

Welliton dos Santos Rodrigues

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS POR MEIO DOS MÉTODOS DNER/1981 E MeDiNa**

Florianópolis, 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Welliton dos Santos Rodrigues

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS POR MEIO DOS MÉTODOS DNER/1981 E MeDiNa**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Civil do Centro Tecnológico
da Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Liseane Padilha Thives,
Dra.

Coorientadora: Poliana Tonieto Cittadella,
MSc.

Florianópolis, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

dos Santos Rodrigues, Welliton ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS POR MEIO DOS MÉTODOS DNER/1981 E MeDiNa / Welliton dos Santos Rodrigues; orientadora, Liseane Padilha Thives, coorientadora, Poliana Toniato Cittadella, 2023. 123 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Dimensionamento. 3. Pavimento. 4. Custo. 5. Desempenho. I. Padilha Thives, Liseane. II. Toniato Cittadella, Poliana. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Welliton dos Santos Rodrigues

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDOS PELO MÉTODO DNER/1981 E
MeDiNa**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Civil” e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 22 de junho de 2023.

Prof^ª. Lia Caetano Bastos, Dr^ª.

Coordenadora do TCC

Banca Examinadora:

Prof^ª. Liseane Padilha Thives, Dr^ª.

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Poliana Tonieto Cittadella, MSc.

Coorientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. EneDir Ghisi, PhD

Universidade Federal de Santa Catarina

Igor Catão Martins Vaz, MSc.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC)

Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

O modo rodoviário é o principal responsável pelo transporte de cargas e passageiros no país, apesar da limitada extensão da rede viária pavimentada. O investimento no setor rodoviário no Brasil tem sido insuficiente frente às necessidades e demandas, o que resultou no crescimento inadequado da malha viária. Devido à escassez de manutenção da rede e crescimento do tráfego pesado, a qualidade da infraestrutura rodoviária tem se deteriorado causando elevado prejuízo aos usuários e ao país. Uma das causas atribuídas ao fraco desempenho dos pavimentos flexíveis é o método de dimensionamento vigente, DNER/1981, de natureza empírica e desatualizado. Neste sentido, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em conjunto com outras instituições desenvolveram um método empírico-mecanicista denominado Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) ainda em implantação no país. O MeDiNa requer dados de caracterização de materiais componentes das camadas do pavimento obtidos a partir de ensaios, com base na mecânica dos pavimentos, sendo necessária a avaliação do desempenho estrutural previsto no dimensionamento. Este trabalho tem como objetivo realizar um comparativo técnico e financeiro a partir do dimensionamento de estruturas de pavimentos através dos métodos DNIT/81 e MeDiNa. No dimensionamento do pavimento, foram simulados três níveis de tráfego (10^6 , 10^7 e 10^8) e camadas de revestimento em concreto asfáltico com asfalto convencional (estrutura 01) e com asfalto borracha (estrutura 02). Foi avaliada a vida útil das estruturas e realizado o levantamento do custo de implantação por quilômetro dos pavimentos dimensionados por cada método. Os resultados mostraram que o custo total de implantação dos pavimentos dimensionados pelo DNER/1981 foi inferior àqueles pelo MeDiNa. Por outro lado, quanto ao afundamento de trilha de roda (ATR), para os tráfegos 10^6 , 10^7 e 10^8 , o DNER/1981 resultou em 11,95 mm, 9,62 mm e 9,40 mm respectivamente, para a estrutura 01 e 11,96 mm, 10,00 mm e 9,87 mm para a estrutura 02. Para o MeDiNa, obteve-se 11,0 mm, 5,80 mm e 4,50 mm para a estrutura 01 e 11,10, 6,80 mm e 5,40 mm para a estrutura 02. Quanto ao percentual de área trincada, o dimensionamento pelo método DNER/1981 resultou em 10,53%, 95,64% e 99,00% para a estrutura 01 e 9,22%, 85,68% e 99,00% para a estrutura 02. Para este parâmetro, no MeDiNa, os resultados foram 9,33%, 28,49%, 29,96% para a estrutura 01 e, 8,31%, 28,10% e 27,60% para a estrutura 02. Pôde-se confirmar que o dimensionamento pelo MeDiNa se mostrou adequado para atender a vida útil de projeto, além de permitir o uso racional dos diferentes materiais disponíveis para a execução dos pavimentos e estruturas de pavimentos mais resistentes ao tráfego solicitado. Observou-se ainda um melhor desempenho com o uso de camada de revestimento em mistura com asfalto modificado em relação à convencional.

Palavras-chave: Dimensionamento. Pavimento. Custo. Desempenho.

ABSTRACT

The road mode is mainly responsible for transporting cargo and passengers in the country, despite the limited extent of the paved road network. In Brazil, the road sector investment needs to be increased, considering the needs and demands, which resulted in inadequate road network growth. Due to scarce network maintenance and heavy traffic growth, the quality of road infrastructure has deteriorated, causing elevated damage to users and the country. One of the causes attributed to the weak performance of flexible pavements is the current design method, DNER/1981, which has empirical nature and also needs to be updated. In this sense, the National Transport Infrastructure Department (DNIT), with other road institutions, developed an empirical-mechanistic method called the National Design Method (MeDiNa), which, at this time, is being implemented in the country. MeDiNa requires characterization data of materials that compose the pavement layers obtained from laboratory tests, which are based on the mechanics of the pavements, requiring the evaluation of the structural performance foreseen in the design. This work aims to carry out a technical and financial comparison based on the design of pavement structures using the DNER/1981 and MeDiNa methods. In the pavement design, three traffic levels (10^6 , 10^7 and 10^8) and two different surface layers using asphalt concrete mixtures with conventional asphalt (structure 01) and asphalt rubber (structure 02) were simulated. The structure's lifespan and the implantation cost of pavement per kilometre design by each method were evaluated. The results showed that the total implementation cost of pavements designed by DNER/1981 was lower than those by MeDiNa. On the other hand, regarding rutting depth, for traffics 106, 107 and 108, the DNER/1981 resulted in 11.95 mm, 9.62 mm and 9.40 mm for structure 01 e, 11.96 mm, 10.00 mm and 9.87 mm for structure 02, respectively. As for MeDiNa, 11.0 mm, 5.80 mm and 4.50 mm for Structure 01 and 11.10, 6.80 mm and 5.40 mm for Structure 02 were obtained. Related to the percentage of cracking area, the design using the DNER/1981 method resulted in 10.53%, 95.64% and 99.00% for structure 01 and 9.22%, 85.68% and 99.00% for structure 02. For this parameter, in MeDiNa, the results were 9.33%, 28.49%, 29.96% for structure 01 and 8.31%, 28.10% and 27.60% for structure 02. From this work, it was proved that MeDiNa proved to be adequate to meet the valuable life of the project, in addition to allowing the rational use of the different materials available for the execution of pavements and resulted in more resistance pavement structures to requested traffic. It was also observed that better performance when asphalt concrete layer with modified asphalt was used than the conventional one.

Palavras-chave: Design. Pavement. Cost. Performance.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Camadas dos pavimentos flexíveis e rígidos (sem escala). | 18 |
| Figura 2. Distribuição de cargas ao longo das camadas dos diferentes tipos de pavimentos | 19 |
| Figura 3. Exemplos de materiais granulares usados em camadas de base e sub-base. | 21 |
| Figura 4. Materiais estabilizados quimicamente e usados em camadas de base e sub-base. | 22 |
| Figura 5. Representação das simbologias adotadas no método DNER/1981 | 27 |
| Figura 6. Parâmetros avaliados na análise mecanicista | 28 |
| Figura 7. Curva sigmoidal ajustada | 32 |
| Figura 8. Fator de deslocamento em função do dano médio | 32 |
| Figura 9. Fator de fadiga da mistura | 34 |
| Figura 10. Fluxograma da metodologia do trabalho | 42 |
| Figura 11. Representação da composição do pavimento da estrutura 1 (sem escala) | 45 |
| Figura 12. Representação da composição do pavimento da estrutura 2 (sem escala) | 45 |
| Figura 13. Tela principal do software MeDiNa | 46 |
| Figura 14. Tela de propriedade do subleito | 47 |
| Figura 15. Tela de resultados do dimensionamento – Danos mensais | 47 |
| Figura 16. Estruturas dimensionada por meio das metodologias DNER/1981 e MeDiNa para N de 10^6 . | 53 |
| Figura 17. Estruturas dimensionada por meio das metodologias DNER/1981 e MeDiNa para N de 10^7 . | 53 |
| Figura 18. Estruturas dimensionada por meio das metodologias DNER/1981 e MeDiNa para N de 10^8 . | 54 |
| Figura 19. Evolução da área trincada da estrutura 01 para as três configurações de tráfego | 55 |
| Figura 20. Evolução da área trincada da estrutura 02 para as três configurações de tráfego | 55 |
| Figura 21. Evolução do afundamento de trilha de roda para os três níveis de tráfego | 56 |
| Figura 22. Custo de implantação de pavimentos novos por método de dimensionamento e carregamento | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Equações dos fatores de equivalência (USACE) de carga para diferentes carregamentos. | 25 |
| Tabela 2. Coeficiente de equivalência estrutural | 26 |
| Tabela 3. Espessura mínima de revestimento betuminoso | 27 |
| Tabela 4. Condições de aderência em função das diferentes camadas do pavimento | 33 |
| Tabela 5. Classes de misturas asfálticas | 35 |
| Tabela 6. Ensaio de deformabilidade | 38 |
| Tabela 7. Espessuras das camadas dos pavimentos. | 39 |
| Tabela 8. Dimensionamento realizado para duas estruturas | 39 |
| Tabela 9. Dimensionamento realizado para a duplicação da BR-287 | 40 |
| Tabela 10. Parâmetros do subleito | 43 |
| Tabela 11. Parâmetros da sub-base estabilizada granulometricamente | 43 |
| Tabela 12. Parâmetros da base estabilizada granulometricamente | 44 |
| Tabela 13. Parâmetros dos materiais do revestimento asfáltico | 44 |
| Tabela 14. Custos de referência | 48 |
| Tabela 15. Dimensionamento empírico das estruturas 01 e 02 | 49 |
| Tabela 16. Evolução da área trincada e ATR para a estrutura 01 por mês | 50 |
| Tabela 17. Evolução da área trincada e ATR para a estrutura 02 por mês | 51 |
| Tabela 18. Dimensionamento empírico-mecanicista da estrutura 01 | 52 |
| Tabela 19. Dimensionamento empírico-mecanicista da estrutura 02 | 52 |
| Tabela 20. Custo de implantação das estruturas de pavimento | 57 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis.

BGS – Brita Graduada Simples.

BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento.

CA – Concreto Asfáltico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo.

CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

ISC – Índice de Suporte Califórnia.

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional.

SBS – Polímero elastômero Estireno-Butadieno-Estireno.

SICRO – Sistema de Custos Referenciais de Obra.

UFC – Universidade Federal do Ceará.

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria.

USACE – *United States Army Corps of Engineers.*

LISTA DE SÍMBOLOS

MR – Módulo de resiliência.

Di – Dano de fadiga.

σ_1 – Tensão vertical.

σ_3 – Tensão de confinamento.

σ_d – Tensão de desvio.

θ – Invariante de tensões.

N_{fad} – Vida de fadiga.

$\%RF$ – Porcentagem de resistência a tração na flexão.

H_t – Espessura total do pavimento.

H_{20} – Espessura total até a base.

H_n – Espessura total até a sub-base.

H_m – Espessura total até o reforço de subleito.

K – Coeficiente de equivalência estrutural.

R – Espessura do revestimento.

B – Espessura da base.

h_{20} – Espessura da sub-base.

h_n – Espessura do reforço de subleito.

V_m – Volume médio diário anual.

FV – Fator de veículo.

FR – Fator climático regional.

FP – Fator de pista.

N – Número de eixos equivalentes.

FFM – Fator de Fadiga da Mistura asfáltica.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 | Objetivo Geral..... | 14 |
| 1.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 1.3 | Estrutura do Trabalho | 15 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | Breve histórico da pavimentação no mundo e Brasil | 16 |
| 2.2 | Tipos de pavimentos rodoviários..... | 18 |
| 2.3 | Materiais constituintes das camadas dos pavimentos flexíveis | 20 |
| 2.3.1 | Métodos empíricos de dimensionamento | 22 |
| 2.3.2 | Método DNER/1981 | 23 |
| 2.3.3 | Métodos empíricos-mecanicistas de dimensionamento..... | 27 |
| 2.3.4 | Método MeDiNa | 30 |
| 2.3.5 | Modelos de comportamento dos materiais e ensaios..... | 35 |
| 2.4 | Comparativo entre os métodos DNER/1981 e MeDiNa..... | 38 |
| 2.5 | Orçamentação rodoviária | 40 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 42 |
| 3.1 | Tráfego..... | 42 |
| 3.2 | Propriedades dos materiais | 42 |
| 3.3 | Composição do pavimento..... | 44 |
| 3.4 | Dimensionamento pelo método DNER/1981 | 45 |
| 3.5 | Método do Dimensionamento Nacional (MeDiNa)..... | 45 |
| 3.6 | Orçamento..... | 48 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 49 |
| 4.1 | Dimensionamento pelo método DNER/1981 | 49 |
| 4.2 | Desempenho das estruturas dimensionadas pelo método DNER/1981 verificadas pelo MeDiNa | 50 |
| 4.3 | Dimensionamento pelo Método de Dimensionamento Nacional | 52 |
| 4.4 | Análise do custo..... | 56 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 59 |
| 5.1 | Limitações..... | 59 |
| 5.2 | Recomendações para trabalhos futuros..... | 60 |
| | REFERÊNCIAS | 61 |
| | APÊNDICE A - DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS DIMENSIONADAS PELO MÉTODO DNER/1981 VERIFICADAS PELO MeDiNa | 69 |
| | APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO REALIZADO NO <i>SOFTWARE</i> MeDiNa..... | 94 |

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a política de transportes incentivou o modo rodoviário com o objetivo de integrar e promover o desenvolvimento do país, que apresenta dimensões continentais (LEE, 2017). Vieira (2001) afirmou que o transporte rodoviário possui versatilidade de escolha de rotas e horários e a capacidade em realizar transporte “porta-a-porta”. O modo rodoviário é responsável por 64,9% do transporte de carga e por mais de 90% do total de passageiros (CNT, 2022a), o que demonstra a importância na economia do país.

Atualmente, a malha rodoviária brasileira possui extensão de 1.720.909 km, da qual apenas 12,4% (213.500 km) são pavimentados e representa uma densidade de 25,1 km de rodovias pavimentadas por 1.000 m² de área do território (CNT, 2022b). Em 2022, a Confederação Nacional do Transporte (CNT) realizou uma avaliação em 109.103 km de rodovias federais e estaduais pavimentadas e constatou que 61,8% apresentaram-se em condições regular ou péssima. Além disso, 52,2% das rodovias avaliadas apresentaram o mesmo desempenho estrutural em condição regular a péssima (CNT, 2022a).

O relatório de competitividade global do fórum econômico mundial mostrou que em 2019 o Brasil encontrava-se na 78^a posição em infraestrutura de transportes, inferior inclusive a de outros países da América Latina, como Argentina (68^a) e Chile (42^a) (WEF, 2019).

Neste contexto, observou-se que o Brasil apresenta carência de rodovias pavimentadas, tendo em conta a representatividade do modo rodoviário e ainda as condições das rodovias pavimentadas que necessitam de melhorias. Um dos problemas atribuídos à condição dos pavimentos das rodovias federais está relacionado ao método de dimensionamento vigente no país.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) foi introduzido no Brasil na década de 1960 pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), o qual, após atualizações, sendo a última em 1981, continua vigente e é amplamente utilizado no país. Trata-se de um método empírico de dimensionamento que se baseia na proteção da camada de subleito (solo de fundação) com capacidade de suporte aferida pelo Índice de Suporte Califórnia (ISC) e tráfego expresso em Número de Repetições do Eixo-simples Padrão (número N) de 80 kN, para um período de projeto de 10 anos (MEDINA; MOTTA, 2015).

Por outro lado, devido ao aumento do tráfego em volume e carga, desenvolvimento de ensaios laboratoriais que promoveram a adequada caracterização dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos e a evolução de modelos computacionais, foram desenvolvidos os métodos de dimensionamento com base empírico-mecanicistas, principalmente os países desenvolvidos.

A abordagem mecanicista busca explicar os fenômenos e as causas físicas não somente pela observação, como ocorre nos métodos empíricos. Em projetos de pavimentos os fenômenos são descritos pelas tensões, deformações e deflexões que se desenvolvem na estrutura, enquanto as causas físicas estão relacionadas às cargas e às propriedades dos materiais das camadas. A relação entre o fenômeno e a causa pode ser descrita por meio de modelos matemáticos adotados nos métodos empíricos. Um dos modelos matemáticos mais usados é o elástico em camadas (PAVEMENT INTERACTIVE, 2023).

O método de dimensionamento mais recente, com base empírico-mecanicista foi publicado em 2004 nos Estados Unidos da América (EUA), resultado de uma ação denominada de *Joint Task Force on Pavements* (força tarefa conjunta para a pavimentação). O método *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) foi desenvolvido para suprir as limitações da metodologia empírica até então aplicada no projeto de pavimentos do país (AASHTO, 2008).

No Brasil, observou-se que nas rodovias federais, os pavimentos dimensionados em conformidade com a normativa vigente não alcançaram a vida útil prevista em projeto, com o aparecimento prematuro de defeitos como trincamento por fadiga e deformação permanente.

Pesquisas desenvolvidas no Brasil concluíram que a ruptura precoce e ocorrência de defeitos poderiam estar relacionadas ao método empírico de dimensionamento (CNT, 2017; FERNANDES *et al.*, 2018; PASCOAL *et al.*, 2021).

Motta e Franco (2021) afirmaram que o tráfego rodoviário mudou significativamente desde 1966, com aumento no volume, a diversidade de tipos de veículos, pneus especialmente desenvolvidos para atender às demandas e pesos dos veículos, corroborando com o agravamento dos defeitos. De acordo com o Ministério da Infraestrutura, a frota de veículos pesados aumentou cerca de 43% entre 2013 e 2022, o que comprova a constatação de Motta e Franco (2021) (BRASIL, 2013; BRASIL, 2022).

Neste sentido, os órgãos rodoviários e centros de pesquisa brasileiros visualizaram a necessidade de desenvolvimento de um método de dimensionamento de pavimentos no Brasil que pudesse contemplar os avanços já implantados no mundo.

Em 2007, Franco (2007) apresentou em sua tese de doutorado o método de dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos asfálticos, o SisPav. Este método foi desenvolvido para atender às condições ambientais do país, permitindo estimar o dano no pavimento por meio de modelos de previsão da deformação máxima admissível na superfície do subleito, bem como da deformação permanente e fadiga.

O SisPav não foi normatizado e os pavimentos das rodovias federais, ainda dimensionados pelo método empírico apresentaram problemas estruturais e funcionais. No entanto, o SisPav foi essencial para o desenvolvimento do método brasileiro de dimensionamento.

Considerando as condições das rodovias federais do país, em 2013 O DNIT realizou o levantamento de onze obras concluídas entre os anos de 2011 e 2012, cujo relatório foi entregue ao Tribunal de Contas da União (TCU). O levantamento revelou que nove destas obras apresentaram problemas estruturais, em que, tais defeitos ocorreram em média sete meses após a conclusão das obras (BRASIL, 2013).

No ano de 2015, foi desenvolvido por meio de um Termo de Execução Descentralizado celebrado entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) em parceria com o Instituto Alberto Luiz de Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), um novo método de dimensionamento. A pesquisa contou com o apoio e contribuição do Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello – CENPES/PETROBRAS em parceria com universidades brasileiras. Em homenagem ao engenheiro Jacques de Medina, foi denominado Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) e é um programa computacional que realiza a verificação do dimensionamento de estruturas de pavimentos empírico-mecanicista de múltiplas camadas (IPR,2020).

O método apresenta a vantagem de incluir não apenas o critério de desempenho do afundamento de trilha de roda (deformação permanente), mas também leva em consideração o trincamento por fadiga. Adicionalmente, permite ao projetista escolher materiais com tecnologias avançadas, tais como revestimentos com asfalto borracha ou com asfaltos modificados com polímero diferentemente do antigo método de dimensionamento (CNT, 2018). Em conjunto com a abordagem mecanicista, elementos

empíricos são usados para definir os valores críticos de tensões e deformações resultam na “falha” do pavimento em um determinado período de projeto.

O MeDiNa está atualmente em processo de implantação no Brasil, devido à exigência de dados de ensaios laboratoriais para a rotina de cálculos. No entanto, é importante ressaltar que nem todas as empresas e universidades estão equipadas para realizar esses ensaios. Por ser um método relativamente novo, a divulgação e emprego, comparativamente ao método do DNER/1981 são importantes para avaliação das estruturas de pavimentos resultantes de cada um. Neste sentido, as espessuras requeridas das camadas, por vezes mais espessas, refletem no custo do pavimento.

É importante destacar a relevância do tema, uma vez que impacta e está diretamente relacionado aos custos, prazos e segurança do transporte de mercadorias e pessoas (CNT, 2022a). O impacto se apresenta mais evidente diante da insuficiência da infraestrutura rodoviária existente no país e da falta de manutenção adequada das vias, o que reforça a necessidade de discussão e busca por soluções desta problemática.

Dessa forma, o tema motivou o desenvolvimento deste trabalho, com a proposta de dimensionar estruturas de pavimentos pelo método atualmente vigente, DNER/1981 e em implantação, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) e realizar um comparativo com as abordagens técnica e financeira. Foram avaliadas duas estruturas de pavimentos distintas comumente empregadas no Brasil sob solicitação de três diferentes tráfegos, dimensionadas com uso de ambas as metodologias. Com base no referencial de preços Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) foram levantados os custos das estruturas.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é comparar estruturas de pavimentos dimensionadas pelos métodos DNER/1981 e MeDiNa e realizar uma avaliação técnica e financeira.

1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as espessuras e tipos de materiais das estruturas propostas pelos métodos DNER/1981 e MeDiNa;

- Comparar a caracterização dos materiais solicitadas pelos métodos em termos de resistência;
- Determinar a evolução do afundamento de trilha de roda e da área trincada da estrutura dimensionada pelo método DNER/1981 utilizando o *software* MeDiNa;
- Determinar o custo por quilômetro do pavimento com base no SICRO do DNIT para ambos os métodos e compará-los.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos cujos conteúdos são descritos a seguir:

O Capítulo 1, Introdução, apresenta uma contextualização acerca do tema. Os objetivos, justificativa e estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, é apresentado o estado da arte relacionado aos temas essenciais para o desenvolvimento do trabalho, bem como resultados de trabalhos de outros autores inseridos na temática.

O Capítulo 3, Materiais e Métodos, apresenta e descreve a metodologia adotada, apoiada em normas, critérios de dimensionamento, literatura consultada, etc. que embasam o estudo.

No Capítulo 4, Resultados e Discussão, são apresentados os resultados obtidos e os quadros comparativos.

O Capítulo 5, Considerações Finais e Recomendações, apresenta um resumo das avaliações apresentadas e discutidas no trabalho, bem como, propostas e recomendações para futuras pesquisas na área.

Nas Referências constam as referências bibliográficas citadas e que serviram de base para a elaboração da metodologia adotada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, foram abordados os principais aspectos relacionados à pavimentação rodoviária, sendo inicialmente apresentado um breve histórico da pavimentação no mundo. Em seguida, foi descrita a estrutura dos pavimentos rodoviários e as camadas que a compõem. Ainda, detalhadas as características e particularidades dos pavimentos flexíveis, bem como os principais defeitos que ocorrem após a abertura ao tráfego. Foram apresentados os dois métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis brasileiros, objetos deste estudo. Por fim, a análise de custo com base no referencial de custos do DNIT foi abordada.

2.1 Breve histórico da pavimentação no mundo e Brasil

De forma a melhorar o acesso a áreas cultiváveis, recursos naturais diversos e expansão da área territorial de influência, a humanidade criou as chamadas estradas, cujo registro mais antigo advém da China. No entanto, aos romanos foi atribuído o aprimoramento da construção de estradas, com introdução de elementos de drenagem, estrutura em camadas e rigor técnico (BALBO, 2007). Na época, a estrutura em camadas continha a fundação formada por pedras justapostas em linha, de maneira a possibilitar a drenagem e prover uma plataforma e permitir a circulação de veículos com duas rodas.

No continente americano destacavam-se as estradas construídas no século XV pelos incas, habitantes da região hoje ocupada pelo Peru, Equador, Oeste da Bolívia e Norte do Chile (BERNUCCI *et al.*, 2022). A primeira rodovia financiada pelo governo federal norte-americano foi construída século XIX para alcançar os assentamentos no oeste do país (USDOT, 2017).

No final do século XVIII foi concebida a primeira estrada pavimentada do Brasil, construída com a supervisão dos engenheiros da Escola de Fortificações de Lisboa e por iniciativa do governador da capitania de São Paulo, que conectava o Planalto Paulista ao porto de Santos (BALBO, 2007). Durante o governo de Washington Luiz (1926-1930), na república velha, deu-se ênfase à construção de rodovias devido à forte influência na indústria automobilística americana, promovendo a expansão acentuada da rede rodoviária nacional (OKUMURA, 2018).

Na década de 1940, o Brasil possuía apenas 1.300 km de rodovias pavimentadas, sendo esta uma das menores extensões rodoviárias da América Latina (BERNUCCI *et*

al., 2022). Em 1944, foi aprovado pelo Governo Federal o primeiro plano rodoviário nacional, com objetivo de indicar linhas prioritárias, instituir a classificação das estradas de rodagem e instituir normas técnicas de especificação das estradas (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 1974).

Durante o governo de Juscelino Kubitschek (1956-1960) foi elaborado o plano de metas que visava aumentar o investimento em vários setores estratégicos, incluindo transportes, indústria de base, alimentação e a construção da nova capital, Brasília (LESSA; PEREIRA, 2011).

A partir da década de 1950 até 1970 os governos da América Latina, inclusive o Brasil, direcionaram uma grande quantidade de recursos públicos e investimentos em infraestrutura de transporte, como malhas rodoviárias de grande escala. O principal objetivo era fortalecer a economia e o bem-estar social, adequado à realidade de cada país (SCHLISSLER; BULL, 1992).

Na década 1990, os governos estaduais e federal engajaram-se em um processo de concessão da operação e manutenção de rodovias à iniciativa privada, com objetivo de garantir de forma eficiente investimentos neste setor (BALBO, 2007).

Durante o período compreendido entre 2004 e 2012, o investimento público federal foi responsável pela maior parte dos recursos destinados às obras de manutenção e expansão da infraestrutura de transportes. Entretanto, a partir de 2013, os investimentos privados tornaram-se a principal fonte de recursos, alcançando um montante de 170% do valor investido pelo governo federal (CNT, 2022c).

Os investimentos na construção e ampliação da rede rodoviária brasileira não acompanharam o aumento da frota, desenvolvimento do país e crescimento da população.

O tráfego de veículos no Brasil tem aumentado significativamente nos últimos anos, refletindo o crescimento da economia e da população do país. Segundo o Ministério da Infraestrutura, em 2008 o número de veículos no Brasil era de 54,5 milhões e em dez anos contabilizava 101 milhões, representando um aumento 85%. Por outro lado, a extensão da malha rodoviária total evoluiu apenas 8,4% para o mesmo período (BRASIL 2008, 2018).

Em 2022, o Brasil possuía extensão de 1.720.909 km de malha rodoviária sendo apenas 213.500 km pavimentada, ou seja, apenas 12% (CNT, 2022b). Neste mesmo ano, a pesquisa realizada pela Confederação Nacional de Transportes (2022a) revelou que cerca de 61,8% das rodovias avaliadas apresentaram algum tipo de problema, como

deficiência na sinalização, falha na geometria ou problemas estruturais e funcionais no pavimento.

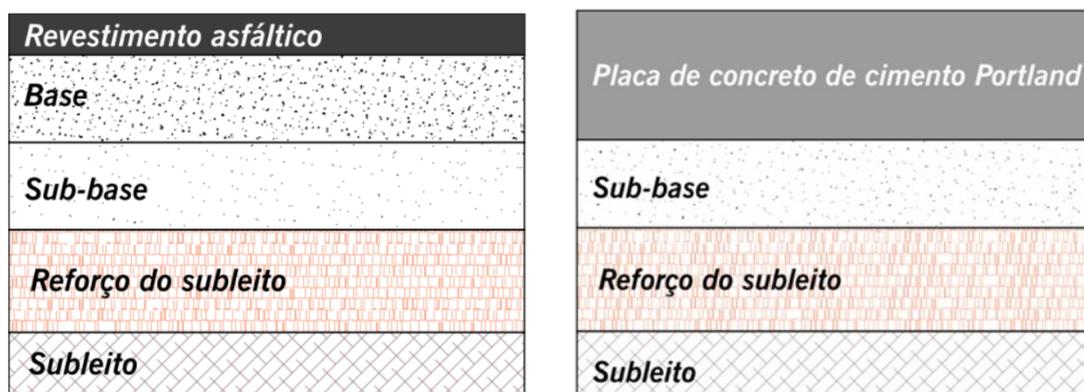
Devido à priorização histórica do meio de transporte rodoviário, atualmente este modo de transporte continua a ser o responsável pela movimentação majoritária do transporte de cargas do país, num percentual de 64,9% (CNT, 2022a).

2.2 Tipos de pavimentos rodoviários

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas construída sobre a superfície final do terrapleno, projetada técnica e economicamente para resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e conferir conforto e segurança aos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Os pavimentos são classificados em função da camada de revestimento, como flexíveis e rígidos. Os pavimentos flexíveis apresentam a camada de revestimento em materiais asfálticos, base asfáltica (camada de ligação), granular ou de solo estabilizado granulometricamente, sub-base granular ou solo, podendo conter camadas de reforço do solo de fundação (subleito) (Figura 1a). Por outro lado, os pavimentos rígidos são compostos de uma placa de concreto de cimento Portland assente sobre solo de fundação ou ainda, sobre sub-base granular ou estabilizada quimicamente (Figura 1b). Pode-se ainda classificar os pavimentos como semirrígidos, quando estes apresentam revestimento composto por concreto asfáltico e camadas de base e/ou sub-base constituídas por materiais quimicamente estabilizados ou de concreto rolado. Neste caso, o revestimento é flexível e a camada de base é rígida (MEDINA; MOTTA, 2015).

Figura 1. Camadas dos pavimentos flexíveis e rígidos (sem escala).



(a) Pavimento flexível

(b) Pavimento rígido.

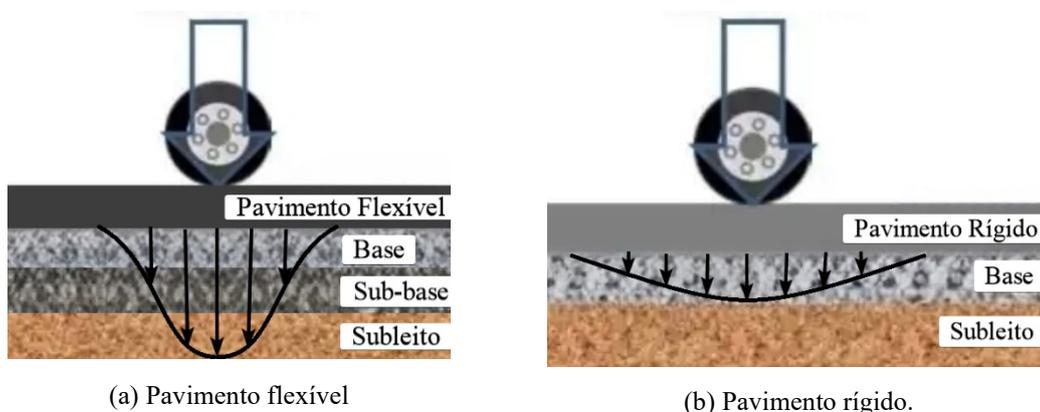
Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

O estabelecimento da estrutura dos pavimentos flexíveis, espessura e tipo de material das camadas, depende do dimensionamento. As camadas usuais são as seguintes (BERNUCCI *et al.*, 2022):

- a. Revestimento: Camada superior designada a receber a ação direta do tráfego, pode ser subdividida em camada de rolamento e camada de ligação (DER/PR, 2018);
- b. Base: Camada do pavimento destinada a resistir aos esforços provenientes do tráfego e redistribuindo para as camadas inferiores, executada sobre a sub-base (IPR, 2010a). Se constituída por material asfáltico é denominada de camada intermediária ou de ligação (*binder*);
- c. Sub-base: Camada complementar à de base com as mesmas funções desta executada sobre o subleito ou reforço de subleito (IPR, 2010b);
- d. Reforço de subleito: Camada estabilizada granulometricamente empregada com o intuito de reduzir as elevadas espessuras das camadas de base e sub-base, quando necessário e executada sobre o subleito (IPR, 2010c);
- e. Subleito: terreno de fundação do pavimento (IPR, 2006a).

Quando um pavimento flexível é submetido ao carregamento, o campo de tensões nas suas camadas é altamente concentrado nas proximidades do ponto de aplicação da carga (Figura 2a), enquanto, em um pavimento rígido, a distribuição do campo de tensões é mais homogênea ao longo da estrutura (Figura 2b), resultando em menores magnitudes de esforços verticais sobre o subleito (BALBO, 2007).

Figura 2. Distribuição de cargas ao longo das camadas dos diferentes tipos de pavimentos



Fonte: Baseado em Anupoju (2011)

A espessura do revestimento de pavimentos rígidos é estabelecida com base na resistência à flexão do concreto e nas resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ou não ser estruturalmente reforçadas com armadura. A camada subjacente desse tipo de pavimento é geralmente designada como sub-base, pois sua qualidade é comparável à da sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

2.3 Materiais constituintes das camadas dos pavimentos flexíveis

No Brasil, os projetos de pavimentos flexíveis utilizam diversas seções padronizadas de combinações de materiais e camadas, dimensionadas para atender às diferentes demandas de tráfego. A escolha dos materiais e espessuras das camadas depende da intensidade do tráfego que circula na via, do clima da região e da qualidade do solo, entre outros fatores (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Os revestimentos dos pavimentos flexíveis, constituídos por materiais asfálticos podem ser produzidos em usinas de asfalto, sendo comumente concreto asfáltico (CA), a camada porosa de atrito (CPA), o *stone matrix asphalt* (SMA), a pré-misturado a quente (PMQ), a pré-misturado a frio (PMF), o concreto asfáltico modificado com polímeros (CAMP) e o concreto asfáltico modificado com borracha (CAMB) (BALBO, 2007). Após a produção, estes materiais são espalhados e compactados por meio de rolos compressores em campo.

A camada de revestimento de pavimentos flexíveis pode ser construída em campo, por meio da técnica denominada tratamento superficial, que consiste na aplicação do ligante asfáltico sobre a base, seguida de distribuição de agregado, e compactação. O número de camadas classifica a técnica em tratamento superficial duplo ou triplo.

Dentre os principais materiais granulares comumente empregados no Brasil para as camadas de base e sub-base destacam-se (BERNUCCI *et al.*, 2022):

- Brita graduada simples – material de composição granulométrica bem-graduada (Figura 3a);
- Macadame hidráulico composto por agregados graúdos de composição aberta (Figura 3b);
- Solo-brita - Composto por material britado misturado com a areia, silte e argila.

Figura 3. Exemplos de materiais granulares usados em camadas de base e sub-base.



(a) Brita graduada simples

(b) macadame hidráulico

Fonte: Balbo (2007)

Para estas camadas, os seguintes materiais estabilizados quimicamente têm sido utilizados (IPR, 2006a):

- Brita graduada tratada com cimento (Figura 4a);
- Solo-cimento (Figura 4b);
- Solo melhorado com cimento;
- Solo cal, solo melhorado com cal;
- Solo betume.

O uso de ligantes hidráulicos tem como finalidade melhorar as propriedades dos materiais aos quais são adicionados. No caso de britas graduadas tratadas com cimento (Figura 4a), o acréscimo de ligante hidráulico leva a um aumento considerável da rigidez (módulo) do material. Por outro lado, na estabilização de solos, o uso de ligantes hidráulicos é indicado para reduzir a expansão, permitindo que esse material seja utilizado como camada de pavimentação, desde que esteja dentro das restrições estabelecidas no projeto (BALBO, 2007).

Figura 4. Materiais estabilizados quimicamente e usados em camadas de base e sub-base.



(a) Brita Graduada Tratada com Cimento

(b) Solo Cimento.

Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Dependendo do tipo de subleito (solo de fundação) ou capacidade de suporte e , para reduzir a espessura das camadas mais nobres, pode ser necessária a inclusão de uma camada denominada de reforço do subleito.

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), solos arenosos lateríticos podem ser utilizados como camadas de reforço ou ainda como sub-base, no caso de tráfego médio ($10^6 < N < 10^7$) a pesado ($N \geq 10^7$) (N é o número de repetições do eixo simples padrão de 80 kN). Esses solos são naturais e compostos por uma mistura de areia e argila com granulometria descontínua e uma baixa porcentagem de silte.

2.3.1 Métodos empíricos de dimensionamento

Métodos de dimensionamento empíricos são aqueles baseados na experiência acumulada, oriunda da observação da evolução da condição do pavimento em pistas de teste e experimentais. Os parâmetros medidos em campo, tais como repetições do eixo padrão, afundamento e trincamento são correlacionados com propriedades dos materiais (granulometria, parâmetros volumétricos, teor de asfalto), cujo resultado é expresso por equações ou parâmetros limites (CNT, 2017).

Estes métodos são considerados de fácil aplicação, por demandarem ensaios de caracterização dos materiais de relativa simplicidade e não requerendo utilização de aparelhagem sofisticada para sua execução. Por outro lado, possuem a limitação de aplicação adequada apenas em condições relativamente semelhantes àquelas dos locais onde foram feitas as observações (BEZERRA NETO, 2004).

No final da década de 1920 foi desenvolvida pela Divisão de Estradas do Estado da Califórnia (CDH), atual *California Department of Transportation* (CALTRANS) uma

metodologia de dimensionamento empírica baseada na capacidade de suporte do subleito, denominado Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) (COUTINHO, 2011). Nesta metodologia, o dimensionamento era realizado por meio de curvas que relacionavam o tráfego com o ISC dos materiais das camadas.

No início da década de 1940, com a entrada dos EUA na Segunda Guerra Mundial e a necessidade de pavimentos adequados em pistas de aeroportos militares, a metodologia anterior foi modificada com auxílio da Sociedade Norte-Americana de Engenheiros Civis (ASCE) (MEDINA; MOTTA, 2015).

Assim, em 1962 foi lançada a primeira versão do *Guide for Design of Pavement Structures* (Guia de Projetos de Pavimentos) contendo os resultados de análises de pistas experimentais da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e parâmetros relativos aos materiais testados. Desta forma, foi possível realizar a avaliação do desempenho estrutural de diferentes materiais aplicados no pavimento. Estas metodologias norte-americanas representaram a base para o desenvolvimento do primeiro método brasileiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis, denominado o Método DNER (MEDINA; MOTTA, 2015).

2.3.2 Método DNER/1981

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), atual DNIT, foi elaborado pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza, cuja primeira versão data de 1960. Além da metodologia desenvolvida pelo Caltrans, com uso do ISC, o método se baseou no trabalho *Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic*, publicado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE) e nos dados de pistas experimentais da AASHTO (IPR, 2006a). Posteriormente, o método foi aperfeiçoado e a última versão é de 1981.

O método de dimensionamento DNER/1981 tem o objetivo prevenir deformações plásticas excessivas no subleito, durante a vida útil de projeto do pavimento. Embora baseado em experimentos e dados climáticos e do solo dos EUA, o método se mostrou eficaz na prevenção de afundamentos de trilhas de roda nos pavimentos brasileiros (IPR 2006). Por outro lado, o método não traz considerações quanto ao desempenho à fadiga do revestimento, ou seja, trincamento.

Neste método, a partir da solicitação do tráfego, define-se a espessura total do pavimento, estabelecendo-se a espessura das sub-camadas (reforço de subleito, sub-base, base e revestimento). Em função do tipo, cada material da camada é caracterizado pelo coeficiente estrutural (k). A capacidade de suporte do subleito bem como os requisitos dos materiais de reforço de subleito, base e sub-base é mensurada conforme o Índice de Suporte Califórnia (ISC), expresso em porcentagem. Atualmente o método está incorporado ao Manual de Pavimentação do DNIT (IPR, 2006a). O método estabelece os valores de ISC mínimos e expansões máximas que os materiais das camadas devem apresentar, sendo:

- a. Materiais para reforço de subleito: ISC maior que o do subleito e expansão igual ou inferior a 2,0%;
- b. Sub-base: ISC igual ou superior a 20%, Índice de Grupo igual a zero e expansão inferior a 1,0%;
- c. Base: ISC igual ou superior a 80%, limite de liquidez igual ou inferior a 25, de plasticidade menor ou igual a 6 e expansão igual ou inferior a 0,5%;
- d. Para pistas cujo número de operações é igual ou inferior a 10^6 o índice de suporte Califórnia da base pode ser igual ou inferior a 60%.

O Índice de Grupo é uma classificação do solo, baseada nas características granulométricas e em seu índice plasticidade e a expansão é a medida da variação volumétrica do corpo de prova em imersão, medida no ensaio ISC.

A primeira etapa para o dimensionamento é a definição do número equivalente de eixos com base no levantamento de tráfego para o período de projeto. O tráfego é expresso no número de eixos equivalentes ao eixo simples padrão de 80 kN, designado número “N”. As seguintes etapas são necessárias para estabelecer o número N:

- a. Realizar a contagem volumétrica classificatória;
- b. Calcular o volume médio diário anual (V_m);
- c. Estimar a taxa de crescimento anual do tráfego;
- d. Calcular o Fator de Veículo (FV) (Equação 1), por meio do fator de carga e do fator de veículos;

$$FV = FC \times FE \quad (1)$$

Em que FV é o fator de veículos, FC é o fator de carga e FE o fator de eixo.

- e. Determinar o Fator Climático Regional (FR). Normalmente tem se adotado o valor de 1,0, conforme os resultados de pesquisas desenvolvidas pelo IPR/DNER (IPR, 2006A);
- f. Determinar o Fator de Pista (FP) definido pela taxa entre o volume de veículos comerciais no sentido de maior tráfego pelo fluxo total de veículos comerciais;
- g. Calcular o número de operações de eixos do ano de base (Equação 2):

$$N_0 = 365 \times V_m \times FV \times FP \times FR \quad (2)$$

Em que V_m é volume médio diário anual, FV o fator de veículo, FP o fator de pista e FR o fator climático regional.

- h. Calcular o número de operações de eixos durante o período de projeto (Equação 3):

$$N = \sum(N_i) \quad (3)$$

Em que N é o número de operações de eixos durante o período de projeto e N_i o número de operações de eixos durante o ano i.

Os fatores de equivalência de operações têm base no USACE e são obtidos pelas equações mostradas na Tabela 1 em função do tipo de eixo. Observa-se que na determinação do número N, os veículos de passeio não são contabilizados, uma vez que a influência, em termos de carregamento, é mínima e pode ser desconsiderada.

Tabela 1. Equações dos fatores de equivalência (USACE) de carga para diferentes carregamentos.

| Tipos de Eixo | Faixas de cargas (tf) | Equações |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|
| Eixo simples de rodagem simples e Eixo simples de rodagem dupla | 0 – 8 | $FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$ |
| | ≥ 8 | $FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$ |
| Eixo Tandem Duplo | 0 – 11 | $FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$ |
| | ≥ 11 | $FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$ |
| Eixo Tandem Triplo | 0 – 18 | $FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$ |
| | ≥ 18 | $FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$ |

Fonte: IPR (2006b).

O ensaio para determinação do ISC é preconizado pela norma DNIT 172/2016 – ME (DNIT, 2016). Na segunda etapa, após o cálculo de N, deve-se definir os materiais de cada camada do pavimento. O método estabelece coeficientes de equivalência estrutural (k), os quais dependem do tipo de material das camadas do pavimento. Os fatores de equivalência estruturais são apresentados na Tabela 2

Tabela 2. 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 7 dias, entre 45kg/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 |

Fonte: IPR (2006a).

A partir dos valores do ISC do solo e dos materiais escolhidos para serem empregados na estrutura do pavimento, bem como dos coeficientes de equivalência estrutural de cada camada e do N, na terceira etapa do dimensionamento, o método estabelece equações e inequações a serem calculadas. Nesta etapa, inicialmente calcula-se a espessura total do pavimento necessária para proteger o solo de fundação (subleito), por meio da Equação 4:

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times ISC_{subleito}^{-0,598} \quad (4)$$

Em que H_t é a espessura total do pavimento (cm), N é o número de eixos equivalentes ao eixo padrão e $ISC_{subleito}$ o índice de suporte Califórnia do subleito (%).

Após, as inequações 1, 2 e 3 são calculadas para obtenção das espessuras de cada uma das camadas do pavimento.

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (1)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_{SB} \geq H_n \quad (2)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_{SB} + h_n \times K_{ref} \geq H_m \quad (3)$$

Em que R é a espessura necessária do revestimento em centímetros, B a espessura necessária da base em centímetros, h_{20} da sub-base em centímetros e h_n a do reforço do subleito em centímetros, H_{20} a espessura do pavimento até o topo da sub-base em centímetros, H_n é a espessura do pavimento até o topo da camada de reforço em centímetros e H_m a espessura total do pavimento em centímetros. K_R , é o coeficiente de equivalência estrutural do revestimento, K_B da base, K_{SB} da sub-base e K_{ref} do reforço de subleito.

As espessuras mínimas recomendadas para os revestimentos asfálticos são apresentadas na Tabela 3.

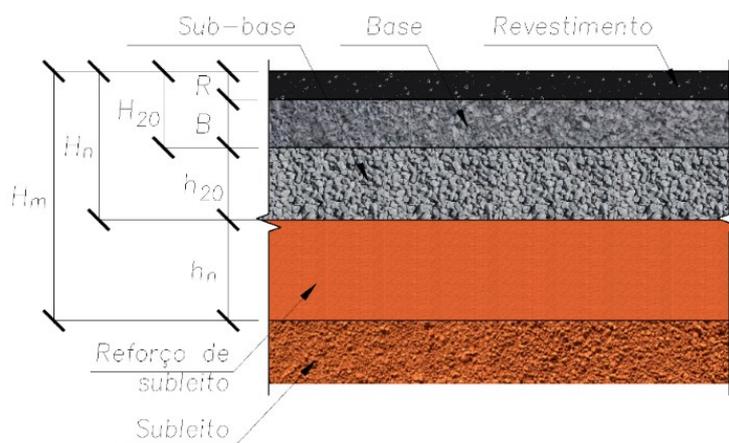
Tabela 3. Espessura mínima de revestimento betuminoso

| N | Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso |
|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| $N \leq 10^6$ | Tratamentos superficiais betuminosos |
| $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$ | Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura |
| $5 \times 10^6 < N \leq 10^7$ | Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura |
| $10^7 < N \leq 5 \times 10^7$ | Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura |
| $N > 5 \times 10^7$ | Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura |

Fonte: IPR (2006a).

A Figura 5 apresenta a estrutura tipo de um pavimento flexível e as simbologias utilizadas no método DNER/1981.

Figura 5. Representação das simbologias adotadas no método DNER/1981



Fonte: Elaborada pelo autor

2.3.3 Métodos empíricos-mecanicistas de dimensionamento

O avanço de técnicas computacionais permitiu o uso de metodologias de dimensionamentos mais racionais baseadas nas teorias de múltiplas camadas. Contudo, devido à complexidade da interação pavimento-veículos e de seus materiais constituintes, permaneceu a necessidade da calibração empírica do dimensionamento, com dados de campo (MOTTA, 1991).

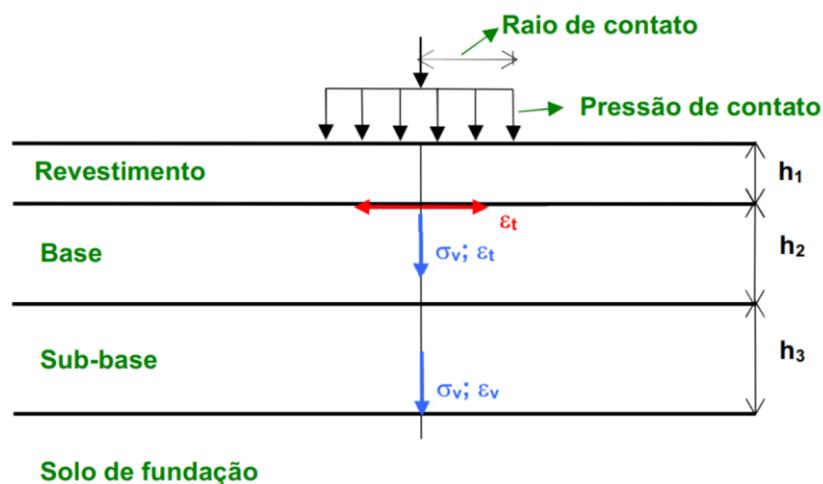
O método mais eficaz atualmente, para prever o desempenho de pavimentos é o uso de modelos empírico-mecanicistas, devido à possibilidade de utilização das propriedades

mecânicas básicas dos solos e dos materiais de pavimentação. Esses modelos também permitem uma otimização do dimensionamento da estrutura, levando em conta a capacidade de suporte de cada camada às cargas de tráfego e aos processos de degradação, ao contrário de modelos puramente empíricos (IPR, 2006a).

A deterioração dos pavimentos é causada principalmente pela repetição de deformações resilientes e pelo acúmulo de deformações permanentes. As deformações permanentes resultam em afundamento diferenciado do pavimento, denominada de “trilha de roda”. Embora as deformações elásticas sejam geralmente menores que a deformação máxima de ruptura por cisalhamento dos materiais, elas podem levar à falha por fadiga dos elementos estruturais submetidos à tração (MOTTA, 1991).

Os principais parâmetros avaliados na análise mecânica de uma estrutura de um pavimento são apresentados na Figura 6: (i) deformação de tração (ϵ_t) na fibra inferior do concreto asfáltico, para o controle do trincamento por fadiga; (ii) estado de tensão no topo da camada de base, importante em estruturas com revestimentos delgados para controlar a ruptura por cisalhamento; (iii) tensão vertical (σ_v) e deformação vertical (ϵ_v) no topo do subleito para controlar a deformação permanente (FONTES, 2009).

Figura 6. Parâmetros avaliados na análise mecânica



Fonte: Baseado em Fontes (2009)

Em 1885, Boussinesq propôs um conjunto de equações para o cálculo das tensões e deformações em um meio semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópico sob ação de uma carga pontual (FRANCO, 2007).

A partir da teoria de Boussinesq, o professor Donald Burmister (1943, 1945), apresentou a teoria da elasticidade de sistemas de duas e três camadas, utilizada para calcular as tensões e deslocamentos em sistemas estratificados sujeitos a cargas distribuídas em uma área circular. Esta teoria baseia-se em algumas suposições básicas: os materiais presentes nas camadas são elásticos, isotrópicos e homogêneos; as camadas são transversalmente ilimitadas e não possuem peso; e a camada inferior é considerada semi-infinita (MEDINA; MOTTA, 2015).

Os métodos de dimensionamento empírico-mecanicistas são definidos como sendo aqueles que se baseiam nos conceitos da mecânica dos pavimentos, e calibram-se com base no conhecimento empírico, nos dados de pistas experimentais e de laboratório (CNT, 2017).

De acordo com a AASHTO (1993) os métodos empírico-mecanicistas apresentam as seguintes vantagens:

- a. Estimar o impacto de novas condições de carregamento (novas configurações de carregamento, configurações de eixos, mudança nas pressões de pneus, entre outras);
- b. Uso otimizado de materiais;
- c. Melhor avaliação dos esforços;
- d. O processo de envelhecimento do concreto asfáltico pode ser computado no dimensionamento;
- e. Pode-se considerar os efeitos climáticos para a estimativa do desempenho do pavimento de forma direta;
- f. Possibilidade de análise da vida útil do pavimento.

Em contrapartida, o dimensionamento da estrutura do pavimento por um método empírico-mecanicista deve ser elaborado com base na caracterização adequada dos materiais, por meio de ensaios de maior complexidade e com o auxílio de ferramentas computacionais (MOTTA, 1991).

As características dos materiais são determinadas por meio de aplicação sucessiva de tensões, buscando se assemelhar com as condições das solicitações dinâmicas do tráfego (MEDINA; MOTTA, 2015). Na década de 1960 foram desenvolvidos programas computacionais para o dimensionamento de pavimentos, como foi o caso do ELSYM5 e

Bisar, baseados na teoria da elasticidade do sistema de múltiplas camadas de Burmister (COUTINHO, 2011).

Medina e Motta (2015) asseveraram que nas últimas décadas os programas computacionais mais utilizados no país foram o ELSYM5 (*Elastic Layered System*) baseado no método das diferenças finitas e o FEPAVE2 (*Finite Element Analysis of Pavement*) de modelagem elástica não linear.

Considerando as condições da malha rodoviária federal e o método de dimensionamento desatualizado, a comunidade científica brasileira e os órgãos rodoviários comprovaram a necessidade emergencial do desenvolvimento de um novo método no Brasil. No ano de 2015, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) firmou um Termo de Execução Descentralizada entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e diversas universidades nacionais, viabilizando o desenvolvimento de um novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis denominado MeDiNa (MOTTA; FRANCO, 2021).

2.3.4 Método MeDiNa

O Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) é um *software* desenvolvido em linguagem de programação C++, cuja função é a de verificação e/ou dimensionamento de estruturas de pavimentos por meio da rotina de Análise Elásticas de Múltiplas Camadas (AEMC), baseada em hipóteses e calibração (IPR, 2020).

O MeDiNa foi desenvolvido em parceria com o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ), o Centro de Pesquisas da Petrobras e com a contribuição de inúmeras outras universidades (IPR, 2020).

- *Hipóteses*

As soluções computacionais desenvolvidas pelo MeDiNa têm como base as mesmas hipóteses fundamentais dos problemas elásticos lineares de meios semi-infinitos estratificados. Medina e Motta (2015) descrevem essas hipóteses como sendo:

- a. Os materiais são elásticos, isotrópicos e homogêneos;
- b. A Lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao de tração;
- c. As camadas do pavimento são ilimitadas transversalmente e não possuem peso;
- d. A camada de fundação é semi-infinita;

- e. A superfície da camada superior do pavimento não está sujeita às tensões fora da região carregada.
 - f. O carregamento é estático e uniformemente distribuído sobre a área de contato pneu/pavimento;
 - g. As tensões em grandes profundidades são nulas;
 - h. São consideradas duas condições de aderência na interface das camadas, a primeira totalmente aderida e a segunda não há atrito entre as camadas.
- *Calibração*

Segundo o IPR (2020), a função de calibração dos danos de fadiga em função da área trincada apresentada pelo *software* foi feita utilizando os dados obtidos na tese de doutorado de Fritzen (2016).

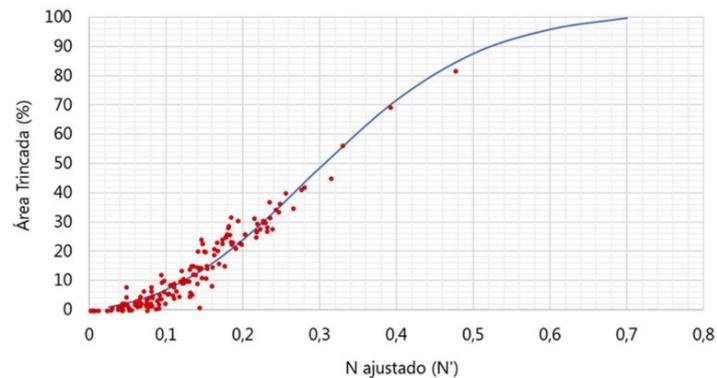
Fritzen (2016) estudou 45 segmentos executados com seis misturas asfálticas distintas em diferentes condições estruturais e níveis de tráfego. Além disso, para validar a função de transferência obtida na tese, foram utilizados os dados experimentais da rede temática de asfalto; dentre eles, estavam os trechos experimentais da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal do Ceará (UFC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Universidade de São Paulo (USP).

Para ajustar a calibração das estruturas da pesquisa de Fritzen (2016), foi necessário definir matematicamente a curva sigmoideal que melhor se adequasse à evolução do trincamento dos trechos analisados. Foram aplicados também fatores de deslocamento (f_s) aos valores dos Números de Eixos Equivalentes (ESAL) onde haviam medidas de área trincada, de forma a minimizar o erro entre a curva sigmoideal e a evolução da área trincada (Figura 7) (IPR, 2020). A expressão do N ajustado foi definida pela Equação 5:

$$N' = (N \times f_s) \times 10^{-10} \quad (5)$$

Em que: N' é o número de eixos equivalentes ajustado; N é o número de eixos equivalentes e f_s é o fator de deslocamento.

Figura 7. Curva sigmoidal ajustada



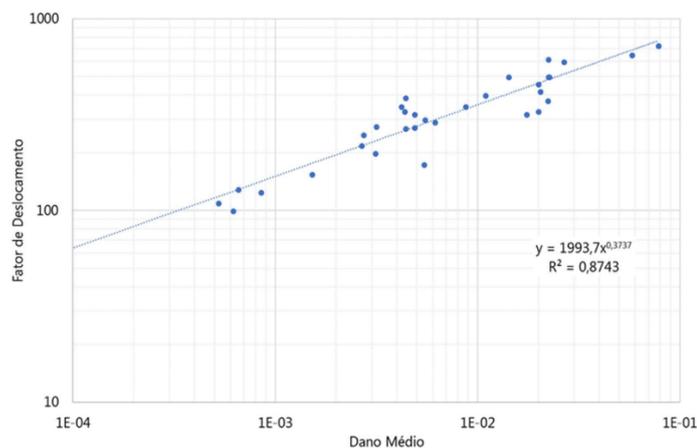
Fonte: IPR (2020)

Utilizando-se dos mesmos pontos de calibração do Fritzen (2016) os fatores de deslocamentos foram correlacionados com o dano médio de fadiga. A função de transferência que descreve essa correlação é definida como (Equação 6; Figura 8):

$$N' = 1993,7 \times (D_{\text{médio}})^{0,3737} \quad (6)$$

Em que: N' é o número de eixos equivalentes ajustado e $D_{\text{médio}}$ é o dano médio de fadiga.

Figura 8. Fator de deslocamento em função do dano médio



Fonte: IPR (2020)

- *Condição de aderência*

Quanto às condições de aderência, conforme anteriormente descrito (Hipóteses), as condições de aderências computadas (k_i) foram estabelecidas como aderidas ou não aderidas. A aderência entre as camadas influencia na modelagem da estrutura, com base em modelos analógicos de molas. Estas condições de aderência foram modeladas

utilizando uma teoria física similar à de molas de forma a permitir a movimentação horizontal entre as camadas do pavimento (IPR, 2020). A lei que descreve a tensão radial que restringe o deslocamento entre as camadas é descrita pela equação 7:

$$\tau = k_1 \times (u_1 - u_{i+1}) \therefore \frac{\tau}{k_1} = (u_1 - u_{i+1}) \quad (7)$$

Em que; τ é a tensão de cisalhamento radial entre as camadas; $(u_1 - u_{i+1})$ é a diferença entre o deslocamento radial relativo ao longo da interface das camadas i e $i+1$; k_1 é o módulo de rigidez da “mola” que resiste ao deslocamento radial relativo ao longo da interface.

Ressalta-se que para um valor de “ k_1 ” muito próximo de zero, o deslocamento é irrestrito, sendo assim, não há aderência. Por outro lado, se “ k_1 ” tender ao infinito, não haverá deslocamento entre as camadas; sendo assim, consideradas aderidas.

O *software* MeDiNa não permite ajustar o módulo de rigidez deste modelo, havendo condições de aderência pré-estabelecidas pelo programa (Tabela 4).

Tabela 4. Condições de aderência em função das diferentes camadas do pavimento

| Camada | Condição |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Camada asfáltica sobre outra camada asfáltica | Aderido |
| Camada asfáltica sobre camada cimentada | Não aderido |
| Camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas | Aderido |
| Camada asfáltica sobre camada de solos ou granulares | Não aderido |
| Tratamento superficial sobre camadas asfálticas | Aderido |
| Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada | Não aderido |
| Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares | Não aderido |
| Camada antirreflexão de trincas sobre camadas estabilizadas | Não aderido |
| Camada de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares | Não aderido |

Fonte: IPR (2020)

- *Critério de fadiga*

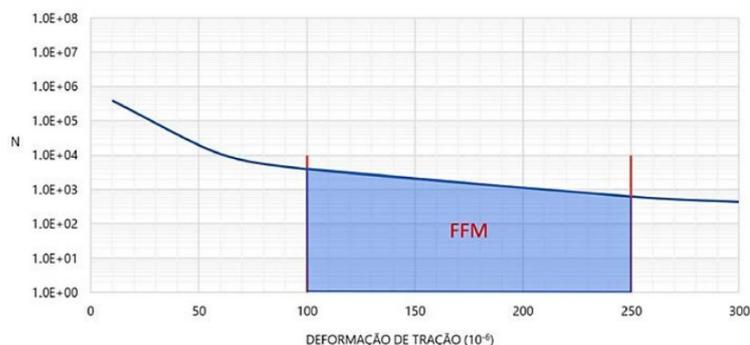
O *software* analisa a fadiga utilizando a relação entre a deformação específica resiliente e vida de fadiga com base nos coeficientes experimentais k_1 e k_2 . Sendo descrita como (Equação 8):

$$N_{fad} = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2} \quad (8)$$

Em que: ε_t é a deformação específica resiliente, N_{fad} a vida de fadiga e k_1 e k_2 os coeficientes de correlação.

Com o objetivo de facilitar a especificação de misturas asfálticas, o MeDiNa classifica os materiais asfálticos com base nas propriedades de módulo de resiliência e no desempenho frente a fadiga, sendo este mensurado pelo Fator de Fadiga da Mistura asfáltica (FFM). O FFM é definido como a área sob a curva de fadiga entre 100 e 250 micro-deformações sendo que este valor é obtido automaticamente pelo *software*. A Figura 9 ilustra graficamente a região que define o FFM, e a Equação 9 expressa a obtenção de seu valor numérico.

Figura 9. Fator de fadiga da mistura



Fonte: IPR (2020)

$$FFM = 0,2[\log (N_{100}) + \log (N_{250})] \quad (9)$$

Em que: FFM é o Fator de Fadiga da Mistura asfáltica, N100 o número de eixos equivalentes relacionado com a deformação de tração de 100 micro-deformações e N250 o número de eixos equivalentes relacionado com a deformação de tração de 250 micro-deformações.

O desempenho da mistura quanto à fadiga não depende apenas da resistência do material, mas também da rigidez, caracterizada pelo módulo de resiliência. Misturas pouco resilientes apresentam maiores deformações e como resultado maiores tensões de tração e desta forma, deve-se analisar ambas as propriedades de forma conjunta (IPR, 2020).

Por meio de simulações de estruturas de pavimentos foram analisadas as respostas a fadiga de diversos tipos de revestimentos asfálticos. As estruturas foram analisadas com confiabilidade de 85% e até que a área trincada total fosse igual a 30%. Com isso foram estipulados intervalos para o qual esses materiais apresentassem comportamentos semelhantes, sendo denominados de classes de misturas asfálticas (Tabela 5).

Tabela 5. Classes de misturas asfálticas

| Classe | Repetições de eixo padrão |
|--------|---------------------------------------------|
| 1 | $4,5 \times 10^6 \leq RP < 6,0 \times 10^6$ |
| 2 | $6,0 \times 10^6 \leq RP < 7,5 \times 10^6$ |
| 3 | $7,5 \times 10^6 \leq RP < 1,0 \times 10^7$ |
| 4 | $RP > 10^7$ |

Fonte: Adaptado de IPR (2020)

2.3.5 Modelos de comportamento dos materiais e ensaios

Para assegurar a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos no dimensionamento ou análise de uma estrutura de pavimento conforme o novo Método de Dimensionamento Nacional, é imprescindível dispor de um conjunto completo e abrangente de informações. Para isso, os materiais utilizados para a pavimentação devem ser caracterizados de forma adequada por meio de ensaios laboratoriais que permitem obter informações sobre seu comportamento mecânico, como o módulo, resistência à deformação permanente e à fadiga (IPR, 2020).

- *Solos e materiais granulares*

No dimensionamento através do MeDiNa, os materiais granulares, solos finos, siltosos ou argilosos são descritos pelos seus parâmetros de módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e resistência à deformação permanente (IPR, 2020).

O módulo de resiliência do solo depende de diversos fatores, incluindo a sua natureza e composição, as condições em que se encontra e as tensões aplicadas sobre ele (MEDINA; MOTTA, 2015). Espinosa (1987), Preussler (1978) e Medina, Motta e Ceratti (1986) em seus estudos sobre o comportamento resiliente de solos e materiais granulares, observaram que o módulo de resiliência é fortemente influenciado pelo histórico de carregamento, pelo estado de tensões, condições de umidade e por sua massa específica.

Modelos matemáticos foram desenvolvidos para descrever o comportamento desses materiais frente a cargas cíclicas. Tais modelos correlacionam o módulo de resiliência com a tensão de desvio (σ_d), tensão confinante (σ_3) ou com a invariante de tensões (θ). O modelo resiliente em função da tensão confinante (Equação 10) descreve o comportamento de solos arenosos, enquanto solos argilosos são representados pelos modelos relacionados a tensão de desvio (Equação 11). Os solos também podem ser

classificados em função da invariante de tensões (equação 12) ou em função das tensões confinantes e de desvio (equação 13).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (10)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (11)$$

$$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (12)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \cdot \sigma_3^{k_3} \quad (13)$$

Em que: MR é o módulo de resiliência, σ_3 a tensão confinante (MPa), σ_d a tensão de desvio (MPa), θ a invariante de tensões (MPa) e k_1 , k_2 e k_3 os coeficientes de correlações experimentais.

A norma DNIT 134 (DNIT, 2018a) estabelece os procedimentos para a determinação do módulo e classifica os materiais (solos e materiais não estabilizados quimicamente) em função do comportamento resiliente.

Guimarães (2009) propôs um modelo de deformação permanente expressa em função do estado de tensões do material. Na pesquisa foram levantados materiais de ampla faixa granulométrica e de diversas regiões do Brasil. Como resultado, foi proposto o modelo descrito na Equação 14.

$$\varepsilon_p^{esp} (\%) = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (14)$$

Em que: ε_p^{esp} é a deformação permanente específica (mm), σ_3 a tensão confinante (kgf/cm²), σ_d a tensão de desvio (kgf/cm²), $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ são os parâmetros de regressão; N é o número de ciclos de aplicação de carga; ρ_0 é a tensão de referência (kgf/cm²).

O objetivo da pesquisa de Guimarães (2009) foi prever o desempenho a longo prazo de camadas granulares, subleitos e solos compactados que sofrem deformações permanentes devido à repetição de cargas do tráfego, sendo normalizado pela primeira vez no país pela norma DNIT 179/2018-IE (BERNUCCI *et al.*, 2022).

- *Materiais estabilizados*

Conforme observado por diversos autores, quando os materiais estabilizados quimicamente são submetidos a carregamentos repetitivos, ocorre a degradação progressiva em suas propriedades mecânicas (CERATTI, 1991; TRICHÊS, 1993; NASCIMENTO *et al.*, 2018).

Desta forma, no *software* MeDiNa, materiais estabilizados são tratados como tendo propriedades elásticas variáveis ao longo de sua vida útil. Por essa razão, a análise é conduzida mensalmente usando um modelo de degradação do Módulo de Resiliência, que diminui gradualmente a cada mês seguindo um padrão sigmoidal (Equação 15) (IPR, 2020).

$$MR = MR_{\min} + \frac{MR_{\max} - MR_{\min}}{1 + e^{-4 + 14 \cdot D_i}} \quad (15)$$

Em que: MR_{\max} e MR_{\min} (MPa) são os limites inferiores e superiores dos módulos de resiliência, D_i é o consumo de vida de fadiga acumulado no mês i e MR (MPa) o módulo da camada estabilizada no mês em análise.

A determinação do módulo de resiliência de camadas estabilizadas é normatizada pela norma DNIT 181 (DNIT, 2018b).

A norma DNIT 434 (DNIT, 2021) descreve os procedimentos para o ensaio de fadiga por compressão diametral de materiais estabilizados quimicamente. O *software* MeDiNa adota um modelo de dano por fadiga que leva em conta a relação (%RF) entre a tensão de tração na fibra inferior da camada e a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias (Equação 16) (IPR, 2020).

$$N = 10^{k_1 + \%RF \cdot k_2} \quad (16)$$

Em que: %RF é a razão entre a tensão de tração aplicada (σ_t) em MPa e a resistência à tração à ruptura estática do material (σ_r) em MPa, k_1 e k_2 os coeficientes de correlação experimentais

- *Revestimento asfáltico*

Dois parâmetros das misturas asfálticas são necessários para introdução no *software*, sendo o módulo de resiliência e os dados da curva de fadiga. O módulo de resiliência das misturas asfálticas é determinado pela norma DNIT 135 (DNIT, 2018c). A resistência à fadiga é obtida por meio da realização de ensaio em diferentes níveis de deformação. Após, é traçada a curva de fadiga e por regressão, obtida a equação representativa. A curva de fadiga das misturas asfálticas é obtida segundo o ensaio por compressão diametral à tensão controlada padronizada pela norma DNIT 183 (DNIT, 2018d). A resistência à fadiga é expressa pela lei descrita na Equação 17.

$$N = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2} \quad (17)$$

Em que: N é o número de repetições de carga até a ruptura (ciclos) ou vida de fadiga; ε_t é a deformação inicial e k_1 e k_2 são constantes experimentais.

De forma resumida, os ensaios necessários e requeridos para realização do dimensionamento pelo método MeDiNa são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Ensaios de deformabilidade

| Norma | Descrição |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DNIT 134/2018 - ME (2018a) | Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio |
| DNIT 179/2018 - IE (2018e) | Pavimentação - Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de ensaio |
| DNIT 181/2018 - ME (2018b) | Pavimentação - Material Estabilizado Quimicamente - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio |
| DNIT 434/2021 - ME (2021) | Pavimentação - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente - Método de ensaio |
| DNIT 135/2018 - ME (2018c) | Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio |
| DNIT 183/2018 - ME (2018d) | Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de ensaio |
| DNIT 184/2018 - ME (2018f) | Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio |

Fonte: Elaborado pelo autor

2.4 Comparativo entre os métodos DNER/1981 e MeDiNa

Diversos autores estabeleceram comparações entre o método de dimensionamento empírico vigente do DNIT, DNER/1981 e o novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), em fase de implantação.

Santos e Silva (2021) dimensionaram duas estruturas para um carregamento com N de 10^7 , constituídas por uma base e sub-base de solo laterítico estabilizada quimicamente, dois revestimentos asfálticos distintos. Para o estudo foram utilizados um subleito siltoso presente no banco de dados do *software* MeDiNa. Foram observadas diferenças significativas nas espessuras de revestimento asfálticos dimensionadas pelos dois métodos (Tabela 7).

Tabela 7. Espessuras das camadas dos pavimentos.

| Método | Empírico | MeDiNa | |
|--------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Revestimento | Concreto Asfáltico (7,5cm) | Concreto asfáltico modificado (CAM RJ CAPFLEX MR 3184 MPa) (15cm) | Concreto asfáltico (classe 4 – MR 10492 MPa) (9,4cm) |
| Base | Estabilizada quimicamente (15cm) | Estabilizada quimicamente (15cm) | Estabilizada quimicamente (15cm) |
| Sub-base | Estabilizada quimicamente (15cm) | Estabilizada quimicamente (15cm) | Estabilizada quimicamente (15cm) |

Fonte: Santos & Silva (2021) – Adaptado

A espessura do revestimento obtida pelo método DNER/1981 mostrou-se mais esbelta que as dimensionadas pelo MeDiNa. Notou-se também uma mudança significativa na espessura do revestimento entre as estruturas dimensionadas pelo MeDiNa. O uso do concreto asfáltico de classe 4 resultou em uma redução de quase 60% da camada do revestimento, demonstrando a sensibilidade do método a variação nas propriedades mecânicas dos materiais das camadas do pavimento.

Biedacha (2020) dimensionou um trecho do contorno viário do perímetro urbano da cidade de Itapejara D'Oeste/PR. Foram feitas coletas de amostras e ensaios de índice de suporte (ISC) da região ao qual apresentou valor de 7,0%. O N estimado para o trecho foi igual a $2,81 \times 10^7$.

Desta forma, foram dimensionadas duas estruturas, ambas compostas por concreto asfáltico e base granular. A principal diferença entre as duas estruturas foi a utilização de uma sub-base de solo-cimento para estrutura 2, em contraste com a sub-base granulometricamente estabilizada da estrutura 1 (Tabela 8). Além disso, foram realizados testes de dimensionamento considerando duas estimativas distintas do módulo de resiliência para os subleitos.

Tabela 8. Dimensionamento realizado para duas estruturas

| Descrição | Espessuras (cm) | | | |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Estrutura 01 - DNER | Estrutura 02 - DNER | Estrutura 01 - MEDINA | Estrutura 02 - MEDINA |
| Revestimento (concreto asfáltico) | 10 | 10 | 14,6 | 12,4 |
| Base (Brita graduada) | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Sub-base | 23 | 15 | 15 | 15 |

Fonte: Adaptado de Biedacha (2020)

Após analisar as estruturas dimensionadas pelo método DNER/1981 com o auxílio do *software* MeDiNa, Biedacha (2020) observou que as espessuras das camadas não eram suficientes para garantir que a estrutura atingisse a vida útil de projeto de 10 anos, com o aparecimento prematura de trincas por fadiga.

Pascoal *et al.* (2021) realizaram um estudo financeiro e estrutural de três estruturas diferentes para a duplicação da BR 287, entre Santa Cruz do Sul e Tabaí/RS. Uma das estruturas foi projetada utilizando o método DNER/1981 enquanto as outras duas foram projetadas utilizando o MeDiNa. O N foi estimado em $6,75 \times 10^7$, para um período de 10 anos.

As estruturas foram avaliadas com as propriedades dos materiais presentes no *software* MeDiNa, sendo os revestimentos de classe 1 e 4, bases e sub-bases granulares e subleito com ISC igual a 11%.

Tabela 9. Dimensionamento realizado para a duplicação da BR-287

| Descrição | Estrutura 01 - DNER | Estrutura 02 - MeDiNa | Estrutura 03 - MeDiNa |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Revestimento (concreto asfáltico) | 12,5 | 27 | 23 |
| Base (Brita graduada) | 15 | 15 | 15 |
| Sub-base | 16 | 15 | 15 |

Fonte: Pascoal *et al.* (2021) – Adaptado

O desempenho das estruturas projetadas pelo método DNER/1981 foi avaliado utilizando o MeDiNa. Com base na análise dos autores, a estrutura projetada utilizando o método DNIT/81, embora tenha atendido a todos os requisitos do projeto, não atendeu aos critérios de fadiga e apresentou falha após aproximadamente um ano.

Embora as espessuras das camadas do revestimento dimensionadas utilizando o MeDiNa sejam mais espessas (Tabela 9) o custo de manutenção é especialmente mais baixo ao longo dos 10 anos de sua vida útil.

2.5 Orçamentação rodoviária

A Administração Pública Brasileira vem enfrentando dificuldades na gestão de contratações, diversos problemas são levantados pelos gestores públicos e diversas causas são apontadas. Normalmente depara-se com licitações sem sucesso, raramente dentro dos prazos e custos inicialmente contratados (BRANCO JR, 2013).

Com o objetivo de obter parâmetros de custos referenciais para elaboração de orçamentos de projetos e licitações de obras rodoviárias o antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) dedicou recursos e esforços no desenvolvimento e implantação de metodologias que incorporassem as tecnologias mais recentes de estimativas de custos disponíveis (DNIT, 2017).

O avanço da computação, das técnicas experimentadas pelos setores de projetos e da construção e da modernização dos equipamentos, o conceito de formação de custos de referência foi sendo aprimorado. No ano de 2000 foi implantado o vigente Sistema de Custos de Obras Rodoviárias – SICRO (DNIT, 2017).

Os orçamentos de obras rodoviárias são o resultado da associação das composições de preços unitários dos serviços e insumos somados aos quantitativos extraídos dos projetos (PEDROZO, 2001).

Segundo Fernandez (2022), conforme regulamentado o custo unitário dos serviços e insumos acrescidos do percentual de Lucro e Despesas Indiretas (LDI) e encargos sociais cabíveis é definido por meio dos seguintes parâmetros:

- a. Composições de custos unitários iguais ou menores à mediana do item correspondente do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) para obras de infraestrutura de transportes e do Sistema Nacional de Índices da Construção Civil (SINAPI) para demais obras e serviços de engenharia;
- b. Dados de pesquisas publicadas em mídia especializada, de tabelas de referência aprovadas pelo Poder Executivo Federal;
- c. Contratações similares feitas pela Administração Pública em execução ou concluídas com período de até um ano anterior à data da pesquisa de preços;
- d. Pesquisa na base nacional de notas fiscais eletrônicas.

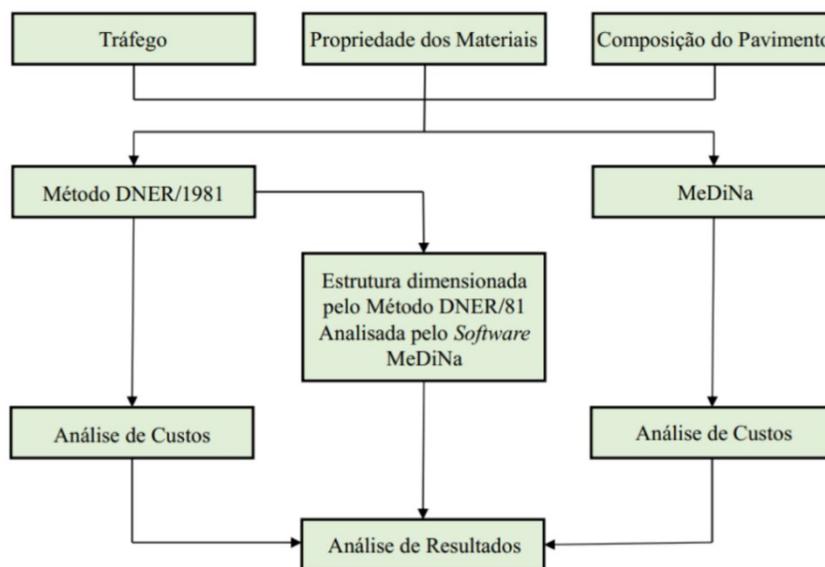
Nas últimas décadas, o investimento na infraestrutura rodoviária brasileira se encontra bem aquém das necessidades do país (BERNUCCI *et al.*, 2022). O investimento em infraestrutura está intimamente relacionado ao desenvolvimento socioeconômico de uma região. Esse descompasso tem um impacto negativo nas empresas de transporte, uma vez que a inadequação da infraestrutura de transporte é um fator crítico que limita a realização de negócios, diminuindo a competitividade global do país (CNT, 2021).

Neste sentido, para além da realização de um estudo comparativo entre estruturas dimensionadas pelo método DNER/1981 e MeDiNa, considera-se importante uma avaliação econômica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para desenvolver os objetivos do trabalho, sendo descritas as composições das estruturas avaliadas, as características dos materiais utilizados nas diversas camadas do pavimento, as metodologias de dimensionamento nacionais e os custos referenciais pertinentes. A Figura 10 apresenta o fluxograma da metodologia adotada.

Figura 10. Fluxograma da metodologia do trabalho



As estruturas dimensionadas por meio dos Métodos DNER/1981 e MeDiNa foram comparadas com base na espessura das suas camadas, no desempenho estrutural em relação a evolução do afundamento de trilha de roda (ATR) e a área trincada e em seu custo de implantação.

3.1 Tráfego

No estudo, foram selecionadas três condições de tráfego, expressas pelo Número N, para o eixo de 80 kN (8,2 tf), sendo, 10^6 , 10^7 e 10^8 .

3.2 Propriedades dos materiais

Neste trabalho foram selecionados os materiais das camadas. Diante da impossibilidade da realização de ensaios de laboratório, as propriedades das camadas de

subleito, sub-base, base e revestimento foram levantadas a partir de dados publicados em trabalhos acadêmicos e como artigos publicados em revistas científicas. A seguir estão descritos os materiais e as respectivas propriedades.

- *Subleito*

As propriedades do subleito foram obtidas na dissertação de Cittadella (2023), cujo solo foi classificado como um silte areno-argiloso de tonalidade vermelha, tipo A7-5, proveniente do Município de Guarapuava/PR. A Tabela 10 apresenta os principais parâmetros do material estudado.

Tabela 10. Parâmetros do subleito

| Parâmetro | Argila |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Energia de compactação | Proctor Normal |
| Umidade ótima | 29,50% |
| Massa específica | 1,430g/cm ³ |
| Módulo de resiliência | $24,054 \cdot \sigma_3^{0,212} \cdot \sigma_d^{-0,755}$ |
| Módulo de resiliência médio | 143 MPa |
| ISC ¹ | 14,3% |
| Deformação Permanente | $\varepsilon_p^{esp} (\%) = 0,348 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{-0,4776} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{1,1684} \cdot N^{0,0711}$ |

1. ISC estimado pela Equação empírica $ISC=MR/10$

Fonte: Cittadella (2023)

- *Sub-base*

O módulo de resiliência, deformação permanente, massa específica, umidade ótima e energia de compactação da brita graduada utilizada para a camada de sub-base foi obtida na dissertação de Lima (2016). O material é proveniente da sub-base da faixa de ônibus do tipo *Bus Rapid Transit* (BRT) na cidade do Rio de Janeiro (RJ). Dentre as faixas granulométricas estudadas pela pesquisadora, a granulometria é referente ao material chamado de CI-1, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Parâmetros da sub-base estabilizada granulometricamente

| Parâmetro | Brita graduada (Gnaisse) |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Energia de compactação | Proctor Modificado |
| Umidade ótima | 5,8% |
| Massa específica | 2,268g/cm ³ |
| Módulo de resiliência | $1401,00 \cdot \sigma_3^{0,57} \cdot \sigma_d^{0,03}$ |
| Deformação Permanente | $\varepsilon_p^{esp} (\%) = 0,1608 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{-0,097} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{0,525} \cdot N^{0,0752}$ |
| Coefficiente de equivalência estrutural (SOUZA, 1981) | 1,00 |

Fonte: Adaptado de Lima (2016)

- *Base*

A camada de base das estruturas foi composta por uma brita graduada simples (Tabela 12) cujas propriedades foram obtidas por Lima (2016).

Tabela 12 Parâmetros da base estabilizada granulometricamente

| Parâmetro | Brita graduada (Gnaise) |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Energia de compactação | Proctor Modificado |
| Umidade ótima | 5,0% |
| Massa específica | 2,223g/cm ³ |
| Módulo de resiliência | $1149,00 \cdot \sigma_3^{0,530} \cdot \sigma_d^{-0,180}$ |
| Deformação Permanente | $\varepsilon_p^{esp} (\%) = 0,0868 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{-0,2801} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{0,8929} \cdot N^{0,0961}$ |
| Coefficiente de equivalência estrutural (SOUZA, 1981) | 1,00 |

Fonte: Adaptado de Lima (2016)

- *Revestimento*

Foram utilizados dois materiais para o dimensionamento das estruturas, o primeiro composto por concreto asfáltico com adição de asfalto borracha e o segundo por concreto asfáltico convencional de classe 1 (Tabela 13), ambos disponibilizados pelo *software* MeDiNa.

Tabela 13. Parâmetros dos materiais do revestimento asfáltico

| Parâmetro | CAPFLEX B | CA (Classe 1) |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Módulo de resiliência | 4980 MPa | 5764MPa |
| Massa específica | 2,40g/cm ³ | 2,40g/cm ³ |
| Modelo de fadiga | $N = 4,000 \times 10^{-12} \times \varepsilon_t^{-3,654}$ | $N = 5,496 \times 10^{-11} \times \varepsilon_t^{-3,253}$ |

Fonte: IPR (2020)

3.3 Composição do pavimento

Foram utilizadas duas estruturas distintas para compor de pavimento. A primeira, denominada estrutura 1 (Figura 11) é composta por uma camada base e sub-base estabilizadas granulometricamente e revestimento em concreto asfáltico. A segunda, estrutura 2 (Figura 12) possui as mesmas camadas de sub-base e base, porém revestimento em concreto asfáltico com asfalto borracha.

Figura 11. Representação da composição do pavimento da estrutura 1 (sem escala)



Figura 12. Representação da composição do pavimento da estrutura 2 (sem escala)



3.4 Dimensionamento pelo método DNER/1981

Para o dimensionamento pelo método DNER/1981 foram utilizados os fatores de equivalência estrutural do revestimento em concreto asfáltico ($k = 2$), de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente ($k = 1$) e equações de equivalência estrutural da USACE descritas na Tabela 1. O procedimento de cálculo foi apresentado na seção 2.3.2.

3.5 Método do Dimensionamento Nacional (MeDiNa)

A determinação das espessuras das camadas dos pavimentos flexíveis pelo novo método de dimensionamento nacional seguiu um processo que envolveu diversas etapas, descritas a seguir.

A primeira etapa foi a definição das propriedades mecânicas dos materiais componentes do pavimento. As características e propriedades relativas a cada camada componente do pavimento (tipo, espessura, módulo e coeficiente de Poisson) são informadas na tela principal do *software* MeDiNa (Figura 13).

Figura 13. Tela principal do *software* MeDiNa

MeDiNa - v.1.1.7.0 - mar/2023

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Wellton Rodrigues EMPRESA: UFSC

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

Alterar Estrutura >>

| CAMADA | DESCRIÇÃO DO MATERIAL | TIPO | ESPESSURA (cm) | MÓDULO (MPa) | COEFICIENTE DE POISSON |
|---------|-----------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------|------------------------|
| >> 1 << | CONCRETO ASFÁLTICO | Classe 1 | 5,0 | 5764 | 0,30 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR | Brita Graduada - Gnaisse C5 | 20,0 | Resiliente Não Linear | 0,35 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | Brita Graduada - Gnaisse C1 | 20,0 | Resiliente Não Linear | 0,35 |
| SL | SUBLEITO | Silte Arenoso Argiloso | 0,0 | Resiliente Não Linear | 0,40 |

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

| | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Tipo de Via: | Sistema Arterial Primário |
| VMD (1º ano): | 274 |
| FV: | 1.000 |
| N anual (1º ano): | 1,00e+05 |
| % Veículos na faixa de projeto: | 100 |
| N Anual da faixa: | 1,00e+05 |
| Taxa de crescimento (%): | 0,0 |
| Período de projeto (anos): | 10 |
| N Total: | 1,00e+06 |

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

--- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---
Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 85%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 9,3%
Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.
Afundamento de Trilha de Roda: 11,0mm

Os resultados obtidos pelo programa devem ser avaliados criteriosamente antes de serem aprovados para a execução de campo.

NÍVEL <A>

Conforme IPR (2020), os resultados do dimensionamento serão tão confiáveis quanto os dados fornecidos pelo projetista; desta forma, as propriedades dos materiais utilizados para compor a estrutura do pavimento devem ser ensaiadas de forma a representar de forma mais fidedigna seu comportamento na estrutura final do pavimento.

O *software* MeDiNa incorpora as propriedades dos materiais por meio da inserção dos modelos de comportamento dos materiais na tela de propriedades (Figura 14).

Figura 14. Tela de propriedade do subleito

Propriedades do Subleito

BASE DE DADOS

Projeto
Solo Silteso NS'
Solo Fino NA
Subleito Retroanalise
Site Areno Argiloso

SUBLEITO

Material Site Areno Argiloso

Parâmetros

Espessura (cm) 0,0
Coeficiente de Poisson 0,40
Contato -

Módulo (MPa)

Modelo Constituinte Resiliente Não Linear
Coeficiente de Regressão (k-1): 24,05
Coeficiente de Regressão (k-2): 0,212
Coeficiente de Regressão (k-3): -0,755
Coeficiente de Regressão (k-4): 0,000

Características

Descrição do Material Site Areno-Argiloso - Guarapuava/PR
Grupo MCT ...
MCT - Coeficiente c' ...
MCT - Índice e' ...
Massa específica (g/cm³) 1,43
Umidade Ótima (%) 29,5
Energia Compactação Proctor Normal
Norma ou Especificação DNIT ES 137

Deformação Permanente

Modelo: $ep = psi \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot psi^2 \cdot (sd \cdot psi^3) \cdot (N \cdot psi^4)$
Coeficiente de Regressão (k-1 ou psi1): 0,348
Coeficiente de Regressão (k-2 ou psi2): -0,4776
Coeficiente de Regressão (k-3 ou psi3): 1,1684
Coeficiente de Regressão (k-4 ou psi4): 0,0711

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Posteriormente, o *software* MeDiNa gera as informações resultantes do dimensionamento, como, os danos mensais de afundamento de trilha de roda, área trincada e as bacias de campo (Figura 15).

Figura 15. Tela de resultados do dimensionamento – Danos mensais

MeDiNa - v.1.1.7.0 - mar/2023

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

Danos Mensais ATR Bacias de campo Completo

| Mês | N equiv | ÁREA TRINCADA (%) | ATR (mm) |
|-----|-----------|-------------------|----------|
| 1 | 8,334e+05 | 4,42% | 6,60 |
| 2 | 1,667e+06 | 7,26% | 6,95 |
| 3 | 2,500e+06 | 10,64% | 7,16 |
| 4 | 3,334e+06 | 14,76% | 7,32 |
| 5 | 4,167e+06 | 19,70% | 7,44 |
| 6 | 5,001e+06 | 25,46% | 7,54 |
| 7 | 5,834e+06 | 31,95% | 7,63 |
| 8 | 6,667e+06 | 39,04% | 7,71 |
| 9 | 7,501e+06 | 46,53% | 7,78 |
| 10 | 8,334e+06 | 54,21% | 7,84 |
| 11 | 9,168e+06 | 61,85% | 7,89 |
| 12 | 1,000e+07 | 69,24% | 7,95 |
| 13 | 1,083e+07 | 76,22% | 7,99 |
| 14 | 1,167e+07 | 82,64% | 8,04 |
| 15 | 1,250e+07 | 88,42% | 8,08 |
| 16 | 1,333e+07 | 93,50% | 8,12 |
| 17 | 1,417e+07 | 97,88% | 8,16 |
| 18 | 1,500e+07 | 99,00% | 8,19 |
| 19 | 1,583e+07 | 99,00% | 8,22 |
| 20 | 1,667e+07 | 99,00% | 8,26 |
| 21 | 1,750e+07 | 99,00% | 8,29 |
| 22 | 1,834e+07 | 99,00% | 8,32 |
| 23 | 1,917e+07 | 99,00% | 8,34 |
| 24 | 2,000e+07 | 99,00% | 8,37 |
| 25 | 2,084e+07 | 99,00% | 8,40 |
| 26 | 2,167e+07 | 99,00% | 8,42 |
| 27 | 2,250e+07 | 99,00% | 8,44 |
| 28 | 2,334e+07 | 99,00% | 8,47 |
| 29 | 2,417e+07 | 99,00% | 8,49 |
| 30 | 2,500e+07 | 99,00% | 8,51 |
| 31 | 2,584e+07 | 99,00% | 8,53 |
| 32 | 2,667e+07 | 99,00% | 8,55 |

C:\Users\welli\OneDrive\Área de Trabalho\ba...Estrutura 01.pvt NÍVEL <A>

3.6 Orçamento

O orçamento dos serviços de pavimentação foi elaborado utilizando a base de dados do Sistema de Custos Referenciais de Obra (SICRO) do DNIT. Os custos dos ligantes asfálticos foram levantados no banco de dados da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). O referencial de custos da base de dados da ANP é proveniente do Estado do Paraná e referente ao mês de fevereiro de 2023 (Tabela 14). O mês de referência da base do SICRO é de outubro de 2022, oriundo do Estado de Santa Catarina.

O valor do Benefício de Despesas Indiretas (BDI) dos serviços de pavimentação foi considerado 27,66%. Para os materiais betuminosos, foi aplicado o BDI diferenciado de 17,69% conforme especificado no memorando circular nº 01/2015-Direx (DNIT, 2015).

O levantamento do custo por quilômetro é dependente das espessuras das camadas dimensionadas para os diferentes tipos de estruturas de pavimento, das taxas de ligantes asfálticos presentes nas misturas e do tipo de material.

Na Tabela 14 são apresentados os custos unitários dos materiais que foram utilizados neste projeto. Cabe ressaltar que os valores não incluem o BDI e não será considerado o transporte dos materiais.

Tabela 14. Custos de referência

| Banco | Código | Descrição | Und. | Valor Unit. |
|--------------|---------------|--------------------------------------------------------|----------------|--------------------|
| SICRO | 4011463 | Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comercial | ton | R\$ 199,82 |
| ANP | - | Cimento asfáltico de petróleo CAP-50/70 | ton | R\$ 3.175,29 |
| ANP | - | CAP modificado por borracha de pneu | ton | R\$ 4.136,44 |
| SICRO | 4011353 | Pintura de ligação | m ² | R\$ 0,29 |
| ANP | - | Emulsão asfáltica RR-1C | ton | R\$ 2.274,67 |
| SICRO | 4011352 | Imprimação com emulsão asfáltica | m ² | R\$ 0,43 |
| ANP | - | Emulsão asfáltica para serviço de imprimação (EAI) | ton | R\$ 3.334,48 |
| SICRO | 4011276 | Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial | m ³ | R\$ 205,10 |
| CAP | - | Cimento Asfáltico de Petróleo | | |
| RR-1C | - | Catiônica de Ruptura Rápida | | |

O custo total de implantação foi calculado considerando uma rodovia de um quilômetro de pista simples com largura de faixa de tráfego de sete metros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no dimensionamento das estruturas propostas pelo método DNER/1981 e pelo *software* MeDiNa, sendo o desempenho das estruturas dimensionadas pelo método empírico verificado com auxílio do novo Método de Dimensionamento Nacional.

4.1 Dimensionamento pelo método DNER/1981

Conforme descrito no Capítulo 3 as estruturas foram dimensionadas para tráfegos, expressos pelo número N_{80kN} de 10^6 , 10^7 e 10^8 . Esta metodologia não distingue o fator de equivalência estrutural (k) para os diferentes revestimentos asfálticos, desta forma, foi utilizado o valor de $K = 2,00$ para ambas as camadas de revestimento. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos.

O resultado do dimensionamento demonstrou que, sob os esforços aplicados e com o ISC do subleito de 14,3%, as camadas granulares não apresentam variações significativas de espessura (Tabela 15). É importante destacar que as espessuras mínimas dos revestimentos asfálticos, apresentadas na Tabela 3 são definidas em função do número N (80 kN).

Tabela 15. Dimensionamento empírico das estruturas 01 e 02

| Estrutura 01 - Método DNER | | | | |
|------------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------|
| Número de eixos equivalentes | Espessuras (cm) | | | |
| | Concreto Asfáltico | Brita Graduada | Brita Graduada | Totais |
| $1,00 \times 10^6$ | 5,00 | 16,00 | 15,00 | 36,00 |
| $1,00 \times 10^7$ | 10,00 | 15,00 | 15,00 | 40,00 |
| $1,00 \times 10^8$ | 12,50 | 15,00 | 15,00 | 42,50 |

Resultados semelhantes a essas estruturas de pavimentos dimensionadas pelo método empírico DNER/1981 foram apresentados por Fontes (2009) e Fernandes (*et al.* 2018), utilizando materiais granulares na base e sub-base.

Fernandes *et al.* (2018) obtiveram no dimensionamento do pavimento utilizando ISC do subleito igual a 10% e para tráfegos de $2,5 \times 10^6$, $2,5 \times 10^7$ e $1,0 \times 10^8$, espessuras de 36 cm, 41 cm e 43,5 cm, respectivamente. Fontes (2009) obteve espessura total do pavimento de 43 cm para o $N 1 \times 10^7$ e de 47,5 cm para 1×10^8 .

A similaridade nas estruturas analisadas pode ser atribuída as solicitações e índice de suporte do subleito muito próximos aos das estruturas estudadas neste trabalho. Esses resultados indicam a limitação da metodologia para considerar as características de resiliência e deformação do solo de fundação em seu dimensionamento.

4.2 Desempenho das estruturas dimensionadas pelo método DNER/1981 verificadas pelo MeDiNa

Determinou-se o desempenho das estruturas frente a evolução do afundamento de trilha de rodas e da área trincada utilizando-se do *software* de dimensionamento empírico-mecanicista MeDiNa. A apresentação detalhada dos resultados encontra-se no apêndice A.

- *Estrutura 01*

A evolução do afundamento de trilha de roda e da área trincada dessa estrutura apresentou bom desempenho quando submetidas ao carregamento de 1×10^6 (Tabela 16).

Tabela 16. Evolução da área trincada e ATR para a estrutura 01 por mês

| Repetições | Mês | Neq | Área Trincada (%) | ATR (mm) |
|--------------------|-----|--------------------|-------------------|----------|
| $1,00 \times 10^6$ | 6 | $5,00 \times 10^4$ | 1,80 | 9,56 |
| | 12 | $1,00 \times 10^5$ | 2,39 | 10,06 |
| | 24 | $2,00 \times 10^5$ | 3,31 | 10,63 |
| | 60 | $5,00 \times 10^5$ | 5,75 | 11,35 |
| | 120 | $1,00 \times 10^6$ | 10,53 | 11,95 |
| $1,00 \times 10^7$ | 6 | $5,00 \times 10^5$ | 3,94 | 7,69 |
| | 12 | $1,00 \times 10^6$ | 6,61 | 8,15 |
| | 24 | $2,00 \times 10^6$ | 11,77 | 8,53 |
| | 60 | $5,00 \times 10^6$ | 40,76 | 9,14 |
| | 120 | $1,00 \times 10^7$ | 95,64 | 9,62 |
| $1,00 \times 10^8$ | 6 | $5,00 \times 10^6$ | 25,46 | 7,54 |
| | 12 | $1,00 \times 10^7$ | 69,24 | 7,95 |
| | 24 | $2,00 \times 10^7$ | 99,00 | 8,37 |
| | 60 | $5,00 \times 10^7$ | 99,00 | 8,97 |
| | 120 | $1,00 \times 10^8$ | 99,00 | 9,45 |

Para os valores de N superiores a esse a estrutura não foi capaz de suportar os esforços de fadiga. Considerando o N igual a $1,0 \times 10^7$, verificou-se que o pavimento

dimensionado pelo método DNER/1981 apresentou área trincada de 30,09% no 49º mês. Esse fato se agrava em valores de carregamentos mais elevados, atingindo 69,24% para o N igual a $1,0 \times 10^8$ durante o primeiro ano.

- *Estrutura 02*

Em comparação com a estrutura 01, a estrutura 02 apresentou redução significativa na porcentagem de área trincada. No entanto, as estruturas não apresentaram bom desempenho para os Ns superiores a 10^6 (Tabela 17).

Tabela 17. Evolução da área trincada e ATR para a estrutura 02 por mês

| Repetições | Mês | Neq | Área Trincada (%) | ATR (mm) |
|--------------------|-----|--------------------|-------------------|----------|
| $1,00 \times 10^6$ | 6 | $5,00 \times 10^4$ | 1,71 | 9,56 |
| | 12 | $1,00 \times 10^5$ | 2,26 | 10,07 |
| | 24 | $2,00 \times 10^5$ | 3,09 | 10,61 |
| | 60 | $5,00 \times 10^5$ | 5,48 | 11,36 |
| | 120 | $1,00 \times 10^6$ | 9,22 | 11,96 |
| $1,00 \times 10^7$ | 6 | $5,00 \times 10^5$ | 3,67 | 7,99 |
| | 12 | $1,00 \times 10^6$ | 5,66 | 8,42 |
| | 24 | $2,00 \times 10^6$ | 10,28 | 8,86 |
| | 60 | $5,00 \times 10^6$ | 33,71 | 4,49 |
| | 120 | $1,00 \times 10^7$ | 85,68 | 10,00 |
| $1,00 \times 10^8$ | 6 | $5,00 \times 10^6$ | 20,49 | 7,89 |
| | 12 | $1,00 \times 10^7$ | 56,47 | 8,31 |
| | 24 | $2,00 \times 10^7$ | 99,00 | 8,75 |
| | 60 | $5,00 \times 10^7$ | 99,00 | 9,37 |
| | 120 | $1,00 \times 10^8$ | 99,00 | 9,87 |

Fernandes *et al.* (2018) observaram que, para tráfego leve, os pavimentos projetados pelo método DNER/1981 atingiram uma vida útil de 10 anos. No entanto, para volumes de tráfego mais elevados, verificou-se que a vida útil do pavimento foi consideravelmente mais curta, semelhantemente ao presente trabalho.

4.3 Dimensionamento pelo Método de Dimensionamento Nacional

Para esses cálculos foram dimensionadas as estruturas 01 e 02 considerando os números de eixos equivalentes de 10^6 até 10^8 . Os resultados detalhados dessa análise são apresentados no apêndice B.

- *Estrutura 01*

Observou-se que a estrutura dimensionada com N igual a 1×10^6 apresentou espessuras semelhantes às dimensionadas pelo método empírico DNER/1981. Nas estruturas com maior número de repetições de eixos, as espessuras de todas as camadas são consideravelmente superiores (Tabela 18).

Tabela 18. Dimensionamento empírico-mecanicista da estrutura 01

| Número de eixos equivalentes | Espessuras (cm) | | |
|------------------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | Concreto Asfáltico | Brita Graduada | Brita Graduada |
| $1,00 \times 10^6$ | 5,00 | 20,00 | 20,00 |
| $1,00 \times 10^7$ | 18,00 | 25,00 | 30,00 |
| $1,00 \times 10^8$ | 30,00 | 35,00 | 40,00 |

- *Estrutura 02*

Para este caso, o valor de Ns iguais a 10^6 foram obtidas espessuras idênticas ao pavimento 01, apresentando assim, o uso ineficiente do concreto asfáltico modificado com cimento borracha (Tabela 19).

Tabela 19. Dimensionamento empírico-mecanicista da estrutura 02

| Número de eixos equivalentes | Espessuras (cm) | | |
|------------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| | CAPFLEX B | Brita Graduada | Brita Graduada |
| $1,00 \times 10^6$ | 5,00 | 20,00 | 20,00 |
| $1,00 \times 10^7$ | 16,00 | 25,00 | 35,00 |
| $1,00 \times 10^8$ | 26,00 | 35,00 | 40,00 |

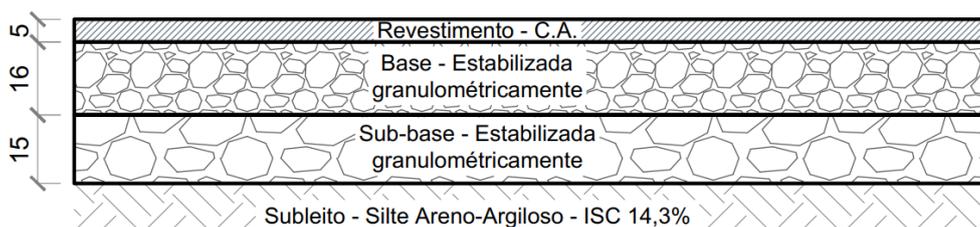
Para os Ns superiores a 10^7 houve redução significativa na espessura do revestimento devido ao uso da modificação do ligante com adição de borracha.

Roza (2018) realizou o dimensionamento de estruturas de pavimentos em 12 tipos de solos provenientes da região norte do Estado do Mato Grosso, utilizando 5 diferentes tipos de solos lateríticos e concretos asfálticos de classes 1 a 4. Os resultados demonstraram que, para um número de eixos equivalentes igual a 10^7 , houve uma variação significativa

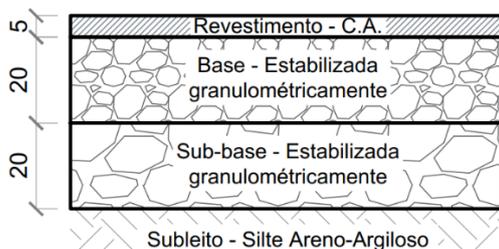
na espessura do revestimento e das camadas de base e sub-base, tanto para o mesmo tipo de solo de fundação quanto para solos de fundação distintos.

De forma geral, as espessuras das camadas de revestimento das estruturas 01 e 02 obtidas por meio dos métodos DNER/1981 e MeDiNa para o tráfego de 10^6 foram iguais e as espessuras das camadas granulares apresentaram-se mais esbeltas nas estruturas dimensionadas pelo método DNER/1981 (Figura 16).

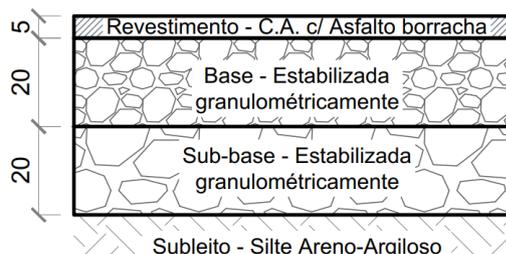
Figura 16. Estruturas dimensionada por meio das metodologias DNER/1981 e MeDiNa para N de 10^6 .



(a) Estrutura 01 – DNER/1981



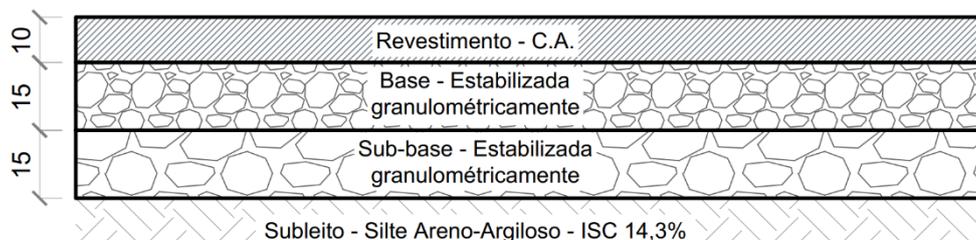
(b) Estrutura 01 - MeDiNa



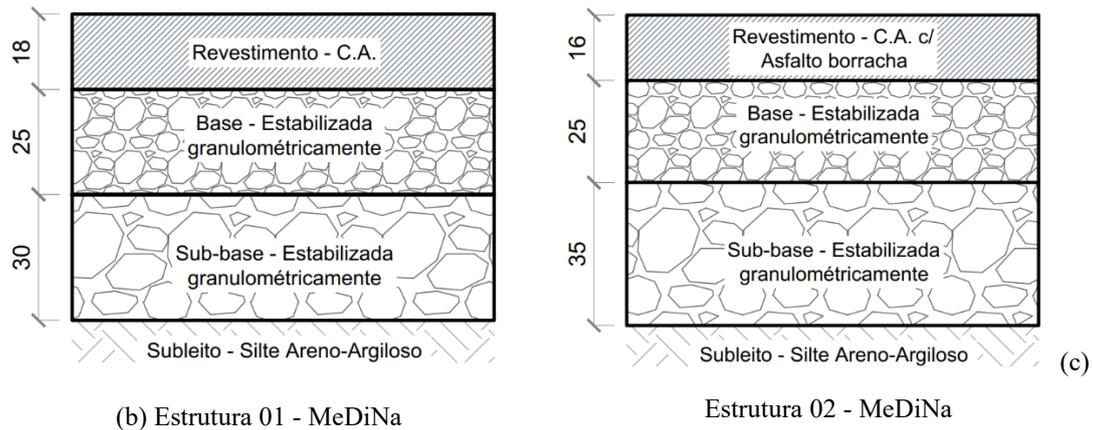
(c) Estrutura 02 - MeDiNa

As estruturas submetidas aos tráfegos médios (Figura 17) e pesados (Figura 18) dimensionadas pelo novo Método de Dimensionamento Nacional se apresentaram consideravelmente mais robustas do que as estruturas dimensionadas pelo método DNER/1981, porém com vida útil mais elevada.

Figura 17. Estruturas dimensionada por meio das metodologias DNER/1981 e MeDiNa para N de 10^7 .

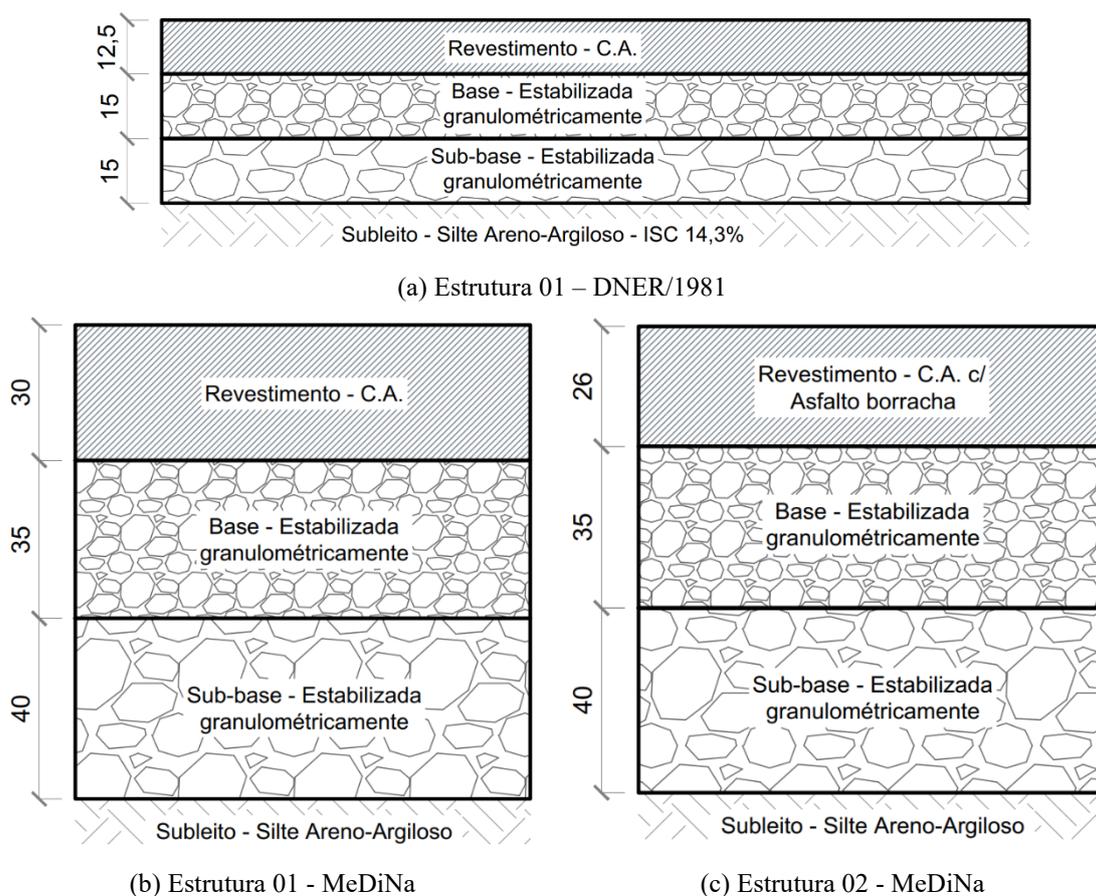


(a) Estrutura 01 – DNER/1981



Observa-se assim que, diferentemente do método DNER/1981, o dimensionamento das estruturas pelo MeDiNa é afetado pelas variações nas propriedades dos materiais empregados no pavimento.

Figura 18. Estruturas dimensionada por meio das metodologias DNER/1981 e MeDiNa para N de 10^8 .



A estrutura 01 dimensionada pelo método DNER/1981 apresentou uma evolução do percentual de área trincada mais acentuada para os tráfegos médio e pesado em

comparação as estruturas dimensionadas pelo método MeDiNa (Figura 19). O mesmo comportamento foi observado na estrutura 02 (Figura 20).

Figura 19. Evolução da área trincada da estrutura 01 para as três configurações de tráfego

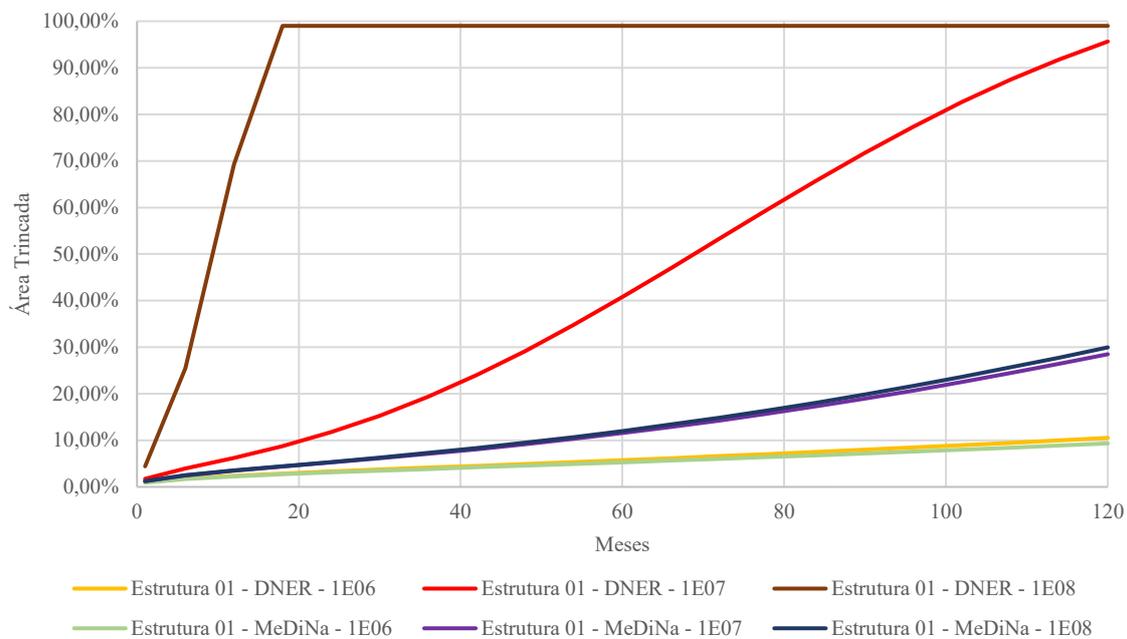
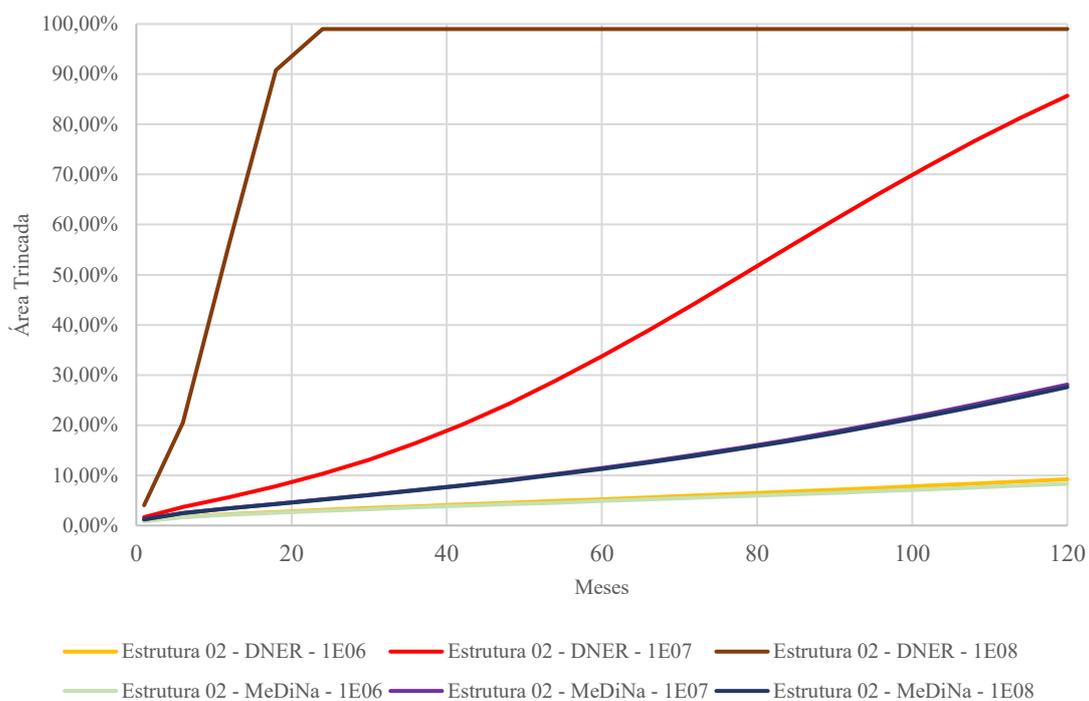


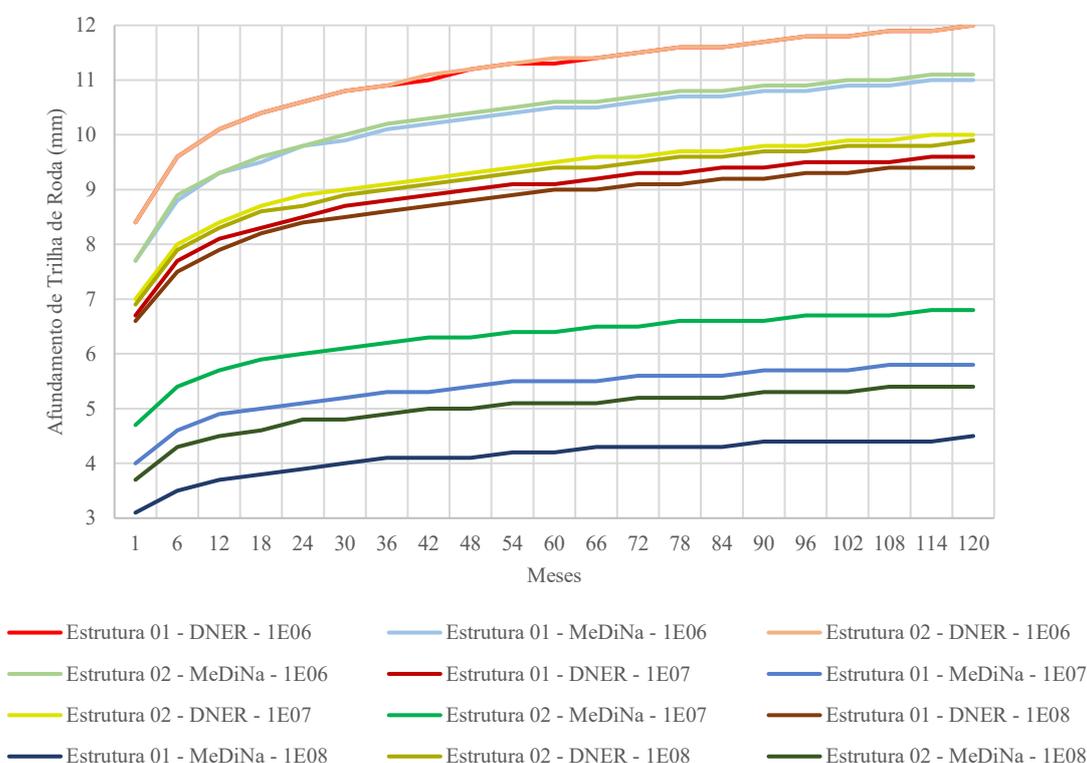
Figura 20. Evolução da área trincada da estrutura 02 para as três configurações de tráfego



As estruturas dimensionadas pelo método de MeDiNa foram menos suscetíveis à progressão da área trincada ao longo do período de projeto analisado, o que demonstra que, apesar de espessuras mais elevadas, a vida útil será atingida, enquanto as estruturas projetadas pelo DNER/1981 apresentariam ruptura nos primeiros meses.

Relativamente ao afundamento de trilha de roda, as deformações observadas ao longo do período de projeto, nas estruturas dimensionadas pelo método DNIT/1981, foram significativamente superiores àsquelas pelo MeDiNa, em todos os níveis de tráfego (Figura 20). Neste sentido, comprovou-se que o Método MeDiNa foi capaz de prover estruturas de pavimentos adequadas para o tráfego imposto, com vida de projeto alcançada.

Figura 21. Evolução do afundamento de trilha de roda para os três níveis de tráfego



4.4 Análise do custo

De acordo com o referencial de custo da Agência Nacional do Petróleo, de fevereiro de 2023, o custo do asfalto borracha é aproximadamente 23,2% mais elevado que o concreto asfáltico convencional. Comparando o custo de implantação de um quilômetro de rodovia simples com largura total de 7,00 metros de ambas as estruturas, foi constatado na estrutura 02 o aumento no custo de implantação para o valor de N igual a 10^6 , em consequência da modificação do ligante (Tabela 20).

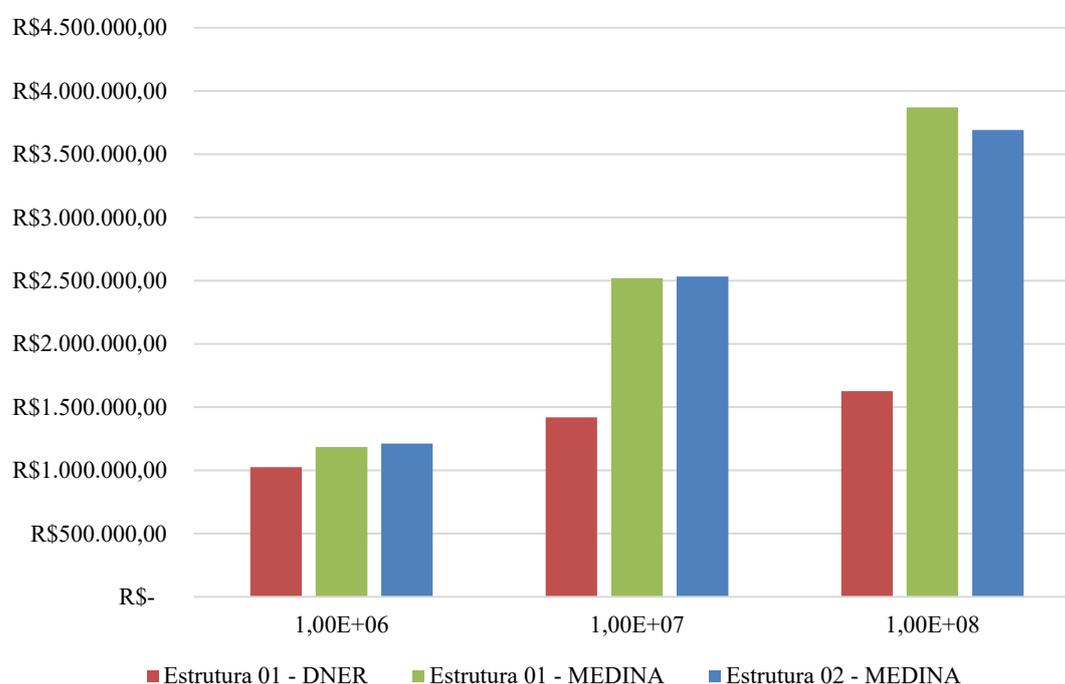
Tabela 20. Custo de implantação das estruturas de pavimento

| Repetições | Estrutura 01 e 02 - DNER | Estrutura 01 - MeDiNa | Estrutura 02 - MeDiNa |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1,0x10 ⁶ | R\$1.024.598,41 | R\$1.183.473,83 | R\$ 1.212.671,34 |
| 1,0x10 ⁷ | R\$1.419.870,56 | R\$2.521.391,56 | R\$ 2.532.642,19 |
| 1,0x10 ⁸ | R\$1.626.932,54 | R\$3.870.743,52 | R\$ 3.691.271,40 |

Para o N de 10⁸, o uso de materiais com propriedades mecânicas adequadas (MeDiNa), reduziu a espessura do revestimento asfáltico em 15,4%, refletindo assim na redução do custo total de implantação da estrutura.

Para um N de 10⁶, houve uma similaridade significativa entre o custo de implantação da estrutura 01 dimensionada pelo método DNER/1981 e pelo MeDiNa. Tal resultado decorreu do adequado desempenho das estruturas dimensionadas pelo método empírico em relação a esse nível de carregamento, o qual não é tão elevado (Figura 22).

Figura 22. Custo de implantação de pavimentos novos por método de dimensionamento e carregamento



Para o número de eixos equivalentes iguais ou superiores a 1,0x10⁷ é notável a diferença entre o custo de implantação da estrutura 01 nos dois métodos de

dimensionamento. Este resultado aponta o subdimensionamento da estrutura utilizando o dimensionamento pelo método empírico nesse intervalo de carregamento.

Em relação ao dimensionamento elaborado utilizando o *software* MeDiNa, a estrutura 01 apresentou custo de implantação inferior à estrutura 02 para o número de eixos equivalentes igual a 10^6 . A partir desse carregamento, a estrutura 02 se mostrou mais econômica (cerca de 5%) devido ao uso de material do revestimento com melhor resposta a fadiga.

A pequena diferença entre os custos de implantação da estrutura 02 em relação ao 01 se dá pela excelente qualidade das propriedades mecânicas do concreto asfáltico convencional de classe 1 apresentado pelo *software* MeDiNa.

5 CONCLUSÕES

Constatou-se através dos resultados, que o método DNER 81 apresentou um desempenho satisfatório para o tráfego leve, podendo ser utilizado para o dimensionamento de pavimentos nesta condição. No entanto, para o tráfego médio a pesado, o método apresentou desempenho insuficiente em relação à fadiga.

Quanto aos custos de implantação de pavimentos, as estruturas dimensionadas por meio do método DNER/1981 foram menores do que as estruturas dimensionadas pelo novo Método de Dimensionamento Nacional para tráfego de médio a alto volume.

No entanto, pôde-se observar que as estruturas dos pavimentos projetados pelo Método DNER/1981 têm uma vida útil adequada de apenas 48 meses (4 anos) para tráfego com N igual a 10^7 , e essa vida útil é consideravelmente reduzida para apenas 6 meses quando submetido a tráfego pesado com N igual a 10^8 . Como resultado, intervenções adicionais serão necessárias, aumentando os custos financeiros e afetando a mobilidade dos usuários do sistema.

Demonstrou-se a possibilidade de otimizar o custo da pavimentação asfáltica de estruturas submetidas a tráfegos médios a pesados, com o uso de materiais com qualidade superior. A aplicação desses materiais resultou na redução de 13,3% da espessura do revestimento asfáltico, refletindo assim no custo global da estrutura do pavimento.

A implantação deste método poderá viabilizar o uso de materiais com propriedades mecânicas mais favoráveis para a estrutura do pavimento, reduzindo assim os custos de construção e manutenção, o que, por sua vez, minimizará o risco do investimento e melhora a eficiência da aplicação dos recursos públicos nesta área.

5.1 Limitações

A pesquisa apresenta algumas limitações significativas que devem ser consideradas. Primeiramente, é importante ressaltar que não foram elaborados ensaios dos materiais das camadas dos pavimentos, devido ao escopo restrito deste estudo. Em vez disso, foram utilizados dados de materiais provenientes de diferentes regiões do Brasil e informações disponíveis no *software* MeDiNa.

Além disso, a análise se concentrou apenas em três níveis de tráfego, o que pode limitar a generalização dos resultados obtidos para outros níveis de tráfego. A não

inclusão de uma variedade mais ampla de níveis de tráfego pode restringir a aplicabilidade das conclusões alcançadas neste estudo.

Outra limitação relevante é a ausência de levantamentos de contagens volumétricas de tráfego. Essa falta de dados impacta diretamente na análise realizada, pois a obtenção das contagens volumétricas é uma etapa crucial para o cálculo do número "N" e, conseqüentemente, para uma análise mais completa do dimensionamento de pavimentos.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Recomenda-se para estudos futuros:

- Realizar o dimensionamento para solos de fundação com propriedades distintas;
- Realizar os dimensionamentos e analisar o custo de implantação de estruturas de pavimento com materiais comumente empregados nos pavimentos dos Municípios do interior do Estado de Santa Catarina;
- Avaliar uma estrutura compostas por materiais quimicamente estabilizados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *Design of pavement structures*. Washington, DC. 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *Mechanistic-Empirical Pavement Guide – A Manual of Practice*. Washington, DC. 2008.

ANUPOJU, S. *Composition and Structure of Rigid Pavement* – FEV/2011. Disponível em: <https://theconstructor.org/transportation/rigid-pavement-composition-structure/5495/>. Acesso: 01/01/2023. 2011.

BALBO, J. T. *Pavimentação asfáltica, materiais, projetos e restauração*. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L, B; MOTTA, L. G. da; CERATTI, J, A, P; SOARES, J, B. *Pavimentação asfáltica, formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2022.

BEZERRA NETO, S. R. *Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

BIEDACHA, M, M *dimensionamento de pavimento asfáltico pelo método DNER e comparativo com o atual método mecanístico-empírico MeDiNa*. Monografia (Graduação) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2020.

BRANCO JR, A, S. *Comparativo entre o regime diferenciado de contratações - RDC e a LEI N° 8666-1993*. Monografia (Graduação) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

BRASIL. Tribunal de Contas da União (TCU). *Acórdão nº 328/2013. Plenário. Processo*

nº TC-030.410/2012-6. Ata nº 6/2013. Brasília, DF, Sessão de 27/02/2013, 2013.

BRASIL, Ministério da Infraestrutura, Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - DEZ/2008. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran>>. Acesso: 01/01/2023. 2008.

BRASIL, Ministério da Infraestrutura, Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - DEZ/2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2018>>. 2018.

BRASIL, Ministério da Infraestrutura, Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - MAI/2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022>>. Acesso: 01/01/2023. 2022.

CERATTI, J. A. P. Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para a utilização em pavimentos. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

CNT, Confederação Nacional do Transporte, Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias não duram? Brasília, CNT, 2017.

CNT, Confederação Nacional do Transporte, Dnit deve implementar novo método de pavimentação asfáltica. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/novo-metodo-pavimentacao-asfaltica-dnit-breve>>. Acesso: 01/01/2023. 2018.

CNT, Confederação Nacional do Transporte, Infraestrutura de transporte: Investimento e financiamento de longo prazo. Brasília, CNT, 2021.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. O transporte move o Brasil – Propostas da CNT ao País. Brasília, CNT, 2022a.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. Anuário CNT do transporte 2022 - Estatísticas consolidadas. Brasília, CNT, 2022b.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. Transporte em foco - Em quais finalidades têm sido realizados os investimentos públicos federais em infraestrutura de transporte nas duas últimas décadas? Brasília, CNT, 2022c.

COUTINHO, J. C. P. Dimensionamento de pavimento asfáltico: Comparação do método do DNER com um método Mecanístico – Empírico aplicada a um trecho. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. DER/PR ES-P 28/18-ME: Pavimentação - Concreto asfáltico usinado à quente com asfalto borracha, tipo terminal blend. Paraná, 2018. 22 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Memorando-Circular nº 01/2015 - DIREX. Brasília, 2015. 2 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de custos de infraestrutura de transportes – Volume 1 Metodologia e conceitos. Rio de Janeiro, 2017. 246 p.

ESPINOSA, V. R. P. Ensaio triaxiais de carga repetida de uma brita. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1987.

FERNANDES, W. D; SPECHT, L. P; PEREIRA, D. S; BRITO, L. A. T. Comparativo de Projeto de Pavimentos Flexíveis através Métodos de Dimensionamento do Brasil e da AASHTO. Revista da Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, p. 99 – 113, 2018.

FERNANDEZ, M, L, S. Comparação de custo e prazo entre duas formas de contratação de obras públicas de pavimentação de rodovias no Brasil. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2022.

FONTES, L. P. T. da L. *Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*. Tese (Doutorado) — Universidade do Minho, UM, Portugal, 2009.

FRANCO, A, C, P. Método de dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos asfálticos SisPav. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

FRITZEN, M. A. Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

GUIMARÃES, A. C. R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Manual de pavimentação: 3ed. Rio de Janeiro, 2006a. 274 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Manual de estudo de tráfego. Rio de Janeiro, 2006b. 384 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 138/2010-ES: Pavimentação - Reforço de subleito - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010c. 7 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 139/2010-ES: Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010b. 8 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 141/2010-ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a. 9 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 134/2018-ME: Pavimentação solos - determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a. 18 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 181/2018-ME: Pavimentação material estabilizado quimicamente – determinação do módulo de resiliência - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b. 16 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 135/2018-ME: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas - determinação do módulo de resiliência - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018c. 13 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 183/2018-ME: Pavimentação asfáltica – ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018d. 15 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 179/2018-IE: Pavimentação – solos – Determinação da deformação permanente - instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018e. 20 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. 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, 2018f. 10 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 172/2016-ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 17 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. DNIT 434/2021-ME: Pavimentação ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 15 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Manual para utilização do método mecanístico-empírico – MeDiNa. Rio de Janeiro, 2020. 78 p.

LEE, S. H. Introdução ao projeto geométrico de rodovias. Florianópolis, SC, Edufsc, 4ed, 2017.

LESSA, S. N.; PEREIRA, L. A. G. O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil. Revista caminhos de geografia, 2011.

LIMA, C. D. A. de. Estudo de deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. G. da. Mecânica dos pavimentos. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 3ed, 2015.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. Estudo de resiliência na mecânica dos pavimentos. In: VIII congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações. Porto Alegre, RS: ABMS, 1986. p. 137–148

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Plano de viação: Evolução histórica 1808 - 1973. Rio de Janeiro, RJ: Concelho Nacional de Transportes, 1974.

MOTTA, L. G. da. Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

MOTTA, L. G. da; LEITE, L, M, F; COSTA, E, C; TEIXEIRA, L, H; MORILHA, A; MARTINS, L, D. Informações básicas sobre materiais asfálticos, volume 1. Rio de Janeiro, RJ: Petrobrás: ABEDA, 3ed, 2020.

MOTTA, L. G. da; FRANCO, A, C, P. Método MeDiNa: Conceitos e ferramentas, 2021. 20 slides.

NACIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures: Part 2 - design inputs*. Illinois, 2004. 85 p.

NACIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures: Part 3 - design analysis*. Illinois, 2004. 115 p.

NASCIMENTO, R.; ALBUQUERQUE, F. S. Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 2018.

OKUMURA, S. H. Além da indústria automobilística políticas de incentivo às rodovias do governo Washington Luís ao primeiro choque do petróleo (1926-1973). IX Encontro de Pós-graduação em História Econômica e 7ª Conferência Internacional de História de Empresas, Ribeirão Preto, SP, 2018.

PASCOAL, P. T.; CHIARELLO, G. P.; BARONI, M.; PEREIRA, D. S. P.; ZUCCHI, F. L. BR 287 *Duplication designed through the methods of DNIT and MeDiNa (2020) - Structural and financial analysis*. Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2021.

PAVEMENT INTERACTIVE. *Mechanistic-Empirical Pavement Design*. Disponível em: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/mechanistic-empirical-pavement-design/>. Acesso: 01/01/2023. 2023.

PEDROZO, L, G. Custo da infraestrutura rodoviária – Análise e sistematização. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

PREUSSLER, E. S. Ensaios triaxiais dinâmicos de um solo arenoso. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1978.

ROZA, A. E. D. contribuição para projeto mecanístico – empírico de pavimentos asfálticos na região norte do Estado do Mato Grosso. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

SCHLISSLER, A. S.; BULL, A. Caminhos, um novo caminho para a gestão e conservação das redes viárias. Nações Unidas – Comissão Econômica Para América Latina e Caribe (CEPAL), 1994.

SOUZA, M. L. de. Método de projeto de pavimentos flexíveis. IPR, Publ. 667, 3ed. Rio de Janeiro, 1981. 34 p.

TRICHÊS, G. Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: Estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 1993.

UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (USDOT). Highway History. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/back0103.cfm>>. Acesso: 01/01/2023. 2017.

VIEIRA, H, F. Centro de consolidação e distribuição da Cabotagem: uma alternativa competitiva para o Transporte integrado de carga geral no brasil. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2001.

WEF, *World Economic Forum, The global competitiveness report*, WEF, Geneva, 2019.

APÊNDICE A - DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS DIMENSIONADAS PELO MÉTODO DNER/1981 VERIFICADAS PELO MeDiNa

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Análise do pavimento

Empresa: **UFSC**

Nome do Projeto:

Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10 anos.**

Análise realizada em **18/04/2023 às 18:08:00** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **95,6%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **9,6mm**

ALERTAS

- *Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!*
- *Tráfego elevado para a estrutura proposta.*

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 Mecânico 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 Classe 1 | 10,0 | Resiliente Linear MR = 5764 MPa | 0,30 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 212 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 137 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|----------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 4 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 105 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Tipo de CAP = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,4
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

Modelos

Ensaio de Fadiga
 -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
 -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$
 -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$
 -Classe de Fadiga: ≥ 1
 -FFM (100µ a 250µ): $\geq 0,84$
 Flow Number Mínimo
 - Condição de Tráfego Normal: ≥ 283 ciclos
 - Condição de Tráfego Severa: ≥ 766 ciclos

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

Propriedades

Descrição do Material = Brita Graduada
 Massa específica (g/cm³) = 2,223
 Umidade Ótima (%) = 5,0
 Energia Compactação = Modificada
 Abrasão Los Angeles (%) = 43,0
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,0868**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,2801**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,8929**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,0961**

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

Propriedades

Descrição do Material = Brita Graduada
 Massa específica (g/cm³) = 2,268
 Umidade Ótima (%) = 5,8
 Energia Compactação = Modificada
 Abrasão Los Angeles (%) = 41,0
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,1608**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,097**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,525**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,0752**

4 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

Propriedades

Modelos

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm ³) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | 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): 0,348 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): -0,4776 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): 1,1684 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2740**
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,00e+06**
 % Veículos na faixa de projeto: **100%**
 Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+06**
 Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,00e+07**

| 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 | 8,334e+04 | 1,74% | 6,7 |
| 6 | 5,001e+05 | 3,94% | 7,7 |
| 12 | 1,000e+06 | 6,21% | 8,1 |
| 18 | 1,500e+06 | 8,77% | 8,3 |
| 24 | 2,000e+06 | 11,77% | 8,5 |
| 30 | 2,500e+06 | 15,29% | 8,7 |
| 36 | 3,000e+06 | 19,38% | 8,8 |
| 42 | 3,500e+06 | 24,02% | 8,9 |
| 48 | 4,000e+06 | 29,19% | 9,0 |
| 54 | 4,500e+06 | 34,80% | 9,1 |
| 60 | 5,001e+06 | 40,76% | 9,1 |
| 66 | 5,501e+06 | 46,97% | 9,2 |
| 72 | 6,001e+06 | 53,29% | 9,3 |
| 78 | 6,501e+06 | 59,60% | 9,3 |
| 84 | 7,001e+06 | 65,79% | 9,4 |
| 90 | 7,501e+06 | 71,74% | 9,4 |
| 96 | 8,001e+06 | 77,38% | 9,5 |
| 102 | 8,501e+06 | 82,63% | 9,5 |

| Mês | N Equiv | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 108 | 9,001e+06 | 87,43% | 9,5 |
| 114 | 9,501e+06 | 91,77% | 9,6 |
| 120 | 1,000e+07 | 95,64% | 9,6 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO | 0,00 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR | 1,28 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,24 |
| 4 | SUBLEITO | 7,10 * |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 9,6 |

* 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 - Classe 1

| 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 | 62 | 52 | 45 | 35 | 27 | 18 | 13 | 11 | 10 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 64 | 52 | 43 | 32 | 23 | 13 | 9 | 7 | 6 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

| 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 | 108 | 80 | 63 | 45 | 34 | 24 | 19 | 16 | 14 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1

| 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 | 130 | 92 | 70 | 50 | 38 | 28 | 23 | 19 | 17 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso

| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Análise do pavimento

Empresa: **UFSC**

Nome do Projeto:

Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10 anos.**

Análise realizada em **18/04/2023 às 17:57:57** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **9,4mm**

ALERTAS

- *Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!*
- *Tráfego elevado para a estrutura proposta.*

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 Classe 1 | 12,5 | Resiliente Linear MR = 5764 MPa | 0,30 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 205 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 129 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|----------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 4 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 121 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Tipo de CAP = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,4
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

Modelos

Ensaio de Fadiga
 -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
 -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$
 -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$
 -Classe de Fadiga: ≥ 1
 -FFM (100µ a 250µ): $\geq 0,84$
 Flow Number Mínimo
 - Condição de Tráfego Normal: ≥ 750 ciclos
 - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1977 ciclos

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

Propriedades

Descrição do Material = Brita Graduada
 Massa específica (g/cm³) = 2,223
 Umidade Ótima (%) = 5,0
 Energia Compactação = Modificada
 Abrasão Los Angeles (%) = 43,0
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,0868**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,2801**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,8929**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,0961**

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

Propriedades

Descrição do Material = Brita Graduada
 Massa específica (g/cm³) = 2,268
 Umidade Ótima (%) = 5,8
 Energia Compactação = Modificada
 Abrasão Los Angeles (%) = 41,0
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,1608**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,097**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,525**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,0752**

4 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

Propriedades

Modelos

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm ³) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **27400**
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,00e+07**
 % Veículos na faixa de projeto: **100%**
 Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+07**
 Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,00e+08**

| 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 | 8,334e+05 | 4,42% | 6,6 |
| 6 | 5,001e+06 | 25,46% | 7,5 |
| 12 | 1,000e+07 | 69,24% | 7,9 |
| 18 | 1,500e+07 | 99,00% | 8,2 |
| 24 | 2,000e+07 | 99,00% | 8,4 |
| 30 | 2,500e+07 | 99,00% | 8,5 |
| 36 | 3,000e+07 | 99,00% | 8,6 |
| 42 | 3,500e+07 | 99,00% | 8,7 |
| 48 | 4,000e+07 | 99,00% | 8,8 |
| 54 | 4,500e+07 | 99,00% | 8,9 |
| 60 | 5,001e+07 | 99,00% | 9,0 |
| 66 | 5,501e+07 | 99,00% | 9,0 |
| 72 | 6,001e+07 | 99,00% | 9,1 |
| 78 | 6,501e+07 | 99,00% | 9,1 |
| 84 | 7,001e+07 | 99,00% | 9,2 |
| 90 | 7,501e+07 | 99,00% | 9,2 |
| 96 | 8,001e+07 | 99,00% | 9,3 |
| 102 | 8,501e+07 | 99,00% | 9,3 |

| Mês | N Equiv | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 108 | 9,001e+07 | 99,00% | 9,4 |
| 114 | 9,501e+07 | 99,00% | 9,4 |
| 120 | 1,000e+08 | 99,00% | 9,4 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO | 0,00 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR | 1,32 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,31 |
| 4 | SUBLEITO | 6,81 * |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 9,4 |

* 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 - Classe 1

| 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 | 49 | 43 | 38 | 30 | 24 | 16 | 12 | 10 | 8 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 49 | 41 | 35 | 27 | 21 | 12 | 8 | 6 | 5 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

| 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 | 108 | 80 | 63 | 45 | 34 | 24 | 19 | 16 | 14 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1

| 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 | 130 | 92 | 70 | 50 | 38 | 28 | 23 | 19 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Análise do pavimento

Empresa: **UFSC**
 Nome do Projeto:
 Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**
 Nível de confiabilidade: **85%**
 Período de projeto: **10 anos**.

Análise realizada em **18/04/2023 às 18:21:45** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **9,2%**
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **12,0mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- O Subleito apresentou Afundamento de Trilha de Roda acima do limite de 5mm.

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 BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 5,0 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 16,0 | Resiliente Não Linear MR = 246 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 164 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|----------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 4 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 81 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

| Propriedades | Modelos |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22 Aditivo Modificador = Borracha Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração CD (MPa) = 1,0 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = - | Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$ -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 104 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 300 ciclos |

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,223 Umidade Ótima (%) = 5,0 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961 |

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,268 Umidade Ótima (%) = 5,8 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |

4 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

| Propriedades | Modelos |
|--------------|---------|
|--------------|---------|

| Propriedades | Modelos |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm^3) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = \text{psi}1.(s3^{\wedge}\text{psi}2).(sd^{\wedge}\text{psi}3).(N^{\wedge}\text{psi}4)$ Coeficiente de Regressão ($k1$ ou $\text{psi}1$): 0,348 Coeficiente de Regressão ($k2$ ou $\text{psi}2$): -0,4776 Coeficiente de Regressão ($k3$ ou $\text{psi}3$): 1,1684 Coeficiente de Regressão ($k4$ ou $\text{psi}4$): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **274**

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

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

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+05**

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

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,00e+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 | 8,334e+03 | 0,90% | 8,4 |
| 6 | 5,001e+04 | 1,71% | 9,6 |
| 12 | 1,000e+05 | 2,26% | 10,1 |
| 18 | 1,500e+05 | 2,70% | 10,4 |
| 24 | 2,000e+05 | 3,09% | 10,6 |
| 30 | 2,500e+05 | 3,47% | 10,8 |
| 36 | 3,000e+05 | 3,83% | 10,9 |
| 42 | 3,500e+05 | 4,18% | 11,1 |
| 48 | 4,000e+05 | 4,53% | 11,2 |
| 54 | 4,500e+05 | 4,89% | 11,3 |
| 60 | 5,001e+05 | 5,24% | 11,4 |
| 66 | 5,501e+05 | 5,60% | 11,4 |
| 72 | 6,001e+05 | 5,97% | 11,5 |
| 78 | 6,501e+05 | 6,35% | 11,6 |
| 84 | 7,001e+05 | 6,73% | 11,6 |
| 90 | 7,501e+05 | 7,12% | 11,7 |
| 96 | 8,001e+05 | 7,52% | 11,8 |
| 102 | 8,501e+05 | 7,93% | 11,8 |

| Mês | N Equiv | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 108 | 9,001e+05 | 8,35% | 11,9 |
| 114 | 9,501e+05 | 8,78% | 11,9 |
| 120 | 1,000e+06 | 9,22% | 12,0 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR | 1,63 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,32 |
| 4 | SUBLEITO | 9,02 * |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 12,0 |

* 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 BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 | 98 | 75 | 59 | 42 | 32 | 22 | 17 | 15 | 13 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 114 | 81 | 61 | 40 | 28 | 16 | 12 | 10 | 8 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

| 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 | 103 | 77 | 61 | 44 | 33 | 23 | 18 | 16 | 14 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1

| 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 | 130 | 92 | 70 | 50 | 38 | 28 | 23 | 19 | 17 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso

| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Análise do pavimento

Empresa: **UFSC**

Nome do Projeto:

Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **18/04/2023 às 18:17:42** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **85,7%**.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **10,0mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

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 BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 10,0 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 215 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 140 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|----------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 4 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 103 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

| Propriedades | Modelos |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22 Aditivo Modificador = Borracha Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração CD (MPa) = 1,0 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = - | Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$ -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 283 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 766 ciclos |

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,223 Umidade Ótima (%) = 5,0 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961 |

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,268 Umidade Ótima (%) = 5,8 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |

4 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

| Propriedades | Modelos |
|--------------|---------|
|--------------|---------|

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm ³) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2740**

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

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,00e+06**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+06**

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

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,00e+07**

| 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 | 8,334e+04 | 1,66% | 7,0 |
| 6 | 5,001e+05 | 3,67% | 8,0 |
| 12 | 1,000e+06 | 5,66% | 8,4 |
| 18 | 1,500e+06 | 7,81% | 8,7 |
| 24 | 2,000e+06 | 10,28% | 8,9 |
| 30 | 2,500e+06 | 13,13% | 9,0 |
| 36 | 3,000e+06 | 16,41% | 9,1 |
| 42 | 3,500e+06 | 20,12% | 9,2 |
| 48 | 4,000e+06 | 24,27% | 9,3 |
| 54 | 4,500e+06 | 28,81% | 9,4 |
| 60 | 5,001e+06 | 33,71% | 9,5 |
| 66 | 5,501e+06 | 38,90% | 9,6 |
| 72 | 6,001e+06 | 44,31% | 9,6 |
| 78 | 6,501e+06 | 49,84% | 9,7 |
| 84 | 7,001e+06 | 55,42% | 9,7 |
| 90 | 7,501e+06 | 60,97% | 9,8 |
| 96 | 8,001e+06 | 66,39% | 9,8 |
| 102 | 8,501e+06 | 71,63% | 9,9 |

| Mês | N Equiv | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 108 | 9,001e+06 | 76,62% | 9,9 |
| 114 | 9,501e+06 | 81,32% | 10,0 |
| 120 | 1,000e+07 | 85,68% | 10,0 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR | 1,33 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,27 |
| 4 | SUBLEITO | 7,40 * |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 10,0 |

* 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 BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 | 65 | 55 | 47 | 36 | 28 | 18 | 14 | 12 | 10 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 67 | 54 | 45 | 33 | 24 | 14 | 9 | 7 | 6 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

| 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 | 108 | 80 | 63 | 45 | 34 | 24 | 19 | 16 | 14 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1

| 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 | 130 | 92 | 70 | 50 | 38 | 28 | 23 | 19 | 17 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Arenoso Argiloso

| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Análise do pavimento

Empresa: **UFSC**
 Nome do Projeto:
 Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**
 Nível de confiabilidade: **85%**
 Período de projeto: **10 anos**.

Análise realizada em **18/04/2023 às 18:13:54** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **9,9mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

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 Mecânico 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 BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 12,5 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 208 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 15,0 | Resiliente Não Linear MR = 131 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|----------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 4 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 117 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

| Propriedades | Modelos |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22 Aditivo Modificador = Borracha Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração CD (MPa) = 1,0 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = - | Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$ -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 750 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1977 ciclos |

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,223 Umidade Ótima (%) = 5,0 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961 |

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,268 Umidade Ótima (%) = 5,8 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |

4 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

| Propriedades | Modelos |
|--------------|---------|
|--------------|---------|

| Propriedades | Modelos |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm^3) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = \text{psi1} \cdot (s3^{\wedge}\text{psi2}) \cdot (sd^{\wedge}\text{psi3}) \cdot (N^{\wedge}\text{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **27400**

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

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,00e+07**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+07**

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

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,00e+08**

| 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 | 8,334e+05 | 4,04% | 6,9 |
| 6 | 5,001e+06 | 20,49% | 7,9 |
| 12 | 1,000e+07 | 56,47% | 8,3 |
| 18 | 1,500e+07 | 90,75% | 8,6 |
| 24 | 2,000e+07 | 99,00% | 8,7 |
| 30 | 2,500e+07 | 99,00% | 8,9 |
| 36 | 3,000e+07 | 99,00% | 9,0 |
| 42 | 3,500e+07 | 99,00% | 9,1 |
| 48 | 4,000e+07 | 99,00% | 9,2 |
| 54 | 4,500e+07 | 99,00% | 9,3 |
| 60 | 5,001e+07 | 99,00% | 9,4 |
| 66 | 5,501e+07 | 99,00% | 9,4 |
| 72 | 6,001e+07 | 99,00% | 9,5 |
| 78 | 6,501e+07 | 99,00% | 9,6 |
| 84 | 7,001e+07 | 99,00% | 9,6 |
| 90 | 7,501e+07 | 99,00% | 9,7 |
| 96 | 8,001e+07 | 99,00% | 9,7 |
| 102 | 8,501e+07 | 99,00% | 9,8 |

| Mês | N Equiv | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 108 | 9,001e+07 | 99,00% | 9,8 |
| 114 | 9,501e+07 | 99,00% | 9,8 |
| 120 | 1,000e+08 | 99,00% | 9,9 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR | 1,38 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,35 |
| 4 | SUBLEITO | 7,14 * |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 9,9 |

* 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 BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 | 52 | 45 | 39 | 31 | 25 | 17 | 12 | 10 | 9 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 52 | 43 | 37 | 28 | 21 | 13 | 8 | 6 | 5 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

| 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 | 108 | 80 | 63 | 45 | 34 | 24 | 19 | 16 | 14 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1

| 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 | 130 | 92 | 70 | 50 | 38 | 28 | 23 | 19 | 17 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso

| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO REALIZADO NO *SOFTWARE* MeDiNa

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFSC**

Nome do Projeto:

Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **17/04/2023 às 19:43:14** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **9,3%**

Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **11,0mm**

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 Classe 1 | 5,0 | Resiliente Linear MR = 5764 MPa | 0,30 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 20,0 | Resiliente Não Linear MR = 235 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 20,0 | Resiliente Não Linear MR = 154 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 4 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 92 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

| Propriedades | Modelos |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de CAP = ... Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Norma ou Especificação = DNIT ES 31 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa. | Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$ -Classe de Fadiga: ≥ 1 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,84$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 104 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 300 ciclos |

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaiss C5

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,223 Umidade Ótima (%) = 5,0 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961 |

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaiss C1

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,268 Umidade Ótima (%) = 5,8 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |

4 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm ³) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 274

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

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

% Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 1,00e+05

Taxa de crescimento do tráfego: 0,0%

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 1,00e+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 | 8,334e+03 | 0,90% | 7,7 |
| 6 | 5,001e+04 | 1,71% | 8,8 |
| 12 | 1,000e+05 | 2,27% | 9,3 |
| 18 | 1,500e+05 | 2,71% | 9,5 |
| 24 | 2,000e+05 | 3,11% | 9,8 |
| 30 | 2,500e+05 | 3,49% | 9,9 |
| 36 | 3,000e+05 | 3,85% | 10,1 |
| 42 | 3,500e+05 | 4,21% | 10,2 |
| 48 | 4,000e+05 | 4,57% | 10,3 |
| 54 | 4,500e+05 | 4,93% | 10,4 |
| 60 | 5,001e+05 | 5,29% | 10,5 |
| 66 | 5,501e+05 | 5,65% | 10,5 |
| 72 | 6,001e+05 | 6,02% | 10,6 |
| 78 | 6,501e+05 | 6,40% | 10,7 |
| 84 | 7,001e+05 | 6,79% | 10,7 |
| 90 | 7,501e+05 | 7,19% | 10,8 |
| 96 | 8,001e+05 | 7,59% | 10,8 |
| 102 | 8,501e+05 | 8,01% | 10,9 |
| 108 | 9,001e+05 | 8,44% | 10,9 |
| 114 | 9,501e+05 | 8,88% | 11,0 |
| 120 | 1,000e+06 | 9,33% | 11,0 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO | 0,00 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR | 2,06 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,64 |
| 4 | SUBLEITO | 7,32 * |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 11,0 |

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

Controle por 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 - Classe 1

| 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 | 86 | 66 | 53 | 39 | 29 | 19 | 15 | 13 | 11 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 101 | 71 | 54 | 36 | 25 | 15 | 10 | 8 | 7 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

| 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 | 86 | 66 | 54 | 40 | 30 | 20 | 16 | 13 | 12 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1

| 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 | 108 | 80 | 63 | 46 | 35 | 25 | 20 | 17 | 15 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso

| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFSC**

Nome do Projeto:

Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10 anos**.

Análise realizada em **17/04/2023 às 19:46:22** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **28,5%**

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **5,8mm**

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 Mecânico 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 Classe 1 | 8,0 | Resiliente Linear MR = 5764 MPa | 0,30 |
| 2 | CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1 | 10,0 | Resiliente Linear MR = 5764 MPa | 0,30 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 25,0 | Resiliente Não Linear MR = 205 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 4 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 30,0 | Resiliente Não Linear MR = 129 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|----------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 5 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 184 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Tipo de CAP = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,4
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

Modelos

Ensaio de Fadiga
 -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
 -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$
 -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$
 -Classe de Fadiga: ≥ 1
 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,84$
 Flow Number Mínimo
 - Condição de Tráfego Normal: ≥ 283 ciclos
 - Condição de Tráfego Severa: ≥ 766 ciclos

2 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Tipo de CAP = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,4
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

Modelos

Ensaio de Fadiga
 -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
 -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$
 -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$
 -Classe de Fadiga: ≥ 1
 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,84$
 Flow Number Mínimo
 - Condição de Tráfego Normal: ≥ 283 ciclos
 - Condição de Tráfego Severa: ≥ 766 ciclos

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

Propriedades

Descrição do Material = Brita Graduada
 Massa específica (g/cm³) = 2,223
 Umidade Ótima (%) = 5,0
 Energia Compactação = Modificada
 Abrasão Los Angeles (%) = 43,0
 Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
 Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
 Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,0868**
 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,2801**
 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,8929**
 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,0961**

4 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

Propriedades

Modelos

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,268 Umidade Ótima (%) = 5,8 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |
| 5 - SUBLEITO: Silte Arenoso Argiloso | |
| Propriedades | Modelos |
| Descrição do Material = Silte Arenoso-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm ³) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2740**

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

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,00e+06**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+06**

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

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,00e+07**

| 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 | 8,334e+04 | 1,23% | 4,0 |
| 6 | 5,001e+05 | 2,48% | 4,6 |
| 12 | 1,000e+06 | 3,46% | 4,9 |
| 18 | 1,500e+06 | 4,35% | 5,0 |
| 24 | 2,000e+06 | 5,23% | 5,1 |
| 30 | 2,500e+06 | 6,14% | 5,2 |
| 36 | 3,000e+06 | 7,09% | 5,3 |
| 42 | 3,500e+06 | 8,10% | 5,3 |
| 48 | 4,000e+06 | 9,18% | 5,4 |

| Mês | N Equiv | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 54 | 4,500e+06 | 10,33% | 5,5 |
| 60 | 5,001e+06 | 11,56% | 5,5 |
| 66 | 5,501e+06 | 12,87% | 5,5 |
| 72 | 6,001e+06 | 14,26% | 5,6 |
| 78 | 6,501e+06 | 15,74% | 5,6 |
| 84 | 7,001e+06 | 17,30% | 5,6 |
| 90 | 7,501e+06 | 18,96% | 5,7 |
| 96 | 8,001e+06 | 20,70% | 5,7 |
| 102 | 8,501e+06 | 22,53% | 5,7 |
| 108 | 9,001e+06 | 24,44% | 5,8 |
| 114 | 9,501e+06 | 26,43% | 5,8 |
| 120 | 1,000e+07 | 28,49% | 5,8 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO | 0,00 |
| 2 | CONCRETO ASFÁLTICO | 0,00 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,24 |
| 4 | MATERIAL GRANULAR | 1,62 |
| 5 | SUBLEITO | 2,94 |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 5,8 |

Controle por 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 - Classe 1

| 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 | 31 | 28 | 25 | 22 | 18 | 12 | 9 | 7 | 6 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 30 | 26 | 23 | 19 | 15 | 10 | 6 | 4 | 3 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - Classe 1

| 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 |
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|

| 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 | 55 | 46 | 40 | 31 | 24 | 15 | 11 | 9 | 8 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5 | | | | | | | | | |
| 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 | 73 | 55 | 46 | 34 | 26 | 17 | 13 | 11 | 9 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1 | | | | | | | | | |
| 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 | 88 | 65 | 53 | 40 | 31 | 21 | 17 | 14 | 12 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso | | | | | | | | | |
| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFSC**

Nome do Projeto:

Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10 anos.**

Análise realizada em **17/04/2023 às 19:48:17** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **30,0%**

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **4,5mm**

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 Classe 1 | 10,0 | Resiliente Linear MR = 5764 MPa | 0,30 |
| 2 | CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1 | 10,0 | Resiliente Linear MR = 5764 MPa | 0,30 |
| 3 | CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1 | 10,0 | Resiliente Linear MR = 5764 MPa | 0,30 |
| 4 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 35,0 | Resiliente Não Linear MR = 240 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 5 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 40,0 | Resiliente Não Linear MR = 140 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|----------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 6 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 303 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Tipo de CAP = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,4
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

Modelos

Ensaio de Fadiga
 -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
 -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$
 -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$
 -Classe de Fadiga: ≥ 1
 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,84$
 Flow Number Mínimo
 - Condição de Tráfego Normal: ≥ 750 ciclos
 - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1977 ciclos

2 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Tipo de CAP = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,4
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

Modelos

Ensaio de Fadiga
 -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
 -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$
 -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$
 -Classe de Fadiga: ≥ 1
 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,84$
 Flow Number Mínimo
 - Condição de Tráfego Normal: ≥ 750 ciclos
 - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1977 ciclos

3 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Tipo de CAP = ...
 Massa específica (g/cm³) = 2,4
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

Modelos

Ensaio de Fadiga
 -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
 -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$
 -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$
 -Classe de Fadiga: ≥ 1
 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,84$
 Flow Number Mínimo
 - Condição de Tráfego Normal: ≥ 750 ciclos
 - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1977 ciclos

4 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada | Ensaio de Deformação Permanente |
| Massa específica (g/cm ³) = 2,223 | Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ |
| Umidade Ótima (%) = 5,0 | Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 |
| Energia Compactação = Modificada | Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 |
| Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 | Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 |
| Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961 |

5 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada | Ensaio de Deformação Permanente |
| Massa específica (g/cm ³) = 2,268 | Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ |
| Umidade Ótima (%) = 5,8 | Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 |
| Energia Compactação = Modificada | Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 |
| Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 | Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 |
| Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |

6 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

| Propriedades | Modelos |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR | Ensaio de Deformação Permanente |
| Grupo MCT = ... | Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ |
| MCT - Coeficiente $c' = ...$ | Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 |
| MCT - Índice $e' = ...$ | Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 |
| Massa específica (g/cm ³) = 1,43 | Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 |
| Umidade Ótima (%) = 31,10 | Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |
| Energia Compactação = Proctor Normal | |
| Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **27400**

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

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,00e+07**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+07**

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

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,00e+08**

| 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 | 8,334e+05 | 1,25% | 3,1 |
| 6 | 5,001e+06 | 2,52% | 3,5 |
| 12 | 1,000e+07 | 3,52% | 3,7 |
| 18 | 1,500e+07 | 4,44% | 3,8 |
| 24 | 2,000e+07 | 5,35% | 3,9 |
| 30 | 2,500e+07 | 6,30% | 4,0 |
| 36 | 3,000e+07 | 7,30% | 4,1 |
| 42 | 3,500e+07 | 8,36% | 4,1 |
| 48 | 4,000e+07 | 9,49% | 4,1 |
| 54 | 4,500e+07 | 10,70% | 4,2 |
| 60 | 5,001e+07 | 12,00% | 4,2 |
| 66 | 5,501e+07 | 13,39% | 4,3 |
| 72 | 6,001e+07 | 14,86% | 4,3 |
| 78 | 6,501e+07 | 16,43% | 4,3 |
| 84 | 7,001e+07 | 18,09% | 4,3 |
| 90 | 7,501e+07 | 19,85% | 4,4 |
| 96 | 8,001e+07 | 21,70% | 4,4 |
| 102 | 8,501e+07 | 23,64% | 4,4 |
| 108 | 9,001e+07 | 25,66% | 4,4 |
| 114 | 9,501e+07 | 27,77% | 4,4 |
| 120 | 1,000e+08 | 29,96% | 4,5 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO | 0,00 |
| 2 | CONCRETO ASFÁLTICO | 0,00 |
| 3 | CONCRETO ASFÁLTICO | 0,00 |
| 4 | MATERIAL GRANULAR | 1,15 |
| 5 | MATERIAL GRANULAR | 1,73 |
| 6 | SUBLEITO | 1,57 |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 4,5 |

Controle por 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 - Classe 1

| 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 |
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|

| 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 | 17 | 16 | 15 | 13 | 12 | 9 | 7 | 5 | 4 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 15 | 13 | 12 | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 | 3 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - Classe 1 | | | | | | | | | |
| 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 | 26 | 24 | 22 | 19 | 16 | 11 | 8 | 6 | 5 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - Classe 1 | | | | | | | | | |
| 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 | 49 | 42 | 35 | 27 | 21 | 13 | 9 | 7 | 6 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5 | | | | | | | | | |
| 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 | 64 | 47 | 38 | 29 | 22 | 15 | 11 | 9 | 7 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1 | | | | | | | | | |
| 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 | 85 | 59 | 47 | 35 | 28 | 19 | 15 | 12 | 11 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso | | | | | | | | | |
| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFSC**
 Nome do Projeto:
 Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**
 Nível de confiabilidade: **85%**
 Período de projeto: **10 anos**.

Análise realizada em **17/04/2023 às 19:41:11** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **8,3%**
Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **11,1mm**

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 Mecânico 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 BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 5,0 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 20,0 | Resiliente Não Linear MR = 237 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 20,0 | Resiliente Não Linear MR = 155 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 4 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 92 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

| Propriedades | Modelos |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22 | Ensaio de Fadiga |
| Aditivo Modificador = Borracha | -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ |
| Massa específica (g/cm ³) = 2,4 | -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$ |
| Resistência à tração CD (MPa) = 1,0 | -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$ |
| Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT | -Classe de Fadiga: ≥ 2 |
| Norma ou Especificação = - | -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$ |
| | Flow Number Mínimo |
| | - Condição de Tráfego Normal: ≥ 104 ciclos |
| | - Condição de Tráfego Severa: ≥ 300 ciclos |

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada | Ensaio de Deformação Permanente |
| Massa específica (g/cm ³) = 2,223 | Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ |
| Umidade Ótima (%) = 5,0 | Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 |
| Energia Compactação = Modificada | Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 |
| Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 | Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 |
| Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961 |

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada | Ensaio de Deformação Permanente |
| Massa específica (g/cm ³) = 2,268 | Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ |
| Umidade Ótima (%) = 5,8 | Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 |
| Energia Compactação = Modificada | Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 |
| Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 | Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 |
| Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |

4 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

| Propriedades | Modelos |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR | Ensaio de Deformação Permanente |
| Grupo MCT = ... | Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ |
| MCT - Coeficiente c' = ... | Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 |
| MCT - Índice e' = ... | Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 |
| Massa específica (g/cm ³) = 1,43 | Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 |
| Umidade Ótima (%) = 31,10 | Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |
| Energia Compactação = Proctor Normal | |
| Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 274

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

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

% Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 1,00e+05

Taxa de crescimento do tráfego: 0,0%

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 1,00e+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 | 8,334e+03 | 0,86% | 7,7 |
| 6 | 5,001e+04 | 1,64% | 8,9 |
| 12 | 1,000e+05 | 2,15% | 9,3 |
| 18 | 1,500e+05 | 2,57% | 9,6 |
| 24 | 2,000e+05 | 2,93% | 9,8 |
| 30 | 2,500e+05 | 3,27% | 10,0 |
| 36 | 3,000e+05 | 3,60% | 10,2 |
| 42 | 3,500e+05 | 3,92% | 10,3 |
| 48 | 4,000e+05 | 4,24% | 10,4 |
| 54 | 4,500e+05 | 4,55% | 10,5 |
| 60 | 5,001e+05 | 4,87% | 10,6 |
| 66 | 5,501e+05 | 5,19% | 10,6 |
| 72 | 6,001e+05 | 5,51% | 10,7 |
| 78 | 6,501e+05 | 5,84% | 10,8 |
| 84 | 7,001e+05 | 6,17% | 10,8 |
| 90 | 7,501e+05 | 6,51% | 10,9 |
| 96 | 8,001e+05 | 6,85% | 10,9 |
| 102 | 8,501e+05 | 7,20% | 11,0 |
| 108 | 9,001e+05 | 7,56% | 11,0 |
| 114 | 9,501e+05 | 7,93% | 11,1 |
| 120 | 1,000e+06 | 8,31% | 11,1 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 2 | MATERIAL GRANULAR | 2,08 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,65 |
| 4 | SUBLEITO | 7,40 * |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 11,1 |

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

Controle por 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 BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 | 87 | 66 | 53 | 39 | 29 | 20 | 15 | 13 | 11 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 103 | 72 | 54 | 36 | 25 | 15 | 10 | 8 | 7 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

| 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 | 86 | 66 | 54 | 40 | 30 | 20 | 16 | 13 | 12 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1

| 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 | 108 | 80 | 63 | 46 | 35 | 25 | 20 | 17 | 15 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso

| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFSC**

Nome do Projeto:

Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10 anos**.

Análise realizada em **17/04/2023 às 19:36:41** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **28,1%**

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **6,8mm**

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 Mecânico 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 BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 8,0 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 2 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 8,0 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 25,0 | Resiliente Não Linear MR = 204 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 4 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 35,0 | Resiliente Não Linear MR = 131 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|----------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 5 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 172 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

Propriedades

Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22
Aditivo Modificador = Borracha
Massa específica (g/cm³) = 2,4
Resistência à tração CD (MPa) = 1,0
Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT
Norma ou Especificação = -

Modelos

Ensaio de Fadiga
-Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
-Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$
-Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$
-Classe de Fadiga: ≥ 2
-FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$
Flow Number Mínimo
- Condição de Tráfego Normal: ≥ 283 ciclos
- Condição de Tráfego Severa: ≥ 766 ciclos

2 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

Propriedades

Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22
Aditivo Modificador = Borracha
Massa específica (g/cm³) = 2,4
Resistência à tração CD (MPa) = 1,0
Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT
Norma ou Especificação = -

Modelos

Ensaio de Fadiga
-Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$
-Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$
-Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$
-Classe de Fadiga: ≥ 2
-FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$
Flow Number Mínimo
- Condição de Tráfego Normal: ≥ 283 ciclos
- Condição de Tráfego Severa: ≥ 766 ciclos

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

Propriedades

Descrição do Material = Brita Graduada
Massa específica (g/cm³) = 2,223
Umidade Ótima (%) = 5,0
Energia Compactação = Modificada
Abrasão Los Angeles (%) = 43,0
Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868
Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801
Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929
Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961

4 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

Propriedades

Modelos

| Propriedades | Modelos |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,268 Umidade Ótima (%) = 5,8 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |
| 5 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso | |
| Propriedades | Modelos |
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm ³) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2740**

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

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,00e+06**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+06**

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

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,00e+07**

| 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 | 8,334e+04 | 1,23% | 4,7 |
| 6 | 5,001e+05 | 2,47% | 5,4 |
| 12 | 1,000e+06 | 3,44% | 5,7 |
| 18 | 1,500e+06 | 4,32% | 5,9 |
| 24 | 2,000e+06 | 5,19% | 6,0 |
| 30 | 2,500e+06 | 6,09% | 6,1 |
| 36 | 3,000e+06 | 7,04% | 6,2 |
| 42 | 3,500e+06 | 8,03% | 6,3 |
| 48 | 4,000e+06 | 9,10% | 6,3 |

| Mês | N Equiv | Área Trincada | ATR (mm) |
|-----|-----------|---------------|----------|
| 54 | 4,500e+06 | 10,23% | 6,4 |
| 60 | 5,001e+06 | 11,44% | 6,4 |
| 66 | 5,501e+06 | 12,73% | 6,5 |
| 72 | 6,001e+06 | 14,10% | 6,5 |
| 78 | 6,501e+06 | 15,55% | 6,6 |
| 84 | 7,001e+06 | 17,09% | 6,6 |
| 90 | 7,501e+06 | 18,72% | 6,6 |
| 96 | 8,001e+06 | 20,43% | 6,7 |
| 102 | 8,501e+06 | 22,23% | 6,7 |
| 108 | 9,001e+06 | 24,11% | 6,7 |
| 114 | 9,501e+06 | 26,07% | 6,8 |
| 120 | 1,000e+07 | 28,10% | 6,8 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 2 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 3 | MATERIAL GRANULAR | 1,49 |
| 4 | MATERIAL GRANULAR | 2,05 |
| 5 | SUBLEITO | 3,25 |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 6,8 |

Controle por 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 BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 | 37 | 33 | 29 | 24 | 20 | 13 | 9 | 7 | 6 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 37 | 31 | 27 | 21 | 17 | 10 | 6 | 4 | 3 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 |
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|

| 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 | 64 | 51 | 43 | 32 | 24 | 15 | 11 | 9 | 8 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5 | | | | | | | | | |
| 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 | 71 | 54 | 44 | 33 | 25 | 16 | 12 | 10 | 9 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1 | | | | | | | | | |
| 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 | 85 | 61 | 49 | 37 | 29 | 20 | 16 | 13 | 11 |
| Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso | | | | | | | | | |
| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |

Programa MeDiNa v.1.1.7.0 - mar/2023

Cópia registrada para Welliton Rodrigues (welliton.santos.rodrigues@grad.ufsc.br), da empresa UFSC.

Análise do pavimento

Empresa: **UFSC**

Nome do Projeto:

Responsável pelo projeto: **Welliton Rodrigues**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **17/04/2023 às 19:50:54** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **27,6%**

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **5,4mm**

ALERTAS

- *Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!*

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 Mecânico 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 BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 8,0 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 2 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 8,0 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 3 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22 | 10,0 | Resiliente Linear MR = 4980 MPa | 0,30 |
| 4 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5 | 35,0 | Resiliente Não Linear MR = 227 MPa (1º mês) k1 = 1149,00 k2 = 0,530 k3 = -0,180 k4 = 0,000 | 0,35 |

| Cam | Material | Espessura (cm) | Módulo de Resiliência | Coef de Poisson |
|-----|--------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 5 | MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1 | 40,0 | Resiliente Não Linear MR = 140 MPa (1º mês) k1 = 1401,00 k2 = 0,570 k3 = 0,030 k4 = 0,000 | 0,35 |
| 6 | SUBLEITO Silte Areno Argiloso | SL | Resiliente Não Linear MR = 262 MPa (1º mês) k1 = 24,05 k2 = 0,212 k3 = -0,755 k4 = 0,000 | 0,40 |

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

| Propriedades | Modelos |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22 Aditivo Modificador = Borracha Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração CD (MPa) = 1,0 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = - | Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$ -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 750 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1977 ciclos |

2 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

| Propriedades | Modelos |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22 Aditivo Modificador = Borracha Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração CD (MPa) = 1,0 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = - | Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$ -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 750 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1977 ciclos |

3 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

| Propriedades | Modelos |
|--------------|---------|
|--------------|---------|

| Propriedades | Modelos |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22 Aditivo Modificador = Borracha Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração CD (MPa) = 1,0 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = - | Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 4,0e-12$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,654$ -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,99$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 750 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1977 ciclos |

4 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,223 Umidade Ótima (%) = 5,0 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961 |

5 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C1

| Propriedades | Modelos |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,268 Umidade Ótima (%) = 5,8 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1608 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,097 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,525 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0752 |

6 - SUBLEITO: Silte Areno Argiloso

| Propriedades | Modelos |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descrição do Material = Silte Areno-Argiloso - Guarapuava/PR Grupo MCT = ... MCT - Coeficiente c' = ... MCT - Índice e' = ... Massa específica (g/cm ³) = 1,43 Umidade Ótima (%) = 31,10 Energia Compactação = Proctor Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137 | Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,348 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,4776 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1684 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0711 |

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **27400**

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

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,00e+07**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,00e+07**

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

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: **N Eq = 1,00e+08**

| 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 | 8,334e+05 | 1,22% | 3,7 |
| 6 | 5,001e+06 | 2,46% | 4,3 |
| 12 | 1,000e+07 | 3,42% | 4,5 |
| 18 | 1,500e+07 | 4,29% | 4,6 |
| 24 | 2,000e+07 | 5,15% | 4,8 |
| 30 | 2,500e+07 | 6,04% | 4,8 |
| 36 | 3,000e+07 | 6,97% | 4,9 |
| 42 | 3,500e+07 | 7,95% | 5,0 |
| 48 | 4,000e+07 | 8,99% | 5,0 |
| 54 | 4,500e+07 | 10,10% | 5,1 |
| 60 | 5,001e+07 | 11,29% | 5,1 |
| 66 | 5,501e+07 | 12,55% | 5,1 |
| 72 | 6,001e+07 | 13,89% | 5,2 |
| 78 | 6,501e+07 | 15,32% | 5,2 |
| 84 | 7,001e+07 | 16,83% | 5,2 |
| 90 | 7,501e+07 | 18,42% | 5,3 |
| 96 | 8,001e+07 | 20,10% | 5,3 |
| 102 | 8,501e+07 | 21,85% | 5,3 |
| 108 | 9,001e+07 | 23,69% | 5,4 |
| 114 | 9,501e+07 | 25,61% | 5,4 |
| 120 | 1,000e+08 | 27,60% | 5,4 |

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

| Cam | Material | Afundamento de Trilha de Roda (mm) |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 2 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 3 | CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA | 0,00 |
| 4 | MATERIAL GRANULAR | 1,47 |
| 5 | MATERIAL GRANULAR | 1,95 |
| 6 | SUBLEITO | 1,97 |
| Afundamento de Trilha de Roda (mm) | | 5,4 |

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 BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 | 21 | 19 | 18 | 16 | 14 | 10 | 7 | 6 | 4 |
| FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton | 20 | 17 | 15 | 13 | 11 | 8 | 5 | 4 | 3 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 | 31 | 28 | 25 | 21 | 17 | 12 | 8 | 6 | 5 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA - CAPFLEX B PG 64-22

| 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 | 51 | 43 | 36 | 27 | 21 | 13 | 9 | 7 | 6 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

| 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 | 64 | 47 | 38 | 29 | 22 | 15 | 11 | 9 | 7 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C1

| 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 | 85 | 59 | 47 | 35 | 28 | 19 | 15 | 12 | 11 |

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Silte Areno Argiloso

| 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 |
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|

| 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 | 166 | 102 | 74 | 51 | 39 | 29 | 23 | 20 | 17 |