PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS

ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES

Curso de Engenharia Civil

Ana Beatriz Souza Souto

INOVAÇÕES NA METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE RODOVIAS: O MÉTODO MeDiNa

GOIÂNIA

2024

Ana Beatriz Souza Souto

INOVAÇÕES NA METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE RODOVIAS: O MÉTODO MeDiNa

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Goiás como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos.

GOIÂNIA
2024

SUMÁRIO

RESUMO.....**4**

ABSTRACT.....**5**

1 INTRODUÇÃO.....**6.**

1.1 Objetivo Geral ..... Erro! Indicador não definido.**7**

1.2 Objetivo Específico.....**7**

1.3Metodologia.....**7**

1.4 Organização do Trabalho.....**7**

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

3 A ANÁLISE MECANÍSTICA..... **....11.**

3.1 Modelos de previsão de desempenho..... **12**

3.2 O Módulo de elasticidade.....**13**

3.3 Avaliação estrutural.....**14**

3.4 Modelos de previsão de desempenho.....**16**

3.4.1 Cálculo de tensões e deformações.....***16***

4 OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS NO BRASIL.....**17.**

5 APLICAÇÃO DO MeDiNa em UM TRECHO HIPOTÉTICO.....**18**

6 ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE MeDiNa.....**20**

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....**25**

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....**27**

9 ANEXO.....**27**

RESUMO

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis de rodovias ainda empregado no Brasil, é o Método DNER, atual DNIT, que é fundamentado no ensaio CBR, ou ISC. As aplicações do referido método têm apresentado imperfeições e defeitos prematuros, como o trincamento do revestimento e afundamentos nas trilhas de roda dos veículos. Ante esses fatos, pesquisadores de diversos países, dentre eles o Brasil, realizaram estudos sobre o comportamento de materiais e desempenho de pavimentos ao longo de sua vida útil, para aperfeiçoar a metodologia de dimensionamento vigente. Desses estudos surgiu o Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos, denominado de MeDiNa, um método mecanístico-empírico, que é um programa computacional que realiza o dimensionamento de pavimentos, por meio da rotina AEMC de análise de camadas de múltiplas camadas. A denominação MeDiNa é uma homenagem ao engenheiro Jacques de Medina, que introduziu a mecânica dos pavimentos no Brasil. Neste trabalho será feita uma aplicação hipotética do MeDiNa, procedida uma análise dos resultados obtidos e apresentadas considerações sobre a aplicabilidade do referido método.

Palavras-chaves: Dimensionamento de Pavimentos, Métodos Mecanísticos. Elasticidade. MeDiNa.

ABSTRACT

The method for sizing of flexible highway pavements still used in Brazil is the DNER Method, currently DNIT, which is based on the CBR test, or ISC. Applications of this method have presented imperfections and premature defects, such as cracking of the coating and sinking in the wheel tracks of vehicles. Given these facts, researchers from several countries, including Brazil, carried out studies on the behavior of materials and performance of pavements throughout their useful life, to improve the current sizing methodology. From these studies emerged the National Pavement Design Method, called MeDiNa, a mechanistic-empirical method, which is a computational program that performs pavement sizing, through the AEMC multi-layer layer analysis routine. The name MeDiNa is a tribute to the engineer Jacques de Medina, who introduced pavement mechanics to Brazil. In this work, a hypothetical application of MeDiNa will be made, the results obtained will be analyzed and considerations will be presented regarding the applicability of the aforementioned method.

Keywords: Pavement sizing. Mechanistic method. Elasticity. MeDiNa.

1 INTRODUÇÃO

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis de rodovias ainda largamente empregado no Brasil, é o conhecido Método DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), antigo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), que é fundamentado no ensaio CBR (*California Bearing Ratio*), ou ISC (Índice de Suporte Califórnia) e nos estudos realizados pelo USACE (*United States Army Corps of Engineergs*) ou Corpo de Engenheiros do Exército Americano, embasados no trabalho "*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*", proposto em 1962 por W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Alvin.

As aplicações do Método DNIT levou à conclusão que tal método apresenta imperfeições, haja vista que resultou em soluções de estruturas, que submetidas à solicitação do tráfego, apresentaram defeitos prematuros, como o trincamento do revestimento ou da capa asfáltica e afundamentos nas trilhas de roda dos veículos. Ante esses fatos, pesquisadores de diversos países, dentre eles o Brasil, realizaram estudos sobre o comportamento de materiais e desempenho de pavimentos ao longo de sua vida útil, para aperfeiçoar a metodologia de dimensionamento vigente.

As pesquisas no Brasil se iniciaram há quase dez anos e foram intensificadas com a implantação do programa de monitoramento de rodovias em serviço, denominado Rede Temática de Asfalto. O Programa teve como objetivo monitorar trechos experimentais, implantados em alguns locais do território brasileiro, com o intuito de criar um banco de dados, a ser utilizado no desenvolvimento de um método mecanístico empírico de dimensionamento de pavimentos para os pavimentos de rodovias brasileiras.

Com efeito, a partir dos estudos e pesquisas realizadas foi proposto um novo método de dimensionamento capaz de avaliar as trincas por fadiga e os afundamentos de trilha de roda nos revestimentos asfálticos, haja vista que o método de dimensionamento até então adotado no Brasil, avalia apenas a deformação permanente do subleito e camadas granulares do pavimento. O novo método, denominado Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos e representado pela sigla MeDiNa, em homenagem ao Professor Medina, pioneiro nos estudos de métodos mecanísticos, é, portanto, um marco na pavimentação nacional, mas que ainda está restrito ao ambiente acadêmico e sua divulgação é necessária para atualizar a formação de novos engenheiros e proporcionar evolução das normas técnicas de pavimentação rodoviária.

1.1 Objetivo geral

Analisar o estado da arte do desenvolvimento do MeDiNa já proposto pelo DNIT e sua aplicabilidade no dimensionamento de pavimentos flexíveis de rodovias, através da bibliografia e normas disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias que desenvolve as especificações técnicas recomendadas pelo DNIT para aplicação em todo o território brasileiro.

1.2 Objetivo específico

Aplicar a metodologia MeDiNa em um caso hipotético de dimensionamento de pavimento rodoviário e analisar a referida aplicabilidade no meio técnico rodoviário.

1.3 Metodologia

O presente trabalho teve seu desenvolvimento com base em pesquisa bibliográfica, que envolveu a literatura especializada em projetos de rodovias, especificamente as direcionadas ao dimensionamento da superestrutura constituída por pavimentos flexíveis. A revisão bibliográfica, foi necessária para o embasamento teórico sobre o tema, e elaboração de uma redação que possa esclarecer os procedimentos adequados para o dimensionamento de pavimentos através das rotinas do software MeDiNa, de forma consistente, atualizada e em consonância com o estado da arte. Além da abordagem teórica sobre os métodos empíricos-mecanísticos de dimensionamento de pavimentos e sua importância, foi apresentado um estudo de caso hipotético que abordou a aplicação do MediNa no dimensionamento de um pavimento de rodovia.

1.4 Organização do trabalho

Este capítulo é uma breve introdução do tema desenvolvido neste Trabalho Final de Curso, com a enumeração de seus objetivos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema e contém citações dos principais autores que pesquisam sobre a análise mecanística dos pavimentos.

O capítulo 3 apresenta detalhes sobre a análise mecanística da estrutura dos pavimentos

O capítulo 4 traz a metodologia recomendada pelo DNIT sobre mecânica dos pavimentos e uma exposição teórica do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, o então denominado MeDiNa.

O capítulo 5 apresenta uma aplicação hipotética do software MeDiNa e uma análise sobre os resultados obtidos.

O capítulo 6 é uma análise da aplicabilidade do MediNa, seguida de recomendações e comentários finais.

O capítulo 7 apresenta as considerações finais e sugestões advindas dos estudos realizados.

No capítulo 9 são relacionadas as referências bibliográficas do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis desenvolvido em 1966 pelo extinto DNER, atual DNIT, é ainda até hoje o mais utilizado, apesar de ser fundamentado em regras desenvolvidas a partir de observações e experiências relativas a certos tipos de pavimentos, de materiais e condições específicas de clima. Esse referido método apresenta caráter generalista, em função de ensaios de CBR, onde várias situações são tratadas de forma simplificada. Sua maior limitação é que não pode ser generalizado com confiabilidade para outras condições senão àquelas para o qual foi desenvolvido, levando a uma análise superficial sobre a situação e especificidades das diversas variáveis que influenciam no desempenho funcional e estrutural de um pavimento (FRANCO, 2007; COUTINHO, 2011).

Bezerra Neto (2004) fez uma análise comparativa de pavimentos, da região de Campo Grande - MS, dimensionados pelo método empírico do então DNER e pelo método mecanístico. Das análises esse autor observou que ora as estruturas obtidas pelo método mecanístico foram idênticas às obtidas pelo método DNER, ora foram mais esbeltas e ora menos esbeltas, dependendo do material constituinte das camadas do pavimento e do nível de confiabilidade adotado. Foi verificado ainda, que a caracterização dos materiais através dos ensaios de módulo de resiliência, vida de fadiga e deformação permanente é

imprescindível quando se deseja projetar um pavimento empregando-se o método mecanístico.

Mota e Medina (2006), apresentam um histórico das investigações e desenvolvimento da mecânica dos pavimentos no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ), e evidenciam a contribuição dos autores e de seus orientados no desenvolvimento de um método mecanístico a ser adotado no dimensionamento de pavimentos de rodovias brasileiras.

Franco (2007) salienta que a condição empírica dos diversos métodos de dimensionamento de pavimentos tem sido tópico de discussões entre os engenheiros rodoviários por vários anos. Importantes instituições no mundo todo estão pesquisando e desenvolvendo métodos modernos e analíticos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, que variam desde métodos simplificados a alguns muito complexos. Esse autor ainda pondera que, mesmo já existindo ferramentas mais atualizadas de análises de pavimentos, que utilizam métodos mecanicistas, a maioria dos projetos de pavimentos no Brasil ainda são elaborados aplicando-se o método de dimensionamento empírico, e afirma que isso acontece, em parte, devido à necessidade de uma mudança de cultura na comunidade da pavimentação brasileira, que é dificultada, dentre outros fatores, pela falta de uma metodologia mecanística de aplicação mais prática ou simples e que leve a uma percepção confiável dos resultados obtidos.

Coutinho (2011) realizou um estudo comparativo entre aplicações do método DNIT e da metodologia mecanística-empírica no dimensionamento de pavimentos flexíveis, e concluiu que a mecanística apresenta maior capacidade de descrever o desempenho funcional e estrutural de um pavimento.

Lemos e Santos (2013) desenvolveram um software para agilizar a aplicação dos métodos DNIT e o mecanístico da resiliência, quando priorizaram a precisão e a agilidade. Concluíram que a ferramenta computacional facilita a compreensão das metodologias e agiliza a aplicação, pois desprende tempo bem menor quando se necessita da realização de cálculos repetitivos, nos diversos processos de dimensionamentos e redimensionamentos, com o objetivo de se chegar a uma solução mais adequada.

Santiago e Soares (2015), apresentaram algumas contribuições ao desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos, naquela época em construção no país. Foram feitas discussões sobre os diversos métodos de dimensionamento de pavimentos nacionais e internacionais e suas características básicas.

Fernandes (2016) apresenta um estudo comparativo de estruturas de pavimentos rodoviários dimensionados aplicando-se o método empírico DNIT, o método da *American Association of State Highway and Officials* (AASHTO) e a metodologia mecanística SISPAVBR divulgada em Franco (2007). Das aplicações obteve-se espessura de revestimento de 12,5 cm pelo método DNIT, 19,5 cm pelo software SISPAVBR e 40 cm pelo método AASHTO. Assim, o método mecanístico, fundamentado na teoria da elasticidade apresentou resultado intermediário, mas o pavimento dimensionado pelo método DNIT apresentou expectativa de vida de projeto bem inferior a esperada, e em alguns casos chegou a apenas 2 meses.

Percebe-se que gradativamente, está-se buscando uma compreensão mais analítica do problema e tentando, com isso, reduzir a parcela de empirismo. Neste buscado enfoque analítico, o pavimento é tratado como uma estrutura de engenharia e seu comportamento mecânico é avaliado em função do carregamento e da resistência dos materiais, assim como é feito no dimensionamento de estruturas de aço e de concreto. Na análise mecanística relacionam-se as tensões de tração na base da camada asfáltica com a formação de trincas no revestimento do pavimento e as deformações verticais com o desenvolvimento do afundamento de trilha de roda.

Alguns pesquisadores, porém, salientam que o enfoque mecanístico, não modela alguns fatores que devem ser observados no dimensionamento de um sistema em camadas, que tem propriedades variáveis com o tempo e condições ambientais, e que tem deterioração acumulada com a passagem das cargas do tráfego variáveis em intensidade, distribuição e velocidade. Por isso a parcela de empirismo acaba sendo inevitável, mesmo com a aplicação de fatores de calibração dos resultados campo-laboratório sobre os modelos desenvolvidos. (MOTTA, 1991; LEKARP et al. 2000 apud FRANCO, 2007).

A análise mecanística do desempenho de pavimentos tem sido o caminho que a COPPE/UFRJ tem desenvolvido desde 1977, por meio de diversos estudos como PREUSSLER (1978), SVENSON (1980), MOTTA (1991) e PINTO (1991). A Mecânica dos Pavimentos, pelo conhecimento do comportamento resiliente dos materiais, utilizando os ensaios dinâmicos de caracterização dos solos e misturas asfálticas, assim como a análise de tensões e deformações de caráter não-linear dos sistemas em camadas realizada por técnicas computacionais, tem buscado desenvolver e aperfeiçoar o dimensionamento dos pavimentos asfálticos (BENEVIDES et al., 2000).

Para Franco (2007) a necessidade da modelagem mecanística empírica vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural,

de modo que seja possível empregar materiais para os quais ainda não se tenha experiência suficiente em campo, além de se considerar os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais os métodos empíricos foram desenvolvidos.

3 A ANÁLISE MECANÍSTICA

O método de dimensionamento do DNIT (2006), visa proteger o subleito contra a geração de deformações plásticas excessivas durante o período de projeto. O foco é, portanto, a resistência ou suporte do subleito, expressa pelo ISC ou CBR e as deformações permanentes produzidas no subleito pelas cargas do tráfego. É um método empírico, com base experimental referente a condições climáticas e de solos nos EUA, onde o método foi originalmente concebido. Tem sido aplicado no dimensionamento de pavimentos de rodovias brasileiras desde os anos 1960, sendo que diversos trechos de rodovias, com pavimento dimensionado pelo método, apresentaram deterioração prematura, fato que desencadeou uma série de análises no meio técnico sobre os resultados produzidos que culminaram com a necessidade de aprimoramento da metodologia.

Um dos aspectos levantados é o fato de o método considerar a ação de cargas estáticas, diferente das cargas dinâmicas e repetitivas características das cargas aplicadas pelos veículos no pavimento. Também, quanto ao comportamento do pavimento, foram identificadas patologias cujas causas não são combatidas no método empírico. Tais patologias são as trincas e sua propagação na superfície do revestimento ou capa asfáltica e o afundamento do pavimento nas trilhas de roda dos caminhões.

Assim, surgiu a necessidade de se desenvolver métodos modernos e analíticos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, com base em análises mais elaboradas cientificamente ou mecanísticas, para explicar melhor o comportamento dos pavimentos ante à operação do tráfego. Porém, mesmo já existindo ferramentas atuais de análises de pavimentos, que utilizam métodos mecanicistas, a maioria dos projetos no Brasil são ainda elaborados por meio do método de dimensionamento empírico. Isso acontece, em parte, devido à necessidade de uma mudança de cultura na comunidade da pavimentação

brasileira, que é dificultada, dentre outros fatores, pela falta de uma metodologia mecanística de utilização simples e que produza uma percepção confiável nos resultados.

Gradualmente, busca-se um entendimento mais analítico do problema para reduzir a parcela de empirismo. Neste enfoque analítico, o pavimento é tratado como uma estrutura de engenharia e seu comportamento mecânico é avaliado em função do carregamento e da resistência dos materiais, assim como é feito com as estruturas de aço ou concreto. Ademais, relacionam-se as tensões de tração na base da camada asfáltica com a formação de trincas no revestimento do pavimento ou as deformações verticais com o desenvolvimento do afundamento de trilha de roda. Essas teorias, porém, não modelam alguns fatores que devem ser observados no dimensionamento de um sistema em camadas, em que as propriedades variam com o tempo e com as condições ambientais, e que tem a deterioração acumulada com a passagem das cargas variáveis em intensidade, distribuição e velocidade. Por isso a parcela de empirismo acaba sendo inevitável.

A necessidade de uma modelagem mecanística-empírica vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo que seja possível utilizar materiais para os quais ainda não se tenha experiência suficiente em campo, além de se considerar os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais o método empírico foi desenvolvido.

Um método empírico, pode ser aperfeiçoado por análises que considerem o problema do trincamento por fadiga das camadas asfálticas e o afundamento do pavimento nas trilhas de roda. Assim, um procedimento mais eficaz é a aplicação de modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico, por estarem embasados em propriedades mecânicas fundamentais dos solos e demais materiais de pavimentação. O dimensionamento deve assegurar que a passagem dos eixos dos veículos não cause o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga e, ainda, garantir que as espessuras das camadas sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda, considerando a deformabilidade dos materiais.

3.1 Modelos de previsão de desempenho

A aplicação de modelos de previsão de desempenho permite quantificar a redução do nível de serventia ou a geração de defeitos ao longo da vida de serviço do pavimento. Esses modelos são denominados de mecanísticos-empíricos e são aplicados

considerando-se:

- Um Modelo Estrutural que permite o cálculo de respostas induzidas pelas cargas de roda em movimento nas camadas do pavimento, como por exemplo, as tensões/deformações ou deflexões elásticas relacionadas com o surgimento ou propagação de defeitos na estrutura do pavimento;
- Funções de Transferência, que relacionam as respostas da estrutura com as cargas do tráfego, geração e propagação de defeitos. Essas funções atendem a determinadas condições de contorno, exigidas pelo problema e se baseiam em teorias. empiricamente validadas, que descrevam o mecanismo com que a deterioração se processa:
- Fatores ou Funções de Calibração, que ajustam as previsões das Funções de Transferência para reproduzir dados de uma determinada base empírica. Consideram parâmetros que não podem ser explicitados, no modelo estrutural ou nas Funções de Transferência, como: clima, características específicas do tráfego atuante, particularidades dos materiais e de sua variabilidade.

3.2 O Módulo de elasticidade

O Módulo de Elasticidade pode ser considerado nas definições abaixo:

- Módulo de Deformação Resiliente (M_R): determinado em laboratório por meio de ensaios de cargas repetidas, com duração de carga da ordem de 0,10 s e tempo de repouso de 0,9 s. Utiliza toda a deformação recuperável no seu cálculo, embutindo. portanto, as parcelas elásticas instantânea e visco elástica, geradas pelo pulso de cargade 0,1 s de duração;
- Módulo de Elasticidade Efetivo "in situ" (E_{ef}): é o módulo determinado por retro análise das bacias de deflexões lidas através de equipamentos para ensaios não destrutivos.

Enquanto M_R se refere às condições de compactação e de solicitação do ensaio de laboratório, E_{ef} reflete ou sintetiza o estado de tensões, a compactação e o modo de solicitação a que a camada é submetida pelas cargas dos veículos em movimento.

3.3 Avaliação estrutural

A condição estrutural de um pavimento pode ser definida a partir dos seguintes parâmetros:

- A capacidade apresentada pelas camadas de solos e de materiais granulares de resistir às deformações elásticas e plásticas induzidas pelas cargas do tráfego;
- A integridade estrutural das camadas asfálticas e cimentadas, relacionadas ao grau e extensão do fissuramento existente. Para se avaliar essa condição, são recomendáveis os seguintes procedimentos:

a) Procedimento I: O pavimento é avaliado continuamente por meio de levantamentos defletométricos com a viga Benkelman. medindo-se a deflexão máxima (Dg) e o seu raiode curvatura (R), que são os parâmetros confiáveis medidos com a viga. Como esses parâmetros não são suficientes para se determinar os módulos de elasticidade das camadas do pavimento, deve-se coletar amostras de alguns, ou de todos os materiais, em subtrechos homogéneos. para a determinação de M_R em laboratório.

Uma análise conjunta desses parâmetros possibilitará análises de fadiga, já que a deformação máxima de tração sob um revestimento asfáltico (ε_t) é função da deflexão máxima (D_0) do raio de curvatura (R), da espessura do revestimento (h_r) e do módulo de resiliência do subleito (MR), ou seja:

:

$$\varepsilon_t = f(D_0, R, h_r, M_R)$$

b) Procedimento II: O pavimento é avaliado por meio de reflectómetros dinâmicos, medindo-se os módulos de elasticidade efetivos (E_{ef}) de cada camada. A retirada de amostras para determinação de M_R em laboratório ficaria restrita a poucos locais, com a finalidade única de ser um teste de verificação dos valores calculados para E_{ef}, a fim de se evitar erros grosseiros no processo de retro análise das barras de deflexões, como é recomendada no Guia da AASHTO.

A determinação dos módulos de elasticidade das camadas é feita por um processo de retro análise. onde se utiliza um modelo estrutural para o pavimento, como a Teoria de Camadas Elásticas ou o Método dos Elementos Finitos, e se encontra a combinação de módulos que faz com que o modelo reproduza, da melhor forma possível, a bacia de deflexões lida pelo FWD no campo. Para tanto, devem ser conhecidas: a carga aplicada e as espessuras das camadas.

Os coeficientes doPoisson são fixados em valores típicos para cada material, já que interferem pouco na bacia de deflexões. Como não se dispõe de uma solução analítica definitiva para o problema, a retro análise deve ser feita por meio de ajustes iterativos. enquanto se tenta minimizar uma Função Erro. definida como a distância entre as bacias medidas e teórica.

Apesar deste processo de ajuste iterativo, a combinação de módulos mais adequada ou correta é única. O que garante essa unicidade é a forma como as tensões se distribuem na estrutura de um pavimento. O bulbo de tensões produzido pela carga aplicada na placa circular tem forma cónica, onde o ângulo médio com que as tensões se espraiam varia em função da espessura e rigidez das camadas.

Por mais bem executada que seja a retro análise raramente se ajustará a bacia teórica à bacia medida de forma perfeita, ou seja, com erro nulo em todos os geofones, pelas seguintes razões:

- Existe um erro experimental. A precisão dos geofones é de 2 micra (0.2 x 10" mm);
- Existe uma certa distância entre modelo teórico e o pavimento real, e sempre haverá, por mais bem elaborado e complexo que seja o modelo.

Uma regra prática deve ser imposta, portanto, para se indicar o momento de interromper as iterações. Pode-se dizer que os resultados obtidos tendem a ser consistentes e estáveis quando o erro em cada um dos geofones for inferior a 1,5%. Outro aspecto, também de natureza prática, diz respeito ao número máximo de parâmetros que podem ser determinados por meio de uma bacia com sete geofones, como é usual. Dificilmente determinar, confiavelmente, mais do que cinco parâmetros independentes, já levando-se em conta que, no caso de retro análises não lineares, uma só bacia é insuficiente, devendo-se dispor de pelo menos duas, referentes a níveis de carga distintos.

3.4 Modelos de previsão de desempenho

Na elaboração de projetos, os modelos mais adequados são os determinísticos do tipo mecanístico-empírico, apropriados para a consideração de:

- Trincamento por fadiga das camadas asfálticas e cimentadas;
- Acúmulo de deformações permanentes nos solos, materiais granulares e camadas asfálticas.

Em termos de proteção contra fadiga dos revestimentos asfálticos, os modelos a seremaplicados deveriam ser capazes de identificar duas fases no processo de trincamento:

- O início do trincamento. quando o revestimento se encontra íntegro. Ao final destafase. surgem as primeiras trincas de fadiga na superfície;
- A propagação das trincas do revestimento, quando as trincas, originalmente isoladas.aumentam de comprimento e se interligam.

3.4.1 Cálculo de Tensões e Deformações

Uma série de modelos e programas de computador estão disponíveis para se calcular as tensões e deformações provocadas pelas cargas de roda em uma estrutura de pavimento. Os modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico estão calibrados para um determinado modelo estrutural, o qual compreende:

- um processo para cálculo de tensões e deformações; e
- uma forma de se considerar as propriedades elásticas dos materiais (módulos de resiliência, por exemplo).

Assim, esses modelos de previsão de desempenho são dependentes do modelo estrutural associado, não se podendo aplicá-los com outros modelos estruturais. Embora o aperfeiçoamento progressivo dos modelos estruturais seja importante para se elevar a confiabilidade dos modelos de previsão de desempenho mecanístico-empíricos, as maiores incertezas se encontram na calibração experimental dos modelos. Assim, antes

de se aplicar modelos deste tipo, é fundamental reavaliar-se os fatores de calibração utilizando-se os dados de desempenho locais ou regionais disponíveis.

4 OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS NO BRASIL

O método de dimensionamento mais divulgado e utilizado no Brasil, segundo Motta (2015), é o adotado pelo órgão rodoviário nacional, o DNER hoje DNIT, desde 1966, tendo sofrido uma pequena revisão em 1981. É um método empírico fundamentado em experiências realizadas pela *United States Army Corps of Engineers* (USACE) e em conclusões do programa AASHTO *Road Test* realizado nos Estados Unidos da América (EUA). Através da aplicação do método determina-se as espessuras das camadas constituintes do pavimento, a partir do suporte - CBR do subleito, dos materiais a serem na construção das camadas e do tráfego estimado para o período de projeto.
No Manual de Pavimentação (DNIT, (2006), passou-se a recomendar a incorporação de análise estrutural e do desempenho de pavimentos como complementos do método empírico ainda em uso. Na análise de desempenho quanto à fadiga o referido manual recomenda o uso de modelos de previsão que considerem os trincamentos ocorridos antes e após o processo de propagação de trincas. Quanto à análise estrutural, não é feita nenhuma recomendação, mas deixa claro que deverá ser feita.

Posteriormente surgiu o método proposto por Motta (1991) que contém uma metodologia mecanística para o dimensionamento de pavimentos asfálticos. Nesse método a autora apresenta um catálogo com 16 estruturas de pavimentos acompanhado de cálculos das tensões e deformações ocorridas nelas. Na sequência, uma outra metodologia mecanística-empírica foi apresentada em uma plataforma computacional, divulgada por Franco (2007), o então denominado Método SisPav. A partir desse método amplas modificações foram realizadas para a formulação do novo método de dimensionamento nacional, o MeDiNa, objeto deste trabalho de conclusão de curso.

O MeDiNa é um programa computacional que realiza a verificação do dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, por meio da rotina AEMC de análise de camadas de múltiplas camadas. O programa foi desenvolvido pelo Termo de Execução

Descentralizado TED 682/2014 celebrado entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro – COPPERJ. O novo método de pavimentação asfáltica foi denominado de MeDiNa em homenagem ao engenheiro Jacques de Medina, que introduziu a mecânica dos pavimentos no Brasil. Trata-se de uma atualização da técnica utilizada no Brasil, ainda da década de 1960, e inclui tecnologias já adotadas em outros países.

O software foi desenvolvido em Visual C++, que permite uma agilidade no processo de cálculos matemáticos. O MeDiNa reúne em poucas telas a entrada de dados, com campos facilmente editáveis e a apresentação dos resultados em relatórios. O programa e seu manual de utilização podem ser baixados gratuitamente por qualquer usuário. (https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr).

Integram as diretrizes para elaboração de estudos e projetos rodoviários, a Instrução de Serviço IS-247 - MeDiNa e a Publicação IPR-726 - Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários - escopos básicos e instruções de serviço. Com a implementação do método MeDiNa, as atualizações refletiriam em extenso cronograma, o que afetaria a publicação imediata do referido método na Autarquia/DNIT. Assim, a IS-247 foi publicada de forma independente, devendo ser incorporada à publicação IPR-726 na próxima revisão/atualização.

5 APLICAÇÃO DO MeDiNa em UM TRECHO HIPOTÉTICO

O método MeDiNa é um software que faz a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico.” O programa é fruto do Termo de Execução Descentralizada celebrado de 2015 a 2018 entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e o Instituto de Pesquisas Rodoviárias de Pós Graduação e Pesquisa de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Permitindo uma notável agilidade no processamento de cálculos matemáticos, o programa MeDiNa reúne em poucas telas a entrada de dados e a apresentação dos resultados em relatórios.

De acordo com os ensaios realizados em laboratórios, obtém-se uma variável existente e anteriormente passam pelo subleito para a definição do seu modulo, curva e deformação. Uma informação fundamental para garantir que o uso do programa obtenha bons resultados é a definição equivalente dos eixos. Vale ressaltar que os resultados do MeDiNa são confiáveis por isso temos que evitar a inferição ou escolher materiais de acordo com pesquisas. Para um projeto de excelência é importante os ensaios e as informações assertivas do trafego.

De acordo com o IPR, as hipóteses fundamentais da solução têm como base as considerações da elasticidade linear, que são:

- Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- A lei de Hooke é uma referência pois o modulo de compressão e semelhante ao modulo de tração;
- Na horizontal as camadas são ilimitadas;
- Todas as camadas são de espessura finita exceto a camada inferior que é considerada semi-infinita;
- A camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- Na área carregada ocorre apenas tensões normais;
- Nas grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- A aderência na interface das camadas varia de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

O software MeDiNa é disponibilizado gratuitamente na página do IPR, juntamente com o respectivo Manual de Utilização. O menu principal do software oferece as seguintes opções: Projeto; Editar; Análise e Ajuda, que são descritas objetivamente a seguir:

- **Projeto**

Nessa aba do aplicativo oferece funções de dados, que são: **Pavimento**, onde cria-se um projeto com os dados iniciais; e **Reforço,** que permite a criação de um projeto neste modo de duas formas: A partir de dados iniciais na opção Dados Novos ou a partir da bacia deflectométrica do BackMeDiNa peça opção Importar Retroanálise.

Abrir - abre um projeto salvo no disco.

Salvar – salva os dados do projeto.

Salvar como – salva dados do projeto em um arquivo, mas com outro nome.

Sair- finaliza o programa.

- **Menu Editar**

Permite navegar entre as abas de Estrutura e Modelagem do programa.

- **Menu Análise**

Nesta aba nos dá a opção de dimensionar a estrutura, realizado o dimensionamento ou realizada a análise estrutural, o aplicativo gera os resultados.

6 ANÁLISE DA APLICABILIDADE DO MeDiNa

A seguir é apresentada uma simulação de dimensionamento da estrutura de um pavimento através da utilização do *software* MeDiNa. São mostradas as telas disponibilizadas no processamento e um breve comentário sobre cada uma. A Figura 1 a seguir é um *print* da tela inicial, que apresenta as opções de camadas a serem utilizadas na estrutura do pavimento.

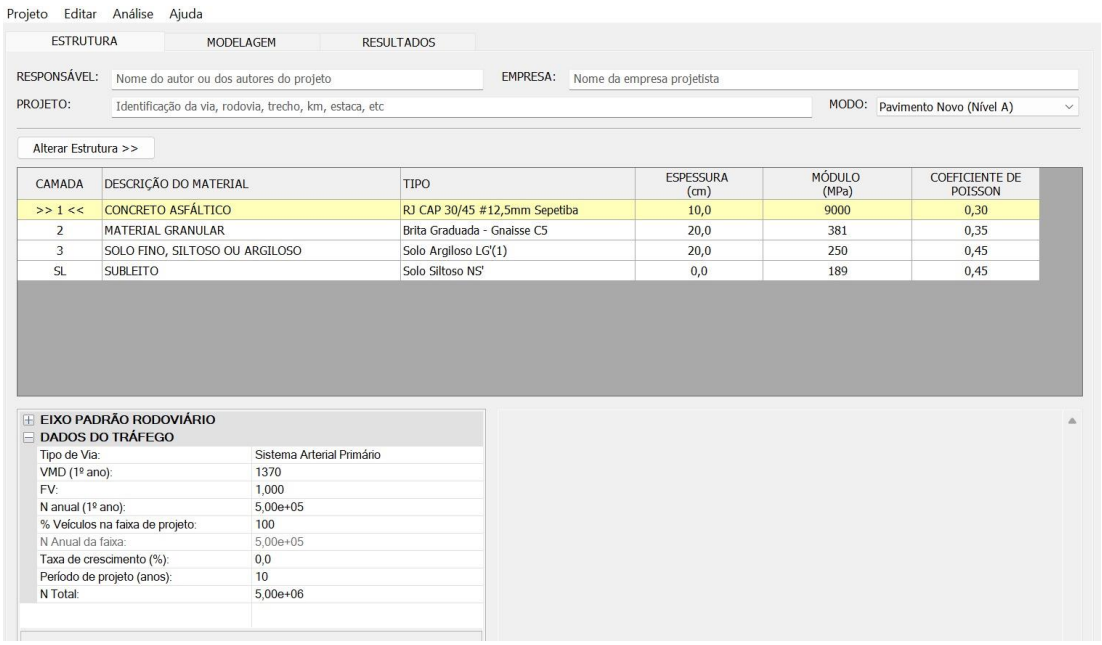


Figura 1 – A página inicial do *software MeDiNa*.

Acima é mostrada a tela ou página inicial do aplicativo de dimensionamento. A Figura 2 a seguir mostra a tela que apresenta as características tecnológicas dos materiais empregados nas camadas da estrutura do pavimento.

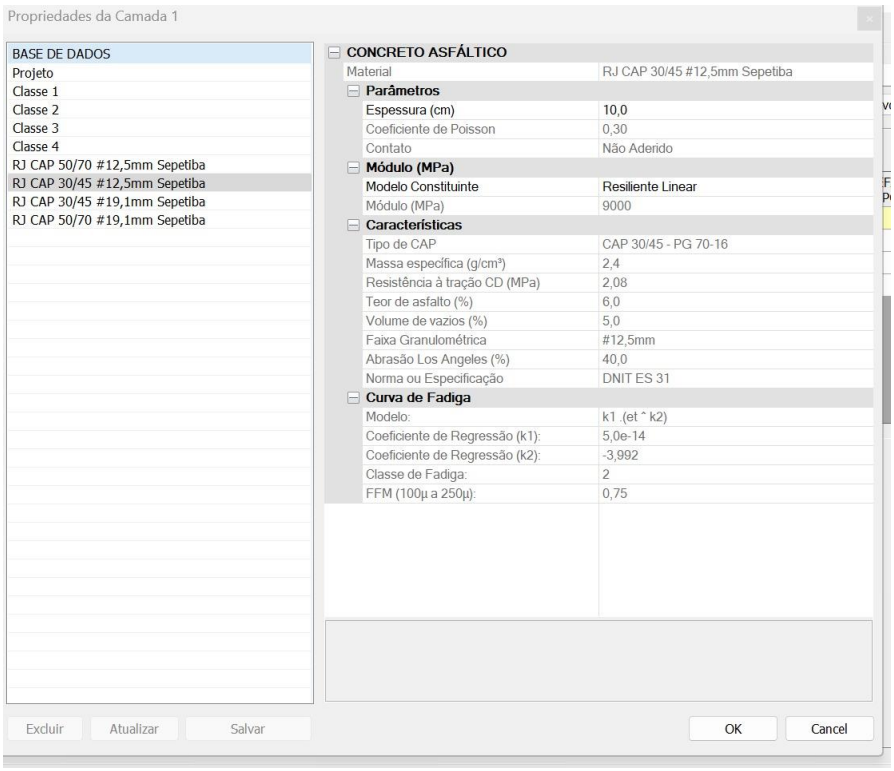


Figura 2 – Propriedades das camadas.

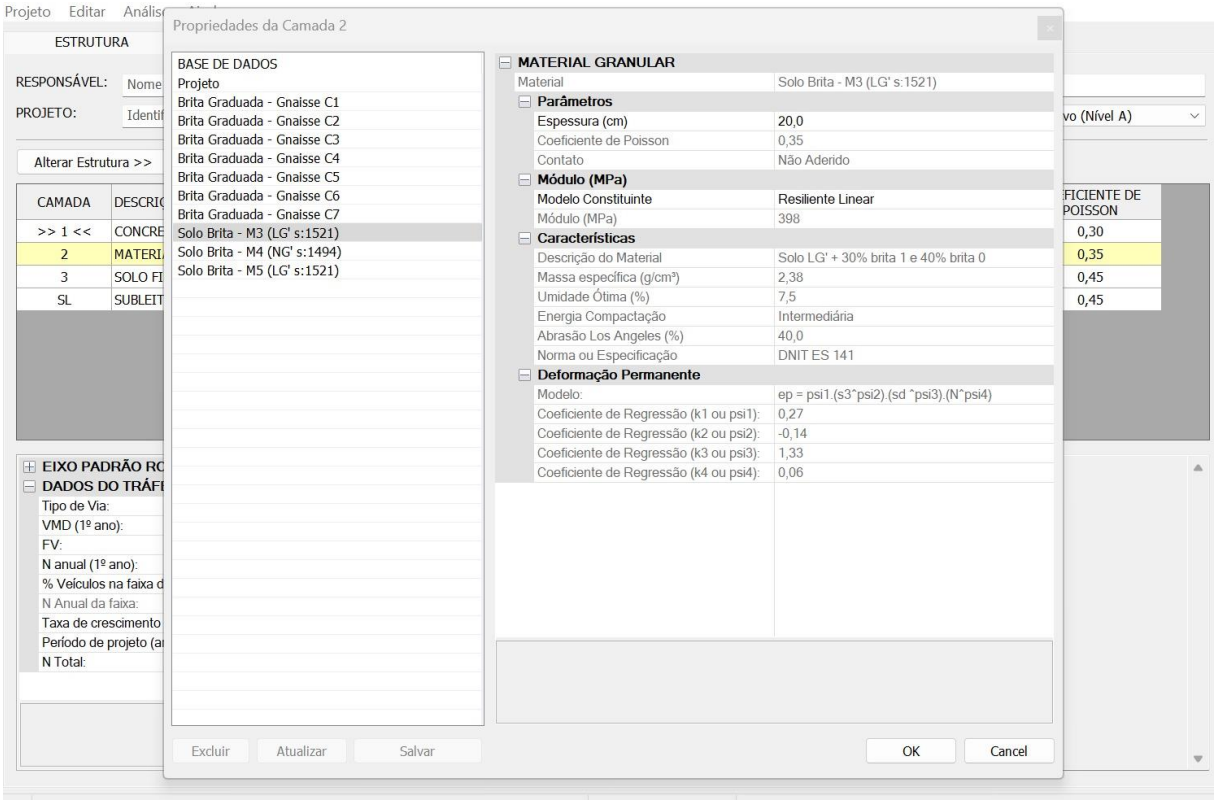


Figura 3 – Tela para a definição do material de cada camada

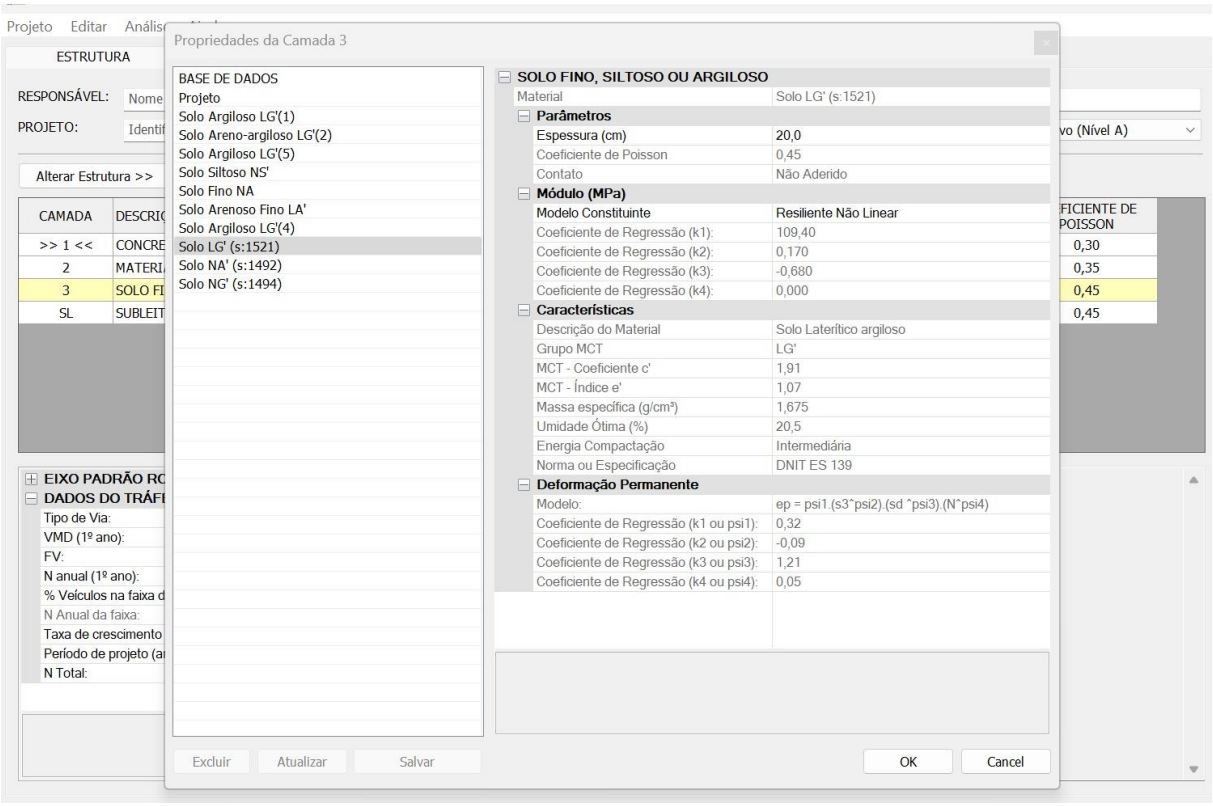


Figura 4 – Tela para a definição do material da camada 3.

Clicando-se 2 vezes na camada 1 pode-se escolher a classe da via. O aplicativo disponibiliza exemplos para que se adquira familiaridade com o programa. Porém, para aplicação com dados reais do campo, torna-se necessário a realização dos ensaios de laboratório, para se definir dados confiáveis para alimentação do *software*. Escolhendo-se a Classe na aba apresentada, no caso a classe 3, segue-se para a seleção do tipo de base e na sequência para a definição do material da camada 2, no caso Solo Brita- M3 . As telas para a seleção do material das camadas são mostradas nas Figuras 3 e 4 apresentadas na página anterior.

Na tela da Figura 4 selecionou-se, para a camada 3, um solo argiloso de comportamento laterítico, LG'(s:1521), por exemplo. A tela da Figura 5 abaixo mostra a escolha das características do subleito.

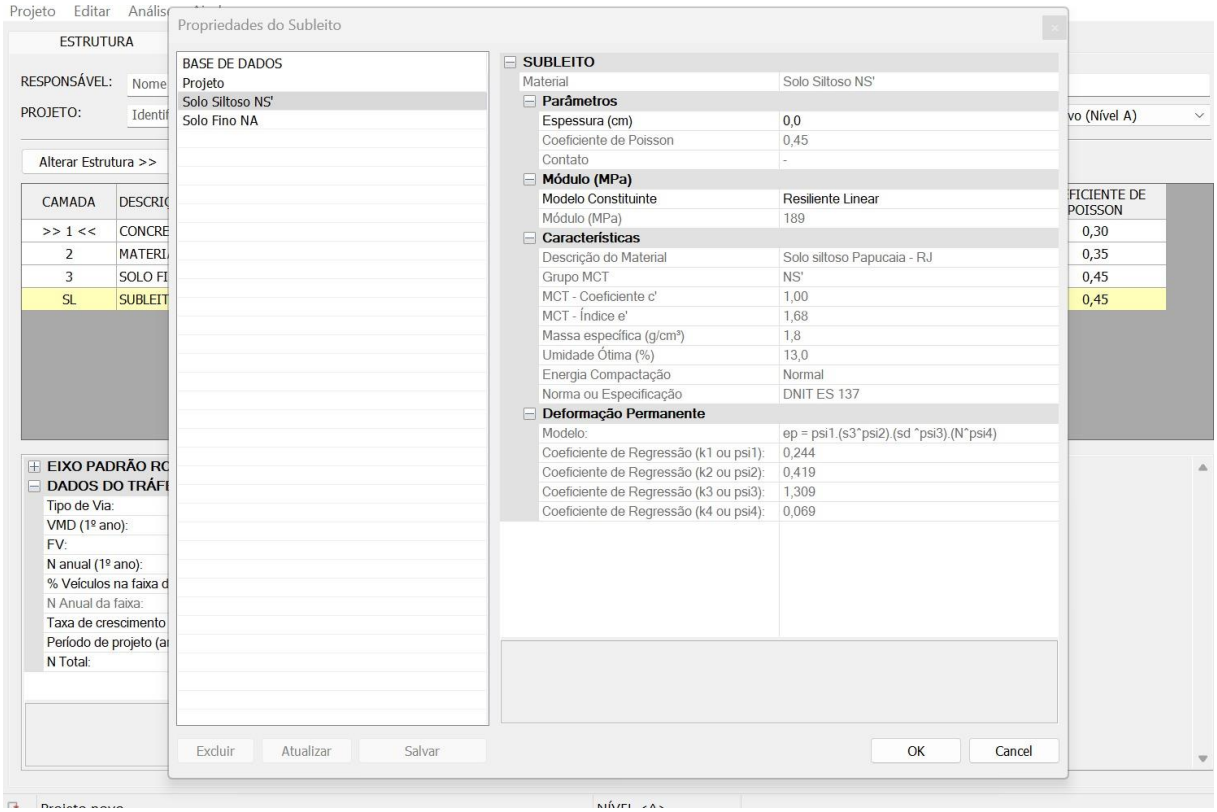


Figura 5 – Informações sobre as características do subleito.

Informando que o subleito é um Solo Siltoso de comportamento não laterítico, NS', o software apresenta a tela da Figura 6 a seguir:

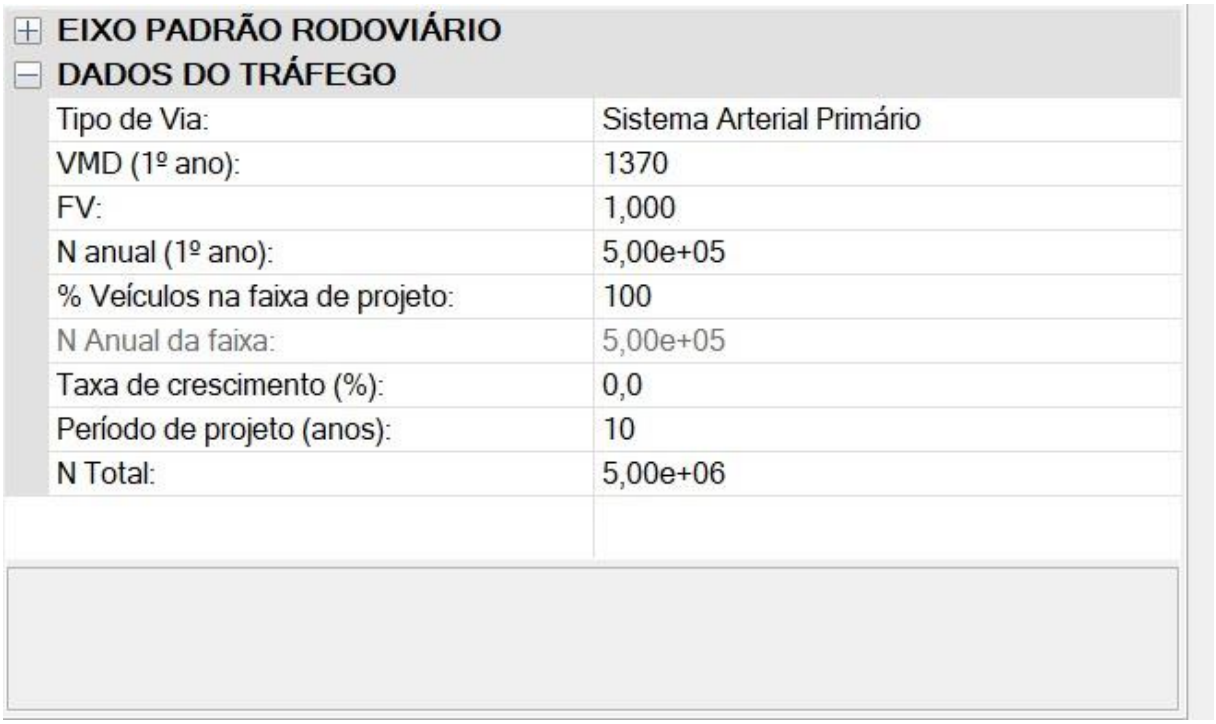


Figura 6 – As características operacionais do tráfego.

No processamento do programa, pede-se para que os dados sejam preenchidos de acordo com a classificação funcional da via em estudo, no caso uma via do sistema arterial primário. A tela da Figura 7 apresenta os resultados obtidos após o processamento.

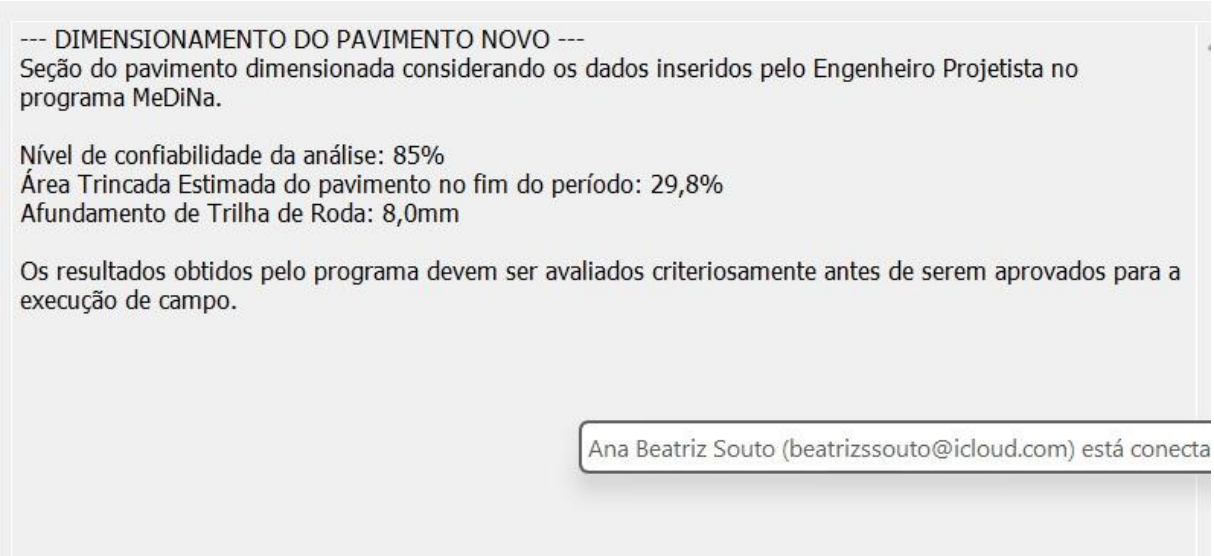


Figura 7 – Os resultados obtidos.

Os resultados obtidos para o pavimento em questão, apresentou uma confiabilidade da ordem de 85%. Também os resultados demonstram que a previsão de afundamento de trilha de roda está em níveis aceitáveis, ou seja, da ordem de 8 milímetros e que a área de trincas previstas ao final da vida útil do pavimento será de 29,8%, inferior ao resultado satisfatório, que é cerca de 30% pelas recomendações do MeDiNa. A Figura 8 mostra a tela final do processamento que apresenta o relatório final do dimensionamento.

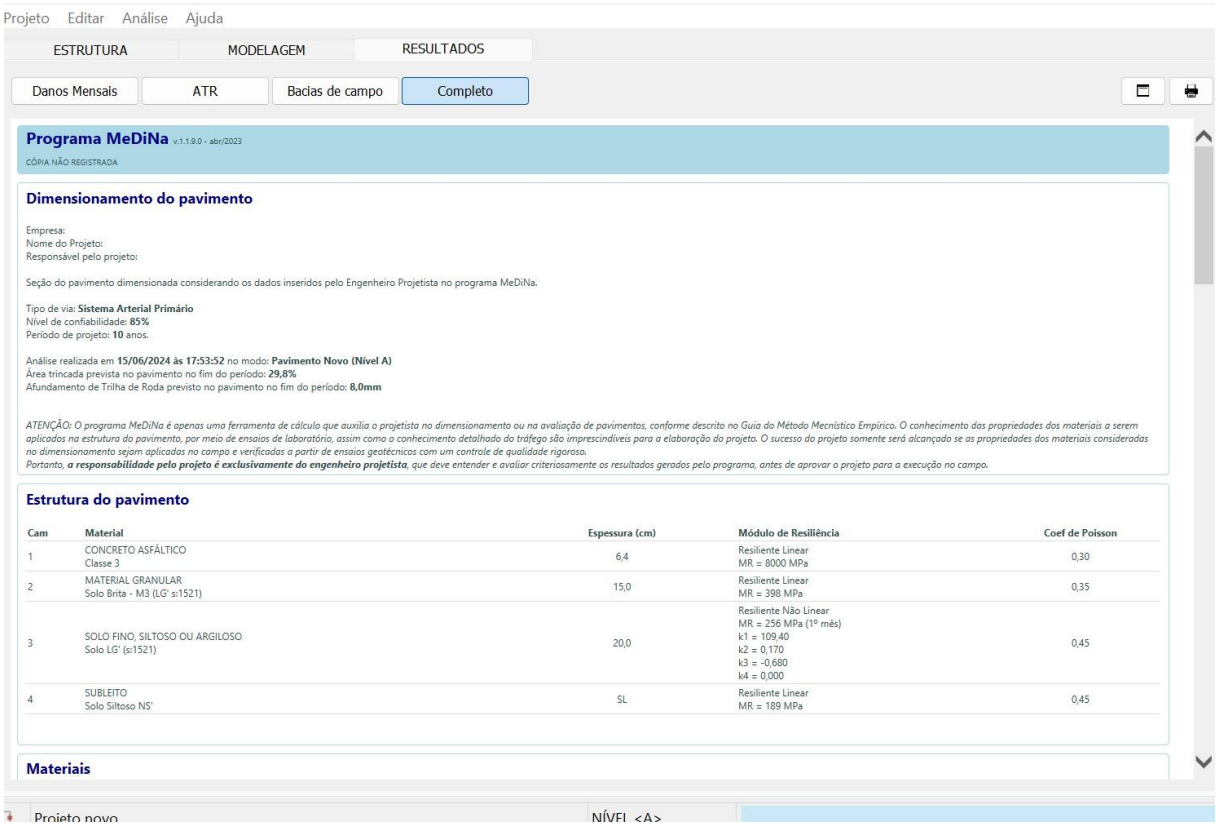


Figura 8 – A tela final do processamento.

Pelas observações realizadas e processamento do software proposto, percebe-se que o aplicativo é de fácil aplicabilidade e tem também apresenta notável versatilidade, haja vista que pode-se fazer diversas tentativas de soluções para que os resultados sejam otimizados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Neste trabalho o objetivo principal foi analisar a aplicabilidade e divulgar no meio acadêmico o inovador Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, o denominado MeDiNa, proposto pelo órgão nacional rodoviário, o DNIT, para utilização no dimensionamento do pavimento de rodovias brasileiras, em substituição do método atual que foi adotado há quase 6 décadas. O método proposto está timidamente sendo aplicado no meio técnico brasileiro, por depender da utilização de *software* e da realização de complexos ensaios de laboratório, como o para determinação do módulo de resiliência dos materiais. Aplicações do software tem demonstrado eficácia na solução de pavimentos que poderão resultar na possibilidade de se prever o início da propagação de

trincas na superfície do revestimento, devido tensões de tração na face inferior da base, e também de deformações permanentes ou afundamento de trilhas de roda, que poderão reduzir a vida útil do pavimento, através da ruptura por fadiga de sua estrutura. No método ainda em prática, denominado Método DNIT, não existe a possibilidade de se analisar as tensões e deformações produzidas no pavimento pela operação do tráfego, por ter sido desenvolvido com fundamento em observações empíricas. Assim, o MeDinA, por ser um método, além de ter certo empirismo, mas também mecanístico, supre essa deficiência que tem provocado o alcance da vida útil do pavimento prematuramente.

Por fim, sugere-se aqui que o MediNa seja objeto de pesquisas, aplicações práticas e seminários no meio acadêmico e técnico, para que os profissionais se familiarizem com a nova metodologia e que os resultados obtidos pela sua aplicação sejam amplamente analisados, para que os profissionais da engenharia possam adquirir confiança na aplicabilidade do método, e para que, por fim, o MeDiNa possa ser de fato adotado nos estudos de mecânica dos pavimentos de rodovias e na definição de sua estrutura.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENEVIDES, S. A. S. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos**: empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do estado do Ceará. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

BEZERRA NETO, R. S.. **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**). EESC-USP. São Carlos, 2004.

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

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. 2011.

FERNANDES, W. D. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da AASHTO**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (RS). 2016.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos -SISPAV**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

LEMOS, J. R.; SANTOS, A. A. **Desenvolvimento de ferramenta computacional para dimensionamento de pavimentos pelos métodos do DNER e da resiliência**. Trabalho de Conclusão de Curso. UNESC. Criciúma -SC. 2013.

MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J. **Investigação e desenvolvimento em mecânica dos pavimentos na COPPE – Brasil**. Rio de Janeiro, 2006.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis**; critério de confiabilidade e ensaio de cargas repetidas. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, (1991).

PREUSSLER, E. S. **Ensaios triaxiais dinâmicos de um solo arenoso**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1978.

SANTIAGO, L. S.; SOARES, J. B. Contribuições ao desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil. UFC, Fortaleza, 2015.

SVENSON, M. **Ensaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1980.

SVENSON, M. **Ensaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1980.

COUTINHO, J. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: Comparação do método do DNER com um método mecanístico** – **Empírico Aplicada a um trecho**. Dissertação de Mestrado. UFOP/Ouro Preto 2011.

FRANCO. F.A.C.P; Motta.L.M.G. **Guia para utilização de Método Mecanistico-Empírico Apresentação dos Programas Desenvolvidos.** COOPE/UFRJ.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
GABINETE DO REITOR

Av. Universitária, 1069 ● Setor Universitário
Caixa Postal 86 ● CEP 74605-010
Goiânia ● Goiás ● Brasil
Fone: (62) 3946.1000
www.pucgoias.edu.br ● reitoria@pucgoias.edu.br

RESOLUÇÃO n° 038/2020 – CEPE

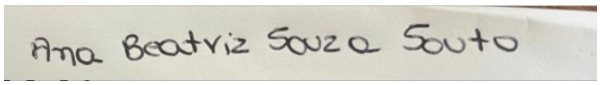
ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

A estudante **ANA BEATRIZ SOUZA SOUTO** do Curso de Engenharia Civil, matrícula 2016.1.0025.1047-0, telefone: (62) 99800-1480 e-mail ssoutoengenharia@hotmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "**INOVAÇÕES NA METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE RODOVIAS: O MÉTODO MeDiNa"**, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 27 de junho de 2024.



Assinatura do autor:_____

Nome completo do autor: ANA BEATRIZ SOUZA SOUTO

Assinatura do professor–orientador:

Nome completo do professor-orientador: **BENJAMIM JORGE RODRIGUES DOS SANTOS**