

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Ana Carolyn Junqueira da Cruz

**ANÁLISE DE QUATRO MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PARA PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS EM VIAS COM BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO**

Santa Cruz do Sul

2024

Ana Carolyn Junqueira da Cruz

**ANÁLISE DE QUATRO MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PARA PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS EM VIAS COM BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
de Santa Cruz do Sul, como
requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Olivio
Nervis

Santa Cruz do Sul

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a mim mesma pela força e determinação com que enfrentei cada desafio, transformando obstáculos em oportunidades valiosas de crescimento. Sou grata por não ter desistido e a Deus por iluminar meu caminho e me conceder coragem nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos, Maryana e Luís Filipe, pela motivação constante e pelo amor que sempre me inspirou a perseguir meus objetivos com determinação. À minha avó Lourdes, pelo carinho e acolhimento, e à minha avó Eva, por acreditar em meu potencial profissional. Aos meus primos, Renan e Karoline, pelos conselhos que equilibraram minhas decisões.

Aos meus dindos, Sadi, Ana Margarete, José Antônio e Elisabete, por se tornarem meu alicerce, pelo apoio constante que sempre me deram, fazendo-me sentir verdadeiramente cuidada e protegida. A minha dinda Andreia, por sempre me impulsionar a buscar o melhor em todas as áreas da vida. Todos vocês representam o verdadeiro significado de família.

Agradeço aos meus pais, Édson Luís e Elizabete, pelos princípios sólidos que me ensinaram, moldando-me em uma mulher forte e determinada.

Aos amigos, familiares e colegas de trabalho, por acreditarem em mim e no meu potencial.

Por fim, minha profunda gratidão ao professor Leandro, cuja orientação, incentivo e paciência foram essenciais para minha jornada acadêmica, sempre me impulsionando a buscar a excelência.

A todos, meu sincero e profundo obrigado!

RESUMO

O presente estudo apresentou a análise e comparação de quatro métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos aplicados a uma via de baixo volume de tráfego: Método da Resiliência, CBR, SAPEM e MeDiNa. Foram investigados aspectos relacionados ao desempenho estrutural, viabilidade técnica e adequação às condições locais, com base em dados disponibilizados na Tese de Nervis (2016). A motivação para essa investigação surge dos desafios enfrentados pelo setor de pavimentação, frequentemente marcado por custos elevados de projeto e pela adoção de soluções que, além de onerosas, podem resultar em pavimentos com vida útil reduzida, comprometendo a sustentabilidade a longo prazo. Assim, é essencial buscar um equilíbrio entre eficiência econômica e durabilidade, visando à implementação de infraestruturas viárias mais seguras, sustentáveis e economicamente viáveis. Os resultados evidenciaram que, embora métodos simplificados, como Resiliência, SAPEM e CBR, ofereçam maior atratividade econômica presumidamente, com base nas suas espessuras e quantidades de ensaios, eles podem não garantir o desempenho estrutural esperado ao longo do tempo. Em contrapartida, o MeDiNa destacou-se pela precisão e durabilidade, embora envolva um custo mais elevado. Portanto, a escolha do método ideal deve equilibrar durabilidade, economia e condições locais, de forma a subsidiar decisões técnicas mais assertivas.

Palavras-chave: Dimensionamento; Revestimento; MeDiNa; CBR; SAPEM; Resiliência.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Camadas de pavimentos rígidos (a) e flexíveis (b) | 12 |
| Figura 2 - Seção típico pavimento flexível..... | 14 |
| Figura 3 – Estrutura de referência do TECNAPAV..... | 18 |
| Figura 4 – Determinação de espessuras do pavimento | 23 |
| Figura 5 – Dimensionamento de pavimento | 23 |
| Figura 6 – Dimensionamento conforme critérios de material especificados no SAMDM..... | 25 |
| Figura 7 – Seção típica da estrutura do pavimento analisado..... | 38 |
| Figura 8 - Ábaco para obtenção das espessuras | 42 |
| Figura 9 – Parâmetros de entrada no software AEMC para análise da conformidade estrutural do pavimento | 43 |
| Figura 10 - Alerta emitido pelo software MeDiNa | 44 |
| Figura 11 – Estruturas propostas por cada método de dimensionamento | 50 |
| Gráfico 1 – Comparativo entre metodologias | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação dos solos..... | 17 |
| Tabela 2 – Granulometria para base granular..... | 20 |
| Tabela 3 – Coeficiente de equivalência estrutural..... | 21 |
| Tabela 4 – Espessura mínima de revestimento betuminoso..... | 22 |
| Tabela 5 – Categorias de estrada SAMDM..... | 24 |
| Tabela 6 – Constante (A) para o critério de deformação permanente do solo de fundação..... | 26 |
| Tabela 7 – Constantes (α e β) para o critério de fadiga em misturas betuminosas .. | 27 |
| Tabela 8 – Constantes para o critério de fadiga..... | 29 |
| Tabela 9 – Valores de referência das características mecânicas de solos estabilizados com cimento..... | 29 |
| Tabela 10 – Constantes para o critério de deformações permanentes por corte em materiais granulares..... | 30 |
| Tabela 11 – Valores de ângulo de atrito e coesão a adotar no critério de deformações permanentes por corte em materiais granulares..... | 31 |
| Tabela 12 – Ensaio e normas utilizadas no método MeDiNa..... | 33 |
| Tabela 13 – Modelos de previsão de desempenho adotados no método MeDiNa ... | 35 |
| Tabela 14 – Principais motivos dos Alertas e sugestões de resolução no método MeDiNa..... | 36 |
| Tabela 15 – Resultados de ensaios utilizados para os dimensionamentos..... | 39 |
| Tabela 16 – Metodologia CBR: resultados obtidos..... | 42 |
| Tabela 17 – Metodologia SAMDM: Modelo de análise..... | 43 |
| Tabela 18 – Verificação estrutural e dimensionamento pela metodologia DNER-PRO 269/94 – TECNAPAV..... | 45 |
| Tabela 19 – Verificação estrutural e dimensionamento pela metodologia CBR..... | 46 |
| Tabela 20 - Verificação estrutural e dimensionamento pela metodologia SAMDM ... | 47 |
| Tabela 21 – MeDiNa: Parâmetros utilizados para o dimensionamento..... | 48 |
| Tabela 22 - Desempenho da Estrutura no software MeDiNa..... | 48 |

LISTA SIMBOLOGIA E ABREVIACOES

| | |
|---------|--|
| AASHTO. | <i>American Association os State Highway and Transportation Officials</i> |
| AEMC. | Análise Elástica de Múltiplas Camadas, Análise Elástica de Múltiplas Camadas |
| ANTT. | Agência Nacional de Transportes Terrestres |
| ATR. | Afundamento de Trilha de Roda. <i>Consulte</i> |
| CAP. | Cimento Asfáltico de Petróleo |
| CBR. | California Bearing Ratio |
| CBUQ. | Concreto Betuminoso Usinado a Quente |
| CNT. | Confederação Nacional de Transportes |
| CPRM. | Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais |
| CTB. | Código de Trânsito Brasileiro |
| DNIT. | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| FV. | Fator de Veículos |
| IPR. | Instituto de Pesquisas Rodoviárias |
| MeDiNa. | Método de Dimensionamento Nacional |
| PMF. | Pré-misturado a Frio |
| PNV. | Plano Nacional de Viação |
| SAMDM. | <i>South African Mechanistic-Empirical Design Method</i> |
| SAPEM. | <i>African Pavement Engineering Manual</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 8 |
| 1.1 | Área e Limitação do Tema | 9 |
| 1.2 | Objetivo Geral..... | 10 |
| 1.3 | Objetivos Específicos | 10 |
| 1.4 | Justificativa | 10 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 2.1 | As Rodovias Brasileiras..... | 11 |
| 2.2 | Os Pavimentos Flexíveis | 12 |
| 2.3 | Pavimento de Baixo Custo | 15 |
| 2.4 | O Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos | 16 |
| 2.5 | O Método da Resiliência..... | 16 |
| 2.6 | O Método CBR | 20 |
| 2.7 | O Método da África do Sul..... | 23 |
| 2.8 | O Método MeDiNa | 31 |
| 3 | METODOLOGIA | 37 |
| 3.1 | Dados para Análise no Estudo | 38 |
| 3.2 | Realização dos Dimensionamentos e Análise Comparativa..... | 41 |
| 4 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 45 |
| 4.1 | O Método da Resiliência..... | 45 |
| 4.2 | O Método CBR | 46 |
| 4.3 | O Método da África do Sul..... | 46 |
| 4.4 | O Método MeDiNa | 47 |
| 4.5 | Análise comparativa dos resultados | 49 |
| 5 | CONCLUSÃO | 53 |
| 5.1 | Perspectivas de Trabalhos Futuros | 54 |
| | REFERÊNCIAS | 55 |
| | APÊNDICE | 58 |

1 INTRODUÇÃO

As estradas, cuja lembrança mais remota provém da China, até seu aprimoramento pelos romanos durante seu período de domínio, foram concebidas para facilitar o acesso a recursos naturais e expandir territórios. Em sua fase áurea, os romanos construíram mais de oitenta mil quilômetros dessas vias, permitindo o transporte eficiente das legiões militares e o acesso a bens disponíveis nos distantes territórios dominados. No entanto, no Brasil, apesar da frequente abordagem da questão rodoviária pela mídia, soluções tangíveis ainda não foram encontradas (BALBO, 2007). Do ponto de vista do progresso social, o sistema rodoviário nacional não tem sido motivo de orgulho acerca do desenvolvimento. Conforme apontado pela pesquisa da Confederação Nacional de Transportes (CNT) em 2023, cerca de 69,50% do pavimento no país possui algum tipo de defeito, e as rodovias de padrão adequado praticamente se restringem ao Estado de São Paulo. Em resumo, a maioria dos pavimentos enfrentam problemas, exigindo investimentos consideráveis em dimensionamento, construção, reconstrução, restauração e manutenção (CNT, 2023).

A infraestrutura rodoviária desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico de qualquer país. No Brasil, a extensa malha rodoviária é um reflexo dessa importância, com 1.720.909,00 quilômetros de vias, distribuídos em 12,40% de rodovias pavimentadas, 78,50% de rodovias não pavimentadas e 9,10% de rodovias planejadas. Essa predominância de estradas não pavimentadas não apenas dificulta o deslocamento eficiente, mas também tem impactos diretos nos custos de transporte, no conforto e na segurança dos usuários, além de limitar o desenvolvimento regional (CNT, 2023).

Por outro lado, há países com alta densidade de rodovias pavimentadas e com uma rede extensa de estradas secundárias para escoamento de matéria-prima e conexão entre áreas remotas e principais troncos rodoviários. Apesar do crescimento recente na densidade das rodovias pavimentadas no Brasil, o país ainda fica consideravelmente atrás de nações com dimensão territorial semelhantes como China e Estados Unidos em termos de infraestrutura rodoviária.

Diante desse cenário, é crucial destacar os benefícios das estradas asfaltadas. Vias pavimentadas não apenas aprimoram a operacionalidade do tráfego, mas também proporcionam uma superfície mais regular, aumentando o conforto no deslocamento. Além disso, garantem uma aderência melhorada, o que é essencial

para a segurança, especialmente em condições adversas como pista úmida. Reduzem significativamente o ruído dos pneus, contribuindo para um ambiente mais tranquilo. Não menos importante, são fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico tanto em áreas urbanas quanto rurais. No entanto, é necessário um compromisso renovado por parte dos governos para enfrentar os desafios relacionados à infraestrutura rodoviária, visando não apenas a modernização das estradas existentes, mas também a construção de novas vias que atendam às demandas crescentes da economia e da sociedade (BALBO, 2007). Estudos como os de Villibor e Alves (2019) indicam que o investimento em pavimentos de baixo custo, podem gerar retorno em um período relativamente curto, tornando essa alternativa ainda mais atrativa.

Neste contexto, é importante ressaltar que existem diversos métodos de dimensionamento disponíveis para alavancar os projetos de dimensionamento de pavimentação asfáltica. No entanto, à medida que eles demandem ensaios laboratoriais mais caros, podem se tornar pouco atrativos para emprego para pavimentos com baixo volume de tráfego. Dessa forma, esse estudo abordou métodos de dimensionamento de pavimentos como: o método das deflexões, o método California Bearing Ratio (CBR), o método da África do Sul (SAMDM) e o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), tomando-se como base os dados obtidos do trabalho de Nervis (2016).

1.1 Área e Limitação do Tema

O trabalho foi desenvolvido na área de pavimentos, com enfoque na investigação da viabilidade da aplicação de diferentes metodologias de dimensionamento de pavimentos asfálticos para vias de baixo volume de tráfego. O estudo se limitou ao comparativo dos diferentes métodos de dimensionamento, tomando-se como base para o estudo dados obtidos do trabalho de Nervis (2016). Trata-se de um estudo teórico, não abrangendo a realização de ensaios, mas abrangendo o emprego de diferentes modelos de cálculo.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho compreende a análise e comparação os diferentes métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos para uma aplicação num caso de uma via de baixo volume de tráfego.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são os seguintes:

- a) Avaliar a viabilidade técnica do emprego de métodos mais simples para dimensionamento de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego;
- b) Realizar a previsão de desempenho das estruturas de pavimento asfáltico obtidas pelos diferentes métodos de dimensionamento para o estudo de caso em questão;
- c) Propor recomendações para a seleção e aplicação de métodos de dimensionamento de pavimentos para vias de baixo volume de tráfego.

1.4 Justificativa

Há muito a ser feito em termos de pavimentação, especialmente considerando os desafios significativos enfrentados pelo setor, em particular no que diz respeito aos métodos de dimensionamento. Frequentemente, esses métodos acarretam custos de projeto elevados, o que pode desencorajar sua aplicação. Além disso, soluções que resultam em pavimentos caros ou com vida útil reduzida não são sustentáveis a longo prazo.

Neste contexto, é essencial investigar e avaliar alternativas de dimensionamento que possam equilibrar eficiência econômica e durabilidade. Justifica-se essa investigação pela necessidade de proporcionar contribuições valiosas para a comunidade técnica, o poder público e a sociedade em geral, visando infraestruturas viárias mais seguras, duradouras e economicamente viáveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 As Rodovias Brasileiras

De acordo com o Anexo I do Código de Trânsito Brasileiro – CTB (BRASIL, 2021), são consideradas rodovias, toda e qualquer via rural pavimentada. No entanto, dentro desse contexto, diversas são as jurisdições que elas poderão estar inseridas. Em 2007, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) delimitou as terminologias a serem utilizadas no meio rodoviário (BRASIL, 2007).

A Lei 5.917/73 e suas modificações estabelece o Plano Nacional de Viação (PNV), assim definindo as responsabilidades pelos programas de operação, manutenção, conservação, restauração e construção das rodovias. A administração das Rodovias Federais é dividida em: administração direta (responsabilidade do DNIT), rodovia delegada (transferência por meio de convênio para o Município, Estado ou Distrito Federal), rodovia concedida (transferência através de licitação) e rodovia delegada ao Município, Estado ou Distrito Federal para Concessão (transferência à iniciativa privada após convênio com o Ministério dos Transportes) (BRASIL, 2007).

Quanto a jurisdição das rodovias brasileiras, tem-se o seguinte:

- a) Rodovias sob jurisdição do Ministério dos Transportes: consistem nas Rodovias Federais integrantes do PNV;
- b) Rodovias na esfera de atuação da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT): correspondem às Rodovias Federais concedidas diretamente pela União;
- c) Rodovias na esfera de atuação do DNIT: referem-se às Rodovias Federais cujos trechos são administrados diretamente ou delegados pelo DNIT aos Estados, Distrito Federal e Municípios;
- d) Rodovias sob jurisdição estadual: englobam trechos controlados pelos órgãos rodoviários estaduais, conforme consta no plano de viação de cada estado, incluindo aquelas construídas pelos Estados seguindo a diretriz de uma Rodovia Federal planejada;
- e) Rodovias sob jurisdição do município: compreendem rodovias sob controle municipal, administradas diretamente ou contratadas pelas Prefeituras Municipais, incluindo aquelas construídas pelos municípios seguindo a diretriz de uma Rodovia Federal planejada.

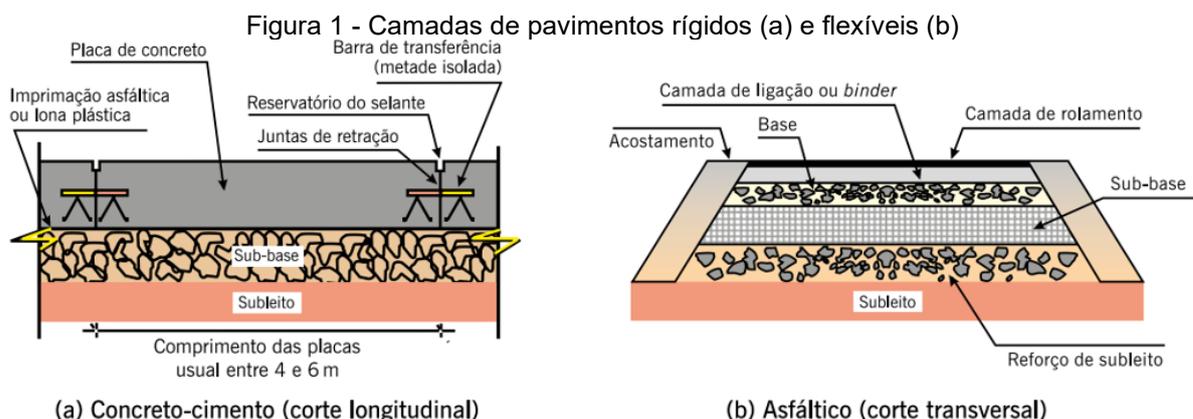
f) Rodovia estadual ou municipal coincidente: são rodovias construídas pelos Estados ou Municípios seguindo a diretriz de uma Rodovia Federal planejada.

2.2 Os Pavimentos Flexíveis

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas sobre a superfície final da terraplenagem, concebido para resistir às cargas do tráfego e ao clima, proporcionando aos usuários melhores condições de rolamento com conforto, economia e segurança. Ele é projetado com camadas específicas em termos de espessura e rigidez. O sistema deve responder de forma adequada às condições climáticas, geométricas e de tráfego ao longo de sua vida útil.

Em termos gerais, os pavimentos são categorizados como flexíveis, semirrígidos e rígidos, conforme Brasil (2006^a):

- Pavimento Flexível:** caracterizado pelo fato de todas as suas camadas sofrerem uma deformação elástica significativa sob a carga aplicada, resultando em uma distribuição de carga aproximadamente equivalente entre as camadas. Um exemplo típico é o pavimento composto por uma base de material granular (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, coberta por uma camada asfáltica, conforme Figura 1b.
- Pavimento Semirrígido:** definido por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias.
- Pavimento Rígido:** representado por um revestimento que possui alta rigidez em relação às camadas inferiores, absorvendo assim praticamente todas as tensões provenientes da carga aplicada. Um exemplo típico é o pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland, ilustrados na Figura 1a.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2022.

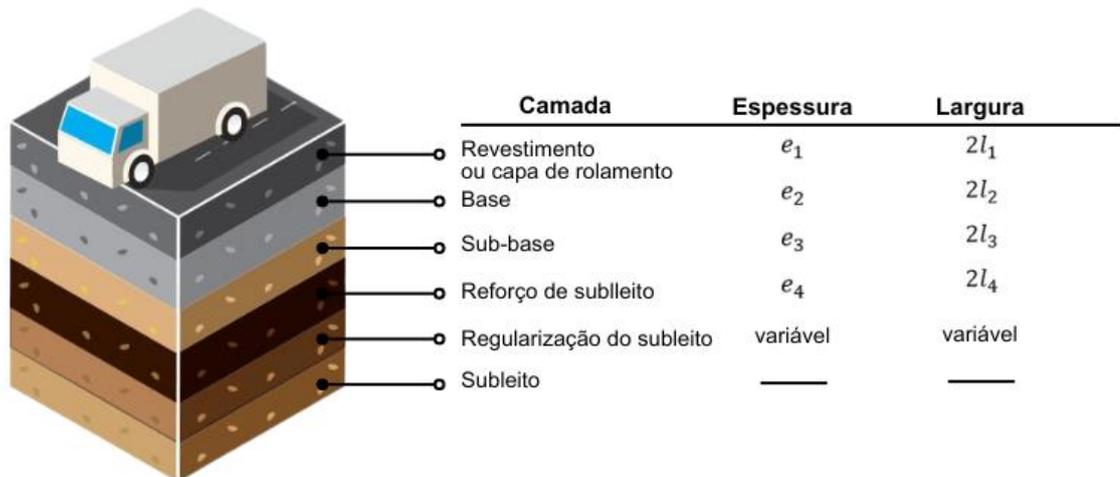
Defeitos de superfície podem surgir tanto precocemente, devido a erros de projeto ou execução, quanto a médio e longo prazo, em decorrência do uso e das condições climáticas. Esses problemas podem resultar de diversos fatores, como erros no projeto, na seleção de materiais, na construção e nas opções de conservação e manutenção. Os tipos de defeitos catalogados pela norma brasileira para calcular o Índice de Gravidade Global (IGG) incluem fissuras, afundamentos, ondulações, exsudação, desgaste, buracos e remendos, sendo parte dos problemas relacionados à deformação permanente atribuída ao revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2022).

A avaliação funcional, essencial para a segurança do tráfego, aborda aspectos como conforto ao dirigir, condição da superfície, interação pneu-pavimento e identificação de defeitos. Já a avaliação estrutural está ligada à capacidade de carga do pavimento, diretamente relacionada ao projeto e dimensionamento. Os defeitos estruturais, resultantes das cargas repetidas, podem ser elásticos ou recuperáveis, como trincamento por fadiga, ou plásticos e permanentes, causados por diversos fatores, como processos de execução inadequados e influência climática (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Uma parcela dos problemas relacionados à deformação permanente e outros defeitos está associada ao revestimento asfáltico. Nas estruturas de pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito desempenham um papel crucial na integridade estrutural. O objetivo da mecânica dos pavimentos é controlar as tensões e deformações na estrutura do pavimento por meio da seleção adequada de materiais e espessuras das camadas constituintes, visando à sua durabilidade (MEDINA e MOTTA, 2015).

Quanto à estrutura dos pavimentos flexíveis, Senço (2008) afirma que “uma seção transversal típica de um pavimento - com todas as camadas possíveis - consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por um dos inúmeros métodos de dimensionamento”. Essa estrutura é exemplificada na Figura 2.

Figura 2 - Seção típico pavimento flexível



Fonte: Adaptado Senço, 2008.

As camadas apresentadas na Figura 2 são definidas por Senço (2008) da seguinte maneira:

- Subleito: é o terreno de fundação do pavimento. Em áreas recém-terraplanadas, sua configuração deve refletir as características finais do terreno. Já em estradas de terra já em uso (há algum tempo) e sujeitas à pavimentação, sua superfície irregular é resultado do desgaste e das intervenções de conservação;
- Regularização do subleito: é uma camada de espessura variável, construída sobre o subleito, com o objetivo de proporcionar as características geométricas desejadas, incluindo a inclinação transversal do pavimento final;
- Reforço do subleito: é uma camada de espessura uniforme construída acima da regularização, com características tecnológicas intermediárias entre a regularização e a sub-base. Apesar do nome, faz parte do pavimento e não da fundação, desempenhando a função da sub-base, que é de distribuir e resistir aos esforços verticais, sem absorvê-los como o subleito faz;
- Sub-base: é uma camada que complementa a base quando não viável construir diretamente sobre a regularização ou o reforço do subleito, seja por questões técnicas ou econômicas. Esse material deve possuir características tecnológicas superiores às do material de reforço e inferiores ao empregado na base;

- e) Base: é a camada projetada para resistir aos esforços verticais causados pelo tráfego e distribuí-los às camadas inferiores. Se o tráfego local for leve, a implementação da sub-base ou do reforço do subleito pode não ser necessária;
- f) Revestimento ou capa de rolamento: é a camada diretamente exposta ao tráfego, idealmente impermeável, projetada para melhorar as condições de conforto e segurança da superfície de rolamento, além de resistir ao desgaste, aumentando a durabilidade da estrutura.

2.3 Pavimento de Baixo Custo

O pavimento de baixo custo não deve ser interpretado como sinônimo de baixa qualidade, pois deve atender aos requisitos técnicos e econômicos padrão para qualquer tipo de pavimento. No entanto, seu custo inicial é consideravelmente menor em comparação com os pavimentos convencionais, podendo, em estradas vicinais, diminuir em até 35%. Além disso, conta com vida útil comprovadamente superior a 30 anos para as camadas de base e sub-base, enquanto a recuperação do revestimento, que inicialmente é feita com tratamento superficial, tem uma vida útil em torno de 9 anos (VILLIBOR E ALVES, 2019).

A conceituação de pavimento de baixo custo, conforme Villibor e Nogami (2009), emprega uma base composta de solo laterítico-agregado de materiais naturais ou misturados com uma pequena porcentagem de agregado, cujos custos de execução são substancialmente menores do que os convencionais, como brita graduada, macadame hidráulico e solo cimento. Esse tipo de pavimento utiliza revestimento asfáltico do tipo tratamento superficial duplo ou triplo, com espessura máxima de 3,00cm sendo, frequentemente, da ordem de 1,50cm e suporta um tráfego máximo do tipo médio, com $N \leq 5 \times 10^6$ solicitações do eixo simples padrão de 80kN na rodovia.

Além das vantagens econômicas, o uso de bases constituídas por solos de comportamento laterítico, oferece benefícios ambientais significativos em comparação com as bases tradicionais como os que empregam bases como solo brita, solo cimento e brita graduada. Essas bases, por serem extraídas de ocorrências naturais, permitem uma recuperação mais fácil das áreas exploradas, com reintegração da vegetação original através da reposição do material orgânico. Por outro lado, as bases tradicionais, que utilizam materiais beneficiados como agregados britados e cimento,

acarretam problemas ambientais sérios, incluindo degradação das áreas exploradas, geração de ruídos e resíduos sólidos, além de custos adicionais com energia e equipamentos para beneficiamento dos materiais (VILLIBOR E ALVES, 2019).

2.4 O Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

O dimensionamento de um pavimento asfáltico envolve a determinação das camadas de reforço do subleito, sub-base, base e revestimento para garantir que suportem, transfiram e distribuam as pressões causadas pela passagem dos veículos sem causar rupturas, deformações excessivas ou desgaste superficial. Embora inicialmente considere-se as cargas como estáticas, o pavimento está sujeito a cargas repetidas, resultando em deformações permanentes e elásticas, que aumentam com o número de solicitações (SENÇO, 2008).

A existência de métodos de dimensionamento distintos é resultado das diversas condições geológicas, ambientais, de tráfego e pedológicas. Os métodos de projeto existentes foram concebidos de duas maneiras distintas: com base nos últimos resultados ou no desempenho observado ao longo do tempo, obtidos pelas experiências em campo (modelos empíricos) ou a partir de teoria elástica considerada adequada para a interpretação dos fenômenos físicos (modelos semiempíricos e semiteóricos) (BALBO, 2007). De forma resumida os métodos podem ser descritos como:

Método empírico – fruto da modelagem estatística da evolução de parâmetros físicos observados nos pavimentos em serviço.

Método semiempírico – fruto da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente.

Método empírico-mecanicista – fruto da calibração de modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e em laboratório (BALBO, 2007, p.377).

2.5 O Método da Resiliência

Em junho de 1982, os engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler apresentaram um procedimento para o projeto de reforço de pavimentos flexíveis, que permite a consideração explícita das propriedades resilientes dos solos e materiais que são comumente utilizados nas estruturas de pavimentos no Brasil. Esse

procedimento posteriormente foi oficializado através do procedimento DNER-PRO 269/94 – TECNAPAV (BRASIL, 2006b).

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (BRASIL, 2006b), o procedimento se baseia em modelos de fadiga de misturas betuminosas, no comportamento resiliente característico de solos finos e materiais granulares, além do cálculo de tensões e deformações que considera a teoria da elasticidade não linear.

O processo de avaliação e projeto de rodovias é composto por várias etapas. Inicialmente, a rodovia é segmentada em unidades homogêneas, levando em conta diversos fatores como tráfego, condições do subleito, deflexão recuperável, estrutura do pavimento e condições superficiais. O parâmetro de tráfego é determinado com base nos critérios de equivalência do Corpo de Engenheiros do Exército Americano. A avaliação das condições do pavimento segue as normas estabelecidas pelo DNIT, sendo a DNIT 007/2003-PRO (Levantamento para Avaliação da Condição de Superfície de Subtrecho Homogêneo de Rodovias de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos para Gerência de Pavimentos e Estudos e Projetos Procedimento) utilizada para identificar áreas defeituosas e a DNIT 005/2003 – TER (Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos Terminologia) para tipos de defeitos. Sondagens são realizadas a cada dois quilômetros, com amostras coletadas e enviadas ao laboratório para ensaios de caracterização, granulometria e CBR (BRASIL, 2006b).

As amostras das sondagens são enviadas ao laboratório para caracterização, análise granulométrica e CBR, classificando os solos em três grupos de resiliência com base no CBR e na porcentagem de silte (S), conforme a Tabela 1 (BRASIL, 2006b).

Tabela 1 - Classificação dos solos

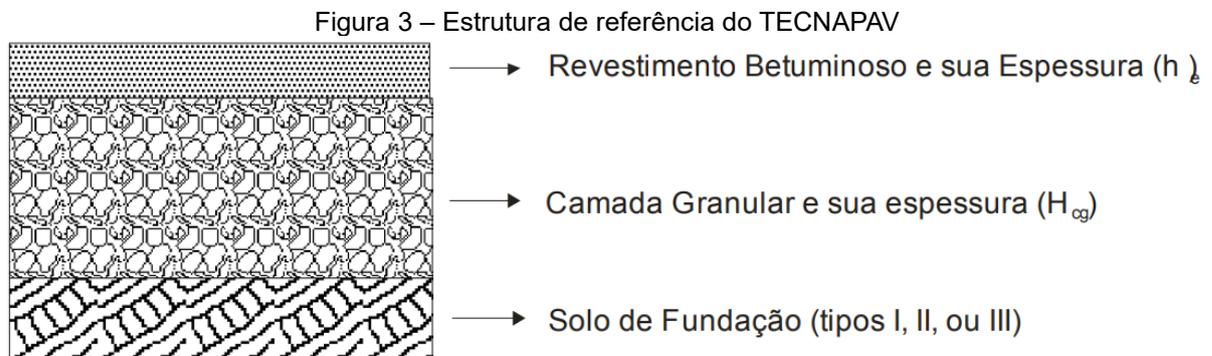
| CBR % | SILTE % | | |
|-------|---------|---------|------|
| | ≤ 35 | 35 á 45 | > 45 |
| ≥ 10 | I | II | III |
| 6 a 9 | II | II | III |
| 2 a 5 | III | III | III |

Fonte: Brasil, 2006^a.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT) determina que o dimensionamento pode ser feito utilizando uma mistura nova para determinar a

espessura necessária para reforçar o pavimento existente, seguindo as seguintes etapas (BRASIL, 2006b):

- a) Cada segmento homogêneo é definido com base na espessura da mistura betuminosa existente (h_e), na deflexão característica ($D_c = x + \sigma$), no trincamento (TR), da espessura da camada granular (H_{cg}) e do tipo de solo da fundação.
- b) Para cada segmento homogêneo, é representada a estrutura de referência, composta por três camadas com suas respectivas espessuras, conforme mostra a Figura 3.



Fonte: Brasil, 2006b.

- c) Cálculo da espessura efetiva (h_{ef}) do revestimento betuminoso através da Equação 1:

$$h_{ef} = -5,737 + \frac{807,961}{D_c} + 0,972 I_1 + 4,101 I_2 \quad (\text{Equação 1})$$

sendo,

D_c : deflexão característica (0,01mm);

I_1 e I_2 : constantes, relacionadas com as características resilientes da 3ª camada da estrutura de referência e de acordo com os seguintes casos:

- i. Espessura da camada granular inferior ou igual a 45cm;
 - a. Quando a 3ª camada for do tipo I: $I_1 = 0$ e $I_2 = 0$;
 - b. Quando a 3ª camada for do tipo II: $I_1 = 1$ e $I_2 = 0$;
 - c. Quando a 3ª camada for do tipo III: $I_1 = 0$ e $I_2 = 1$.
- ii. Espessura da camada granular é maior que 45 cm, adota-se $I_1 = 0$ e $I_2 = 1$;
- iii. Espessura efetiva compreendida entre $0 \leq h_{ef} \leq h_e$;

- a. Se $h_{ef} < 0$, adotar $h_{ef} = 0$;
 - b. Se $h_{ef} > h_e$, adotar $h_{ef} = h_e$
- iv. Se o grau de trincamento do revestimento existente for superior a 50%, considerando as classes das fendas¹ ($FC - 2 + FC - 3 > 80\%$) ou ($FC - 3 > 30\%$), então é conveniente adotar $h_{ef} = 0$ e considerar a solução de recapeamento em camadas integradas de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e Pré-misturado a frio (PMF).

d) Cálculo da deflexão máxima permissível através da Equação 2:

$$\log \bar{D} = 3,148 - 0,188 \log N_p \quad (\text{Equação 2})$$

sendo,

\bar{D} : deflexão máxima permissível (0,01mm);

N_p : número de solicitações de eixo padrão de 8,2 t, durante a vida do projeto.

e) Cálculo da espessura do reforço em concreto asfáltico (HR), conforme Equação 3:

$$HR = - 19,015 + \frac{238,24}{D^{1/2}} - 1,357 h_{ef} + 1,014 I_1 + 4,101 I_2 \quad (\text{Equação 3})$$

f) Segundo o Manual do DNIT, tem-se como soluções de recapamento (BRASIL, 2006b):

- i. Se $3 < HR \leq 12,5\text{cm}$, utilizar camada única de CBUQ ou camadas integradas de CBUQ e pré-misturado se houver muitas fissuras, evitando a propagação de trincas;
- ii. Se $12,5 < HR \leq 25\text{cm}$, recomenda-se a utilização de camadas integradas de CBUQ (H_{ca}) e pré-misturado (H_{pm}) com proporções específicas, sendo:

$$H_{pm} = 0,40 HR$$

$$H_{ca} = HR - H_{pm};$$

¹ Classe das trincas isoladas:

FC-1: trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0 mm.

FC-2: trincas com abertura superior a 1,0 mm e sem erosão nas bordas.

FC-3: trincas com abertura superior a 1,0 mm e com erosão nas bordas.

Classe das trincas interligadas:

As trincas interligadas são classificadas como FC-3 e FC-2 caso apresentem ou não erosão nas bordas (BRASIL, 2006b)

- iii. Se $HR > 25$ cm, evitar camadas só de misturas betuminosas;
- iv. Se $HR \leq 3$ cm, avaliar tratamento superficial ou lama asfáltica.
- v. Para restrições orçamentárias, considerar reforço por etapas.

2.6 O Método CBR

O método CBR é fundamentado no "*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*" escrito por W.J. Turnbull, C. R. Foster e R. G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, adaptado com os resultados obtidos na Pista Experimental da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e modificações pertinentes (DNIT, BRASIL, 2006^a). Nesse método, a avaliação da Capacidade de Suporte do subleito e dos materiais do pavimento é realizada pelo CBR, normatizado pelo DNIT sob a norma DNER-ME 049/94, usando corpos-de-prova indeformados ou moldados em laboratório, conforme a massa específica aparente e umidade especificada para o serviço. Os materiais do subleito devem apresentar uma expansão no ensaio CBR de até 2% e um mínimo 2% de CBR (BRASIL, 2006^a).

No caso de o limite de liquidez ser superior a 25% e/ou índice de plasticidade ser superior a 6%, o material pode ser utilizado na base (desde que satisfaça as demais condições), contanto que o equivalente de areia seja superior a 30. Para um número de repetições do eixo-padrão, durante o período do projeto $N \leq 5 \times 10^6$, materiais com CBR $\geq 60\%$ podem ser utilizados. Os materiais granulares para a base devem atender a uma das faixas granulométricas especificadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Granulometria para base granular

| Tipos | Para $N > 5 \times 10^6$ | | | Para $N < 5 \times 10^6$ | | | Tolerâncias da faixa de projeto |
|-----------------|---------------------------|-------|-------|--------------------------|--------|--------|---------------------------------|
| | A | B | C | D | E | F | |
| Peneiras | % em peso passando | | | | | | |
| 2" | 100 | 100 | - | - | - | - | ± 7 |
| 1" | - | 75-90 | 100 | 100 | 100 | 100 | ± 7 |
| 3/8" | 30-65 | 40-75 | 50-85 | 60-100 | - | - | ± 7 |
| Nº 4 | 25-55 | 30-60 | 35-65 | 50-85 | 55-100 | 10-100 | ± 5 |
| Nº 10 | 15-40 | 20-45 | 25-50 | 40-70 | 40-100 | 55-100 | ± 5 |
| Nº 40 | 8-20 | 15-30 | 15-30 | 25-45 | 20-50 | 30-70 | ± 2 |
| Nº 200 | 2-8 | 5-15 | 5-15 | 10-25 | 6-20 | 8-25 | ± 2 |

Fonte: Brasil, 2006^a.

Para o dimensionamento do pavimento são considerados os seguintes aspectos:

- a) Tráfego: o pavimento é dimensionado com base no número equivalente (N) de operações de um eixo padrão com carga de 8,2t (18.000 lb) ao longo do período de projeto selecionado. Esse fator, pode ser influenciado por vários outros, sendo determinado por índices diretamente ligados ao volume de tráfego na rodovia a ser ampliada ou construída, sendo esse um parâmetro volátil (BRASIL, 2006^a). Para calcular isso, considera-se o volume médio (Vm) no ano de abertura, no sentido mais solicitado, com uma taxa de crescimento do tráfego (t%) anualmente, em progressão aritmética (BRASIL, 2006^a).
- b) Coeficiente de equivalência estrutural: as inequações, onde a incógnita K representa o coeficiente de equivalência estrutural do material da camada em questão, conforme Tabela 3 (BRASIL, 2006^a).

$$RK_R + BK_B \geq H_{20}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_s \geq H_n$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_s + h_n K_{Ref} \geq H_m \quad \text{(Equação 4)}$$

Tabela 3 – Coeficiente de equivalência estrutural

| Componentes do pavimento | K |
|---|-------------|
| Base ou revestimento de concreto betuminoso | 2,00 |
| 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 à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm | 1,70 |
| Idem, com resistência à compressão a dias entre 45 kg/cm e 28 kg/cm | 1,40 |
| Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm | 1,20 |

* Pesquisas futuras podem justificar mudanças nestes coeficientes, designados, genericamente por: revestimento (KR); base (KB); sub-base (KS) e reforço (KRef).

Fonte: Brasil, 2006^a.

- c) Espessura de revestimento: conforme apresentado na Tabela 4.

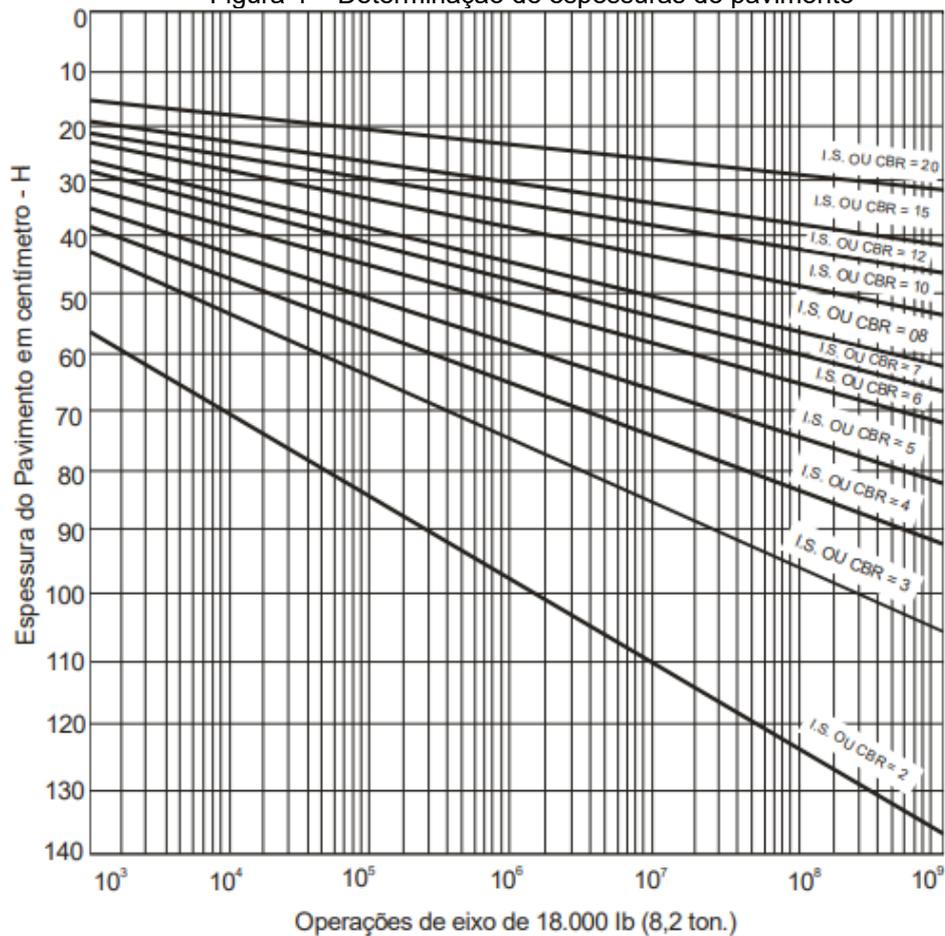
Tabela 4 – Espessura mínima de revestimento betuminoso

| Espessura mínima de revestimento betuminoso | N |
|---|-------------------------------|
| Tratamentos superficiais betuminosos | $N \leq 10^6$ |
| Revestimentos betuminosos com 5,00cm de espessura | $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$ |
| Concreto betuminoso com 7,50cm de espessura | $5 \times 10^6 < N \leq 10^7$ |
| Concreto betuminoso com 10,00cm de espessura | $10^7 < N \leq 5 \times 10^7$ |
| Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura | $N > 5 \times 10^7$ |

Fonte: Brasil, 2006^a.

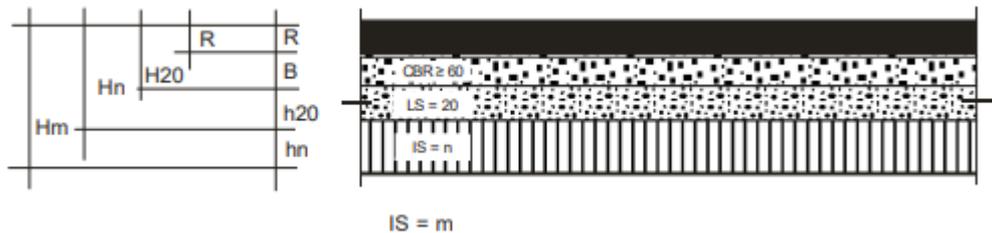
- d) Dimensionamento do pavimento: utiliza-se o ábaco da Figura 4 para determinar a espessura total do pavimento, bem como de cada uma das suas camadas, com base no CBR e no número N. Assume-se sempre que há uma adequada drenagem superficial e que o nível do lençol freático foi rebaixado pelo menos 1,50m em relação ao greide de regularização (BRASIL, 2006^a). A Figura 5 apresenta um esquema das camadas do pavimento para cálculo, onde ***Hm*** representa a espessura total do pavimento necessário para proteção do material, ***Hn*** indica o reforço do subleito, quando necessário, H_{20} e h_{20} são as espessuras da camada de pavimento sobre a sub-base e a sub-base, respectivamente, enquanto ***R*** e ***B*** indicam as espessuras de revestimento e base. Após determinar as espessuras ***Hm***, ***Hn***, H_{20} , pelo ábaco da Figura 4, e ***R*** pela Tabela 5, as espessuras de base (***B***), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n), são obtidas pela resolução sucessiva das Equações 4.

Figura 4 – Determinação de espessuras do pavimento



Fonte: Brasil, 2006^a.

Figura 5 – Dimensionamento de pavimento



Fonte: Brasil, 2006^a.

2.7 O Método da África do Sul

O Método Mecanístico-Empírico para Dimensionamento de Pavimentos da África do Sul - *South African Mechanistic-Empirical Design Method (SAMDM)* é apresentado no *South African Pavement Engineering Manual (SAPEM, 2014)*. Inicialmente, ele classifica as estradas de acordo com a sua importância e nível de serviço que pretendem atingir, conforme Tabela 5. Dessa forma, o período de dimensionamento é então definido de acordo com a categoria da estrada.

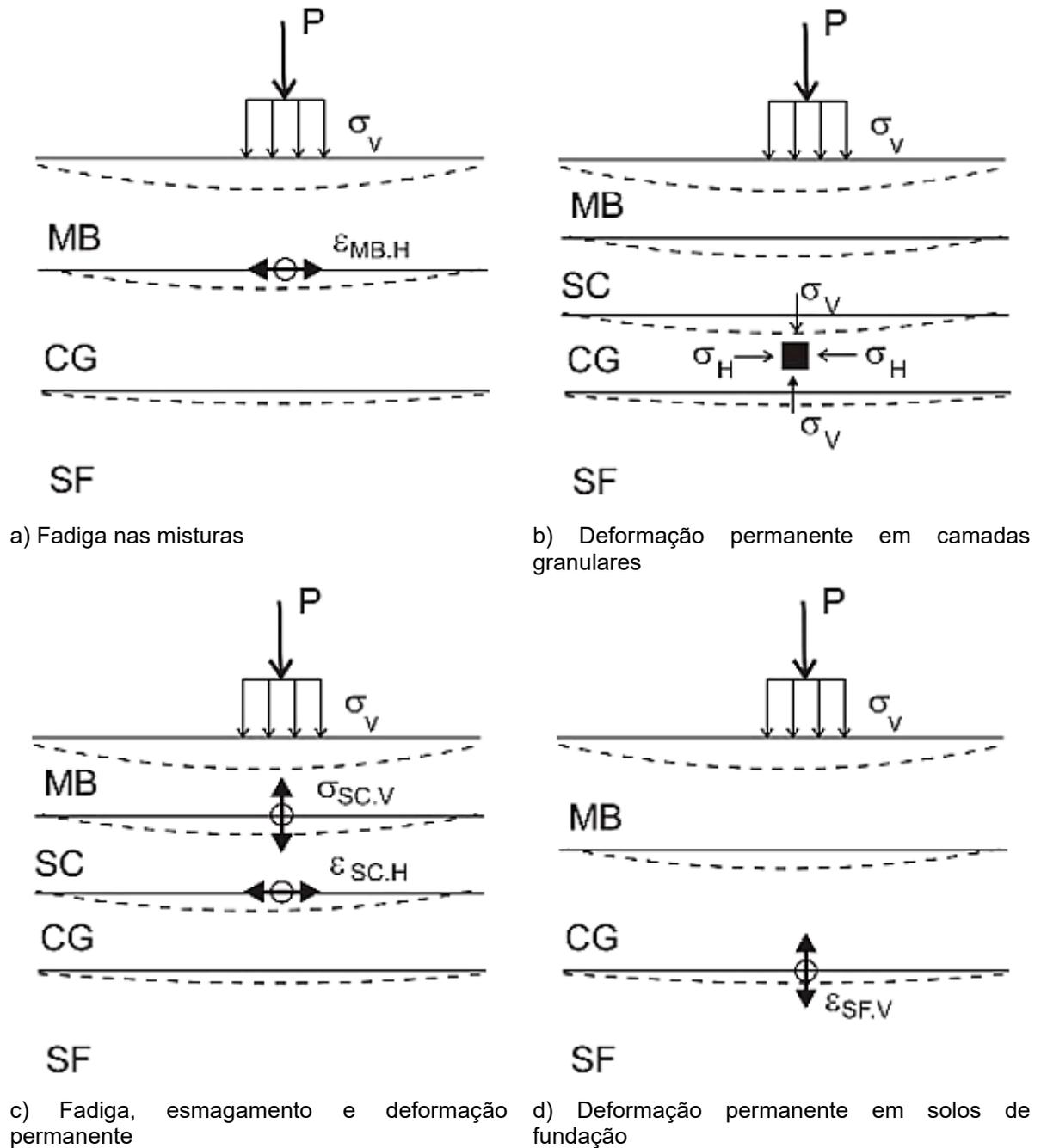
Tabela 5 – Categorias de estrada SAMDM

| Categoria | A | B | C | D |
|--|---------------------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Descrição | Autoestradas e Itinerários principais | Via coletoras e estradas rurais | Estradas rurais de tráfego baixo | Estradas de acesso rural |
| Importância | Muito importante | Importante | Pouco importante | Pouco importante |
| Nível de serviço | Muito alto | Alto | Moderado | Moderado |
| Características Típicas do Pavimento | | | | |
| Confiança aproximada (%) | 95,00 | 90,00 | 80,00 | 50 ¹ |
| Extensão que excede o limite após o dim. (%) | 5,00 | 10,00 | 20,00 | 50,00 |
| Nº de passagens no horizonte por eixo padrão | 3 a 100 em 20 anos | 0,30 a 10 dependendo do dimensionamento | <3 dependendo do dimensionamento | <1 dependendo do dimensionamento |
| Classe de tráfego | ES10 a ES100 | ES1 a ES10 | ES0,03 a ES3 | ES0,003 a ES1 |
| Tráfego diário | >4.000 | 600 a 10.000 | <600,00 | <500,00 |
| Índice IRI | | | | |
| Construção | 2,40 a 1,60 | 2,90 a 1,60 | 3,50 a 2,40 | 4,20 a 2,40 |
| Terminal | 3,50 | 4,20 | 4,50 | 5,10 |
| Afundamento de Trilha de Roda no Pavimento (mm) | | | | |
| Aviso | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| Terminal | 20,00 | 20,00 | 20,00 | 20,00 |

¹O valor de 50% significa que se está a projetar para uma situação média
Fonte: Sanral, 2014.

Os critérios de dimensionamento adotados são baseados no SAMDM proposto por Theyse *et al.* (1996), considerando aspectos como deformação permanente para solos de fundação, fadiga em misturas betuminosas, fadiga e esmagamento em materiais com ligantes hidráulicos e deformação permanente em materiais granulares (Figura 6) (Theyse *et al.*, 1996 *apud* SANRAL, 2014).

Figura 6 – Dimensionamento conforme critérios de material especificados no SAMDM



Fonte: Sanral, 2014.

O critério de dimensionamento para solos de fundação aborda a limitação das deformações permanentes para evitar cavidades na superfície do pavimento. Essa limitação é determinada pela extensão vertical de compressão na parte superior do solo de fundação. São estabelecidos dois critérios com base no valor máximo de deformação permanente aceitável no topo do solo de fundação ao final do período de vida útil, sendo estes de 10 mm ou 20 mm. A avaliação da deformação permanente está diretamente relacionada à compressão vertical na superfície da camada do solo de fundação ($\varepsilon_{v.sf}$), sendo expressa conforme Equação 5 (Theyse *et al.*, 1996 *apud* SANRAL, 2014).

$$N = 10^{(A-10 \log(\varepsilon_{v.sf}))} \quad (\text{Equação 5})$$

sendo,

N : número de aplicações de carga do eixo padrão;

A : constante dada em função da categoria da estrada e do valor terminal de deformação permanente (Tabela 6).

Tabela 6 – Constante (A) para o critério de deformação permanente do solo de fundação

| Categoria | Deformação permanente limite (A) | |
|-----------|----------------------------------|-------|
| | 10 mm | 20 mm |
| 95% (A) | 33,30 | 36,30 |
| 90% (B) | 33,38 | 36,38 |
| 80% (C) | 33,47 | 36,47 |
| 50% (D) | 33,70 | 36,70 |

Fonte: Sanral, 2014.

O critério de fadiga em misturas betuminosas é determinado pela extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas, especialmente em áreas mais propensas ao tracionamento. Critérios distintos são estabelecidos para camadas espessas e finas. Seu objetivo é limitar a abertura de pequenas fendas por fadiga e, conseqüentemente, prevenir o surgimento de fendas na superfície do pavimento. Esse critério de dimensionamento é definido em função da extensão horizontal na base da camada em misturas betuminosas (*et. mb*), conforme a Equação 6 (SANRAL, 2014).

$$N = SF \cdot 10^{\alpha \left(1 - \frac{\log(\epsilon t m b)}{\beta}\right)} \quad (\text{Equação 6})$$

sendo,

N : número de aplicações de carga do eixo padrão;

α e β : constantes, dadas em função da categoria da estrada, do tipo de misturas, da sua espessura e do módulo de deformabilidade das camadas de base (Tabela 7);

SF : fator de segurança que tem em conta a espessura da camada em misturas betuminosas (Equação 7).

$$SF = \begin{cases} 1 & \text{se } e < 25 \text{ mm} \\ 0,0489 e - 0,2225 & \text{se } e \geq 25 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{Equação 7})$$

sendo,

e : espessura da camada em mm

Sendo assim, a Equação 7 resulta que quanto mais espessa for a camada, maior é a resistência à propagação de fendas (SANRAL, 2014).

Tabela 7 – Constantes (α e β) para o critério de fadiga em misturas betuminosas

| Camada de desgaste - fina (< 50 mm) | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------|----------|---------|--------------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Nível de confiança | Mistura betuminosa contínua | | | | Mistura betuminosa descontínua | | | | | |
| | α | | β | | α | | β | | | |
| 95% (A) | 17,40 | | 3,40 | | 15,79 | | 3,705 | | | |
| 90% (B) | 17,46 | | 3,41 | | 15,85 | | 3,719 | | | |
| 80% (C) | 17,54 | | 3,42 | | 16,93 | | 3,736 | | | |
| 50% (D) | 17,71 | | 3,46 | | 16,09 | | 3,774 | | | |
| Camada de base - espessa (> 75 mm) | | | | | | | | | | |
| Módulo de deformabilidade (MPa) | | | | | | | | | | |
| Nível de confiança | 1000 | | 2000 | | 3000 | | 5000 | | 8000 | |
| | α | β | α | β | α | β | α | β | α | β |
| 95% (A) | 16,44 | 3,378 | 16,09 | 3,357 | 15,78 | 3,334 | 15,52 | 3,317 | 15,086 | 3,227 |
| 90% (B) | 16,81 | 3,453 | 16,43 | 3,428 | 16,11 | 3,403 | 15,73 | 3,362 | 15,296 | 3,272 |
| 80% (C) | 17,25 | 3,543 | 16,71 | 3,487 | 16,26 | 3,435 | 15,83 | 3,383 | 15,39 | 3,291 |
| 50% (D) | 17,87 | 3,671 | 17,17 | 3,583 | 16,68 | 3,524 | 16,10 | 3,441 | 15,65 | 3,346 |

Fonte: Adaptado de Sanral, 2014.

Os materiais estabilizados com ligantes hidráulicos são avaliados levando em consideração três critérios diferentes: o critério de fadiga, o critério de início de esmagamento e o critério de esmagamento avançado. O critério de dimensionamento de fadiga para esses materiais visa limitar o surgimento de pequenas fendas devido à

fadiga e, conseqüentemente, evitar o aparecimento de fendas na superfície do pavimento. Esse critério é estabelecido em função da extensão horizontal na base da camada estabilizada com ligantes hidráulicos ($\varepsilon_{t.lh}$), conforme Equação 8 (SANRAL, 2014).

$$N = SF \cdot 10^{c \left(1 - \frac{\varepsilon_{t.lh}}{d\varepsilon_{ultimo}} \right)} \quad (\text{Equação 8})$$

sendo,

N : número de aplicações de carga do eixo padrão;

c e d : constantes, dadas em função da categoria da estrada (Tabela 8);

ε_{ultimo} : extensão de rotura (Tabela 9);

SF : fator de segurança que tem em conta a espessura da camada estabilizada com ligantes hidráulicos (Equação 9);

$$SF = \begin{cases} 1 & se & e < 102 \text{ mm} \\ 10^{(0,00285 e - 0,293)} & se & 102 \text{ mm} \leq e \leq 419 \text{ mm} \\ 8 & se & e > 419 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{Equação 9})$$

sendo,

e : espessura da camada em mm. Assim como nas misturas betuminosas de base, a resistência à propagação de fendas para a superfície aumenta com o aumento da espessura da camada (SANRAL,2014).

O critério de dimensionamento para o início de esmagamento de materiais estabilizados com materiais hidráulicos tem por objetivo identificar quando o fendilhamento por compressão começa a ocorrer, resultando no surgimento de deformações permanentes na superfície do pavimento. Da mesma forma, o critério de esmagamento avançado desses materiais busca limitar o surgimento de deformação permanente por esmagamento generalizado do material. Ambos são definidos em função da tensão vertical (σ_v), sendo o primeiro na base da camada estabilizada ($\sigma_{v.lh}$) e o segundo no topo da camada estabilizada com ligantes hidráulicos ($\sigma_{t.lh}$), conforme apresenta a Equação 10 (SANRAL, 2014).

$$N = 10^{a \left(1 - \frac{\sigma_v}{b\sigma_c} \right)} \quad (\text{Equação 10})$$

sendo,

N : número de aplicações de carga do eixo padrão;

a e b : constantes, dadas em função da categoria da estrada (Tabela 8);

σ_c : tensão de compressão simples do material (Tabela 9).

Tabela 8 – Constantes para o critério de fadiga

| Categoria | Esmagamento | | Esmagamento | | Fadiga | |
|-----------|-------------|------|-------------|------|--------|------|
| | (início) | | (avançado) | | C | d |
| | A | B | a | b | | |
| 95% (A) | 7,386 | 1,09 | 8,064 | 1,19 | 6,72 | 7,49 |
| 90% (B) | 7,506 | 1,10 | 8,184 | 1,20 | 6,84 | 7,63 |
| 80% (C) | 7,706 | 1,13 | 8,384 | 1,23 | 6,87 | 7,66 |
| 50% (D) | 8,216 | 1,21 | 8,894 | 1,31 | 7,06 | 7,86 |

Fonte: Sanral, 2014.

Tabela 9 – Valores de referência das características mecânicas de solos estabilizados com cimento

| Classe inicial (não fendilhada) | E (MPa) | $\epsilon_{ultimo} \times 10^{-6}$ | σ_c (MPa) | Classe final | E |
|---------------------------------|---------|------------------------------------|-----------------------|---------------------|-------|
| | | | | (estado fendilhado) | (MPa) |
| C3 | 2000 | 125 | 1,5 a 3,0 (2,25) | EG4 | 300 |
| C4 | 1500 | 145 | 0,75 a 1,5 (1,125) | EG5 | 200 |

σ_c (MPa) - Tensão de compressão simples aos 7 dias para 100% da baridade máxima seca

Fonte: Sanral, 2014.

O SAMDM funciona determinando a capacidade estrutural de cada camada no pavimento. A capacidade estrutural do pavimento é determinada pela camada com menor vida útil, denominada camada crítica. Conforme mencionado no SAPEM, o único critério relacionado à falha estrutural da camada tratada com ligantes hidráulicos é o critério de fadiga, os critérios relacionados ao esmagamento não sinalizam a falha do material, mas sim um potencial efeito na deformação permanente da superfície. Porém, eles devem ser considerados no projeto de pavimentos rodoviários (SANRAL, 2014).

O critério de dimensionamento para os materiais granulares da camada de base e sub-base visa controlar as deformações permanentes excessivas nesses materiais, evitando assim a formação de afundamento de trilha de roda no pavimento do pavimento. Esse critério compara o estado de tensão de corte com os parâmetros de resistência ao corte, como coesão e ângulo de atrito, utilizando o modelo simplificado de Mohr-Coulomb. A determinação do critério de ruptura é feita com base no fator de segurança ao corte, conforme especificado na Equação 11 (SANRAL, 2014).

$$N = 10^{(\alpha SF + \beta)} \quad (\text{Equação 11})$$

sendo,

N : número de aplicações de carga do eixo padrão;

α e β : constantes, dadas em função da categoria da estrada e do teor de humidade da camada granular (Tabela 10);

SF : fator de segurança dado pelo quociente entre o valor de corte resistente e o valor de corte, conforme Equação 12.

$$SF = \frac{\sigma_{3.cg} \left(K \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) + 2 K C \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right)}{\sigma_{1.cg} - \sigma_{3.cg}} = \frac{\sigma_{3.cg} \phi_p + C_p}{\sigma_{1.cg} - \sigma_{3.cg}} \quad (\text{Equação 12})$$

sendo,

$\sigma_{1.cg}$ e $\sigma_{3.cg}$: tensões principais I e III de cálculo atuantes a meio da camada granular (adotando-se a convenção de compressão positiva);

ϕ_p e C_p : termos angulares e de coesão (Tabela 11);

C : coesão

ϕ : ângulo de atrito

K : termo dependente do grau de saturação da camada granular, apresentado na Equação 13.

$$K = \begin{cases} 0,65 & \text{se} & \text{saturado} \\ 0,80 & \text{se} & \text{moderado} \\ 0,95 & \text{se} & \text{normal} \end{cases} \quad (\text{Equação 13})$$

Se a tensão principal III ($\sigma_{3.cg}$) for negativa (tração), o círculo de Mohr usado para calcular o fator de segurança é deslocado, anulando o valor de $\sigma_{3.cg}$. O valor da tensão principal I corrigida ($\sigma_{1.cg}$) é aumentado do valor absoluto de $\sigma_{3.cg}$, mantendo-se assim o valor da tensão deviatória ($\sigma_{1.cg} - \sigma_{3.cg}$) (SANRAL, 2014).

Tabela 10 – Constantes para o critério de deformações permanentes por corte em materiais granulares

| Categoria | α | β |
|-----------|----------|----------|
| 95% (A) | 2,605122 | 3,480098 |
| 90% (B) | 2,605122 | 3,707667 |
| 80% (C) | 2,605122 | 3,983324 |
| 50% (D) | 2,605122 | 4,510819 |

Fonte: Sanral, 2014

Tabela 11 – Valores de ângulo de atrito e coesão a adotar no critério de deformações permanentes por corte em materiais granulares

| Material | Seco | | Moderado | | Úmido | |
|----------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | ϕ_p | C_p (MPa) | ϕ_p | C_p (MPa) | ϕ_p | C_p (MPa) |
| G1 | 8,61 | 0,392 | 7,03 | 0,282 | 5,44 | 0,171 |
| G2 | 7,06 | 0,303 | 5,76 | 0,221 | 4,46 | 0,139 |
| G3 | 6,22 | 0,261 | 5,08 | 0,188 | 3,93 | 0,115 |
| G4 | ,550 | 0,223 | 4,40 | 0,160 | 3,47 | 0,109 |
| G5 | 3,60 | 0,143 | 3,30 | 0,115 | 3,17 | 0,083 |
| G6 | 2,88 | 0,103 | 2,32 | 0,084 | 1,76 | 0,064 |
| EG4 | 4,02 | 0,140 | 3,50 | 0,120 | 3,12 | 0,100 |
| EG5 | 3,37 | 0,120 | 2,80 | 0,100 | 2,06 | 0,080 |
| EG6 | 1,63 | 0,100 | 1,50 | 0,080 | 1,40 | 0,060 |

Fonte: Sanral, 2014.

2.8 O Método MeDiNa

O MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional, é um software projetado para verificar e dimensionar estruturas de pavimentos sob uma abordagem mecanística-empírica, utilizando a rotina de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). Esse programa é resultado de uma parceria 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, em colaboração com o Centro de Pesquisas da Petrobras e várias universidades brasileiras (FRANCO E MOTTA, 2020).

Segundo Franco e Motta (2020) para a realização do dimensionamento de uma nova estrutura com o auxílio do MeDiNa são exigidos alguns critérios:

- a) Espessura mínima de 5cm e máxima de 15cm para camadas asfálticas;
- b) Espessura máxima de 25cm para camadas estabilizadas e 40cm para as demais camadas;
- c) Deformação permanente de uma camada deve ser inferior a 5% de sua espessura;
- d) Deformação máxima do subleito limitada a 5mm;
- e) Em caso de existência de camada estabilizada, a deflexão da camada imediatamente abaixo deve ser inferior a 70 (0,01 mm).

Para a realização do dimensionamento empregando-se o método é necessário inserir no software as seguintes informações:

- a) **Dados de tráfego:** o sistema converte o espectro de cargas e configurações de eixos em um valor de equivalência de passagens de um padrão de eixo padrão (N). Para determinar esse valor, ele utiliza diversos eixos pré-definidos no software, assumindo uma distribuição uniforme da carga da roda. Esse cálculo depende do volume médio diário (VMD) e do fator de veículos (FV), requerendo o coeficiente de equivalência de carga para calcular o coeficiente de veículos. Os tipos de vias são categorizados conforme a hierarquia dos sistemas funcionais estabelecidos pelo DNIT, com critérios e confiabilidade resumidos. No processo de cálculo do coeficiente veicular (DNIT), o projetista seleciona o eixo desejado e o inclui na tabela, permitindo o cálculo automático dos coeficientes de carga, do veículo individual e do veículo total. Por fim, considera-se a distribuição do tráfego nas faixas de rolamento, detalhando-a para cada direção da via conforme recomendado pelo DNIT (FRANCO E MOTTA, 2020).
- b) **Dados dos Materiais:** eles são segregados em materiais asfálticos, estabilizados, granulares e constituintes do subleito, e considera-se que os dados de entrada foram obtidos por meio desses ensaios para a caracterização desses materiais, conforme a Tabela 12 (FRANCO E MOTTA, 2020).

Tabela 12 – Ensaio e normas utilizadas no método MeDiNa

| Descrição | Norma | Resumo |
|--|------------------|--|
| Mistura asfálticas – Determinação do módulo de resiliência | DNIT 135/2018-ME | Define a aparelhagem e condições operacionais para obtenção dos resultados |
| Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada | DNIT 183/2018-ME | Compara o tráfego real para prever a área trincada |
| Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência a deformação permanente | DNIT 184/2018-ME | Parâmetro na designação internacional denomina-se <i>Flow Number</i> (FN) |
| Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral | DNIT 136/2018-ME | Determina a resistência à tração indireta por compressão diametral de misturas asfálticas |
| Solos – Determinação do módulo de resiliência | DNIT 134/2018-ME | Usado para previsão do desempenho dos materiais e para calcular a resposta estrutural do pavimento |
| Solos – Determinação da deformação permanente | DNIT 179/2018-IE | Define propriedades mecânicas essenciais para prever desempenho e calcular a resposta estrutural |
| Materiais estabilizados quimicamente – Determinação do módulo de resiliência | DNIT 181/2018-ME | Análise do comportamento resiliente de materiais de pavimentação estabilizados quimicamente. |
| Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente | DNIT 434/2021-ME | Usada em camadas de base ou sub-base estabilizadas quimicamente para prever rachaduras em pavimentos asfálticos, comparando com o número N do projeto. |

Fonte: Elaborado pela autora com base em Franco e Motta (2020).

- i. Caracterização dos materiais asfálticos: as espessuras das camadas asfálticas são limitadas entre 5cm e 15cm, sendo que a estrutura de um pavimento pode ser composta por mais de uma camada, se necessário. Além disso, dados como tipo de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), massa específica, resistência à tração, teor de asfalto, volume de vazios, faixa granulométrica, abrasão Los Angeles e coeficiente de Poisson são considerados na composição das misturas asfálticas, sendo este último usualmente adotado com valor 0,30 conforme o DNIT 135/2018-ME (FRANCO E MOTTA, 2020).
 - ii. Caracterização dos materiais estabilizados: solicita diversos dados para caracterização dos materiais estabilizados, incluindo o coeficiente de Poisson, módulo de resiliência, grupo de classificação MCT, teor de cimento, resistência à tração, massa específica, umidade ótima, energia de compactação e análise de fadiga. Embora nem todos sejam essenciais para o dimensionamento da estrutura, a precisão aumenta com a caracterização detalhada dos materiais (FRANCO E MOTTA, 2020).
 - iii. Caracterização dos materiais granulares e de subleito: os dados de entrada necessários para esse item incluem o coeficiente de Poisson, módulo de resiliência, massa específica, umidade ótima, energia de compactação, abrasão Los Angeles e deformação permanente. Esses materiais podem ser usados em camadas com espessuras variando de 10,00cm a 40,00cm (FRANCO E MOTTA, 2020).
- c) Análise da estrutura e desempenho: Franco e Motta (2020) consideram nesta análise os danos relacionados aos critérios de ruptura por deformação plástica e por fadiga, os quais são mais comuns nos pavimentos do Brasil. Os cálculos dos dados acumulados são realizados através de modelos de desempenho adotados neste método, os quais estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Modelos de previsão de desempenho adotados no método MeDiNa

| Camada | Análise | Equação | Variáveis |
|--------------|-----------------------|---|--|
| Asfáltica | Fadiga | $N_{fad} = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2}$ | k_1 e k_2 – parâmetros da curva de fadiga; $\varepsilon_t^{k_2}$ – def. específica resiliente de tração |
| Estabilizada | Fadiga | $N_{fad} = 10^{(k_1+k_2 \cdot \%RF)}$ | N_{fad} – N° de ciclos de aplicação de carga à ruptura; $\%RF$ – razão entre tensão de tração aplicada e a resistência à tração à ruptura estática do material; k_1 e k_2 – parâmetros experimentais |
| Granular | Deformação permanente | $\varepsilon_p^{esp} = \omega_1 \cdot \sigma_3^{\omega_2} \cdot \sigma_d^{\omega_3} \cdot N^{\omega_4}$ | ε_p^{esp} – deformação permanente específica; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ e ω_4 – parâmetros; σ_d – tensão desvio; N – número de ciclos de aplicação de cargas |

Fonte: Franco e Motta (2020) *apud*. Souza (2021)

- d) Relatórios: de acordo com Franco e Motta (2020), além de ser possível obter um relatório completo da análise, que apresenta todas as informações utilizadas no dimensionamento ou análise da estrutura, existem também três tipos de relatórios que podem ser consultados, são eles:
- i. Evolução mensal dos danos: apresenta os resultados relacionados ao comportamento da área trincada, deformação permanente total e módulo sigmoidal quando houver camadas cimentadas na estrutura;
 - ii. Resumo da deformação permanente: apresenta um resumo com a contribuição de cada camada na deformação permanente total;
 - iii. Bacias de deflexão: apresenta as bacias de deflexão, medidas em 10^{-2} mm no topo de cada camada e no topo do subleito, calculadas através dos parâmetros que simulam os equipamentos *Falling Weight Deflectometer* e a Viga Benkelman.
- e) Alertas: são emitidos quando não é possível dimensionar o pavimento ou após a avaliação inicial. Caso durante o dimensionamento, um alerta não seja resolvido mesmo com os critérios de Área Trincada e Deformação Permanente sendo atingidos, o programa altera a análise para a avaliação

da estrutura e fornece os motivos nos alertas, sendo os principais motivos apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Principais motivos dos Alertas e sugestões de resolução no método MeDiNa

| Alerta | Sugestão |
|--|--|
| a espessura atingiu o máximo permitido para a análise (15,00cm para as camadas asfálticas, 25,00cm para as estabilizadas e 40,00cm para as demais) | a estrutura precisa ser mais robusta inclua uma camada a mais na estrutura, preferencialmente asfáltica ou estabilizada |
| a camada apresentou deformação permanente acima do limite de 5% | o material da camada não possui bom comportamento à deformação permanente substitua o material da camada, ou altere a sua espessura, ou inclua outra camada acima com outro material |
| o Subleito apresentou deformação permanente acima do limite de 5mm | o material do Subleito não possui bom comportamento à deformação permanente inclua uma camada de reforço com material de boa qualidade |
| a camada de suporte da camada estabilizada possui uma deflexão superior a 70 (0,01mm) | o material da camada que suporta a camada estabilizada não possui boa qualidade inclua uma camada nova de melhor qualidade para melhorar o suporte da camada estabilizada |
| módulo da camada estabilizada decaiu rapidamente em um período | o programa MeDiNa tenta solucionar o problema no dimensionamento ocorre por conta da fadiga elevada do material estabilizado |
| tráfego elevado para a estrutura proposta | o programa MeDiNa tenta solucionar o problema no dimensionamento ocorre por conta da fadiga elevada do material asfáltico |

Fonte: Franco e Motta, 2020.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados como subsídio os dados de ensaios disponíveis na tese de doutorado de Nervis (2016), que aborda os mecanismos de degradação de pavimentos com revestimento primário e apresenta um amplo conjunto de informações detalhadas sobre as camadas de subleito, permitindo a aplicação de métodos de dimensionamento, como o método da Resiliência, método CBR, método da África do Sul e método MeDiNa. A escolha dessa tese justifica-se pela dificuldade de encontrar trabalhos com tamanha diversidade de dados experimentais. O objetivo principal foi simular esses métodos em uma via de baixo volume de tráfego, não para aplicação prática direta nas amostras estudadas, mas para conduzir uma análise comparativa que identificasse as abordagens mais adequadas para contextos semelhantes. Essa simulação avaliou a eficácia técnica, bem como a viabilidade econômica e ambiental dos métodos, fornecendo subsídios para decisões informadas em futuros projetos rodoviários.

No estudo de Nervis (2016) foi implantado um trecho experimental no interior de São Gabriel – RS, caracterizado por uma geomorfologia de relevo aplainado e suave ondulado, com predominância de vegetação do bioma Pampa. Geologicamente, o trecho experimental se insere em depósitos aluviais de areia grossa a fina, cascalho e sedimento siltico-argiloso. O subleito é constituído por areia siltosa, argila siltosa e areia média, conforme Figura 7. Sobre ele foi implantado o revestimento primário constituído de uma camada de argila siltosa e sobre ela uma camada de saibro.

Figura 7 – Seção típica da estrutura do pavimento analisado



Fonte: Nervis (2016)

Dessa forma, a pesquisa desenvolvida é classificada como descritiva, de natureza aplicada, visando comparar e analisar os diversos métodos de dimensionamento de pavimentos para vias de baixo volume de tráfego, considerando modelos teóricos e analíticos. A verificação foi conduzida de forma quantitativa e utilizou como subsídio os dados de ensaios disponíveis na tese de doutorado de Nervis (2016). Para o emprego das técnicas de dimensionamento de pavimentos flexíveis acima mencionadas, foram empregadas ferramentas como Excel e softwares específicos para a realização dos cálculos.

3.1 Dados para Análise no Estudo

A seguir, são apresentados os ensaios de campo (itens **a** ao item **c**) e de laboratório (itens **d** ao **i**) realizados na pesquisa mencionada, os quais são aplicáveis a este estudo:

- a) Ensaios de frasco de areia e de determinação de umidade;
- b) Ensaio DCP;
- c) Levantamento de deflexões;
- d) Ensaios de caracterização;

- e) Ensaios de classificação MCT e voltados à aplicação da especificação expedita de materiais para vias não pavimentadas – 4ª aproximação (D'ÁVILA, HAX e FREITAS, 2008);
- f) Ensaios de compactação, ISC e expansão;
- g) Calibração do equipamento DCP;
- h) Ensaios de cisalhamento direto;
- i) Ensaios triaxiais de carga repetida.

Alguns dos resultados dos ensaios acima listados foram separados para a realização deste trabalho. Assim, os parâmetros essenciais para este estudo foram meticulosamente compilados e estão detalhadamente apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados de ensaios utilizados para os dimensionamentos

| Descrição | Método | Valor | Unidade | Observações |
|---|-----------------------------|-------|-------------------|---|
| Porcentagem de Silte | Met. da Resiliência | 52 | % | Material: Areia Siltosa |
| ISC Sub-base | CBR | 8 | % | Material: Saibro |
| ISC Reforço do subleito | CBR | 14 | % | Material: Argila |
| ISC Subleito | CBR e Met. da Resiliência | 19 | % | Material: Areia Siltosa |
| Coefficientes – Módulo de Resiliência (σ^3) | CBR | 50,20 | kPa | Material: Areia Siltosa |
| Coefficiente de equivalência estrutural (K_r) | CBR | 2,00 | | Componentes do pavimento |
| Coefficiente de equivalência estrutural ($K_b / K_s / K_{ref}$) | CBR | 1,00 | | camadas granulares |
| Deflexão característica | Met. Resiliência | 113,3 | mm | Valor considerando pista pronta (média + desvio padrão) |
| Grau de Saturação (S) | Met. África do Sul | 92 | % | Material: Saibro |
| Massa específica | MeDiNa e Met. África do Sul | 1,654 | | Material: Argila |
| Resistência a tração | MeDiNa | 1,881 | g/cm ³ | Material: Areia Siltosa |
| Coefficiente de Poisson (μ) | MeDiNa e Met. África do Sul | 1,881 | | Camada inferior |
| | | 1,25 | MPa | Material: Argila |
| | | 0,35 | | Material: Saibro |
| | | 0,45 | | Material: Argila |
| | | 0,35 | | Material: Areia Siltosa |

(continua)

(conclusão)

| Descrição | Método | Valor | Unidade | Observações | |
|---|--------------------------------|------------|---------|--------------------------|-------------------------|
| Módulo de Resiliência (MR) | MeDiNa e Met. África do Sul | 107 | MPa | Material: Saibro | |
| | | 75 | | Material: Argila | |
| | | 48 | | Material: Areia Siltosa | |
| | | 256 | | Material: Argila Siltosa | |
| Coeficiente c' | MeDiNa | 1,53 | | Material: Saibro | |
| | | 2,26 | | Material: Argila | |
| | | 1,15 | | Material: Areia Siltosa | |
| | | 1,15 | | Material: Argila Siltosa | |
| Coeficiente e' | MeDiNa | 1,19 | | Material: Saibro | |
| | | 0,88 | | Material: Argila | |
| | | 1,36 | | Material: Areia Siltosa | |
| | | 1,36 | | Material: Argila Siltosa | |
| Umidade Ótima | MeDiNa | 12,1 | % | Material: Saibro | |
| | | 19,5 | | Material: Argila | |
| | | 11,8 | | Material: Areia Siltosa | |
| | | 11,8 | | Material: Argila Siltosa | |
| Módulo Resiliência – Coeficiente de Regressão | MeDiNa | k1= 97,94 | | Material: Argila | |
| | | k2 e k4= 0 | | | |
| | | k3 = 0,18 | | Material: Areia Siltosa | |
| | | k1= 93,72 | | | |
| k2 e k4= 0 | Material: Argila | | | | |
| k3 = 0,38 | | | | | |
| k1= 0,003 | | | | | |
| k2= 0 | | | | | |
| Deformação Permanente – Coeficiente de Regressão | MeDiNa e Met. África do Sul | k3= 1,25 | | Material: Argila | |
| | | k4 = 0,55 | | | |
| | | k1= 2,63 | | | Material: Areia Siltosa |
| | | k2 e k3= 0 | | | |
| k4 = 0,68 | Material: Argila Siltosa | | | | |
| k1= 0,097 | | | | | |
| k2= -1,6 | | | | | |
| k3= 1,90 | | | | | |
| | | k4 = 0,063 | | | |

Fonte: Nervis (2016).

3.2 Realização dos Dimensionamentos e Análise Comparativa

Para o desenvolvimento do trabalho foram realizados os dimensionamentos com base nos métodos apresentados no Capítulo 2, descritos a seguir:

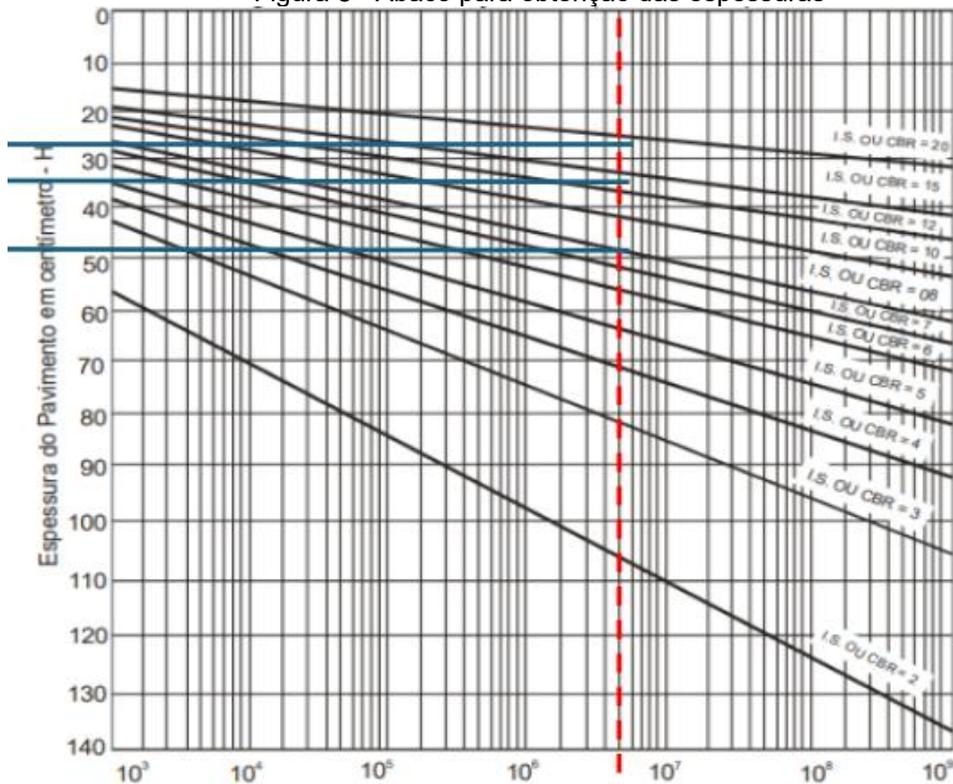
- a) Método da Resiliência (Item 2.5);
- b) Método CBR (Item 2.6);
- c) Método da África do Sul (Item 2.7);
- d) Método MeDiNa (Item 2.8).

Considerando o tráfego previsto para o objeto do estudo, todos os dimensionamentos da estrutura foram realizados para suportar um tráfego máximo correspondente a $N \leq 5 \times 10^6$ solicitações do eixo simples padrão de 80 kN, ao longo de um período de 20 anos. Essa definição foi fundamental para a escolha dos métodos e critérios adotados.

No método da resiliência, os dados classificaram o solo do subleito como classe I, indicando uma capacidade de suporte limitada e exigindo que o dimensionamento do pavimento leve em consideração a resistência do subleito. Devido à espessura inferior a 45 cm da camada granular existente, as constantes resilientes da terceira camada foram consideradas como $I_1 = 0$ e $I_2 = 0$, em conformidade com as especificações de referência.

No método CBR, as espessuras das foram determinadas com o uso do ábaco, utilizando de base os valores relacionados ao CBR e número N, conforme ilustrado na Figura 8. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 16, com base nas espessuras obtidas expostas na Tabela 14.

Figura 8 - Ábaco para obtenção das espessuras



Fonte: Autora (2024).

Tabela 16 – Metodologia CBR: resultados obtidos.

| Descrição | Observações | Valor |
|------------------------------|-----------------------------------|--------|
| | Sub-base (h20) – Saibro | 49cm |
| Espessura utilizando o Ábaco | Reforço do subleito (Hn) – Argila | 34cm |
| | Subleito (Hm) – Areia | 28cm |
| Espessura de Revestimento | Revestimento (R) | 5,0 cm |

Fonte: Autora (2024).

Na metodologia proposta no SAPEM, foi adotada a estrutura descrita na Tabela 17, no qual foi dimensionada para uma estrada classificada como categoria B. Esta classificação foi escolhida após análise dos parâmetros específicos e do tráfego diário, considerando que ela é a mais adequada para atender às características da via com o volume de tráfego projetado.

Tabela 17 – Metodologia SAMDM: Modelo de análise

| Camada | Descrição | e (cm) | Massa específica | Módulo (MPa) |
|--------|-------------------------------|--------|------------------------|--------------|
| 1 | RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22 | 5,00 | 2,40 g/cm ³ | 3184 |
| 2 | Saibro | 7,30 | 1,93 g/cm ³ | 107 |
| 3 | Argila | 17,50 | 1,65 g/cm ³ | 75 |
| 4 | Areia | 15,00 | 1,88 g/cm ³ | 48 |

Fonte: MeDiNa (2020); Nervis (2016).

Após a definição das camadas, foi realizada a implementação dos cálculos utilizando a ferramenta disponibilizada pelo MeDiNa, o software AEMC, conforme apresentado na Figura 9, para viabilizar a aplicação do método correspondente. Este software fornece uma série de dados cruciais para o dimensionamento, como informações sobre posição, deslocamento, tensões, deformações e tensões principais em diferentes pontos da estrutura do pavimento. Além disso, ele faz uso de informações complementares, como as características mecânicas de solos estabilizados com cimento da classe C3, conforme descrito na Tabela 9, que serviu como base para a análise detalhada do comportamento da estrutura.

Figura 9 – Parâmetros de entrada no software AEMC para análise da conformidade estrutural do pavimento

| CAMADA | ESPESSURA (cm) | MASSA ESP (g/cm ³) | COMPORTAMENTO | MÓDULO (MPa) | k1 | k2 | k3 | k4 | COEF POISSON | ADERÊNCIA |
|--------|----------------|--------------------------------|---------------|--------------|----------------|--------|-------------|---------|--------------|-----------|
| 1 | 5 | 2,4 | LINEAR | 3184 | 3,000000000003 | -3,535 | 0 | 0 | 0,35 | 1 |
| 2 | 7,3 | 1,93170 | LINEAR | 107 | 153,683963852 | 0,0 | 0,0 | 0,41 | 0,35 | 1 |
| 3 | 17,5 | 1,654 | LINEAR | 75 | 0,00315988 | 0,0 | 1,245570421 | ,559092 | 0,45 | 1 |
| 4 | 15 | 1,881 | LINEAR | 48 | 2,6391 | 0,0 | 0,0 | 0,0683 | 0,35 | 1 |

Tipo de carregamento:

- Eixo padrão rodoviário
- Eixo simples
- Dois eixos simples (direcional)
- Eixo duplo
- Dois eixos duplos
- Dois eixos duplos em tandem

EIXO DUPLO

Análise: Semi-eixo

Número de rodas: 2

Carga do semi-eixo (ton): 4,10

Carga de roda (ton): 2,05

Pressão de pneus (MPa): 0,56

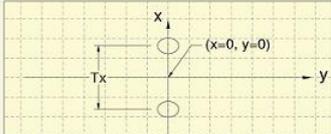
Ty (cm): 0,00

Tx (cm): 32,40

Lx (cm): 181,00

Área (cm²): 366,07

Raio (cm): 10,79



Pontos de análise e resultados

Calcular Ferramentas >>

| Ponto | X (cm) | Y (cm) | Z (cm) | Ux (µm) | Uy (µm) | Uz (µm) |
|-------|--------|--------|--------|-----------|---------|------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0,00000 | 0,00000 | 1179,97688 |
| 2 | 0 | 0 | 2,5 | 0,00000 | 0,00000 | 1183,76108 |
| 3 | 0 | 0 | 5,0 | 0,00000 | 0,00000 | 1181,70324 |
| 4 | 0 | 0 | 8,65 | 0,00000 | 0,00000 | 1139,65219 |
| 5 | 0 | 0 | 12,3 | 0,00000 | 0,00000 | 1091,46687 |
| 6 | 0 | 0 | 21,05 | 0,00000 | 0,00000 | 974,52056 |
| 7 | 0 | 0 | 28,55 | 0,00000 | 0,00000 | 880,54823 |
| 8 | 0 | 0 | 44,8 | 0,00000 | 0,00000 | 668,36843 |
| 9 | 16,2 | 0 | 0 | -29,26234 | 0,00000 | 1191,50106 |
| 10 | 16,2 | 0 | 2,5 | -4,51987 | 0,00000 | 1197,00688 |
| 11 | 16,2 | 0 | 5,0 | 20,02315 | 0,00000 | 1188,73024 |
| 12 | 16,2 | 0 | 8,65 | 38,69725 | 0,00000 | 1116,63721 |
| 13 | 16,2 | 0 | 12,3 | 55,32367 | 0,00000 | 1051,80431 |
| 14 | 16,2 | 0 | 21,05 | 64,75632 | 0,00000 | 919,27566 |
| 15 | 16,2 | 0 | 28,55 | 69,52686 | 0,00000 | 829,49665 |
| 16 | 16,2 | 0 | 44,8 | 51,47271 | 0,00000 | 637,60634 |
| 17 | | | | | | |
| 18 | | | | | | |
| 19 | | | | | | |
| 20 | | | | | | |

Fonte: Autora (2024).

No método MeDiNa, inicialmente considerou-se os dados referentes as camadas e espessuras encontradas na estrutura local, apenas adicionando uma camada padrão do software de concreto asfáltico, mas ao tentar dimensionar a primeira camada de revestimento asfáltico, o software emitiu um alerta (Figura 10) indicando que a espessura máxima permitida de 15,0 cm seria insuficiente para atender os critérios de desempenho. Esse resultado sugere que o pavimento apresentaria falhas, como área trincada e afundamento em trilha de roda, acima dos limites aceitáveis.

Figura 10 - Alerta emitido pelo software MeDiNa

The screenshot displays the MeDiNa software interface. At the top, there are tabs for 'ESTRUTURA', 'MODELAGEM', and 'RESULTADOS'. Below these, there are input fields for 'RESPONSÁVEL' (anacruzj), 'EMPRESA' (unisc), and 'PROJETO' (Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc). A dropdown menu for 'MODOS' is set to 'Pavimento Novo (Nível A)'. A table lists the pavement layers:

| CAMADA | DESCRIÇÃO DO MATERIAL | TIPO | ESPESSURA (cm) | MÓDULO (MPa) | COEFICIENTE DE POISSON |
|---------|--------------------------------|----------------------------|----------------|--------------|------------------------|
| >> 1 << | CONCRETO ASFÁLTICO | Classe 2 | 15,0 | 6743 | 0,30 |
| 2 | SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO | Sabro - sub-base | 15,0 | 107 | 0,35 |
| 3 | SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO | Argila - reforço sub-leito | 17,5 | 75 | 0,45 |
| SL | SUBLEITO | Areia - sub-leito | 0,0 | 48 | 0,35 |

An alert dialog box is overlaid on the table, displaying the message: 'A espessura da camada selecionada atingiu o limite superior previsto! Reveja a estrutura.' with an 'OK' button.

At the bottom left, there is a section for 'EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO' and 'DADOS DO TRÁFEGO' with various input fields and values, such as 'Tipo de Via', 'VMD (1º ano): 1370', 'FV: 0,724', 'N anual (1º ano): 3,62e+05', etc.

Fonte: Autora (2024).

Os resultados obtidos em cada método foram submetidos a uma análise detalhada, possibilitando uma comparação abrangente e a formulação de respostas fundamentadas aos objetivos do estudo.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 O Método da Resiliência

Com base no dimensionamento pelo método da resiliência, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Verificação estrutural e dimensionamento pela metodologia DNER-PRO 269/94 – TECNAPAV

| Parâmetro | Valor | Observação |
|------------------------------------|-----------------|---|
| Espessura Efetiva (h_{ef}) | 1,39 cm | |
| Deflexão Permissível (\bar{D}) | 77,37 (0,01 mm) | Mantém a deformação dentro do limite aceito |
| Espessura de Reforço (HR) | 1,5 cm | Recomendado tratamento superficial |

Fonte: Autora, 2024.

Destaca-se a importância de avaliar a necessidade de reforço nas camadas superiores para garantir a durabilidade do pavimento. A deflexão permissível encontrada foi de 77,37 (0,01 mm), indicando que o pavimento consegue suportar as deformações dentro dos limites aceitáveis, proporcionando uma superfície estável e segura ao longo de sua vida útil.

Por fim, a espessura de reforço calculada foi de apenas 1,5 cm, pode ser considerada bastante reduzida. De acordo com o Manual do DNIT (BRASIL, 2006b), para valores de espessuras de revestimento iguais ou inferiores a 3 cm, é recomendada a aplicação de um tratamento superficial ou de uma camada de lama asfáltica. Esses métodos consistem em tratamentos econômicos e são indicados para pavimentos com espessuras finas, pois formam uma camada protetora capaz de melhorar a impermeabilidade e aumentar a resistência ao desgaste superficial. Esse reforço mínimo é ideal para vias de baixo volume de tráfego, como a analisada, pois oferece uma solução econômica e eficiente.

4.2 O Método CBR

Com base no dimensionamento pelo método CBR, foi possível realizar o dimensionamento que está apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Verificação estrutural e dimensionamento pela metodologia CBR

| Descrição | Resultado | Mínimo exigido |
|--|-----------|----------------|
| Dimensionamento da espessura da base | 39cm | 15cm |
| Dimensionamento da espessura da sub-base | -15,00 cm | 15 cm |
| Dimensionamento do reforço do subleito | -6,00 cm | 15cm |

Fonte: Autora (2024).

O dimensionamento das camadas do pavimento considerou as especificações normativas do DNIT e as características peculiares do solo local. A espessura da base foi determinada em 39 cm, de acordo com a norma que exige um mínimo de 15 cm para um número de solicitações $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$. No entanto, devido ao comportamento atípico do CBR que cresce com a profundidade, verificou-se que essa espessura de base já é mais que suficiente para proteger as camadas inferiores. Isso torna desnecessárias as camadas de saibro e argila que já são preexistentes. Neste método específico, seria tecnicamente viável utilizar uma espessura de 39 cm de base para garantir a proteção necessária.

4.3 O Método da África do Sul

Os resultados obtidos pelo Método da África do Sul estão apresentados na Tabela 20, eles já contemplam uma estrutura de pavimento atendendo as especificações mínimas referentes à camada de revestimento betuminoso exigido pelo método.

Tabela 20 - Verificação estrutural e dimensionamento pela metodologia SAMDM

| Fadiga em misturas betuminosas | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | N | SF | $\epsilon_{v.sf}$ | $\epsilon_{t.mb}$ | $\epsilon_{t.lh}$ |
| admissível | 5×10^6 | 1 | 704,86 | 126,38 | 118,30 |
| AEMC | | | 0,001047 | 0,00025 | -0,000128 |
| Esmagamento admissível | | | | | |
| | Inicial | | Avançado | | |
| admissível | 2,66E-01 | | 4,90E-01 | | |
| | AEMC | | 0,00025 | | |
| Critério de Ruptura | | | | | |
| | SF | | N | | |
| admissível | 103,5240406 | | 2,5143E+273 | | |

Fonte: Autora (2024).

Os resultados da análise de fadiga nas misturas betuminosas mostram que as deformações calculadas estão abaixo dos limites críticos, indicando que a camada asfáltica deve suportar o tráfego previsto para 20 anos sem apresentar rachaduras significativas. Os valores de esmagamento (0,266 no estágio inicial e 0,490 no estágio avançado) estão dentro das faixas aceitáveis, o que evidencia que as camadas inferiores resistirão ao carregamento sem deformações excessivas.

Além disso, a análise dos critérios de ruptura revela que o fator de segurança admissível (SF) de 103,52 e o número admissível de ciclos (N) de $2,5143 \times 10^{273}$ são significativamente elevados, sugerindo que a estrutura possui uma capacidade de resistência muito superior aos esforços projetados. Esses valores indicam uma margem ampla de segurança contra a ruptura estrutural, complementando a durabilidade da camada asfáltica e das camadas de suporte do pavimento.

4.4 O Método MeDiNa

Após uma série de análises, tornou-se necessário propor uma nova estrutura ao sistema de dimensionamento, a fim de determinar uma espessura da camada de revestimento asfáltico que atendesse adequadamente aos requisitos. Identificou-se a necessidade de retirada da camada de saibro e a inclusão de duas camadas que não faziam parte da estrutura original: uma de material granular e outra de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), com o objetivo de suportar o tráfego previsto para uma via de baixo volume.

As características do material granular foram extraídas do livro "Mecânica dos Pavimentos" e são referentes a amostra S-375/02 – Modificada (MEDINA e MOTTA, 2015) e as informações sobre a camada de BGTC foram obtidas por meio do software MeDiNa, que utiliza dados da bibliografia de Balbo (1993). Os parâmetros e coeficientes utilizados são apresentados na Tabela 21 e as porcentagens de área trincada e os valores de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) para a estrutura analisada estão na Tabela 22.

Tabela 21 – MeDiNa: Parâmetros utilizados para o dimensionamento

| Material | Propriedade | Coeficientes | |
|---|------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22 | Aditivo modificador: | Polímero SBS | k1: $\geq 3,0 \text{ e-}11$ |
| | Massa específica: | 2,4 g/cm ³ | k2: $\geq -3,535$ |
| | Resistência à tração: | 1,28 MPa | Classe de fadiga: ≥ 2 |
| | Faixa granulométrica: | Faixa B DNIT | FFM: $\geq 1,16$ |
| BGTC: Balbo 1993 c: 80 kg/m ³ | Energia Compactação: | Modificada | |
| | Teor de cimento: | 4% | |
| | Resistência à tração: | 1,25MPa | |
| | Massa específica: | 2,23 g/cm ³ | |
| | Umidade ótima: | 4,48% | |
| Amostra S-375/02 Modificada | | | k1: 0,079 |
| | | | k2: -0,598 |
| | Massa específica: | 2,088 g/cm ³ | k3: 1,243 |
| | | | k4: 0,081 |

Fonte: Medina e Motta (2015); MeDiNa (2020).

Tabela 22 - Desempenho da Estrutura no software MeDiNa

| Mês | N equiv. | Área Trincada (%) | ATR (mm) |
|-----|-----------|-------------------|----------|
| 1 | 4,167e+04 | 0,11 | 10,08 |
| 12 | 5,000e+05 | 0,26 | 12,33 |
| 48 | 2,000e+06 | 0,42 | 14,13 |
| 60 | 2,500e+06 | 0,46 | 14,48 |
| 120 | 5,000e+06 | 0,61 | 15,74 |

Fonte: Autora (2024).

A seção de pavimento analisada apresenta um nível de confiabilidade de 65,00% e um período de projeto de 10 anos. A estimativa é de que, ao final desse período, a área trincada totalize 0,60%, embora seja importante notar que o programa utilizado não contabiliza as trincas geradas pela reflexão da base estabilizada. Além disso, é

apresentado um afundamento de trilha de roda de 15,74mm, mas ultrapassando o limite de 5,00% em relação à espessura da camada 5. Também foi observada uma deflexão na camada de suporte do material estabilizado, superior ao valor crítico de 0,010mm.

De acordo com Medina e Motta (2015), os valores admissíveis para afundamento de trilha de roda situam-se entre 10 e 20 mm, dependendo das condições de tráfego e tipo de via. Para vias de alto volume de tráfego, recomenda-se um limite de 13,00mm, com um máximo de 16,00mm para evitar comprometimentos de segurança. Dado esse contexto, o afundamento de 15,74mm projetado atende ao limite recomendado para vias de baixo volume de tráfego, sendo considerado aceitável dentro desse perfil de utilização.

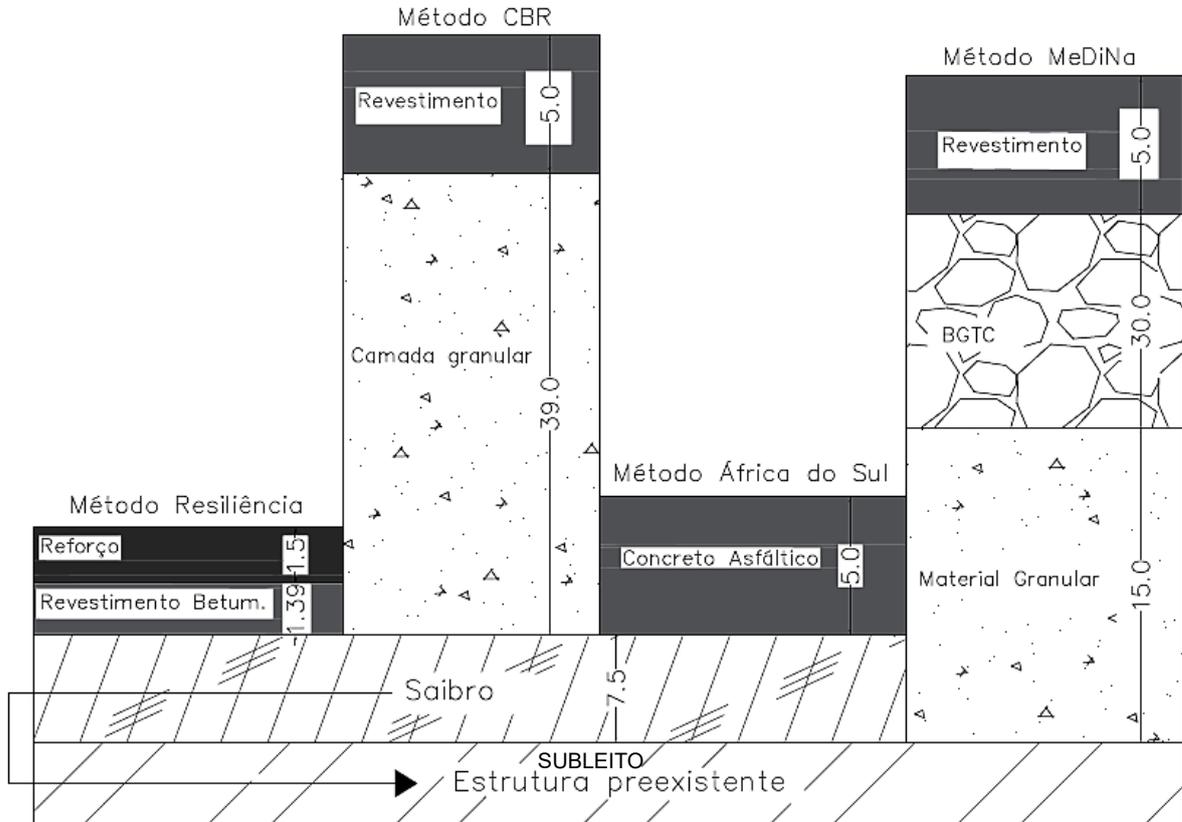
Assumiu-se a aceitação de uma ligeira extrapolação dos valores críticos acima mencionados porque, sem essa abordagem, não seria possível o dimensionamento da estrutura sem a remoção completa de todas as camadas preexistentes. Essa remoção seria necessária para tratar ou substituir a camada superior do revestimento, considerando os dados disponíveis de deformação permanente dessa camada.

Para uma análise mais precisa, que permita realizar a manutenção das camadas de argila e saibro preexistentes, seria necessário dispor de dados mais abrangentes e detalhados sobre a deformação permanente do subleito. Esses dados seriam fundamentais para refinar a avaliação do desempenho da estrutura e garantir a confiabilidade do dimensionamento com base nas condições existentes.

4.5 Análise comparativa dos resultados

Os métodos analisados para o dimensionamento de pavimentos apresentam abordagens distintas, refletindo diferenças em robustez, custo e adequação às condições locais. As estruturas propostas por cada metodologia estão ilustradas na Figura 11, enquanto a estrutura preexistente é representada na Figura 7. Embora o saibro integre essa camada preexistente, foi destacado na ilustração devido à necessidade de sua remoção no dimensionamento realizado pelo método MeDiNa. Essa remoção foi essencial para garantir que a estrutura atendesse aos critérios estabelecidos pelo método, evidenciando a adaptabilidade das soluções de dimensionamento às condições específicas do projeto.

Figura 11 – Estruturas propostas por cada método de dimensionamento – medidas em centímetros



Corte – estruturas propostas
Sem escala

Fonte: Autora (2024).

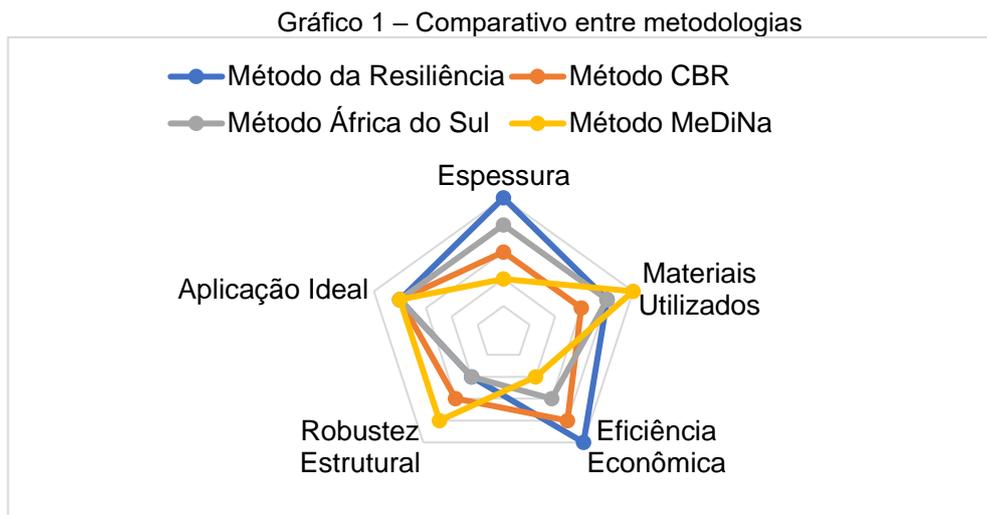
O método da Resiliência é a opção mais econômica, aproveitando a estrutura geológica existente, acrescentando uma espessura de revestimento de 1,39cm e uma camada de reforço calculada de apenas 1,5cm sugere uma solução econômica e eficiente para a via de baixo volume de tráfego. Embora apresente limitações na capacidade de suporte estrutural, é eficaz para solos de baixa resistência e tráfego reduzido, oferecendo uma solução viável sem grandes intervenções.

A metodologia sul-africana equilibra segurança e eficiência ao combinar uma modulação avançada com o aproveitamento da estrutura geológica existente, utilizando uma camada de revestimento de 5 cm. Ideal para vias de tráfego baixo, onde é necessário balancear desempenho e economia. Além disso, simula a resistência à fadiga da camada asfáltica superior e a deformação das camadas inferiores, nesse caso otimizando o uso de materiais e promovendo estruturas robustas e economicamente viáveis.

O método CBR propõe uma estrutura robusta, com maior segurança estrutural em comparação com as abordagens anteriores, porém exige uma quantidade de ensaios inferiores ao necessário para aplicação da metodologia africana, por exemplo, mas exige uma base de 39,0cm e um revestimento de 5,0cm, elevando os custos de materiais e construção. O que ocorre no presente caso é que os valores de CBR são crescentes com a profundidade, o que é um caso atípico. Assim, a camada de base necessária para proteger o saibro já é mais que suficiente para proteger as camadas inferiores, por isso os valores dão negativos. Assim, para esse método as camadas de saibro e de argila se mostram desnecessárias, porém já estão lá.

O método MeDiNa, diferencia-se pela análise detalhada e rigor técnico. Inclui a remoção de camadas preexistentes e adição de materiais granulares e BGTC. Sua aplicação é justificada quando durabilidade e desempenho a longo prazo são essenciais, especialmente em vias de baixo tráfego que demandam alta resiliência e mínima deformação plástica.

O Gráfico 1 sintetiza a comparação entre os quatro métodos de dimensionamento de pavimentos considerando os critérios de espessura, materiais utilizados, eficiência econômica, robustez estrutural e aplicação ideal. A representação destaca o desempenho individual de cada método, facilitando a visualização das vantagens e limitações associadas a cada abordagem.



Fonte: Autora (2024).

O método da Resiliência apresenta destaque na espessura reduzida, o que indica uma solução mais leve em termos de estrutura, embora com limitações na

robustez, sendo adequado para solos de baixa resistência e tráfego reduzido. Em contrapartida, o método CBR apresenta maior robustez estrutural, porém requer espessuras mais significativas de base e revestimento, tornando-se mais notável nesse critério. A metodologia sul-africana mostra um comportamento equilibrado, com espessuras moderadas e um desempenho bem distribuído entre robustez e aplicação, refletindo uma solução otimizada para vias de baixo volume de tráfego. Já o método MeDiNa, com destaque no critério de materiais utilizados, diferencia-se pela ênfase na durabilidade e no desempenho técnico a longo prazo, sendo uma abordagem mais conservadora.

Essa representação gráfica permite identificar como os diferentes métodos variam em relação às espessuras e demais parâmetros técnicos analisados, indicando que as espessuras desempenham um papel relevante nas comparações realizadas. A análise visual reforça a importância de considerar as particularidades de cada projeto na escolha do método mais adequado, especialmente em vias de baixo volume de tráfego.

5 CONCLUSÃO

Este estudo apresenta uma análise comparativa de quatro métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos aplicados a uma via de baixo volume de tráfego, destacando as diferenças significativas entre as metodologias, tanto nas soluções estruturais propostas quanto nas características técnicas envolvidas.

Embora amplamente reconhecidos e consolidados, os métodos analisados geraram resultados distintos, variando de alternativas mais simples a modelos mais robustos, com ênfase em maior durabilidade e desempenho a longo prazo. Essa diversidade ressalta a importância de selecionar o método adequado considerando os objetivos e as restrições do projeto.

Os resultados oferecem uma visão abrangente sobre a aplicabilidade dos métodos estudados, ajudando na tomada de decisões mais fundamentadas para projetos de pavimentos de baixo volume de tráfego. Essa perspectiva permite equilibrar aspectos como desempenho estrutural, viabilidade técnica e adequação ao contexto local.

O método da Resiliência se destacou pela simplicidade e pelas espessuras de camada reduzidas, o que, presumidamente, resulta em uma solução mais econômica em termos de execução. Ele oferece uma opção eficaz para vias com tráfego reduzido, embora tenha limitações na capacidade de suporte estrutural. O método CBR, por sua vez, apresentou maior robustez estrutural, com espessuras superiores em suas camadas. A metodologia sul-africana se mostrou eficiente ao otimizar o uso de recursos, balanceando as necessidades estruturais e de aplicação, sem comprometer a eficácia do pavimento. Por fim, o MeDiNa, se mostrou ser o mais detalhado e seguro, priorizando a resistência e o desempenho ao longo dos anos, embora com um custo presumido mais elevado.

As comparações entre os métodos evidenciam a importância de uma abordagem multifacetada para um dimensionamento eficaz, que não apenas atenda às exigências normativas, mas também proporcionem uma infraestrutura durável e econômica, capaz de suportar as demandas do tráfego ao longo do tempo. A escolha do método de dimensionamento ideal depende do equilíbrio entre economia e durabilidade, considerando o contexto específico do local.

Dentre os métodos abordados, o MeDiNa, apesar de exigir maiores espessuras e custos presumidos mais elevados, se destaca pela aplicação de critérios técnicos

rigorosos. Isso resulta em um dimensionamento detalhado que prioriza a resistência e o desempenho da estrutura ao longo dos anos. Vale destacar que os métodos alternativos não atenderiam aos mesmos critérios de segurança e durabilidade estabelecidos pelo MeDiNa, reforçando seu caráter conservador e sua orientação para uma solução mais confiável a longo prazo. Embora o MeDiNa possivelmente envolva um maior custo inicial, sua aplicação é justificada quando o desempenho e a durabilidade são prioridades, especialmente em situações em que a infraestrutura exige que o pavimento resista por mais tempo. No entanto, sua viabilidade em vias de baixo volume de tráfego pode ser questionada devido ao custo elevado de implantação, o que torna os outros métodos, com menores espessuras, mais atrativos em termos práticos e econômicos.

Considerando se tratar de uma via de baixo volume de tráfego, pode ser mais atrativo optar por métodos que demandam menos ensaios, como o Método da Resiliência ou o CBR. Contudo, esses métodos apresentam limitações em reproduzir o desempenho esperado ao longo dos anos. Embora mais práticos e simples, podem não prever com precisão o desempenho real a longo prazo. Assim, a escolha do método mais adequado deve levar em conta não apenas o volume de tráfego, mas também as condições locais, a viabilidade técnica e a garantia de que os resultados atendam às expectativas de desempenho e durabilidade.

5.1 Perspectivas de Trabalhos Futuros

Apresenta-se aqui sugestões de continuidade do estudo, como aprimoramento para os métodos utilizados:

- Realizar ensaios com a inclusão de materiais granulares locais para maior precisão nos dados de deformação;
- Realizar a composição de custos associados à aplicação de cada metodologia ao longo da extensão de uma via.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. L.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo para regiões tropicais: Projeto e Construção. Florianópolis, 2019.
- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br>>. Acesso em: 18 abr. 2024.
- BERNUCCI, L. et al. Pavimentação asfáltica. 2a edição ed. Rio de Janeiro. 2022
- BRASIL. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Ministério de Minas e Energia (Org.). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Folha Uruguaiana (SH 21). Rio de Janeiro, 2008.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. DNIT 134/2018-ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, julho de 2018.
- _____. DNIT 135/2018 – ME. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro, abril de 2018.
- _____. DNIT 136/2018 – ME. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, julho de 2018.
- _____. DNIT 179/2018 – IE. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro, maio de 2018.
- _____. DNIT 181/2018 – ME. Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, maio de 2018.
- _____. DNIT 183/2018 – ME. Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, agosto de 2018.

_____. DNIT 184/2018 – ME. Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, agosto de 2018.

_____. DNIT 434/2021 – ME. Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente – Método de ensaio. Brasília, julho de 2021.

_____. DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Manual de Conservação Rodoviária. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, 2005.

_____. DNIT. Manual de Pavimentação. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006^a.

_____. DNIT. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. DNIT. Terminologias Rodoviárias Usualmente Utilizadas. Agosto, 2007.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa CNT de rodovias 2023. Brasília-DF, 2023.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Manual de utilização MeDiNa. Agosto de 2020.

MEDINA, J.; MOTTA, L. Mecânica dos pavimentos. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

NERVIS, L. O. Identificação e discussão dos mecanismos de degradação de pavimentos com revestimento primário. 2016.

PARANÁ. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná - DER/PR. DER/PR ES-T 07/2018. Terraplenagem: Revestimento Primário. Curitiba, 2018. Disponível em: <<https://www.der.pr.gov.br> >. Acesso em: 01 jun. 2024.

SAPEM. South African National Roads Agency. South African Pavement Engineering Manual – Chapter 10: Pavement Design. Manual Técnico, Republic of South Africa, 2014.

SANRAL. South African National Roads Agency. South African pavement engineering manual - 10: Pavement Design. Manual Técnico, Republic of South Africa, 2014.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. São Paulo, 2008.
SÃO PAULO. Secretaria dos Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - DER/SP. ET-DE-P00/013 Revestimento Primário. São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www.der.sp.gov.br/>> Acesso em: 01 jun. 2024.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. Pavimentos econômicos - Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 – Tabela de dimensionamento referente ao método de resiliência

| Fórmula | Parâmetro/ Coeficiente | Valor | OBS | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|-------------------------|---|-------------------|------|-------------------------|------|--------------------------|------|-------------------------|-------|--------------------------------------|
| $H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598}$ | HT | 28,08335604 | | | | | | | | | | |
| | N | 5,00E+06 | | | | | | | | | | |
| | CBR | 19 | % | | | | | | | | | |
| i. Espessura da camada granular inferior ou igual a 45cm; a. Quando a 3ª camada for do tipo I: $I_1 = 0$ e $I_2 = 0$; b. Quando a 3ª camada for do tipo II: $I_1 = 1$ e $I_2 = 0$; c. Quando a 3ª camada for do tipo III: $I_1 = 0$ e $I_2 = 1$. | I1 | 0 | | | | | | | | | | |
| | I2 | 0 | | | | | | | | | | |
| d) Cálculo da deflexão máxima permissível através da Equação 2: $\log \bar{D} = 3,148 - 0,188 \log N_p$ (Equação 2) sendo, \bar{D} : deflexão máxima permissível (0,01mm); N_p : número de solicitações de eixo padrão de 8,2 t, durante a vida do projeto. | D | 77,3737488 | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tr> <td rowspan="4">Sobre a pista pronta</td> <td>Média (0,01mm):</td> <td>84,4</td> </tr> <tr> <td>Mediana (0,01mm):</td> <td>88,0</td> </tr> <tr> <td>Desvio Padrão (0,01mm):</td> <td>28,9</td> </tr> <tr> <td>Coeficiente de Variação:</td> <td>0,34</td> </tr> </table> | Sobre a pista pronta | Média (0,01mm): | 84,4 | Mediana (0,01mm): | 88,0 | Desvio Padrão (0,01mm): | 28,9 | Coeficiente de Variação: | 0,34 | Deflexão característica | 113,3 | pista pronta (média + desvio padrão) |
| Sobre a pista pronta | | Média (0,01mm): | 84,4 | | | | | | | | | |
| | | Mediana (0,01mm): | 88,0 | | | | | | | | | |
| | | Desvio Padrão (0,01mm): | 28,9 | | | | | | | | | |
| | Coeficiente de Variação: | 0,34 | | | | | | | | | | |
| $h_{ef} = -5,737 + \frac{807,961}{D_c} + 0,972 I_1 + 4,101 I_2$ | hef | 1,394165049 | | | | | | | | | | |
| iii. Espessura efetiva compreendida entre $0 \leq h_{ef} \leq h_e$; a. Se $h_{ef} < 0$, adotar $h_{ef} = 0$; b. Se $h_{ef} > h_e$, adotar $h_{ef} = h_e$ | | | Como o valor de hef é negativo, de acordo com a regra, devo considerar =0 | | | | | | | | | |
| Equação 3: $HR = -19,015 + \frac{238,24}{D^{1/2}} - 1,357 h_{ef} + 1,014 I_1 + 4,101 I_2$ | HR | 1,47516101 | | | | | | | | | | |

Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE 2 – Tabela de dimensionamento referente ao método CBR

| Descrição | Parâmetro/ Coeficiente | Valor | Unidade | obs |
|---|------------------------|----------|---------|---|
| N | N | 5,00E+06 | | |
| sub-base | ISC | 8% | % | SAIBRO |
| reforço sub-leito | ISC | 14% | % | ARGILA |
| sub-leito | ISC | 19% | % | AREIA |
| sub-base - ABACO | H20 | 49,00 | cm | SAIBRO |
| reforço sub-leito - ABACO | Hn | 34,00 | cm | ARGILA |
| sub-leito - ABACO | Hm | 28,00 | cm | AREIA |
| esp. de revestimento | R | 5,00 | cm | |
| Coeficiente de equivalência estrutural - componentes do pavimento | Kr | 2,00 | | |
| Coeficiente de equivalência estrutural - camadas granulares | Kb / Ks / Kref | 1,00 | | Não foi considerado o uso de Solo Cimento - coeficiente iria mudar caso use |
| Coeficientes - Módulo de Resiliência | σ^3 | 50,40 | kPa | Sub-leito (areia) |

| Descrição | Fórmula | Resultado | Unidade | OBS | Valor mínimo exigido |
|--|---|-----------|---------|---|----------------------|
| Dimensionamento de espessura da Base | $RK_R + BK_B \geq H_{20}$ | 39,00 | cm | coef. de seg. não considerado pois $N \leq 5 \times 10^6$ | 15 cm |
| Dimensionamento de espessura da sub-base | $RK_R + BK_B + h_{20} K_s \geq H_n$ | -15,00 | cm | exigência mínima do DNIT 15 cm | 15 cm |
| Dimensionamento de espessura do reforço do sub-leito | $RK_R + BK_B + h_{20} K_s + h_n K_{Ref} \geq H_m$ | -6,00 | cm | exigência mínima do DNIT 15 cm | 15 cm |

Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE 3 – Síntese da planilha de conversão de modelos de deformação permanente e a consequente obtenção dos parâmetros de argila para utilização no MeDiNa

A figura abaixo resume os principais parâmetros utilizados nas análises de deformação e tensão, com destaque para os valores representativos de ψ , que são essenciais para o cálculo das deformações recalculadas.

| N | $\sigma_c = \sigma_3$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_v (kPa) | p_{max} (kPa) | q_{max} (kPa) | L_{max} (kPa) | ϵ (%) | σ_3/p_0 (kPa) | σ_d/p_0 (kPa) | $\log(\sigma_3/p_0)$ (kPa) | $\log(\sigma_d/p_0)$ (kPa) | $\log(N)$ | $\log(\epsilon)$ | ϵ (recalculado) (%) | $\epsilon_p = \left[0,00127N^{0,55092} \left(\frac{L_{max}}{p_0} \right)^{2,97072} \left(\frac{q_{max}}{p_0} \right)^{-1,38957} \right]$ |
|-----|--------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|------------------|---------------------------------|---|
| 1 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00109344 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0 | -2,9612 | 0,000567536 | |
| 2 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00160191 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0,301 | -2,7954 | 0,000831451 | |
| 3 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00200285 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0,4771 | -2,6984 | 0,001039558 | |
| 4 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00234682 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0,6021 | -2,6295 | 0,001218092 | |
| 5 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00265381 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0,699 | -2,5761 | 0,001377431 | |
| 6 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00293422 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0,7782 | -2,5325 | 0,001522973 | |
| 7 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00319429 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0,8451 | -2,4956 | 0,001657962 | |
| 8 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00343814 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0,9031 | -2,4637 | 0,001784529 | |
| 9 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00366864 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 0,9542 | -2,4355 | 0,001904164 | |
| 10 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00388789 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1 | -2,4103 | 0,002017963 | |
| 20 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00569583 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1,301 | -2,2444 | 0,002956355 | |
| 30 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00712146 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1,4771 | -2,1474 | 0,003696313 | |
| 40 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,0083445 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1,6021 | -2,0786 | 0,004331118 | |
| 50 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,00943605 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1,699 | -2,0252 | 0,004897672 | |
| 60 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,01043308 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1,7782 | -1,9816 | 0,005415172 | 0,55092 |
| 70 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,01135782 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1,8451 | -1,9447 | 0,005895146 | 0,00343344 |
| 80 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,01222486 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1,9031 | -1,9128 | 0,006345173 | 0,01719584 |
| 90 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,01304442 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 1,9542 | -1,8846 | 0,006770558 | 0,9807299 |
| 100 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,013824 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 2 | -1,8594 | 0,007175186 | 0,13369561 |
| 200 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,02025243 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 2,301 | -1,6935 | 0,010511788 | #N/D |
| 300 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,02532149 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 2,4771 | -1,5965 | 0,013142827 | #N/D |
| 400 | 50,4 | 25,2 | 75,6 | 58,8 | 25,2 | 63,97 | 0,0296702 | 0,504 | 0,252 | -0,29757 | -0,5986 | 2,6021 | -1,5277 | 0,015399976 | #N/D |

L_{max} : comprimento da trajetória de tensões ($L_{max} = \sqrt{p_{max}^2 + q_{max}^2}$);
 p_{max} : máximo p alcançado durante um ciclo de carregamento;
 q_{max} : máximo q alcançado durante um ciclo de carregamento;
 p_0 : pressão atmosférica ($p_0=100kPa$);
 η_1 e η_2 : parâmetros do modelo.

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

| | |
|------------|-------------------|
| $\psi_1 =$ | 0,00315988 |
| $\psi_2 =$ | 0 |
| $\psi_3 =$ | 1,24570421 |
| $\psi_4 =$ | 0,55092 |

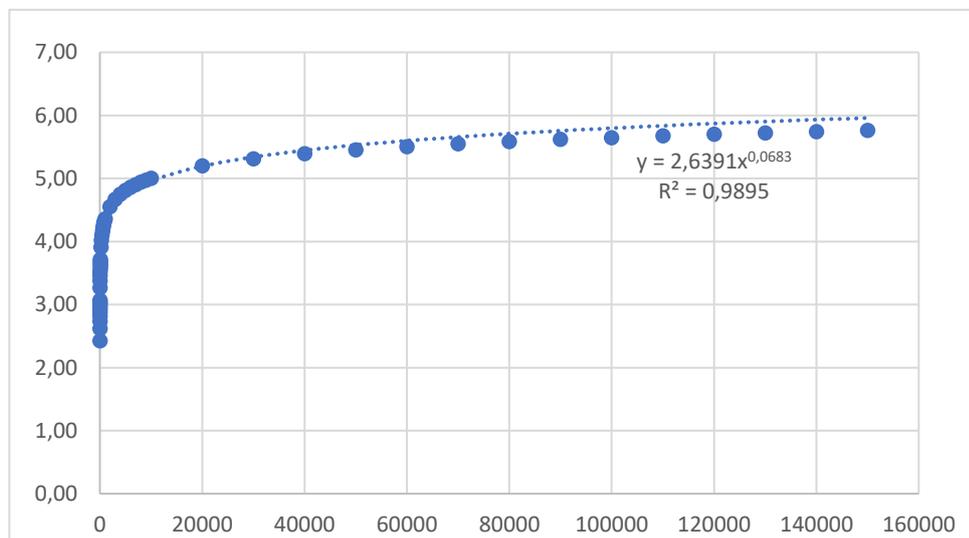
Fonte: Nervis (2016)²

² **Nota:** Este apêndice apresenta um resumo dos dados completos, apresentando apenas como os dados foram obtidos e destacando os valores utilizados ao canto inferior direito. Caso seja necessário, os dados completos estão disponíveis sob demanda.

APÊNDICE 4 – Síntese da planilha de conversão de modelos de deformação permanente e a consequente obtenção dos parâmetros da areia para utilização no MeDiNa

| N | ε (%) | N | ε (%) | N | ε (%) | N | ε (%) |
|----|-------|------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 1 | 2,42 | 60 | 3,57 | 2000 | 4,55 | 70000 | 5,55 |
| 2 | 2,62 | 70 | 3,61 | 3000 | 4,66 | 80000 | 5,58 |
| 3 | 2,73 | 80 | 3,65 | 4000 | 4,74 | 90000 | 5,62 |
| 4 | 2,81 | 90 | 3,68 | 5000 | 4,81 | 100000 | 5,65 |
| 5 | 2,87 | 100 | 3,71 | 6000 | 4,86 | 110000 | 5,67 |
| 6 | 2,92 | 200 | 3,91 | 7000 | 4,90 | 120000 | 5,70 |
| 7 | 2,97 | 300 | 4,02 | 8000 | 4,94 | 130000 | 5,72 |
| 8 | 3,00 | 400 | 4,10 | 9000 | 4,97 | 140000 | 5,74 |
| 9 | 3,04 | 500 | 4,16 | 10000 | 5,00 | 150000 | 5,76 |
| 10 | 3,07 | 600 | 4,21 | 20000 | 5,20 | | |
| 20 | 3,26 | 700 | 4,26 | 30000 | 5,31 | | |
| 30 | 3,37 | 800 | 4,29 | 40000 | 5,39 | | |
| 40 | 3,46 | 900 | 4,33 | 50000 | 5,45 | | |
| 50 | 3,52 | 1000 | 4,36 | 60000 | 5,50 | | |

Gráfico obtido a partir dos resultados



Síntese dos resultados

$$\psi_1 = 2,6391$$

$$\psi_2 = 0$$

$$\psi_3 = 0$$

$$\psi_4 = 0,0683$$

Fonte: Nervis (2016)

APÊNDICE 5 – Resultados obtidos no software no MeDiNa

Programa MeDiNa v.1.1.9.0 - abr/2023

Cópia registrada para anacruzj (anacarloyna@mx2.unisc.br), da empresa unisc.

Análise do pavimento

Empresa: **unisc**
 Nome do Projeto:
 Responsável pelo projeto: **anacruzj**

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Local**
 Nível de confiabilidade: **65%**
 Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **01/11/2024 às 18:10:09** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **0,6%**

>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **15,7mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- A camada 5 apresentou Afundamento de Trilha de Roda acima do limite de 5%.
- Deflexão acima do limite 70 (0,01mm) da camada de suporte do material estabilizado.

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecnístico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso. Portanto, **a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista**, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|--|----------------|---|-----------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22 | 5,0 | Resiliente Linear MR = 3184 MPa | 0,30 |
| 2 | BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³ | 30,0 | Sigmoidal Ei (MPa) = 7000 (1º mês) Ef (MPa) = 6997 (fim período) | 0,25 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Amostra S-375/02 Modificada - Mec. dos Pav. | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 160 MPa (1º mês) k1 = 1051,00 k2 = 0,480 k3 = -0,060 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|--|----------------|---|-----------------|
| 4 | SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Argila - reforço sub-leito | 17,5 | Resiliente Não Linear MR = 43 MPa (1º mês) k1 = 97,94 k2 = 0,000 k3 = 0,180 k4 = 0,000 | 0,45 |
| 5 | SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Areia - sub-leito | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 18 MPa (1º mês) k1 = 93,72 k2 = 0,000 k3 = 0,000 k4 = 0,380 | 0,35 |
| 6 | SUBLEITO camadas inf - sub-leito | SL | Resiliente Linear MR = 256 MPa | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Propriedades

Tipo de CAP = CAPFLEX 65-90 SBS PG 70-22
Aditivo Modificador = Polímero SBS
Massa específica (g/cm³) = 2,4
Resistência à tração CD (MPa) = 1,28
Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT
Norma ou Especificação = DNIT ES 385

Modelos

Ensaio de Fadiga
- Modelo: $k1 \cdot (et)^{k2}$
- Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 3,0e-11$
- Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,535$
- Classe de Fadiga: ≥ 2
- FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 1,16$
Flow Number Mínimo
- Condição de Tráfego Normal: ≥ 209 ciclos
- Condição de Tráfego Severa: ≥ 575 ciclos

2 - BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC): Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Propriedades

Descrição do Material = Estudo Balbo (1993)
Teor ótimo de cimento = 4%
Resistência à tração CD (MPa) = 1,25
Massa específica (g/cm³) = 2,230
Umidade Ótima (%) = 4,48
Energia Compactação = Modificada
Norma ou Especificação = DNIT ME 434

Modelos

3 - MATERIAL GRANULAR: Amostra S-375/02 Modificada - Mec. dos Pav.

Propriedades

Descrição do Material = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,088
 Umidade Ótima (%) = ...
 Energia Compactação = ...
 Abrasão Los Angeles (%) = ...
 Faixa Granulométrica = ...
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: **$ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$**
 Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): **0,079**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): **-0,598**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): **1,243**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): **0,081**

4 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Argila - reforço sub-leito**Propriedades**

Descrição do Material = Argila - São Gabriel RS
 Grupo MCT = LG'
 MCT - Coeficiente c' = 2,26
 MCT - Índice e' = 0,88
 Massa específica (g/cm³) = 1,6544
 Umidade Ótima (%) = 19,5
 Energia Compactação = Intermediário
 Norma ou Especificação = DNIT ES 139

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: **$ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$**
 Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): **0,00315988**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): **0**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): **1,245570421**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): **0,55092**

5 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Areia - sub-leito**Propriedades**

Descrição do Material = Areia - São Gabriel RS
 Grupo MCT = NA'
 MCT - Coeficiente c' = 1,15
 MCT - Índice e' = 1,36
 Massa específica (g/cm³) = 1,8807339
 Umidade Ótima (%) = 11,8
 Energia Compactação = Intermediária
 Norma ou Especificação = DNIT ES 139

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: **$ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$**
 Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): **2,6391**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): **0**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): **0**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): **0,0683**

6 - SUBLEITO: camadas inf - sub-leito**Propriedades**

Descrição do Material = Areia - São Gabriel RS
 Grupo MCT = NA'
 MCT - Coeficiente c' = 1,15
 MCT - Índice e' = 1,36
 Massa específica (g/cm³) = 1,8807339
 Umidade Ótima (%) = 11,8
 Energia Compactação = Intermediária
 Norma ou Especificação = DNIT ES 137

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: **$ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$**
 Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): **0,097**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): **-1,6**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): **1,9**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): **0,063**

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1370**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **5,00e+05**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **5,00e+05**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **5,00e+06**

| Eixo | Tipo | FE | Carga (ton) | FC | FVi |
|------|----------------------------|------|-------------|-------|-------|
| 1 | Eixo simples de roda dupla | 100% | 8,20 | 1,000 | 1,000 |

Evolução dos danos no pavimento

| Mês | N Equiv | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 1 | 4,167e+04 | 0,11% | 10,1 |
| 6 | 2,500e+05 | 0,20% | 11,6 |
| 12 | 5,000e+05 | 0,26% | 12,3 |
| 18 | 7,500e+05 | 0,30% | 12,8 |
| 24 | 1,000e+06 | 0,33% | 13,2 |
| 30 | 1,250e+06 | 0,36% | 13,5 |
| 36 | 1,500e+06 | 0,38% | 13,7 |
| 42 | 1,750e+06 | 0,40% | 13,9 |
| 48 | 2,000e+06 | 0,42% | 14,1 |
| 54 | 2,250e+06 | 0,44% | 14,3 |
| 60 | 2,500e+06 | 0,46% | 14,5 |
| 66 | 2,750e+06 | 0,48% | 14,6 |
| 72 | 3,000e+06 | 0,50% | 14,8 |
| 78 | 3,250e+06 | 0,51% | 14,9 |
| 84 | 3,500e+06 | 0,53% | 15,1 |
| 90 | 3,750e+06 | 0,54% | 15,2 |
| 96 | 4,000e+06 | 0,56% | 15,3 |
| 102 | 4,250e+06 | 0,57% | 15,4 |
| 108 | 4,500e+06 | 0,59% | 15,5 |
| 114 | 4,750e+06 | 0,60% | 15,6 |

| Mês | N Equív | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 120 | 5,000e+06 | 0,61% | 15,7 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|---|---|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO | 0,00 |
| 2 | BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) | 0,00 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 0,12 |
| 4 | SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO | 1,94 |
| 5 | SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO | 13,54 * |
| 6 | SUBLEITO | 0,14 |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 15,7 |

* O Afundamento de Trilha de Roda ultrapassou o limites de 5% da espessura da camada ou 5mm de profundidade do subleito

Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

| Equipamento | Sensor 1 0 cm | Sensor 2 20 cm | Sensor 3 30 cm | Sensor 4 45 cm | Sensor 5 60 cm | Sensor 6 90 cm | Sensor 7 120 cm | Sensor 8 150 cm | Sensor 9 180 cm |
|---|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton | 23 | 22 | 21 | 19 | 17 | 14 | 11 | 8 | 6 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 21 | 18 | 17 | 15 | 13 | 10 | 8 | 6 | 4 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) - Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

| Equipamento | Sensor 1 0 cm | Sensor 2 20 cm | Sensor 3 30 cm | Sensor 4 45 cm | Sensor 5 60 cm | Sensor 6 90 cm | Sensor 7 120 cm | Sensor 8 150 cm | Sensor 9 180 cm |
|---|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton | 23 | 22 | 21 | 19 | 17 | 14 | 11 | 8 | 6 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Amostra S-375/02 Modificada - Mec. dos Pav.

| Equipamento | Sensor 1 0 cm | Sensor 2 20 cm | Sensor 3 30 cm | Sensor 4 45 cm | Sensor 5 60 cm | Sensor 6 90 cm | Sensor 7 120 cm | Sensor 8 150 cm | Sensor 9 180 cm |
|--|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton | 94 | 58 | 38 | 18 | 10 | 6 | 5 | 5 | 4 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Argila - reforço sub-leito | | | | | | | | | |
| Equipamento | Sensor 1 0 cm | Sensor 2 20 cm | Sensor 3 30 cm | Sensor 4 45 cm | Sensor 5 60 cm | Sensor 6 90 cm | Sensor 7 120 cm | Sensor 8 150 cm | Sensor 9 180 cm |
| Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton | 97 | 44 | 24 | 11 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Areia - sub-leito | | | | | | | | | |
| Equipamento | Sensor 1 0 cm | Sensor 2 20 cm | Sensor 3 30 cm | Sensor 4 45 cm | Sensor 5 60 cm | Sensor 6 90 cm | Sensor 7 120 cm | Sensor 8 150 cm | Sensor 9 180 cm |
| Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton | 60 | 23 | 15 | 11 | 9 | 7 | 6 | 4 | 4 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - camadas inf - sub-leito | | | | | | | | | |
| Equipamento | Sensor 1 0 cm | Sensor 2 20 cm | Sensor 3 30 cm | Sensor 4 45 cm | Sensor 5 60 cm | Sensor 6 90 cm | Sensor 7 120 cm | Sensor 8 150 cm | Sensor 9 180 cm |
| Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton | 38 | 24 | 18 | 12 | 9 | 7 | 6 | 5 | 4 |

Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE 6 – Estrutura aplicada para análise elástica de múltiplas camadas - metodologia África do Sul

| DADOS DA ESTRUTURA | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------------|----------------|---------------|------------|-----------|--------|-----------|----------|
| CAMADA | MASSA ESP (g/cm ³) | ESPESSURA (cm) | COMPORTAMENTO | MÓDULO MPa | k1 | k2 | k3 | k4 |
| 1 | 2,4 | 5 | LINEAR | 3184 | 0 | -3,535 | 0 | 0 |
| 2 | 1,9317 | 7,3 | LINEAR | 107 | 153,68396 | 0 | 0 | 0,41 |
| 3 | 1,654 | 17,5 | LINEAR | 75 | 0,0031599 | 0 | 1,2455704 | 0,559092 |
| 4 | 1,881 | 15 | LINEAR | 48 | 2,6391 | 0 | 0 | 0,0683 |

DADOS DO CARREGAMENTO

| | |
|---------------------------------|------------|
| Tipo: | Eixo duplo |
| Tipo de análise: | Semi-eixo |
| Número de rodas: | 2 |
| Carga de roda: | 2,05 |
| Pressão de Pneus (MPa): | 0,56 |
| Raio do Carregamento (m): | 10,79 |
| Distância entre rodas - Tx (m): | 32,4 |
| Distância entre eixos - Ty (m): | 0 |
| Bitola - Lx (m): | 181 |

Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE 7 – Resultados obtidos no programa de análise elástica de múltiplas camadas para a estrutura proposta na metodologia África do Sul

| Ponto | X (cm) | Y (cm) | Z (cm) | Ux (μm) | Uy (μm) | Uz (μm) | Sx (MPa) | Sy (MPa) | Sz (MPa) | Sxy (MPa) | Syz (MPa) | Sxz (MPa) | Ex (m/m) | Ey (m/m) | Ez (m/m) |
|-------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1179,97688 | 0,23045 | 2,00382 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,000148 | 0,000604 | -0,000246 |
| 2 | 0 | 0 | 2,5 | 0 | 0 | 1183,76108 | 0,263936 | 0,229105 | 0,073546 | 0 | 0 | 0 | 0,000005 | 0,000035 | -0,000031 |
| 3 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1181,70324 | 0,090816 | 0,028593 | 0,154366 | 0 | 0 | 0 | 0,00025 | -0,000535 | 0,001052 |
| 4 | 0 | 0 | 8,65 | 0 | 0 | 1139,65219 | 0,052405 | -0,006906 | 0,150921 | 0 | 0 | 0 | 0,000019 | -0,00073 | 0,001262 |
| 5 | 0 | 0 | 12,3 | 0 | 0 | 1091,46687 | 0,063773 | 0,02356 | 0,139548 | 0 | 0 | 0 | -0,000128 | -0,000906 | 0,001337 |
| 6 | 0 | 0 | 21,05 | 0 | 0 | 974,52056 | 0,02032 | -0,001297 | 0,105942 | 0 | 0 | 0 | -0,000357 | -0,000775 | 0,001298 |
| 7 | 0 | 0 | 28,55 | 0 | 0 | 880,54823 | -0,004906 | -0,019398 | 0,080932 | 0 | 0 | 0 | -0,000435 | -0,000715 | 0,001225 |
| 8 | 0 | 0 | 44,8 | 0 | 0 | 668,36843 | -0,000483 | -0,003919 | 0,048703 | 0 | 0 | 0 | -0,000337 | -0,000433 | 0,001047 |
| 9 | 16,2 | 0 | 0 | -29,26234 | 0 | 1191,50106 | 2,887656 | 3,358391 | 0,56 | 0 | 0 | 0 | 0,000476 | 0,000676 | -0,000511 |
| 10 | 16,2 | 0 | 2,5 | -4,51987 | 0 | 1197,00688 | 0,31956 | 0,346759 | 0,420064 | 0 | 0 | 0,012083 | 0,000016 | 0,000028 | 0,000059 |
| 11 | 16,2 | 0 | 5 | 20,02315 | 0 | 1188,73024 | 0,060268 | 0,04645 | 0,260238 | 0 | 0 | 0,017586 | -0,00044 | -0,000614 | 0,002083 |
| 12 | 16,2 | 0 | 8,65 | 38,69725 | 0 | 1116,63721 | 0,018303 | -0,002738 | 0,204833 | 0 | 0 | 0,019213 | -0,00049 | -0,000755 | 0,001863 |
| 13 | 16,2 | 0 | 12,3 | 55,32367 | 0 | 1051,80431 | 0,043336 | 0,025613 | 0,163717 | 0 | 0 | 0,018805 | -0,000558 | -0,000901 | 0,001769 |
| 14 | 16,2 | 0 | 21,05 | 64,75632 | 0 | 919,27566 | 0,014353 | -0,000692 | 0,103911 | 0 | 0 | 0,018581 | -0,000428 | -0,000719 | 0,001304 |
| 15 | 16,2 | 0 | 28,55 | 69,52686 | 0 | 829,49665 | -0,004499 | -0,017626 | 0,074393 | 0 | 0 | 0,014554 | -0,000401 | -0,000654 | 0,001125 |
| 16 | 16,2 | 0 | 44,8 | 51,47271 | 0 | 637,60634 | 0,00067 | -0,003656 | 0,044098 | 0 | 0 | 0,008605 | -0,000281 | -0,000403 | 0,00094 |

(continua)

(conclusão)

| Ponto | Exy (m/m) | Eyz (m/m) | Exz (m/m) | s1 (MPa) | s2 (MPa) | s3 (MPa) | e1 (m/m) | e2 (m/m) | e3 (m/m) | sOctNor (MPa) | sOctCis (MPa) |
|-------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|---------------|---------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 2,00382 | 0,23045 | 0 | 0,000604 | -0,000148 | -0,000246 | 0,744757 | 0,895249 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0,263936 | 0,229105 | 0,073546 | 0,00005 | 0,000035 | -0,000031 | 0,188863 | 0,082772 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0,154366 | 0,090816 | 0,028593 | 0,001052 | 0,00025 | -0,000535 | 0,091258 | 0,051347 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0,150921 | 0,052405 | -0,006906 | 0,001262 | 0,000019 | -0,00073 | 0,065473 | 0,065092 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0,139548 | 0,063773 | 0,02356 | 0,001337 | -0,000128 | -0,000906 | 0,075627 | 0,048088 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0,105942 | 0,02032 | -0,001297 | 0,001298 | -0,000357 | -0,000775 | 0,041655 | 0,046306 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0,080932 | -0,004906 | -0,019398 | 0,001225 | -0,000435 | -0,000715 | 0,018876 | 0,044277 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0,048703 | -0,000483 | -0,003919 | 0,001047 | -0,000337 | -0,000433 | 0,014767 | 0,024037 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 3,358391 | 2,887656 | 0,56 | 0,000676 | 0,000476 | -0,000511 | 2,268682 | 1,223409 |
| 10 | 0 | 0 | 0,00001 | 0,421496 | 0,346759 | 0,318128 | 0,000059 | 0,000028 | 0,000015 | 0,362128 | 0,043576 |
| 11 | 0 | 0 | 0,000444 | 0,261773 | 0,058733 | 0,04645 | 0,002102 | -0,000459 | -0,000614 | 0,122318 | 0,098736 |
| 12 | 0 | 0 | 0,000485 | 0,206791 | 0,016344 | -0,002738 | 0,001888 | -0,000515 | -0,000755 | 0,073466 | 0,094596 |
| 13 | 0 | 0 | 0,000727 | 0,166586 | 0,040467 | 0,025613 | 0,001825 | -0,000614 | -0,000901 | 0,077555 | 0,063246 |
| 14 | 0 | 0 | 0,000718 | 0,107613 | 0,010651 | -0,000692 | 0,001375 | -0,0005 | -0,000719 | 0,039191 | 0,048603 |
| 15 | 0 | 0 | 0,000563 | 0,076992 | -0,007098 | -0,017626 | 0,001175 | -0,000451 | -0,000654 | 0,017423 | 0,042341 |
| 16 | 0 | 0 | 0,000484 | 0,045741 | -0,000973 | -0,003656 | 0,000987 | -0,000327 | -0,000403 | 0,013704 | 0,02268 |

Fonte: Autora (2024)

APÊNDICE 8 – Tabela de dimensionamento referente ao método da África do Sul

| Fórmula | Observação | Resultado | Considerações | Valor | Item | Valor 2 |
|---|--|-----------------|---|---|---------------------------------------|-----------|
| $N = 10^{(A - 10 \log(\epsilon_{v,df}))}$ | compressão vertical na superfície da camada do solo de fundação | 704,8602 175 | Com base na Tabela 5 - na linha da categoria B, foram interpolados os valores para atingir o limite de deformação permanente para uma via com 16mm - ideal para via com baixo volume de tráfego | 16 | valor interpolado para a esp. de 16mm | 35, 18 |
| Fórmula | Observação | Resultado | Considerações | Observação 2 | | |
| $N = SF \cdot 10^{\alpha \left(1 - \frac{\log(\epsilon_{t,mb})}{\beta}\right)}$ | critério de fadiga - extensão horizontal na base da camada em misturas betuminosas | 126,3768 046 | Dados das constantes obtidos através da Tabela 6 - Utilizados os valores da linha da categoria B para mistura betuminosa contínua | a Equação 11 resulta que quanto mais espessa for a camada, maior é a resistência à propagação de fendas | | |
| $SF = \begin{cases} 1 & \text{se } e < 25 \text{ mm} \\ 0,0489 e^{-0,2225} & \text{se } e \geq 25 \text{ mm} \end{cases}$ | SF | 1,00 | | | | |
| $N = SF \cdot 10^{\alpha \left(1 - \frac{\epsilon_{t,mb}}{\epsilon_{t,ultimo}}\right)}$ | <u>extensão horizontal na base da camada estabilizada</u> | 118,3010 3 | utilizados dados da Tabela 7 - linha da categoria B | | | |
| $SF = \begin{cases} 1 & \text{se} \\ 10^{(0,00285e - 0,293)} & \text{se} \\ 8 & \text{se} \end{cases}$ | 102mm ≤ | SF | 1,00 | | | |

(continua)
(conclusão)

| Fórmula | Observação | Resultado | Considerações | Observação 2 |
|--|--|-----------------|--|--------------|
| $N = 10^{\alpha \left(1 - \frac{\sigma v}{b \sigma c}\right)}$ | esmagamento inicial | 2,66E-01 | | |
| | esmagamento avançado | 4,90E-01 | | |
| $SF = \frac{\sigma_{a.cg} \left(K \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) + 2 K C \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right)}{\sigma_{1.cg} - \sigma_{a.cg}}$ | 1ª equação | 103,5240 406 | | |
| | 2ª equação - utilizada, caso S3 fosse zero | 4,046397 903 | | |
| $N = 10^{(\alpha SF + \beta)}$ | Critério de Ruptura | 2,5143E+273 | Utilizada a Tabela N para obtenção dos resultados - linha da categoria B | |
| DADOS PARA OBTENÇÃO DE SF - EQUAÇÃO 12 | | | | |
| s3 | 0,02356 | s1 | 0,139548 | |
| com base na tabela 10 | ϕ_p | 7,06 | | |
| com base na tabela 1 | C_p | 0,303 | | |
| Tabela 26 (Nervis) | ϕ | 44 | | |
| Tabela 26 (Nervis) | C | 113,6666 | | |
| $45 + \frac{\phi}{2}$ | | 2,355852366 | | |

Fonte: Autora (2024).