 (pesquisa exploratória): Caracterização em laboratório do módulo de resiliência do solo estabilizado com 20% de escória KR;
- Etapa 03 (pesquisa explicativa): Simulações computacionais utilizando o MeDiNa para comparação de desempenho do trecho e previsões.

Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Autoral, 2021.

3.1 Etapa 1: Trecho Experimental

Como etapa inicial deste projeto de graduação, foram coletados dados de pistas de um trecho experimental que foram submetidas a carregamentos acelerados com uso de simulador de tráfego HVS. Foram aplicadas diferentes soluções para as camadas de base e sub-base nas pistas avaliadas, incluindo a solução de solo-KR. O trecho teve sua construção iniciada no período de novembro a dezembro do ano de 2017, e foi parte de um projeto de pesquisa RDT em parceria entre a Universidade Federal do Espírito Santo (com pesquisadores do Laboratório de Geotecnia e

Pavimentação do Centro Tecnológico) e a ECO101 CONCESSIONÁRIA DE RODOVIAS S.A. Este trecho está situado entre os Kms 362 e 363 da Rodovia BR-101/ES, no município de Anchieta/ES, conforme mostrado na Figura 3.2.

Este projeto resultou em duas dissertações de mestrado (FURIERI, 2019 e NEPOMUCENO, 2019) bem como diversos trabalhos de conclusão de curso.

Segundo o site Climate-Data², o trecho se localiza em uma região que apresenta clima litorâneo úmido, cujas médias de temperatura dos meses mais quentes e mais frios são de 31°C e 18°C, respectivamente. Com relação ao subleito existente nessa localidade, ensaios laboratoriais realizados pela equipe do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES mostraram que este apresenta Índice de Suporte Califórnia (ISC) superior a 10%.

Figura 3.2 – Mapa de localização do trecho experimental



Fonte: ANTT, 2019.

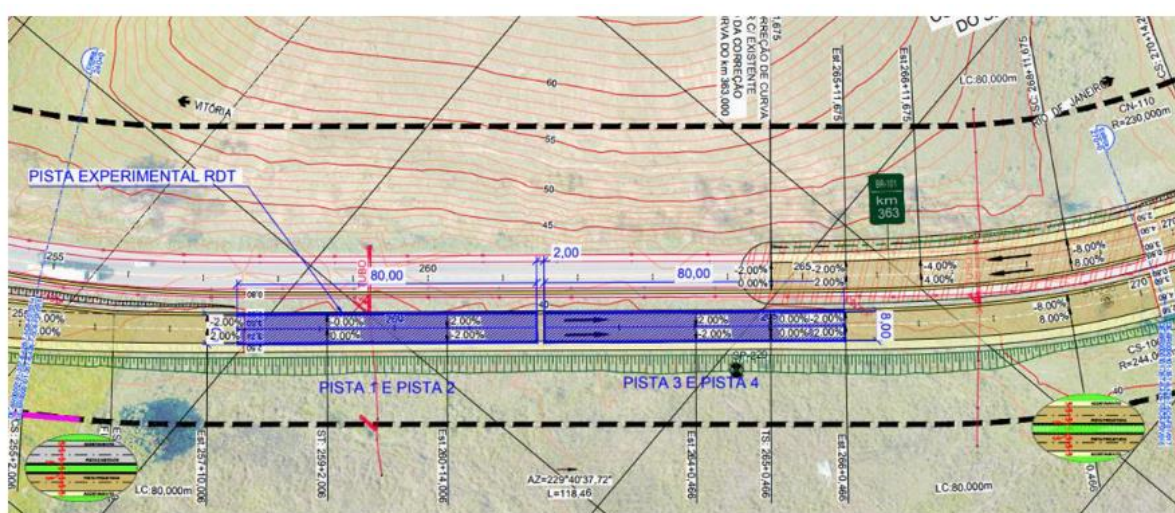
O dimensionamento do pavimento do trecho experimental foi realizado através do método empírico do DNER e executado pela empresa RoadRunner Engenharia,

² Disponível em Climate-data.org.

considerando um número N AASHTO de projeto de $2,32 \times 10^7$ e N USACE de $5,74 \times 10^7$, para um período de projeto de 10 anos.

O trecho experimental foi dividido em quatro pistas utilizadas para condução de ensaios de campo, com comprimento de oitenta metros (80,00m) e largura de quatro metros (4,00m) cada, conforme mostrado na Figura 3.3, sendo apenas a Pista 01 o objeto de estudo deste trabalho. As espessuras determinadas pelo dimensionamento empregadas na execução das quatro pistas experimentais são mostradas na Tabela 3.1.

Figura 3.3 – Projeto Geométrico das quatro pistas que compõem o trecho experimental



Fonte: ANTT, 2019.

Tabela 3.1 – Espessura das camadas das pistas experimentais

Camada	Pista 01	Pista 02	Pista 03	Pista 04
Revestimento	9cm CBUQ (CAP Borracha)	9cm CBUQ (CAP Borracha)	9cm CBUQ (CAP Borracha)	9cm CBUQ (CAP Borracha)
Base	20 cm de SMC com 3%	20 cm de SMC* com 3%	18 cm de BGTC + 11cm de BGS	20 cm de BS PLUS* 1:1500+ Cal 3%
Sub-base	20 cm de Solo com 20% KR	20 cm de SMC* com 3%	10 cm BGS	20 cm de BS PLUS* 1:1000 + Sulfato de Alumínio 1:5000
Subleito	CBR > 10%	CBR > 10%	CBR > 10%	CBR > 10%

*SMC = solo melhorado com cimento; BS PLUS – aditivo químico comercial

Fonte: ANTT, 2019.

3.1.1 Avaliação em campo do trecho experimental

Para realizar as simulações de passagem das rodas dos veículos sobre o pavimento do trecho experimental foi utilizado um simulador de tráfego móvel (modelo HVS), cujas características estão mostradas no Quadro 3.1. Os pneus a serem utilizados podem ser do tipo 900 x 20, 1.000 x 20 ou super single. A Figura 3.4 mostra o equipamento simulador que será utilizado para avaliação da estrutura analisada no estudo, bem como alguns detalhes internos, como a aplicação da carga na pista por uma unidade hidráulica.

Quadro 3.1 – Características do Simulador de Tráfego Móvel (HVS)

Dados	Unidade	Valor
Comprimento Total	m	19,00
Largura Total	m	3,00
Altura	m	4,50
Peso Total	t	50,00
Velocidade	Km/h	8,00
Comprimento de simulação máximo	m	10,00
Comprimento de simulação útil	m	6,00
Largura de simulação máxima	m	1,00
Ciclos (sentido único)	Ciclos/hora	350
Ciclos (sentidos opostos)	Ciclos/hora	700
Carga máxima aplicada (semi - eixo)	tf	9,00

Fonte: Adaptado de ANTT, 2019.

Figura 3.4 – Simulador HVS utilizado no estudo



Fonte: ANTT, 2019.

O Quadro 3.2 resume as características que foram adotadas para determinar o período necessário de testes com o HVS para cada pista experimental, de forma a simular os números de tráfego NUSACE e NASSHTO de projeto. Os resultados obtidos indicaram o tempo de 2,8 meses (85 dias), a partir de um número total de passadas do simulador, em cada pista experimental, de aproximadamente 1.000.000 de ciclos, simulando, assim, o volume de tráfego para um projeto de 10 anos. Este número total de ciclos foi determinado considerando o número de operações de um eixo rodoviário normalizado, N , de $5,7 \times 10^7$, dividido por um fator de carga determinado de acordo com o modelo USACE de 62 (considerando 16tf por eixo).

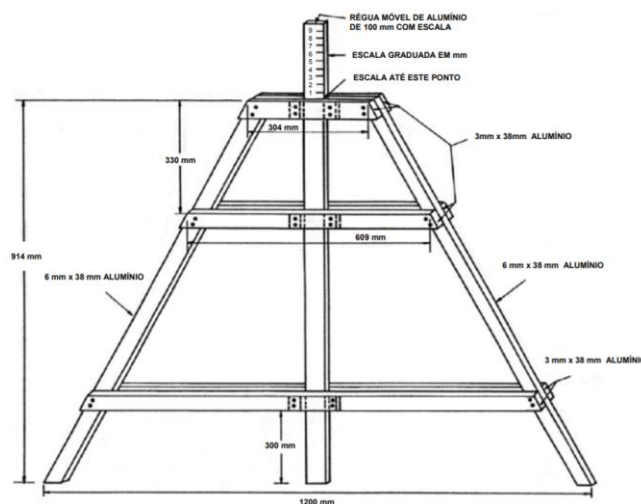
Quadro 3.2 – Características adotadas no simulador

Características	Unidade	Valor Adotado
Carga no semi-eixo	tf	8,20
Pressão nos pneus	psi	120
Semi-ciclos por horas	-	540
Deslocamento lateral transversal	m	1,00
Tempo de operação	h/dia	20
Dias de operação	dias/mês	30
Esforço de tração na camada de CAUQ	Kgf/cm ²	11,00
Modo de operação	-	Bidirecional

Fonte: Adaptado de ANTT, 2019.

Para o acompanhamento da evolução das deformações permanentes do pavimento foi utilizada uma treliça metálica, equipamento que permite a determinação do afundamento de trilha de roda das seções analisadas. O equipamento apresentado na Figura 3.5 possui 1,20m de comprimento na base e é dotado de régua móvel instalada em seu ponto médio para medir, em milímetros, as flechas da trilha de roda.

Figura 3.5 – Esquema de treliça metálica para medição de ATR.



Fonte: DNIT, 2013.

Já para a análise da evolução de trincas por fadiga na superfície do pavimento foi efetuada inspeção visual, realizada em conjunto com as medições deflectométricas. No caso de constatação, as trincas que surgiram na superfície foram demarcadas com tinta de diferentes cores em cada semana e também desenhadas em papel milimetrado, com o auxílio de um gabarito em estrutura metálica de 1,0 x 1,0m (Figura 3.6), sobre o revestimento trincado. Posteriormente, as trincas também foram repassadas para via digital, auxiliando na representação da evolução das trincas. Entretanto, não foram observadas trincas para pista 01.

Figura 3.6 – Gabarito utilizado para marcação das trincas.



Fonte: NEPOMUCENO, 2019.

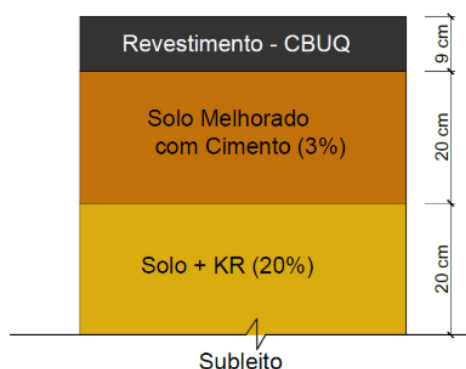
3.1.2 Detalhamento Pista 01

A estrutura do pavimento da Pista 01, objeto de estudo desse trabalho, é constituída pelas seguintes camadas:

- Camada de sub-base de 20 cm de espessura composta com solo da área de empréstimo localizada no Km 368 da BR-101 (solo S1) misturado com escória KR com proporção de 20%;
- Camada de base de 20 cm de espessura de solo melhorado com cimento (SMC) composta de solo da jazida do Km 373 da BR-101 (solo S2) melhorado com 3% de cimento Portland do tipo CPII fornecido pela Holcim;
- A camada de revestimento é composta por concreto asfáltico modificado com borracha com 9 cm de espessura.

A Figura 3.7 ilustra as espessuras e materiais a serem empregados nas camadas da Pista 01.

Figura 3.7 – Estrutura do pavimento da Pista 01



Fonte: Nepomuceno, 2019.

O processo de mistura de solo com KR e solo com cimento ocorreu de maneira convencional, onde o aglomerante é lançado sobre o solo já depositado na pista, na umidade correta. Posteriormente, a mistura é homogeneizada em campo com auxílio de máquina recicladora modelo Wirtgen W2500, conforme mostrado na Figura 3.8.

A execução do revestimento de concreto asfáltico modificado com borracha foi feita após a finalização da pintura de ligação, através do uso de uma vibroacabadora com auxílio de rolo compactador de pneus e um rolo liso.

Figura 3.8 – Máquina recicladora utilizada no espalhamento e homogeneização das misturas de solo com KR e solo com cimento



Fonte: ANTT, 2019.

3.1.2.1 Características das misturas.

Como apresentado na Figura 3.7, a solução para as camadas da pista 01 previu misturas de SMC na base e solo-KR na sub-base. Para a mistura com KR foi utilizado o solo S1, que é considerado como um solo argiloso laterítico, altamente plástico e com grande variação de volume, ou seja, sem características técnicas adequadas para ser utilizado sozinho em obras de pavimentação. Já para a mistura de solo com cimento foi utilizado o solo S2, que é considerado arenoso laterítico com presença de pedregulhos e argila, bem graduado e de média plasticidade, possuindo características técnicas de excelente qualidade para utilização em obras de pavimentação. A Tabela 3.2 reúne as principais características destes materiais.

Tabela 3.2 – Características físicas do solo e misturas com solo.

	S1	S1+20%KR	S2+3%Cimento
	(Solo in natura)	(Solo-KR)	(SMC)
Massa específica real dos grãos (g/cm³)	2,65	2,74	2,01
Limite de liquidez (%)	49%	42,1%	-
Limite de plasticidade (%)	24,8%	29,8%	-
Índice de plasticidade (%)	24,2%	12,3%	-

Fonte: ANTT, 2019.

Para a caracterização mecânica das misturas de solos foram realizados ensaios de compactação, expansão, ISC e módulo de resiliência (MR). Os resultados dos ensaios estão reunidos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de compactação, expansão e ISC.

	Energia	S1 (Solo in natura)	S1+20%KR (Solo-KR)	S2+3%Cimento (SMC)
W_{ótima} (%)	Intermediária	17,0	17,4	-
	Modificada	16,3	15,5	10,10
Dens. Máx. seca (g/cm³)	Intermediária	1,752	1,804	-
	Modificada	1,808	1,853	2,01
Expansão (%)	Intermediária	0,02	0,01	-
	Modificada	0,00	0,03	0,00
ISC (%)	Intermediária	22,7	81,2	-
	Modificada	25,3	103,2	128,10

Fonte: ANTT, 2019.

3.1.2.2 Características do revestimento

Para determinação das propriedades mecânicas da camada de revestimento, composta por asfalto modificado com borracha, foram realizados ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e de Resistência à Tração (RT), em dois corpos de prova diferentes, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.4. As características físicas do revestimento foram determinadas através do ensaio Marshall, por meio de análise de duas amostras coletadas em campo, durante a execução da camada, conforme mostrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios realizados na camada de revestimento

Corpo de Prova	RT (kgf/cm²)	MR (Mpa)
CP1	17,66	7563
CP2	16,87	9488
Média	17,27	8525,5

Fonte: ANTT, 2019.

Tabela 3.5 – Resultados do Ensaio Marshall na camada de revestimento

Propriedade	Amostra 1	Amostra 2	Média
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,496	2,492	2,494
Volume de Vazios (%)	3,64	3,78	3,71
Teor de Asfalto (%)	76,71	76,06	76,36

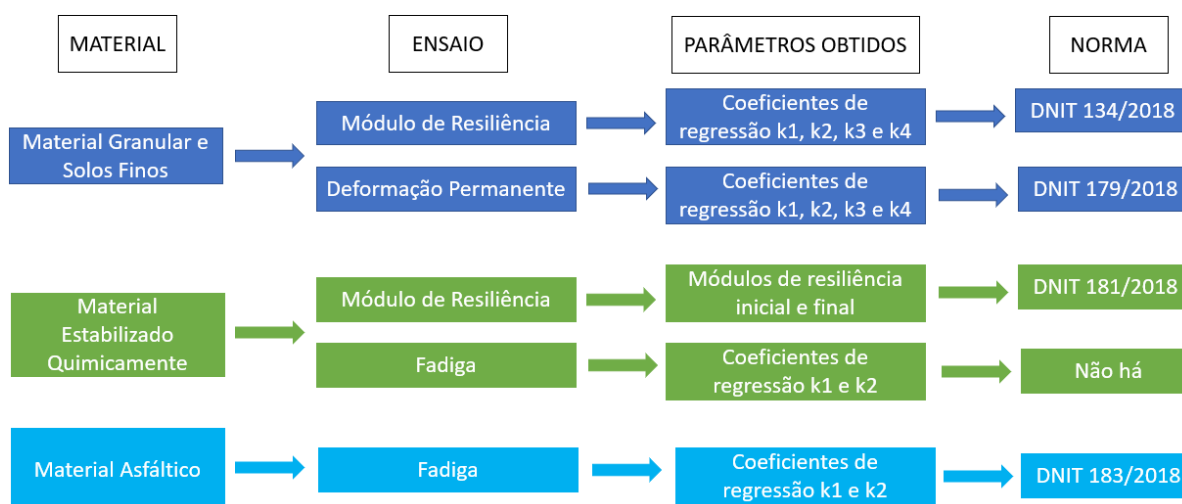
Fonte: ANTT, 2019.

Vale ressaltar que nesta seção foram apresentados os dados mais relevantes correspondentes aos ensaios realizados na pesquisa que envolve os materiais e o trecho experimental já citados. Maiores explicações referentes à execução das pistas, bem como os resultados dos ensaios feitos nas camadas dos pavimentos, encontram-se apresentados no relatório final da pesquisa RDT: Estabilização de Solos com Aditivo Químico, Cal/Escória e Cimento (ANTT, 2019).

3.2 Etapa 02: Caracterizações Experimentais Complementares

Para obtenção de outros parâmetros requeridos para a modelagem no MeDiNa, foram inicialmente previstas as caracterizações experimentais complementares por meio de ensaios de módulo de resiliência, fadiga e deformação permanente, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Ensaios complementares a serem realizados



Fonte: Autoral, 2021.

3.2.1 Considerações iniciais dos materiais para modelagem

Para a modelagem no MeDiNa foram necessárias algumas considerações iniciais sobre as misturas de solos, a fim de supor seu comportamento e sua forma de rompimento:

- Conforme mencionado anteriormente, não se sabe ao certo o comportamento de um solo estabilizado por escória KR. Sendo assim, foram feitas simulações considerando a mistura S1 com KR (20%) tanto como material granular, quanto como material estabilizado quimicamente. Logo, foram realizados ensaios considerando duas formas de ruptura diferentes, por deformações permanentes e por trincamento devido à fadiga.
- Devido ao baixo teor de cimento adicionado ao solo S2, bem como baixa resistência a tração, o solo melhorado com cimento utilizado na camada de base foi, de maneira inicial, considerado como material granular ou solo fino. Essa consideração também se respalda em algumas referências bibliográficas, como Balbo (2007). Portanto, sua forma de ruptura será por deformação permanente.

3.2.2 Relação entre ensaios previstos e realizados

a) Ensaio de módulo de resiliência

Para materiais granulares e solos finos, os ensaios de módulo de resiliência foram realizados conforme a norma DNIT 134/2018-ME. No caso desses materiais, cujos módulos se comportam de maneira não linear, foi realizado um tratamento dos resultados obtidos, a fim de determinar os coeficientes de regressão k_1 , k_2 , k_3 e k_4 . Foi verificado, então, se este módulo depende ou da tensão desvio ou da tensão confinante, baseando-se nas considerações apresentadas no Quadro 2.6.

Devido ao curto prazo de tempo e aos defeitos que ocorreram com o equipamento, não foi possível a realização deste ensaio para a mistura de solo melhorado com cimento, utilizando, então, aqueles resultados apresentados no relatório da ANTT (2019).

Para materiais estabilizados quimicamente, o ensaio foi realizado conforme a norma DNIT 181/2018-ME. No caso desses materiais, cujos módulos se comportam

de maneira sigmoidal, os resultados obtidos foram tratados de forma a determinar os módulos de resistência inicial e final, correspondentes ao maior valor de módulo e ao valor referente ao solo puro, antes da estabilização, respectivamente.

b) Ensaio de deformação permanente

Durante a realização de ensaios preliminares, houve um problema no equipamento que inviabilizou, por conta do tempo para finalização deste projeto, a realização do trabalho. Assim, não foi possível realizar os ensaios de deformação permanente, sendo necessárias algumas considerações importantes para obtenção dos coeficientes:

- Para o solo do subleito, que por sua vez é um solo argiloso laterítico, foram adotados os coeficientes existentes no banco de dados do MeDiNa para esse tipo de material;
- Para o solo melhorado com cimento, foi realizada uma calibração dos coeficientes a partir da pista 2, cujas camadas de base e sub-base utilizam esse mesmo material. Sendo assim, foram simuladas várias curvas de ATR por número de ciclos, utilizando diferentes coeficientes existentes no banco de dados, comparando-as com a curva obtida por análises de campo, a fim de determinar os coeficientes que mais correspondem à realidade.
- Caso esta seja a realidade do Solo-KR, o procedimento se dará de forma semelhante ao SMC, calibrando a curva de ATR por número de ciclos, utilizando coeficientes existentes no banco de dados, com a curva de campo.

c) Ensaio de fadiga

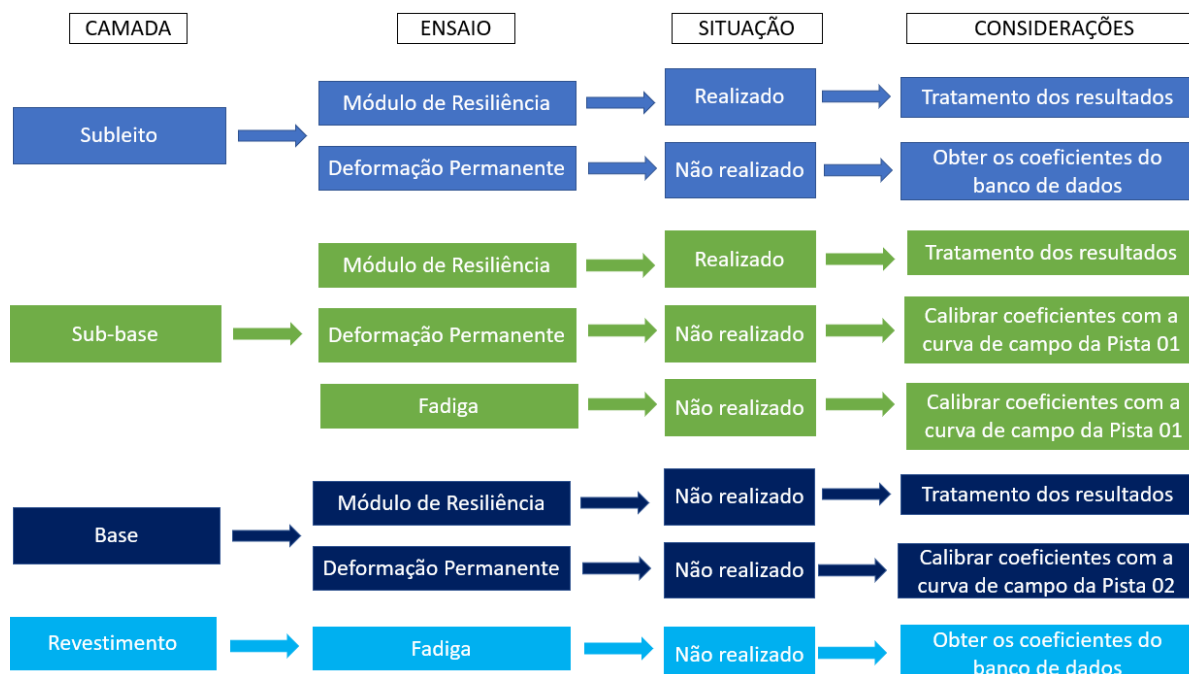
Os ensaios de fadiga também não foram realizados pelos mesmos motivos expostos anteriormente para o ensaio de deformação permanente. Sendo assim, foram feitas as seguintes considerações:

- Para o revestimento asfáltico, foram utilizados os coeficientes existentes no banco de dados para este material;
- Para o material estabilizado, procedimento realizado foi semelhante àquele feito para o solo melhorado com cimento. Com todos os parâmetros dos demais materiais definidos, serão comparadas as curvas de ATR por

número de ciclos, utilizando os diferentes coeficientes do banco de dados com aquela obtida por análises de campo.

O fluxograma representado na Figura 3.10 mostra a relação dos ensaios realizados, bem como as considerações realizadas em cada caso.

Figura 3.10 - Relação de ensaios realizados



Fonte: Autoral, 2021.

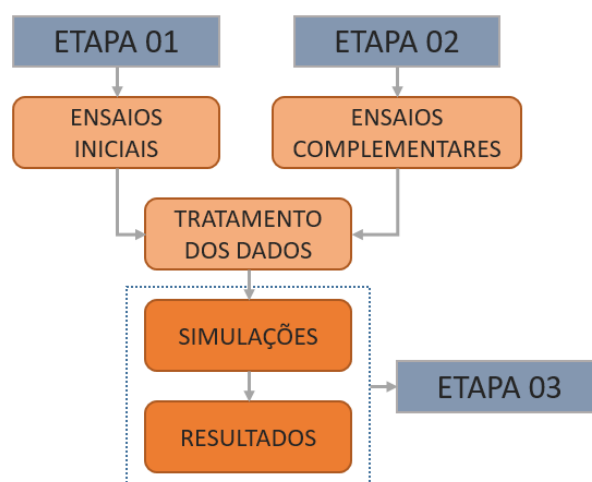
3.3 Etapa 03: Simulações no MeDiNa

A versão do pacote computacional do MeDiNa utilizada para as análises de vida útil e dimensionamento das camadas do pavimento foi a v.1.1.5.0 (MeDiNa, 2020). Para modelagem do pavimento, no programa que aplica o método, foram utilizadas as características de projeto da pista bem como as propriedades dos materiais, que são provenientes do estudo inicial do trecho e dos ensaios complementares, como já apresentado. Demais requisitos para completa caracterização das camadas, que não foram possíveis de obtenção direta nas etapas 01 e 02, foram adotados de forma adequada seguindo as considerações descritas no item 4.3 deste trabalho.

Quanto aos dados de tráfego, parâmetro de entrada importante, foram utilizados os dados obtidos no levantamento de tráfego fornecidos pela concessionária ECO

101 e contidos no relatório ANTT (2019) para o local do trecho experimental. A linha de raciocínio seguida está apresentada na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Linha de raciocínio para simulação.



Fonte: Autoral, 2021.

As camadas do pavimento podem ser caracterizadas de formas distintas a depender da categoria do material que as compõe, possuindo uma entrada de dados diferente no programa bem como modelo de cálculo para sua análise. Na Tabela 3.6 encontra-se como foi tratada cada camada constituinte da pista 01.

Tabela 3.6 – Representação das camadas no MeDiNa.

Camada	Categoria	MR	Ruptura
Revestimento	Concreto Asfáltico Borracha	Elástico Linear	Fadiga
Base	Material Granular	Elástico não Linear	Deformação Permanente
Sub-base	A ser verificado	-	-
Subleito	Subleito	Elástico Linear	Deformação Permanente

Fonte: ANTT, 2019.

Uma vez inserido o projeto e realizada a avaliação da estrutura, são gerados então relatórios com os resultados, sendo eles: a evolução mensal dos danos no pavimento; a análise de afundamento de trilha de roda com a contribuição de cada camada; as bacias de deflexões e a área trincada ao fim do período de projeto.

Em posse desses resultados, foi possível realizar uma análise comparativa, entre a previsão do programa e o desempenho em campo desta pista.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados da Etapa 01: Desempenho de Campo

Para o acompanhamento de campo foi elaborado uma ficha resumo de todos os ensaios e resultados levantados em campo, conforme Figura 4.1 e Figura 4.2.

Figura 4.1 – Exemplo de ficha de acompanhamento em campo.

EXEMPLO DE FICHA DE ACOMPANHAMENTO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO

UNIDADE Nº:		LOCAL/TRECHO:		CICLO Nº		DADOS DO SIMULADOR		TEMP. EXT. °C		DATA					
RDT - ECO 101		EXPERIMENTAL 01 - SUB-BASE: SOLO + 20% KR / BASE: SMC 3% REVESTIMENTO ASFÁLTICO - CAP AB-8 - FAIXA B		771.314		PRESSÃO (bar) 90		TEMP. INT. °C 29,1		25,3 16/04/2018					
MANCHA DE AREIA				PÊNDULO BRITÂNICO				ÍNDICE INTERNACIONAL DE ATRITO (IFI)				TRELIÇA			
Diâmetro (mm)				VRD				Classificação				ATR (mm)			
L1 L2 L3 L4 Média Hs				L1 L2 L3 L4 L5 Média Temp. °C				Sp FR60 F60				IE EX LD Média			
S1 161 170 168 160 165 1,17				S1 56 56 55 54 53 55 31,0				121,62 36,33 0,35 OTIMO				6,0 4,5 5,0 5,2			
S2 180 185 188 179 183 0,95				S2 57 55 54 54 53 55 31,0				96,38 32,50 0,32 OTIMO				5,5 4,5 5,0 5,0			
S3 182 165 180 188 180 0,98				S3 56 55 55 54 54 55 31,0				99,70 33,19 0,32 OTIMO				6,0 4,5 5,5 5,3			
Média 174 173 181 176 176 1,03				Média 56 55 55 54 53 55 31,0				105,14 34,02 0,33 OTIMO				5,9 4,6 5,2 5,2			
Aceitação				> 47								< 7mm			
VIGA BENKELMAN - DEFLEXÕES (0,01 mm)												Gráfico ATR (mm)			
Deflexão Real												Deflexão Real (0,01 mm)			
Local L ₁ L ₂ D ₁ L ₂₁ L ₂₂ L ₂₃ L ₂₄ D ₂₁ D ₂₂ D ₂₃ D ₂₄ Raio Curv.												UE EX LD			
Carga - 16,4 tf (por eixo)												Deflexões - 0,01 mm			
S1 500 484 32												S1 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
S2 500 489 22												S2 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
S3 500 489 22												S3 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
S4 500 497 26												S4 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
S5 500 492 16												S5 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
Média 500 488 24												Média 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
Carga - 8,2 tf (por eixo)												Deflexões - 0,01 mm			
Local L ₁ L ₂ D ₁ L ₂₁ L ₂₂ L ₂₃ L ₂₄ D ₂₁ D ₂₂ D ₂₃ D ₂₄ Raio Curv.												Deflexões - 0,01 mm			
S1 500 491 18												S1 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
S2 500 497 6												S2 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
S3 500 494 12												S3 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
S4 500 497 6												S4 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
S5 500 494 12												S5 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			
Média 500 495 11												Média 0m 1m 2m 3m 4m 5m 6m 7m 8m 9m 10m			

Observação: Medidas das deflexões realizadas com carga de 8,2tf e 16,4tf aplicada no semi-eixo do simulador.
Carregamento correspondente a 16,4tf e 8,2tf por eixo.
Houve registro de chuva no período que antecede as leituras atuais (130 mm).

Fonte: ANTT, 2019.

Figura 4.2 – Exemplo de ficha de acompanhamento em campo.

EXEMPLO DE FICHA DE ACOMPANHAMENTO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO

UNIDADE Nº:		LOCAL/TRECHO:		CICLO Nº		DADOS DO SIMULADOR		TEMP. EXT. °C		DATA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
RDT - ECO 101		EXPERIMENTAL 01 - SUB-BASE: SOLO + 20% KR / BASE: SMC 3% REVESTIMENTO ASFÁLTICO - CAP AB-8 - FAIXA B		771.314		PRESSÃO (bar) 90		TEMP. INT. °C 29,1		25,3 16/04/2018																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
MAPEAMENTO DE FISSURAS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
C1 <table border="1"> <tr><td>A</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr> <tr><td>B</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>C</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>D</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>E</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>G</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>H</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>I</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>J</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> POSIÇÃO COMPR. (mm) ABERT. (mm) AGRESS. C2 <table border="1"> <tr><td>A</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr> <tr><td>B</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>C</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>D</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>E</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>G</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>H</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>I</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>J</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> POSIÇÃO COMPR. (mm) ABERT. (mm) AGRESS. C3 <table border="1"> <tr><td>A</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr> <tr><td>B</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>C</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>D</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>E</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>G</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>H</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>I</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>J</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> POSIÇÃO COMPR. (mm) ABERT. (mm) AGRESS. C4 <table border="1"> <tr><td>A</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr> <tr><td>B</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>C</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>D</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>E</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>G</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>H</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>I</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>J</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> POSIÇÃO COMPR. (mm) ABERT. (mm) AGRESS. C5 <table border="1"> <tr><td>A</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr> <tr><td>B</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>C</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>D</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>E</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>G</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>H</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>I</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>J</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> POSIÇÃO COMPR. (mm) ABERT. (mm) AGRESS.												A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B											C											D											E											F											G											H											I											J											A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B											C											D											E											F											G											H											I											J											A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B											C											D											E											F											G											H											I											J											A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B											C											D											E											F											G											H											I											J											A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B											C											D											E											F											G											H											I											J										
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
B																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
D																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
E																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
F																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
G																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
I																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
J																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
B																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
D																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
E																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
F																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
G																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
I																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
J																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
B																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
D																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
E																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
F																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
G																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
I																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
J																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
B																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
D																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
E																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
F																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
G																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
I																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
J																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
B																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
D																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
E																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
F																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
G																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
I																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
J																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

Observações:

Fonte: ANTT, 2019.

As fichas foram preenchidas durante as semanas da pesquisa em campo, conforme o avanço do número de ciclos do simulador de tráfego, e encontram-se documentadas no relatório final da pesquisa RDT: Estabilização de Solos com Aditivo Químico, Cal/Escória e Cimento (ANTT, 2019). Dessa forma, em concordância ao foco deste presente estudo, será apresentado um resumo dos resultados relevantes, ou seja, deformação permanente (ATR) e trincamento referentes à pista 01.

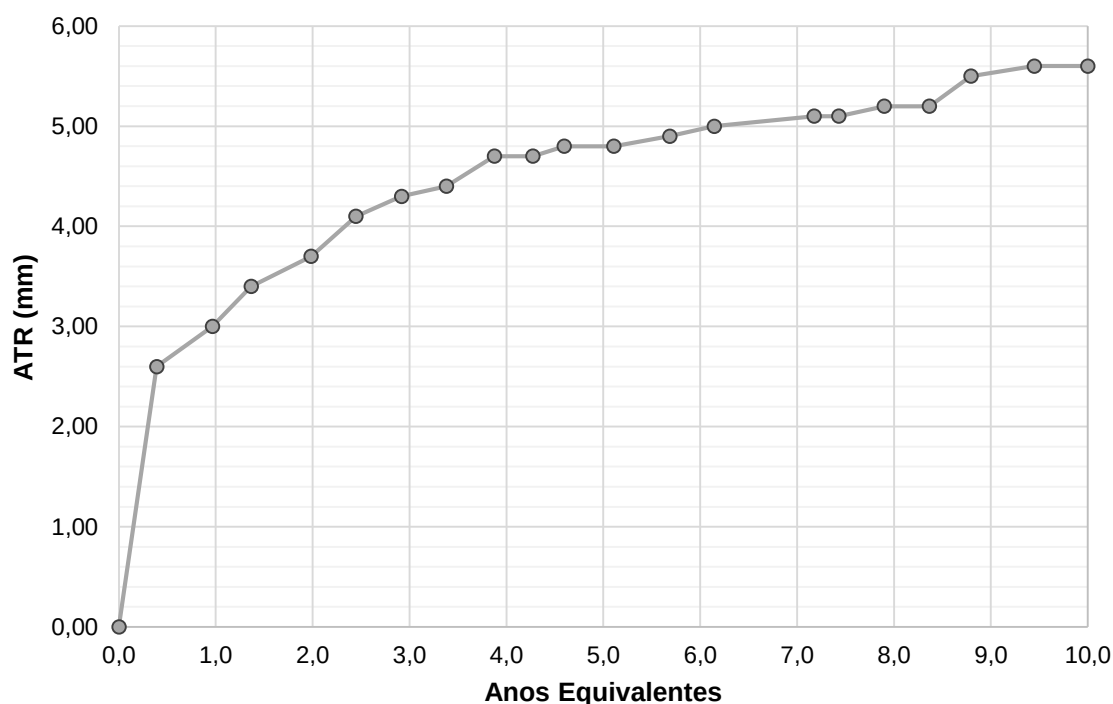
As medidas das deformações permanentes foram realizadas concomitantemente aos levantamentos de trincamento. Entretanto, durante toda a fase de simulação não foram observadas trincas no pavimento. Quanto à deformação permanente é possível observar a evolução na Tabela 4.1 e Gráfico 4.1.

Tabela 4.1 – Evolução do ATR para pista 01.

Nº Anos Equivalente	Nº Ciclos	ATR (mm)
0	0	0
0,4	36000	2,6
1	89000	3
1,4	125760	3,4
2	182880	3,7
2,4	225508	4,1
2,9	268863	4,3
3,4	311622	4,4
3,9	357200	4,7
4,3	393892	4,7
4,6	423854	4,8
5,1	470902	4,8
5,7	524317	4,9
6,1	566499	5
7,2	661677	5,1
7,4	685147	5,1
7,9	728329	5,2
8,4	771314	5,2
8,8	810748	5,5
9,4	871023	5,6
10,0	922007	5,6

Fonte: Adaptado ANTT, 2019.

Gráfico 4.1 – Evolução do ATR para pista 01.



Fonte: Adaptado ANTT, 2019.

As avaliações refletiram um comportamento satisfatório do pavimento mesmo depois dos 922.007 ciclos realizados, ou seja, os parâmetros avaliados atenderam aos limites estabelecidos de 13mm de ATR para via arterial primária, conforme Tabela 2.2.

4.2 Resultados da Etapa 02: Caracterizações Experimentais Complementares

Conforme mencionado no item 3.2.2, somente os ensaios de módulo de resiliência foram realizados. A seguir, estão apresentados os resultados referentes a esses ensaios:

4.2.1 Módulo de resiliência do solo do Subleito

O subleito existente é composto pelo solo S1 que, conforme mencionado anteriormente, é um solo argiloso, altamente plástico e com grande variação de volume. Os resultados do ensaio de módulo de resiliência, realizado na energia intermediária, estão apresentados no Quadro 4.1.

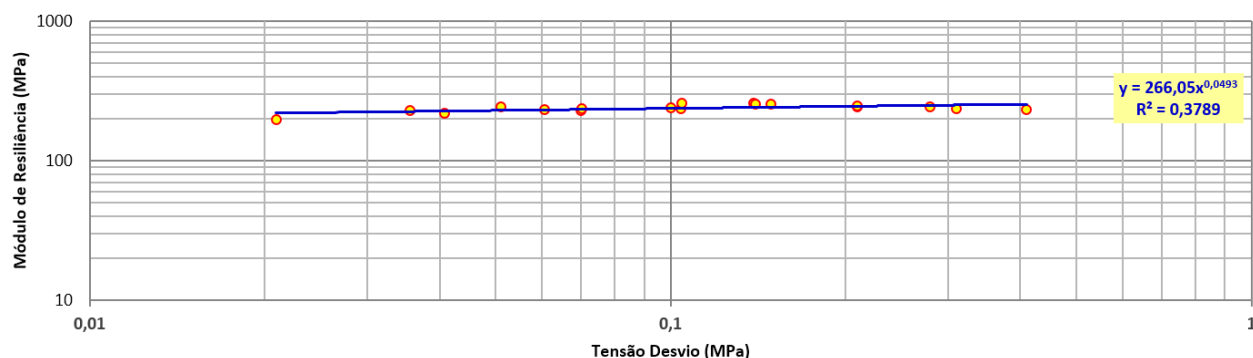
Quadro 4.1 - Ensaio de Módulo de Resiliência para o solo do subleito (S1)

Tensões de Referência (DNIT 134/2010)		Resultados do Ensaio		
σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	θ	ϵ_r (mm)	MR (Mpa)
0,0207	0,0207	0,0621	1,05E-04	198,691
	0,0414	0,0828	1,87E-04	217,712
	0,0621	0,1035	2,62E-04	231,319
0,0345	0,0345	0,1035	1,56E-04	228,038
	0,0689	0,1379	3,07E-04	228,792
	0,1029	0,1719	4,38E-04	237,538
0,0504	0,0504	0,1512	2,09E-04	242,777
	0,1029	0,2037	4,16E-04	240,549
	0,1552	0,2560	5,85E-04	254,106
0,0689	0,0689	0,2067	2,97E-04	236,355
	0,1379	0,2757	5,41E-04	257,112
	0,2068	0,3446	8,55E-04	244,803
0,1029	0,1029	0,3087	4,07E-04	257,130
	0,2068	0,4126	8,42E-04	249,056
	0,309	0,5148	1,31E-03	237,582
0,1379	0,1379	0,4137	5,49E-04	255,018
	0,2747	0,5505	1,14E-03	245,085
	0,412	0,6878	1,77E-03	231,386

Fonte: Autoral, 2021.

Mesmo com uma variação relativamente pequena, percebe-se que o MR varia conforme a Tensão Desvio (σ_d), de forma com que possa ser calculado através das simplificações apresentadas no Quadro 2.6, assumindo, então, os coeficientes de regressão K2 e K4 iguais a zero. Então, através da plotagem do gráfico de MR por Tensão Desvio (Gráfico 4.2), obtêm-se os coeficientes K1 = 266,05 e K3 = 0,0493.

Gráfico 4.2 - Gráfico de MR x Tensão Desvio para o solo do subleito (S1)



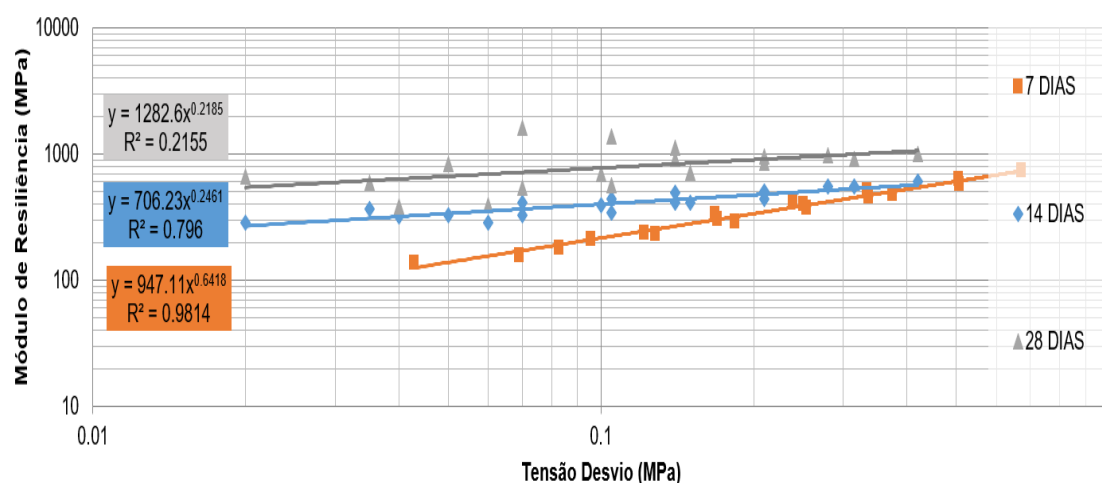
Fonte: Autoral, 2021.

4.2.2 Módulo de resiliência com Solo-KR

Para melhor compreensão do efeito da adição do coproduto KR ao solo S1, bem como análise do comportamento da mistura resultante, foram realizados ensaios de módulos de resiliência conforme duas normas distintas, conforme mencionado no item 3.2.2.

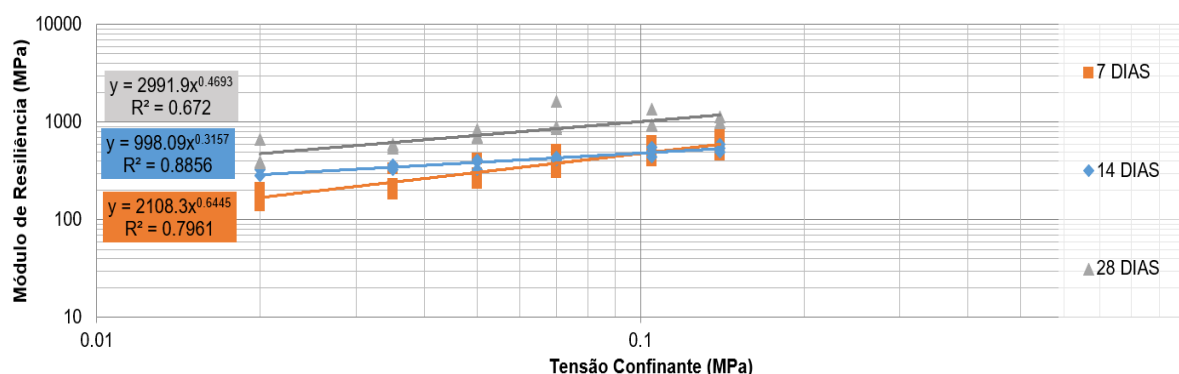
Primeiramente, foi realizado o ensaio de MR de acordo com a norma DNIT 134/2018-ME, para materiais granulares e solos, utilizando energia de compactação intermediária e diferentes dias de cura. Os gráficos com os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 4.3 e Gráfico 4.4.

Gráfico 4.3 - Módulo de resiliência x Tensão desvio em diferentes dias de cura (DNIT 134/2018-ME)



Fonte: Autoral, 2021.

Gráfico 4.4 - Módulo de resiliência x Tensão confinante em diferentes dias de cura (DNIT 134/2018-ME)



Fonte: Autoral, 2021.

A partir da análise dos resultados, percebe-se que o módulo de resiliência varia com o tempo e não só com a aplicação de diferentes tensões. Além disso, ao aumentar o tempo de cura, observa-se que a dependência do módulo em relação a tensão desviu consideravelmente, um comportamento bem marcante de materiais estabilizados. Porém, observa-se também, que o módulo de resiliência máximo obtido está próximo de 1000 MPa (para 28 dias), valor relativamente baixo para materiais estabilizados.

Após essas considerações, foi realizado, então, o ensaio de módulo de resiliência conforme a norma DNIT 181/2018-ME para solos estabilizados, utilizando energia intermediária e 7 dias de cura, já que ainda restavam dúvidas sobre o comportamento da mistura, principalmente sobre o fato de o ganho de resistência estar associado a uma possível cimentação ou até mesmo por perda de umidade. Sendo assim, foram analisados 3 corpos de prova distintos, CP1, CP2 e CP3, cujos resultados estão apresentados no Quadro 4.2, Quadro 4.3, e Quadro 4.4, respectivamente. O Quadro 5.5 e Gráfico 5.5 apresentam a média dos resultados, a fim de obter os parâmetros necessários para a entrada no MeDiNa.

Quadro 4.2 - Ensaio de MR do Solo-KR para 7 dias de cura (CP1) (DNIT 181/2018-ME)

Ciclo	Tensão vertical (MPa)	Deslocamento resiliente (mm)	Deformação resiliente	Módulo de Resiliência (MPa)
1	0,1	0,090	4,48E-04	235,618
2	0,2	0,144	7,17E-04	303,261
3	0,3	0,184	9,19E-04	358,268
4	0,4	0,220	1,10E-03	403,464
5	0,5	0,251	1,25E-03	443,151

Fonte: Autoral, 2021.

Quadro 4.3 - Ensaio de MR do Solo-KR para 7 dias de cura (CP2) (DNIT 181/2018-ME)

Ciclo	Tensão vertical (MPa)	Deslocamento resiliente (mm)	Deformação resiliente	Módulo de Resiliência (MPa)
1	0,1	0,111	5,57E-04	183,982
2	0,2	0,153	7,66E-04	283,921
3	0,3	0,174	8,69E-04	377,224
4	0,4	0,192	9,58E-04	460,050
5	0,5	0,215	1,08E-03	514,250

Fonte: Autoral, 2021.

Quadro 4.4 - Ensaio de MR do Solo-KR para 7 dias de cura (CP3) (DNIT 181/2018-ME)

Ciclo	Tensão vertical (MPa)	Deslocamento resiliente (mm)	Deformação resiliente	Módulo de Resiliência (MPa)
1	0,1	0,084	4,21E-04	252,906
2	0,2	0,132	6,57E-04	332,441
3	0,3	0,165	8,24E-04	395,516
4	0,4	0,195	9,73E-04	449,391
5	0,5	0,216	1,07E-03	513,120

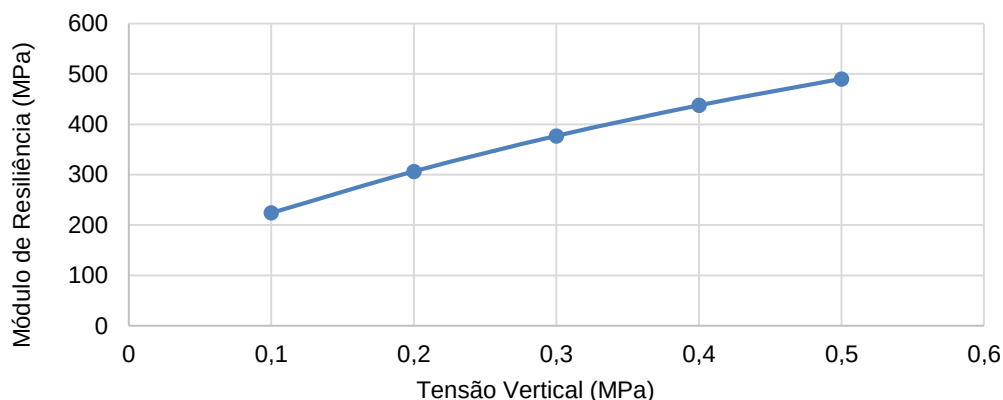
Fonte: Autoral, 2021.

Quadro 4.5 - Média dos resultados de MR para 7 dias de cura (DNIT 181/2018-ME)

Ciclo	Tensão vertical (MPa)	Deslocamento resiliente (mm)	Deformação resiliente	Módulo de Resiliência (MPa)
1	0,1	0,095	4,75E-04	224,169
2	0,2	0,143	7,13E-04	306,541
3	0,3	0,174	8,71E-04	377,003
4	0,4	0,202	1,01E-03	437,635
5	0,5	0,227	1,13E-03	490,174

Fonte: Autoral, 2021.

Gráfico 4.5 - Tensão vertical x Módulo de Resiliência para Solo-KR com 7 dias de cura



Fonte: Autoral, 2021.

Após as análises dos resultados utilizando a norma para materiais estabilizados, percebe-se que, da mesma forma que nos dados obtidos pela norma para materiais granulares e solos, houve um aumento de resistência para os diferentes níveis de tensões, porém estes valores continuam abaixo dos usuais encontrados para materiais estabilizados.

Por outro lado, nota-se, também, um valor relativamente alto para os deslocamentos resilientes. A norma DNIT 181/2018-ME especifica que, para validação do ensaio, esses deslocamentos devem ser maiores que 25 μm e menores que 50 μm , fato que não ocorre nesse ensaio, cujos resultados estão entre 84 μm e 216 μm .

O acréscimo no módulo de resiliência e nas deformações resilientes mostram que o material, com o incremento de tensões, não se encontra tão rígido, aliviando estas tensões através de deformações e não por formações de trincas, como seria o caso de materiais estabilizados quimicamente, como solo-cimento. Materiais estabilizados quimicamente tendem, para grandes deformações, e dada a sua elevada rigidez, dissipar energia através da formação de trincas. Observa-se, no entanto, que nos resultados de MR não houve uma redução em seus valores, mesmo para grandes deformações reportadas, o que resultaria em trincamento e redução da rigidez. Logo, conclui-se que a mistura de Solo-KR se comporta mais como um material granular (resiliente e com rigidez não elevada). Assim, foi considerado nas análises no MeDiNa que seu modo de ruptura seria por deformação permanente e

não fadiga (considerado para materiais de elevada rigidez), i.e., assumiu-se comportamento de materiais granulares.

Para realização da simulação serão utilizados os dados referentes a 7 dias de cura, visto que o ajuste do gráfico se apresenta melhor em relação aos demais dias. Apesar do ensaio utilizar valores de tensão diferentes daqueles normatizados pela norma DNIT 134/2018-ME, seus resultados (Quadro 4.6) ainda são válidos para efeitos de simulação e comparação no MeDiNa.

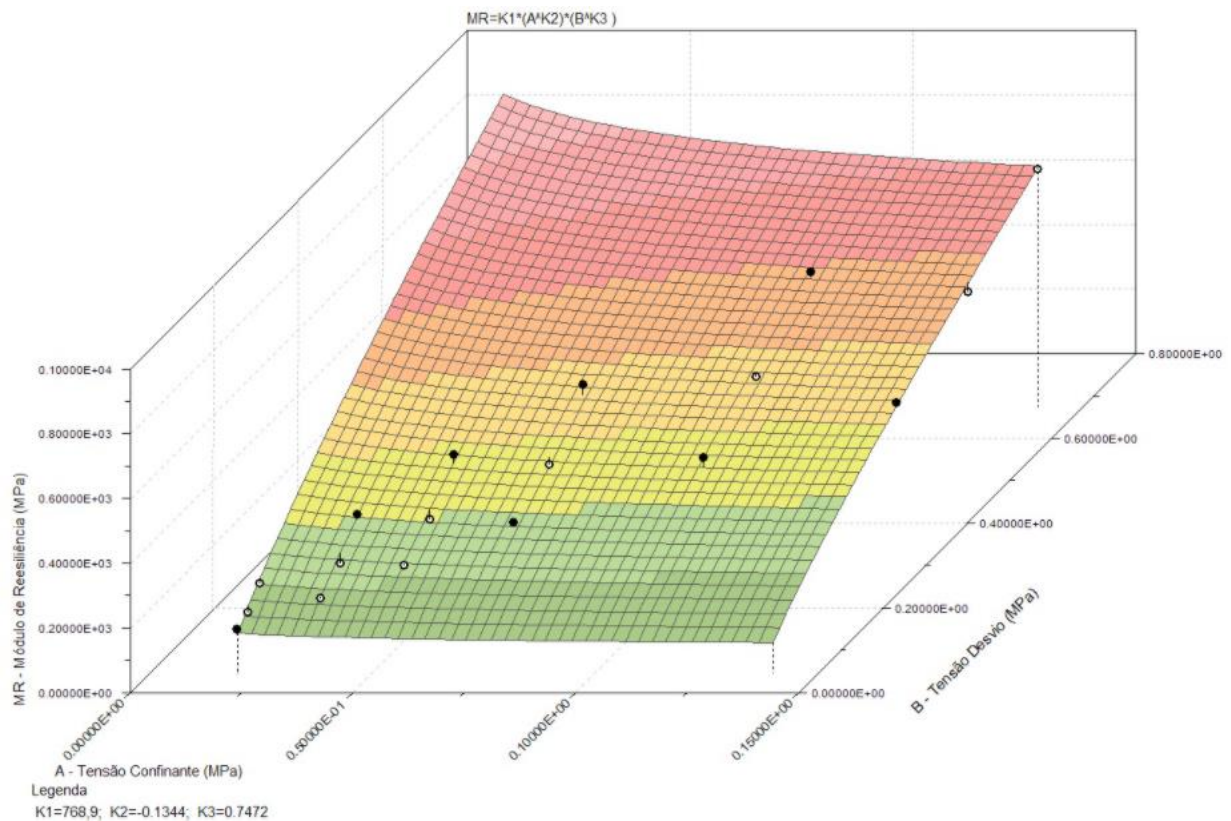
Quadro 4.6 - Ensaio de Módulo de Resiliência para Solo-KR com 7 dias de cura (DNIT 134/2018-ME)

Tensões do Ensaio				
σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	θ	ϵ_r	MR (Mpa)
0,020	0,04290	0,0829	3,11E-04	139,091
	0,06895	0,1090	4,32E-04	159,627
	0,09565	0,1356	4,48E-04	212,338
0,035	0,08269	0,1527	4,53E-04	182,531
	0,12778	0,1978	5,49E-04	232,729
	0,16784	0,2378	5,07E-04	331,587
0,050	0,12157	0,2216	5,16E-04	235,628
	0,18344	0,2834	6,22E-04	294,822
	0,23894	0,3389	5,64E-04	423,974
0,070	0,16959	0,3096	5,57E-04	304,436
	0,25406	0,3941	6,83E-04	371,772
	0,33364	0,4736	6,48E-04	515,297
0,105	0,25022	0,4602	6,28E-04	398,447
	0,37411	0,5841	7,67E-04	487,631
	0,50551	0,7155	7,90E-04	640,102
0,140	0,33688	0,6169	7,37E-04	457,025
	0,50717	0,7872	8,83E-04	574,331
	0,67333	0,9533	9,14E-04	736,380

Fonte: Autoral, 2021.

Os coeficientes de regressão referentes ao módulo de resiliência foram obtidos através do software LabFit utilizando o modelo composto segundo a Equação 3.18, adotando $K_4 = 0$, conforme Quadro 2.6, visto que o módulo varia consideravelmente tanto com a tensão desvio quanto com a tensão confinante. Foram obtidos, então, os parâmetros $K_1 = 768,9$; $K_2 = -0,1344$ e $K_3 = 0,7472$, conforme mostrado na Figura 4.3. Vale ressaltar que os dados se ajustaram de maneira bastante satisfatória ao modelo obtido, apresentando R^2 igual a 98%.

Figura 4.3 - Obtenção dos coeficientes de MR para solo-KR através da plotagem dos resultados no LabFit



Fonte: Autoral, 2021.

4.2.3 Módulo de resiliência do SMC

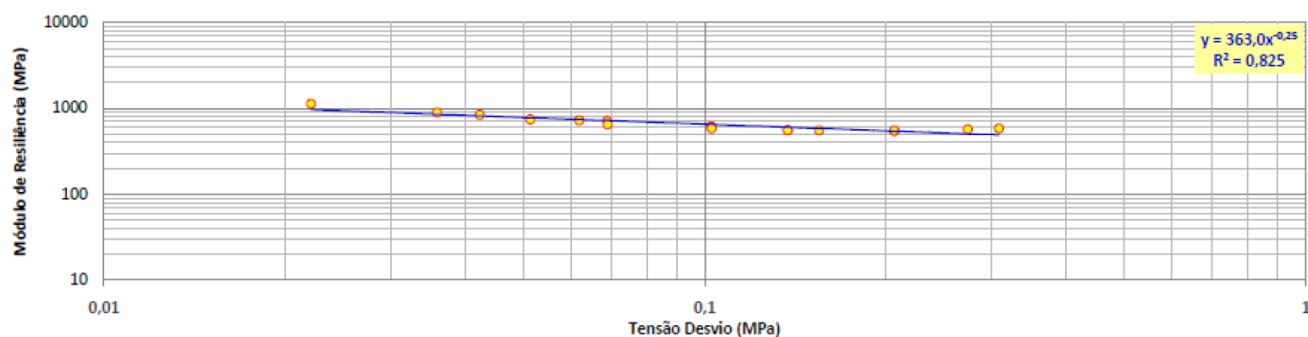
Conforme mencionado também no item 3.2.2, o ensaio de MR não pôde ser realizado, sendo utilizados, então, aqueles resultados apresentados no relatório da ANTT (2019), que estão mostrados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Ensaio de Módulo de Resiliência para a mistura de solo S2 com cimento 3%

Tensões de Referência (DNIT 134/2010)		Resultados do Ensaio		
σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	θ	ϵ_r (mm)	MR (Mpa)
0,0207	0,0207	0,0621	1,96E-05	1131,074
	0,0414	0,0828	5,03E-05	839,907
	0,0621	0,1035	8,52E-05	725,429
0,0345	0,0345	0,1035	4,02E-05	892,511
	0,0689	0,1379	9,68E-05	710,581
	0,1029	0,1719	1,67E-04	613,109
0,0504	0,0504	0,1512	6,88E-05	744,607
	0,1029	0,2037	1,67E-04	614,461
	0,1552	0,2560	2,80E-04	553,241
0,0689	0,0689	0,2067	1,06E-04	650,480
	0,1379	0,2757	2,46E-04	558,151
	0,2068	0,3446	3,78E-04	546,679
0,1029	0,1029	0,3087	1,75E-04	586,691
	0,2068	0,4126	3,74E-04	552,201
	0,309	0,5148	5,29E-04	584,067
0,1379	0,1379	0,4137	2,47E-04	555,362
	0,2747	0,5505	4,81E-04	569,315
	0,412	0,6878	6,99E-04	585,810

Fonte: ANTT, 2019.

Gráfico 4.6 - Gráfico de MR x Tensão Desvio para a mistura de solo S2 com cimento 3%



Fonte: ANTT, 2019.

Pela análise dos resultados obtidos, é possível perceber que o módulo de resiliência varia conforme a Tensão Desvio (σ_d), de forma com que possa ser

calculado através das simplificações apresentadas no Quadro 2.6, assumindo K_2 e K_4 iguais a zero. Observando também os valores de MR obtidos no ensaio, percebe-se que estes são bem inferiores àqueles fornecidos pelo MeDiNa para solo-cimento, enfatizando ainda mais a tendência de comportamento como material granular e resiliente não-linear. Sendo assim, plotando-se os valores obtidos no gráfico de MR por Tensão Desvio (Gráfico 4.6), obtêm-se $K_1 = 363,0$ e $K_3 = -0,25$.

4.3 Resultados da Etapa 03: Simulações no MeDiNa

As simulações no MeDiNa foram realizadas em duas etapas, através da calibração dos coeficientes de deformação permanente do SMC usado na camada de base da pista 1, bem como análise do comportamento do Solo-KR utilizado na camada de sub-base da pista 01. Para isso, é necessária a definição dos seguintes parâmetros que não puderam ser obtidos em laboratórios:

- Para o solo S1 do subleito, foram adotados, através do banco de dados, os coeficientes de deformação permanente de um solo que possui as mesmas características. Sendo assim, por se tratar de um solo argiloso laterítico, foram adotados os coeficientes do solo LG'4, cujos valores são $\Psi_1 = 0,32$; $\Psi_2 = -0,09$; $\Psi_3 = 1,21$ e $\Psi_4 = 0,05$. O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,45;
- Para o revestimento asfáltico, foram adotados, através do banco de dados, coeficientes de fadiga condizentes com o material utilizado, bem como com seu módulo de resiliência. Sendo o assim, por se tratar de um asfalto modificado com borracha classe 4, foram adotados os coeficientes $K_1 = 1,91E-5$ e $K_2 = -1,9$. O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,32.

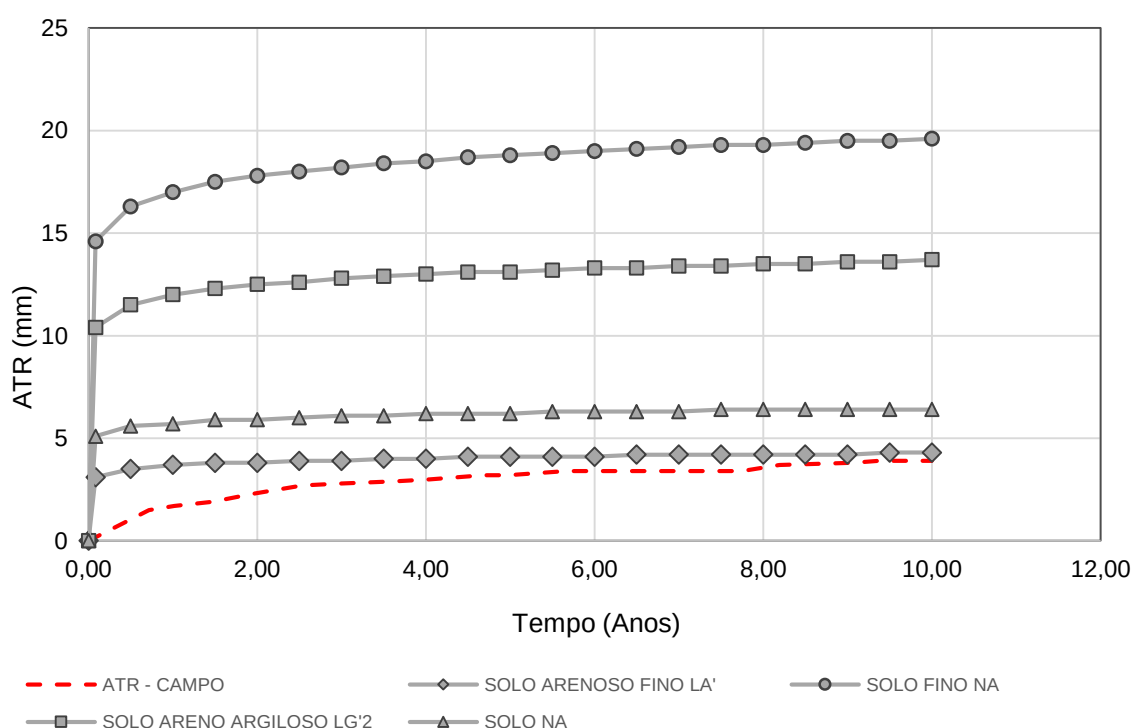
4.3.1 Base: Calibração dos coeficientes de deformação permanente do SMC 3%

Conforme mencionado no item 3.2.2, os ensaios de deformação permanente para a mistura de SMC não foram realizados. Sendo assim, os coeficientes de regressão serão determinados de forma indireta, através dos materiais existentes no banco de dados do MeDiNa. Para isso será realizada uma calibração desses coeficientes utilizando a estrutura de pavimento da pista 02, que difere da pista 01 por apresentar a mistura de SMC em ambas camadas de base e sub-base.

Os materiais do banco de dados foram escolhidos dentro da classe “Solo fino, argiloso ou siltoso” (MeDiNa, 2020), pois os materiais do banco de dados dentro da categoria “Material Granular” eram apenas Britas Graduadas e Solos-Brita, que pouco se assemelharam com o SMC componente da base, sendo assim foram considerados para testagem apenas os solos arenosos finos, já que o solo S2 utilizado na mistura é um solo arenoso laterítico. Utilizou-se também coeficiente de Poisson de 0,45.

Uma vez em posse dos resultados de desempenho em campo da pista 02 é possível então encontrar, comparando os gráficos de ATR por número de ciclos em cada situação, qual material possui coeficiente de deformação permanente mais próximo do comportamento real observado em campo, através da utilização dos coeficientes de um material diferente a cada simulação. Os resultados de desempenho de campo, bem como os resultados obtidos com o uso dos coeficientes existentes no banco de dados, estão apresentados no Gráfico 4.7.

Gráfico 4.7 - Gráfico de ATR x Tempo da Pista 02



Fonte: Autoral, 2021.

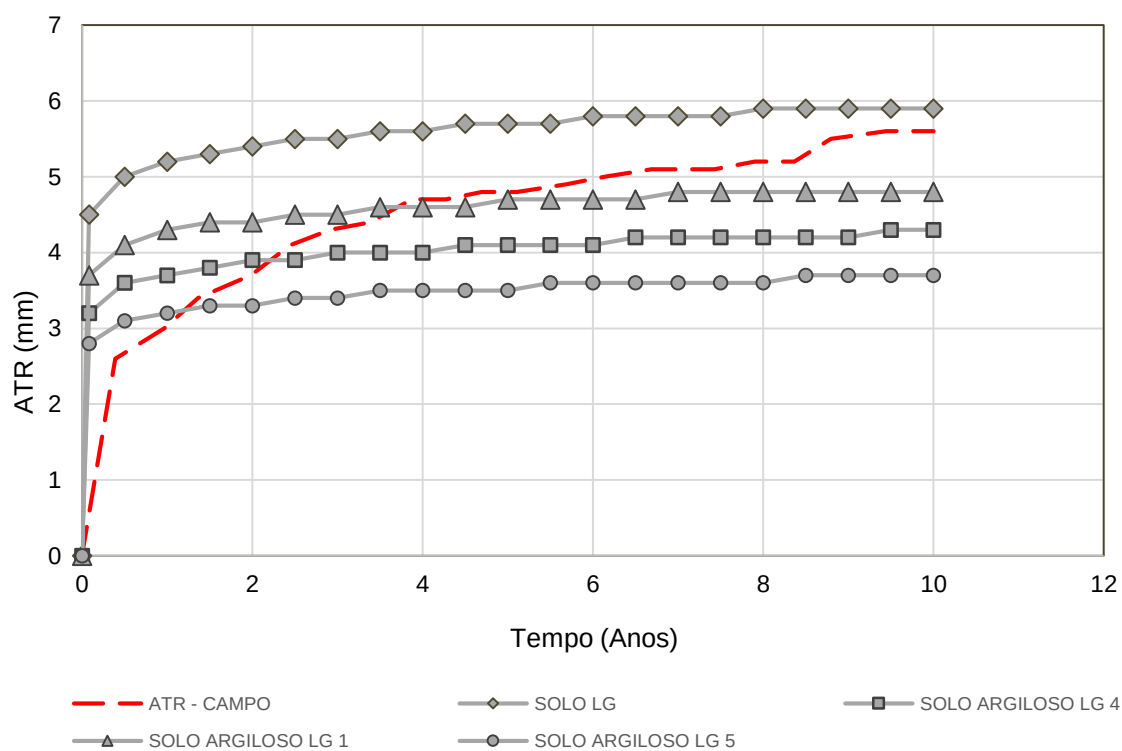
Diante desses resultados observa-se que o comportamento mais próximo ao de campo foi obtido utilizando os coeficientes de deformação permanente do “Solo Arenoso Fino LA”, que é um solo arenoso fino laterítico /MG (MeDiNa, 2020) que, por

sinal, apresenta classificação bem semelhante ao solo S2 puro. Sendo assim, os coeficientes de utilizados para a simulação da pista 01 foram $\Psi_1 = 0,021$; $\Psi_2 = -0,086$; $\Psi_3 = 1,37$ e $\Psi_4 = 0,05$.

4.3.2 Sub-base: Avaliação do comportamento do Solo KR

Em posse dos coeficientes de deformação permanentes para a mistura de SMC, bem como da definição de todos os parâmetros dos materiais que compõem as demais camadas, foi possível simular o comportamento do Solo-KR utilizando os coeficientes existentes no banco de dados do MeDiNa e compará-los com os resultados obtidos em campo. Para as simulações, foram utilizados os coeficientes daqueles materiais que possuíam características similares ao solo S1 puro, ou seja, uma argila laterítica, todos estes pertencentes à classe “Solo fino, argiloso ou siltoso” (MeDiNa, 2020). Os resultados desta análise estão apresentados no Gráfico 4.8.

Gráfico 4.8 - Gráfico de ATR x Tempo da Pista 01



Fonte: Autoral, 2021.

É possível perceber então, através da análise dos resultados obtidos, que, para cada coeficiente de deformação permanente utilizado, ocorre um comportamento

bastante similar àquele observado em campo. Isto mostra que o MeDiNa permite o dimensionamento de uma estrutura de pavimentos de modo bastante satisfatório e fiel à realidade, por analisar o comportamento de cada material que compõe o pavimento.

Outro ponto importante a ser observado é que, no MeDiNa, existe uma deformação inicial bem maior para cada coeficiente nos primeiros anos em comparação ao ATR de campo. Uma hipótese para isso seria que a adição do coproduto KR a um solo argiloso confere ao solo puro uma cimentação inicial, mesmo que pequena, já que há sim um incremento no módulo de resiliência, distribuindo as deformações de forma mais uniforme ao longo do tempo. Sendo assim, apesar da mistura se comportar como um material granular, é necessário um maior aprofundamento sobre os efeitos causados pela estabilização de solos com o coproduto, verificando, principalmente, sua influência sobre as deformações permanentes no pavimento.

Vale ressaltar que não é possível definir corretamente quais são os coeficientes de deformação permanente da mistura, visto que nenhuma curva se aproxima extremamente da curva de campo, apenas apresenta comportamento semelhante. Isso se justifica pelo fato de que os coeficientes, tanto para o subleito quanto para a camada de base, foram adotados também pelo banco de dados, e não obtidos por ensaios laboratoriais.

4.3.3 Revestimento: Análise da fadiga do concreto asfáltico modificado com borracha

Como ambos materiais de base e sub-base são granulares, conclui-se que toda a fadiga do pavimento é sofrida pelo revestimento. A Tabela 4.2 mostra a evolução das áreas trincadas, obtida pelo MeDiNa, ao longo dos anos para o tráfego proposto.

Tabela 4.2 - Evolução das áreas trincadas

Ano equivalente	Área Trincada
0	2,42%
0,08	6,78%
0,5	13,35%
1	22,59%
1,5	34,43%
2	48,04%
2,5	62,13%
3	75,39%
3,5	86,85%
4	96,03%
4,5	99,00%
5	99,00%
5,5	99,00%
6	99,00%
6,5	99,00%
7	99,00%
7,5	99,00%
8	99,00%
8,5	99,00%
9	99,00%
9,5	99,00%
10	99,00%

Fonte: Autoral, 2021.

Analisando os resultados obtidos, percebe-se que a partir do quarto ano de projeto, segundo o MeDiNa, o pavimento já se encontraria quase 100% trincado, pois o tráfego é muito elevado para a estrutura proposta, contrariando a observação de campo, relatada no Item 4.1, de que não foram observadas trincas durante toda a simulação. Essa diferença pode ser justificada pelos seguintes motivos:

- Falta de caracterização dos parâmetros de fadiga da mistura asfáltica, sendo adotados, então, os coeficientes existentes do banco de dados;
- As simulações de tráfego feitas com o HVS foram realizadas em ambientes controlados, diferentemente do que acontece na realidade de um pavimento, visto que este está sujeito também às ações de intempéries e do clima, o que leva a um envelhecimento da mistura, e consequentemente no aumento da rigidez desta e diminuição da sua resistência à fadiga;

- O simulador se deslocava em dois sentidos, para a frente e para trás, diferentemente da realidade, onde o pavimento está sujeito apenas a um sentido de fluxo de veículos. Essa forma de deslocamento do simulador pode acarretar o fechamento de algumas trincas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O trabalho teve como objetivo analisar o comportamento da escória KR utilizada na sub-base de um pavimento de um trecho experimental, através de análise de dados existentes, realização de ensaios laboratoriais complementares e modelagem em programa que aplica o dimensionamento e avaliação de pavimentos flexíveis com base no método mecanístico-empírico nacional MeDiNa.

Para isso, foi realizada uma análise dos resultados em campo presentes na pesquisa RDT, posteriormente realizou-se uma complementação de ensaios laboratoriais com amostras dos mesmos materiais empregados em campo e por fim foi feita a simulação desta estrutura de pavimento no MeDiNa, dentro das limitações relatadas, de maneira que possibilitou um melhor entendimento do desempenho do pavimento, dos materiais empregados em sua construção e do novo método utilizado. Dos resultados de campo, de laboratório e do método MeDiNa, as seguintes conclusões foram alcançadas:

- A mistura de solo S2 + 3% de cimento classifica-se como um solo melhorado com cimento (SMC), e para fins de utilização no MeDiNa não pode ser categorizada como um solo-cimento, ou outro material estabilizado quimicamente, sendo considerado no MeDiNa seu modo de ruptura predominante por deformação permanente. Assim, solos melhorados com cimento devem ser modelados na categoria “Solo fino, siltoso ou argiloso” ou “Material Granular”, dessa forma são representados por seus parâmetros de Módulo de Resiliência, Coeficiente de Poisson e Deformação Permanente;
- O acréscimo de coproduto KR ao solo S1 na proporção de 20% promoveu aumento do módulo de resiliência em comparação ao solo S1 puro, fato que confirma os resultados de trabalhos anteriores na mesma linha de pesquisa, ainda que em menor proporção;
- A viabilização do uso de escória KR como material para pavimentação se deu inicialmente pelo incremento de ISC% promovido por esse material quando misturado com solos, principalmente argilosos, bem como pela baixa expansão, atendendo, portanto, aos requisitos conforme dimensionamento por método empírico do DNER. Neste trabalho, por sua vez, verificou-se que diante

de uma avaliação mecânica-empírica a escória KR continua a apresentar bom desempenho e pode ser utilizada para fins de pavimentação;

- A mistura de Solo-KR se adapta muito bem para o modelo composto de módulo de resiliência, modelo que representa o comportamento da maioria dos solos existentes;
- Foi verificado que a adição de coproduto KR provoca um aumento de módulo de resiliência por uma possível cimentação inicial, porém não o suficiente para ser considerado um estabilizante químico. Este incremento é muito pequeno em relação aos materiais estabilizados quimicamente como solo-cimento, BGTC e solo-cal;
- A mistura apresentou grandes deformações durante o ensaio de módulo de resiliência conforme a norma DNIT 181/2018 – ES para materiais estabilizados. Logo, verifica-se que seu modelo de ruptura se dá por deformações permanentes e não pela formação de trincas, sendo, então, analisado pelo MeDiNa na categoria de materiais granulares e solos finos, siltosos e argilosos;
- O MeDiNa se mostrou como um método confiável para avaliação e dimensionamento de pavimentos flexíveis, visto que as curvas geradas por este apresentam comportamentos similares àqueles observados em campo.

5.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

Apesar das conclusões apresentadas, é de suma importância a realização de todos os ensaios necessários para modelagem pelo MeDiNa, permitindo, então, que estes sejam caracterizados de forma correta, para a maior confiabilidade dos resultados obtidos. Dessa forma, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Realização de novas simulações do trecho experimental em campo, utilizando um simulador de tráfego em sentido único em um ambiente não controlado, avaliando, então, os efeitos do clima e das intempéries na estrutura do pavimento. Dessa forma, poderá ser feita uma comparação mais precisa entre o trincamento observado em campo e aquele calculado pelo MeDiNa.
- Caracterização completa do concreto asfáltico utilizado no revestimento, incluindo o ensaio de fadiga, bem como dos materiais utilizados nas camadas de base, sub-base e subleito, realizando os ensaios de deformações

permanente, podendo, então, analisar de maneira mais precisa o comportamento dessa estrutura de pavimento pelo MeDiNa;

- Continuar o monitoramento do Solo-KR em campo e laboratório (com diferentes períodos de cura), a fim de avaliar seu comportamento ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. M. S. **Avaliação de desempenho mecânico e microestrutural da brita graduada tratada com cimento com incorporação de coproduto de aciaria KR**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018.

ANTT; ECO101; UFES. **Pesquisa RDT: Estabilização de solos com aditivo químico, cal/escória e cimento**. 2018. Relatório final de pesquisa. Dezembro, 2018.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do Fator de Expansão de uma Escória de Aciaria em Diferentes Processos de Cura para Uso em Pavimentação**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2001.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração**. São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2008.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos Rodoviários**. Almedina. Coimbra, Portugal, 2006

BRASIL. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. **Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019**. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. 2019. Brasília: Ministério da Educação, 2019

BRIDI, L. O. **Estudo do efeito da estabilização com coproduto de dessulfuração KR sob as propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de

Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT. **Pesquisa CNT de rodovias : Relatório Gerencial**. n. 03, p. 913, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT. **Transporte Rodoviário: Por que os pavimentos das rodovias do brasil não duram?** . 60 p. 2017b. Brasília, 2017.

CORREIA E SILVA, C. F. S. **Análise de tensões em pavimentos a partir de modelo físico instrumentado**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Coppe. Rio de Janeiro, 2014.

COUTINHO, J.C.P. **Dimensionamento de Pavimento Asfáltico: Comparação do Método do DNER com um Método Mecanístico - Empírico aplicada a um trecho**. 2011. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP. Ouro Preto, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR - 719, v. 3, p. 278. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INTRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER - EM 262/94**: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Especificação de material. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER - ES 385/99**: Pavimentação Concreto Asfáltico com Polímero. Especificação de serviço;

_____. **DNIT 031/2006 - ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 098/2007 - ES**: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 112/2009 - ES:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfaltoborracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 113/2009 - ME:** Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria - Método de ensaio;

_____. **DNIT 114/2009 - ES:** Pavimentação rodoviária - Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 115/2009 - ES:** Pavimentação rodoviária - Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA® - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 134/2010 - ME:** Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio;

_____. **DNIT 139/2010 - ES:** Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 140/2018 - ES:** Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço;

_____. **DNIT 141/2010 - ES:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 142/2010 - ES:** Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento; - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 142/2010 - ES:** Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de serviço;

_____. **DNIT 179/2018 - IE:** Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio;

_____. **DNIT 181/2018 - ES:** Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente –

Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio;

_____. **DNIT 183/2018 - ES:** Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio;

_____. **DNIT 420/2019 - ES:** Pavimentação – Sol-Cal – Adição de cal para Estabilização de camada de Base – Especificação de Serviço;

_____. **DNIT 421/2019 - ES:** Pavimentação – Sol-Cal – Adição de cal para Estabilização de camada de Sub-base – Especificação de Serviço;

FERNANADES, W. D. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da AASHTO.** 2016. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2016.

FERREIRA, J. G. H. M. **Elaboração e Análise da Base de Dados de Ensaio Triaxiais Dinâmicos da COPPE/ UFRJ.** 2002. Tese de Mestrado, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** 2009. Tese de doutorado - Bolsas de Alto Nível para a América Latina. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal de Santa Catarina. 2009.

FRANCISCO, A. P. S. **Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis.** 2012. Relatório Final de Projeto. Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2012.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav.** 2007. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. P. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual**

de Utilização. Versão 1.0.0. Rio de Janeiro, 2018.

FREITAS, H. B.; MOTTA, L. M. G. **Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado.** 2008. Publicado em: TRANSPORTES, v. XVI, n. 2, p. 5-12, dezembro, 2008.

FURIERI, E. C. **Avaliação em laboratório e em campo de solos estabilizados com coproduto KR, cimento e estabilizante químico BlindaSolo para pavimentos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018.

GONÇALVES, F. P.. **O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis.** p. 149, 1999. Disponível em: <<http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/09.pdf>>.

GONÇALVES, R. M. **Incorporação de coproduto de aciaria KR e polímero PDC em solos para base de pavimentos.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

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

KAKUDA, F. M. **Desenvolvimento e a utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico.** 2010. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

KIRMSE, O. J. **Estudo do Comportamento Metalúrgico do “Reator Kambara” Através de Modelagem Física.** 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos.** Editora UFRJ. Rio de Janeiro, 1997.

MEDINA. **Método de Dimensionamento Nacional**. Versão 1.1.5. Rio de Janeiro - dezembro, 2020.

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

MOTTA, L.M.G. **Método de dimensionamento de pavimento flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de carga repetidas**. 1991. 366 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPE. Rio de Janeiro, 1991.

NEPOMUCENO, D. V. **Avaliação em campo de estrutura de pavimento incorporando solo estabilizado com coproduto de aciaria KR sujeita à carregamento com simulador HVS e comparação com previsões de desempenho segundo o novo método brasileiro de dimensionamento MeDiNa**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2019.

NETO, R. S. B. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 189 f. Universidade de São Paulo, 2004.

OLIVEIRA, C. F. **Uso de Copodruto de Dessulfuração de Reator Kambara Como Agente Estabilizante de Solos Para Fins de Pavimentação**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª Edição, Oficina de textos. São Paulo, 2006.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. 1991. 489 f. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, S. & PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 1 ed.. Synergia, Rio de Janeiro, 2010.

PIRES, P.J.M.; TEIXEIRA, J.E.S.L.; NEPOMUCENO, D.V.; FURIERI, E.C. **Laboratory Evaluation Coupled with Full-Scale Accelerated Pavement Testing using Heavy Vehicle Simulator (HVS) to Assess the Effectiveness of Soil Stabilization with Desulfurization Steel Slag for Paving Application**. In: Journal of Materials in Civil Engineering. March, 2019.

PAIS, J.; PEREIRA, P.; AZEVEDO, M. D. **A Reflexão de Fendas no dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis**. 2000. A Qualidade Rodoviária na Viragem do Século, 1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000, (pp. 627-637). Lisboa, 2000.

ROHDE, L. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos – Estudo Laboratorial**. 2002. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.

SILVA, J. E. G. **Método nacional de dimensionamento de pavimentos - MeDiNa, avaliação da duplicação da AL-145**. 2018. 79 f. Universidade Federal do Alagoas. Delmiro Gouveia, 2018.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis DNER**. - 1966.

SOUZA, M.L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, IPR, 1981 (IPR Publ. 667).

SOUZA JUNIOR, J.G. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. 236 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade federal do Rio de Janeiro, COOPE. Rio de Janeiro, 2018.

SVENSON, M. **Ensaio triaxiais dinâmicos em solos argilosos**. 1980. Dissertação

de M.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 1980.

TESSARI, C. L.; COBE, R. P. **Melhoramento de solos com incorporação de resíduos de siderurgia**. 2015. 97 f. Projeto de graduação (Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

VENDRUSCULO, J.I; PASCOAL, P.T.; SANTOS, T. A.; BUENO, L. D.; PINHEIROS, R. J. B. **Comparação entre pavimentos dimensionados com os métodos do DNER (1981) e MEDINA (2018): estudo de caso com solos de subleito da cidade de Santa Maria/RS**. 2018. 10f. Publicado em: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes da ANPET. Gramado, RS. Novembro, 2018.