

# Análise comparativa entre métodos empíricos e mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos

Lara Cordeiro Pitangui

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, laracordeirop@gmail.com

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, luizguilherme@unb.br

Rafael Cerqueira Silva

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rafael.silva@unb.br

**RESUMO:** No Brasil, o transporte de cargas é realizado predominantemente por meio de rodovias, resultando em tráfegos elevados e na necessidade de métodos de dimensionamento mais representativos do comportamento do pavimento frente às ações do tráfego e clima. Avanços nesse sentido são encontrados em métodos mecanístico-empíricos, nos quais são calculadas as tensões e deformações do sistema de camadas que compõe o pavimento. Estes modelos são comumente desenvolvidos com base em ensaios laboratoriais, buscando simular as condições de campo, sendo essa relação campo-laboratório a parcela empírica. Nas metodologias tradicionais, as considerações para verificação do desempenho dos pavimentos são simplificadas, não sendo utilizados modelos de previsão de danos para vida útil do projeto. No artigo, apresentam-se análises comparativas entre os resultados do dimensionamento dos métodos empíricos e mecanístico-empírico de pavimentos executados em rodovias federais. Também foram avaliadas as previsões do trincamento e do afundamento de trilha de roda. Observaram-se diferenças entre os resultados dos métodos, sendo o empírico mais favorável. Entretanto, a previsibilidade de dano do método mecanístico-empírico não reproduziu a condição do pavimento. A incerteza nas propriedades dos materiais, a condição de aderência entre camadas e o volume de tráfego são aspectos que podem ter influenciado nos resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimentação, Dimensionamento de Pavimentos, MeDiNa, Mecanístico-Empírico, Método do DNER

## 1 INTRODUÇÃO

A malha rodoviária no Brasil cresceu em grande escala com o passar dos anos, tornando-se fundamental a evolução das técnicas e projetos para construção e restauração de pavimentos.

Apesar da influência de outros fatores, como a falta de conservação das rodovias, a má execução dos serviços de pavimentação, entre outros, essa situação pode também ser justificada pela falta de um método de dimensionamento mais rebuscado (FRITZEN, 2016).

Em razão disso, é fundamental que ocorra uma evolução em tais métodos para que estes possam atender com qualidade aos usuários das rodovias durante toda a vida útil de projeto do pavimento.

Por muito tempo, o método empírico desenvolvido pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza (conhecido como Método do CBR ou Método do DNER) foi o principal meio utilizado para o dimensionamento das camadas dos pavimentos. No entanto, tal método não atende satisfatoriamente ao tráfego atual, pois não considera diversos fatores, como a análise de tensões e deformações, caracterização mais aprofundada dos materiais, parâmetros mecânicos do solo, dos materiais granulares e das misturas asfálticas, entre outros.

Diferentes metodologias foram sendo propostas com o passar dos anos, ocasionando o surgimento de outros métodos de dimensionamento, como aqueles com bases mecanicistas, que levam em conta os fatores supracitados desconsiderados pelo Método do

DNER. Destaca-se, nesse sentido, o programa desenvolvido pelo DNIT em parceria com a COPPE no âmbito de um Termo de Execução Descentralizada - TED: o MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional). Trata-se de uma ferramenta computacional utilizada para verificação e dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos por meio de uma análise de um sistema de múltiplas camadas com comportamento elástico.

O MeDiNa leva em conta diversas características dos materiais utilizados, trazendo uma análise mais próxima da realidade e possibilitando um dimensionamento com previsão da vida útil dos materiais empregados (FRANCO, 2000). Diferentemente dos métodos mais antigos, necessita de uma caracterização mecânica apurada dos materiais constituintes das camadas, tal como aqueles obtidos por ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. Embora ainda parcialmente empírico, o programa representa um avanço considerável na análise do sistema de camadas de pavimentos, trazendo uma previsão de danos da estrutura durante o período de vida útil de projeto considerado.

Visto que o MeDiNa passou a ser recomendado para dimensionamento de pavimentos pelo DNIT, no artigo são apresentadas análises comparativas entre os resultados de dimensionamento de pavimentos por métodos empíricos e mecanístico-empíricos de pavimentos executados em rodovias federais, e o MeDiNa.

## 2 MÉTODO DO DNER

O Método do DNER, introduzido no Brasil pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza, utiliza o ensaio de CBR para avaliar a capacidade de suporte relativa do subleito. Para as camadas superiores, com base nas características gerais dos materiais integrantes, são adotados coeficientes de equivalência estrutural, que definem as espessuras da camada com base no Número N (DNER, 1981).

Por meio de ábacos e em função dos dados supracitados, obtém-se a espessura total do pavimento. Uma vez estabelecida a espessura total exigida, segue-se para a determinação da espessura de camada componente do pavimento, em que a espessura do revestimento asfáltico exigida é, no máximo, de 12,5 cm, para o caso de tráfegos mais elevados.

## 2 MEDINA

O MeDiNa traz uma metodologia mecanística-empírica, que procura traduzir as tensões, deformações e deslocamentos, buscando

compatibilizá-los com o estado de tensões e deformações admissíveis para uma determinada vida de projeto, enquanto a parcela de empirismo reside no fator de calibração entre o campo e o laboratório (FRANCO, 2007).

De modo geral, o dimensionamento de um pavimento novo pelo MeDiNa consiste em definir a estrutura do pavimento, alimentando o programa com as características dos materiais de cada camada e sua respectiva espessura. Os principais dados utilizados pelo programa advêm de ensaios de módulo de resiliência, deformação permanente e fadiga realizados em laboratório, cujos resultados na forma de modelos ou valores médios são inseridos para o cálculo dos danos. Também é necessário definir o tráfego, que é dado pelo conceito de Número N.

No que diz respeito à condição de aderência, para o caso do dimensionamento de novas estruturas, ela já é pré-estabelecida. Tal informação é considerada no modelo de calibração do programa para o cálculo da previsão de danos, não sendo facultada ao projetista sua seleção (PITANGUI, 2019). Entre camadas de misturas asfálticas, adota-se uma condição totalmente aderida, para as demais camadas granulares e de solo, a condição é totalmente não-aderida. Não existe, em nenhuma interface de camadas, a opção parcialmente aderida.

Uma vez inseridas as informações, o programa realiza os cálculos e verifica os principais critérios de dimensionamento adotados: a porcentagem de área trincada, relacionada ao dano de fadiga, e o afundamento de trilha de roda (ATR), relacionado à deformação permanente. No final, é apresentado um resumo, e o projetista é capaz de avaliar se um determinado projeto passa ou não de acordo com as informações apresentadas.

## 3 METODOLOGIA

Para a realização das comparações entre as metodologias citadas, foram selecionados oito projetos do acervo técnico do DNIT, onde foram pesquisadas as informações necessárias para a alimentação do MeDiNa. Estes projetos já foram aprovados e as obras implementadas no Brasil.

Notoriamente, por se tratar de um método antigo e empírico, o Método do DNER não continha todas as informações necessárias para a alimentação do MeDiNa, principalmente no que tange às características dos materiais. Tal observação também é válida para os demais métodos de dimensionamento mecanicistas, que também necessitam de diferentes informações, principalmente com relação aos modelos utilizados pelo MeDiNa. Diante dessa situação, foram realizadas algumas adaptações.

Para aqueles projetos que continham, de forma direta, as informações necessárias para o MeDiNa, estas foram utilizadas, cadastrando os respectivos materiais no programa. Aqueles que não possuíam tais informações, foram realizadas algumas adaptações, adotando-se determinadas premissas para a realização da análise comparativa.

### 3.1 Módulo de Resiliência

A primeira premissa adotada foi com relação ao módulo de resiliência do material, o qual constituiu o principal parâmetro utilizado para a compatibilização dos materiais.

Nos casos em que não foram dadas estas informações pelos projetistas (principalmente em projetos dimensionados apenas pelo Método do DNER), optou-se pela utilização de módulos conhecidos na literatura, como (BERNUCCI, 2010) e (BALBO, 2007), bem como nas referências já cadastradas no próprio programa. Já nos demais casos, em que os projetos disponibilizaram esse parâmetro, este foi utilizado como referência para o cadastramento do material no *software* (PITANGUI, 2019).

### 3.2 Curvas de Fadiga

A segunda premissa diz respeito às curvas de fadiga exigidas pelo MeDiNa. A maioria dos projetos selecionados não possui uma curva de fadiga para inserção no programa. Em razão disso, foram utilizadas as fornecidas pelo próprio *software*.

O MeDiNa utiliza o conceito de Classes de Fadiga, junto ao parâmetro Fator de Fadiga da Mistura - FFM. Este faz com que o módulo de resiliência seja avaliado de forma conjunta à fadiga, fornecendo quatro opções padrão de classes, além de outras curvas de materiais mais específicos.

Nessa lógica, tal como mencionado anteriormente, procurou-se não subestimar o material indicado no projeto. Com isso, foram cadastradas, na maioria dos casos, a classe 4 de fadiga para os materiais do revestimento. Nos casos em que, ainda que com a classe 4, o material apresentou um FFM baixo, implicando em uma classe 0, que é inadequada para o dimensionamento, foi empregada a do material RJ CAPFLEX 65/90 SBS, por possuir comportamento relacionado à fadiga ainda melhor que a classe 4.

Sabe-se que esta não é a curva do material, sendo um artifício para elaboração do dimensionamento. Contudo, trata-se de uma aproximação razoável para análise qualitativa proposta nesse trabalho.

### 3.3 Deformação Permanente

Para este parâmetro, nenhuma das metodologias anteriores traz o modelo necessário para que o material possa ser cadastrado no MeDiNa.

Atualmente, para o programa, o material deve ser avaliado por meio de ensaios de materiais submetidos à ação de cargas repetidas, apresentando um modelo de previsão com quatro parâmetros de regressão, com dependência das tensões desvio e confinante (GUIMARÃES, 2009).

Contudo, apesar de não ser possível cadastrar o modelo específico do material analisado, o MeDiNa, quanto aos solos e materiais granulares, possui opções de materiais, com os principais tipos de solos brasileiros. Logo, a partir dos dados obtidos dos estudos geotécnicos, foi possível identificar um solo mais adequado para o projeto de acordo com as opções já cadastradas no MeDiNa.

### 3.4 Parâmetros

Por fim, para não subestimar os projetos selecionados, nos casos em que não foram fornecidas informações exatas a respeito dos materiais das camadas, optou-se sempre por um material de parâmetros melhores que a referência, a fim de confirmar se algum projeto estaria subdimensionado ou superdimensionado de acordo com o MeDiNa.

### 3.5 Seleção dos projetos

Diante das premissas adotadas, foram selecionados oito projetos para o novo dimensionamento do pavimento pelo MeDiNa, os quais são listados na Tabela 1, junto ao Número N, parâmetro fundamental para o dimensionamento.

As rodovias selecionadas estão espalhadas por todo o Brasil, apresentando diferentes condições climáticas, tráfegos e soluções de pavimentação.

Tabela 1 – Projetos selecionados.

Rodovia	Segmento	Número N
BR 470 SC	km 0,0 ao km 18,61	8,57E+07
BR 101 SC	km 245,0 ao km 271,7	1,56E+08
BR 104 PE	km 19,8 ao km 71,2	2,29E+07
BR 050 MG	km 47 ao km 68,4	7,34E+07
BR 116 BA	km 334,23 ao km 387,41	7,68E+07
BR 280 SC	km 36,68 ao km 74,58	1,13E+07
BR 386 RS	km 351,5 ao km 385,3	1,78E+07
BR 448 RS	km 0,00 ao km 22	9,54E+07

### 3.6 Compilação de dados

Tendo em vista que um projeto de implantação de um

pavimento consiste em uma série de subprojetos, como drenagem, tráfego, pavimentação etc., a compilação consistiu, basicamente, em selecionar as informações demandadas pelo MeDiNa e organizá-las de modo a facilitar o posterior dimensionamento.

Como os projetos são diferentes entre si, nem todas as informações foram encontradas em todos, em sua integralidade. Em linhas gerais, as informações coletadas se resumiram em: Número N; período de projeto; camadas da estrutura e respectivas espessuras; e dados principais referentes aos materiais de cada camada. Após o levantamento, os dados disponíveis foram compatibilizados com aqueles presentes no MeDiNa, selecionando-se os que melhor caracterizavam o projeto em análise.

Para cada um dos oito projetos apresentados, foi elaborada uma tabela constando os dados do projeto, bem como os dados cadastrados/selecionados no MeDiNa. A título de exemplo, é apresentada na Tabela 2 os dados de um dos projetos (BR 280/SC).

Tabela 2: Dados BR 280/SC

Camada	Esp.(cm)	Material Projeto	Material MeDiNa
Revestimento Asfáltico	12,5	CBUQ Faixa "B" com polímero tipo SBS 60/85	CAP SBS 60/85 (MR Ref. 6000 e dados Classe 4)
Base	15	Brita graduada	Brita Graduada - Gnaisse C4
Sub-base	17	Macadame Seco	Macadame Seco (MR Ref.: 300 e DP da BGS C4)
Subleito	-	CBR 6% - Tipo A.1.b - Saibro rosado com pedregulhos	Solo Arenoso-argiloso LG'(2)

### 3.7 Compilação de dados

Compiladas todas as informações, o próximo passo consistiu na análise e no dimensionamento por meio do MeDiNa.

O *software* foi alimentado com as informações dos projetos, tal como exemplificado na Tabela 2, realizando-se, em seguida, a análise do projeto. Em todas elas, foram consideradas vias pertencentes ao

Sistema Arterial Primário, com nível de confiabilidade de 85%.

Os parâmetros de análise utilizados pelo MeDiNa para avaliação da adequabilidade do projeto são a porcentagem de área trincada e o afundamento de trilha de roda, os quais são previstos até o fim do período de projeto adotado.

Para o tipo de rodovia considerada, pertencente ao Sistema Arterial Primário, o programa considera um limite máximo de 30% de área trincada, ou seja, até o fim do período de vida útil de projeto, o pavimento não poderá ter mais de 30% de trincamento para que seja considerado adequado.

Quanto ao afundamento de trilha de roda, relacionada à deformação permanente, o programa considera que o limite máximo permitido é de 13 mm até o fim da vida útil. Ressalta-se que, com relação aos materiais estabilizados quimicamente, o programa não calcula a área trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.

## 4 RESULTADOS

Com base nos dados selecionados e nas premissas adotadas para a realização do dimensionamento, os resultados obtidos de porcentagem de área trincada estimada do pavimento no fim do período e de afundamento de trilha de rodas estimado, em mm, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados das Análises

Rodovia	Período Projeto (anos)	Área Trincada Estimada - Fim do Período (%)	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
BR 470 SC	10	99,0%	8,6
BR 101 SC	10	99,0%	3,0
BR 104 PE	15	99,0%	3,3
BR 050 MG	10	99,0%	5,1
BR 116 BA	10	99,0%	9,8
BR 280 SC	10	99,0%	8,6
BR 386 RS	10	99,0%	8,7
BR 448 RS	10	99,0%	5,6

A Tabela 4 complementa os resultados da análise, indicando o mês em que o pavimento atingiu mais de 30% de área trincada, bem como o valor máximo de 99%.

O primeiro valor indica a partir de quando o pavimento é considerado como não adequado sob a ótica do MeDiNa, ou seja, ao atingir 30%, o dimensionamento com a solução proposta é insuficiente para o tráfego de projeto. Já o segundo valor indica um pavimento completamente deteriorado, onde toda a sua área estará trincada a

partir de um determinado mês.

Tabela 4: Período de alcance da área trincada

Rodovia	Mês que alcançou 30%	Mês que alcançou 99%
BR 470 SC	13	34
BR 101 SC	17	43
BR 104 PE	63	128
BR 050 MG	15	39
BR 116 BA	14	34
BR 280 SC	11	29
BR 386 RS	15	38
BR 448 RS	23	60

Os projetos analisados atingiram o término do período de vida útil antes do estabelecido para as rodovias, ou seja, ultrapassaram o limite de 30% adotado pelo MeDiNa para esse tipo de via. Além disso, todos os oito projetos apresentaram pavimento com 100% de área trincada antes do final da vida útil de projeto. Ainda que para tráfegos elevados, tais resultados, a priori, representam danos altos quando comparados ao observado em campo nos pavimentos.

Com exceção do projeto da BR 104/PE, cujo pavimento atingiu o limite de área trincada após o décimo ano (considerando o período de projeto de 15 anos), os demais projetos apresentaram uma média de trincamento completo entre o terceiro e quarto ano.

Uma hipótese para explicação deste resultado é a condição de aderência entre as camadas da estrutura do pavimento, que já são pré-definidas no programa. Com exceção das camadas de revestimento asfáltico aderidas entre si e das camadas anti reflexão de trincas com revestimento asfáltico (também aderidas entre si), todas as demais são dadas como não aderidas, ou seja, presume-se que a interação entre elas em nada contribui para o desempenho do pavimento, o que nem sempre é verdade. Não há possibilidade de se adotar uma situação parcialmente aderida, o que, em muitos projetos, é a situação que realmente ocorre em campo. Isto poderia resultar em resultados diferentes, possivelmente com espessuras mais reduzidas.

Outro ponto capaz de explicar os valores de área trincada são os próprios dados de entrada no MeDiNa. Mesmo utilizando valores de módulo iguais ou maiores aos utilizados em campo, a falta de informações dos projetos (quando comparados à necessidade do MeDiNa) não permitiu uma perfeita comparação. Para isso, seria interessante os ensaios de todos os materiais para a obtenção de suas características, assim como da curva de fadiga e do

modelo de deformação permanente exigidos pelo programa.

Por fim, o resultado confirma o que o novo método vem propor, uma análise mais aprofundada do dano de fadiga, por meio da área trincada. No Método do DNER, vigente no Brasil por mais de 50 anos, a análise focava-se mais na proteção do subleito, o que pode ser observado a partir dos resultados de afundamento de trilha de roda encontrados, onde se observa que nenhum projeto atingiu o limite máximo definido.

Quanto à camada de revestimento, a maior espessura prevista para o Método do DNER é de 12,5 cm, para tráfegos a partir de  $5,0 \times 10^7$ . Ao analisar esse parâmetro, e tendo em vista os tráfegos vistos atualmente no país, mostra-se insuficiente, justificando os altos índices de área trincada encontrados.

## 5 CONCLUSÕES

Nas metodologias de dimensionamento de pavimento tradicionais, as considerações utilizadas para o desempenho do pavimento quanto à fadiga eram bastante simplificadas, não sendo utilizados modelos de previsão de danos durante a vida útil do projeto.

Ao apresentar modelos de curva de fadiga e de deformação permanente para materiais efetivamente utilizados no país, o MeDiNa representa uma evolução na avaliação de desempenho das estruturas de pavimentos asfálticos, pois gera resultados menos empíricos. Ao mesmo tempo, exige a necessidade de muito mais parâmetros quando comparados aos métodos de dimensionamento usualmente empregados no país.

Nessa perspectiva, quanto à comparação realizada e aos resultados analisados, é observada uma diferença significativa nos dimensionamentos. É fato que, em todas as análises, os materiais utilizados no MeDiNa não correspondem exatamente ao utilizado no dimensionamento real da estrutura, o que já pode ser uma justificativa para a diferença observada. No entanto, ainda assim, trata-se de uma aproximação razoável, que fornece resultados passíveis de análise.

Tais resultados indicam um dano de fadiga (dado pela porcentagem de área trincada estimada para o fim do período de projeto considerado) alto, indicando 100% de trincamento no pavimento antes do fim do período. Já com relação à deformação permanente (dada pelo cálculo do afundamento de trilha de roda), os valores são relativamente pequenos, principalmente para o tempo considerado. Esses dados condizem com a falta de previsão de danos por fadiga nas metodologias antigas, que agora são apontados pelo MeDiNa.

Deve-se ressaltar, contudo, que os trincamentos calculados pelo MeDiNa não foram observados em campo. A não consideração de aderência entre as camadas e a necessária suposição de alguns materiais devido à ausência de informações mais precisas, associadas ao volume de tráfego, podem explicar a diferença entre previsão e o real desempenho do pavimento.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. (2007) *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*, São Paulo, Brasil, Oficina de Textos.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2010) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA.
- DNER. (1981) *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- FRANCO, F.A.C.P. (2000) *Um Sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- FRANCO, F.A.C.P. (2007) *Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SISPAV*, 294 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- FRITZEN, M. A. (2016) *Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- GUIMARÃES, A. C. R. (2009) *Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- PITANGUI, L. C. (2019) *Análise comparativa do método do DNER com o método mecânico-empírico MeDiNa*. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.