

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TÚLIO CANCIAN

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO EMPÍRICO DO
DNER DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS E DO NOVO
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL DE PAVIMENTOS -
MEDINA**

TÚLIO CANCIAN

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO EMPÍRICO DO
DNER DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS E DO NOVO
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL DE PAVIMENTOS –
MEDINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro Universitário Unifacvest como parte
dos requisitos para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Aldori Batista dos
Anjos

**LAGES
2020**

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÚLIO CANCIAN

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO EMPÍRICO DO DNER DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS E DO NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL DE PAVIMENTOS – MEDINA

Trabalho de Conclusão de Curso foi submetido à Banca Examinadora em ___/___/___, atendendo os critérios e legislação vigente do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário UNIFACVEST, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Banca Examinadora

Nome do Membro da Banca Examinadora, Titulação

Nome do Membro da Banca Examinadora, Titulação

Nome do Membro da Banca Examinadora, Titulação

AGRADECIMENTOS

Devo mostrar primeiramente gratidão plena a Deus pelo apoio fiel durante todo o processo, tendo-o como amigo leal para todas as horas de desespero, uma base absolutamente rígida.

Aos meus pais, Mario e Cleunice, pelo apoio e incentivo. Estes caminharam junto comigo durante toda minha trajetória, e estiveram sempre me fortalecendo e incentivando, sem eles nada disso seria possível.

E por fim, aos amigos e colegas da faculdade, que de certa forma participaram desse projeto, deixaram esse período mais agradável e gratificante.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO EMPÍRICO DO DNER DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS E DO NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL DE PAVIMENTOS – MEDINA

Túlio Cancian¹

Aldori Batista dos Anjos²

RESUMO

A consecução do presente trabalho demandará, inicialmente, a coleta de dados e informações através de revisões bibliográficas: busca minuciosa de periódicos acadêmicos, revistas, jornais, artigos disponíveis na internet e legislações. Visando reunir subsídios e analisar o dimensionamento de pavimentos pelo método do DNER e pelo novo Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos – MeDiNa. O trabalho estuda principalmente o Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos, que é uma nova proposta mecanística empírica de cálculos de pavimentos asfálticos que visa substituir o atual método empírico. Inicialmente são apresentados os processos para o correto dimensionamento pelo método empírico atualmente utilizado. Posteriormente, é realizada uma abordagem detalhada do MeDiNa tratando dos conceitos fundamentais que governam sua metodologia mecanística empírica. Por fim, os dois métodos são comparados, e através da conclusão é distinguido o método que proporciona maior sucesso.

Palavras-chaves: Pavimentação; Dimensionamento; DNER; MeDiNa.

¹Graduação em Engenharia Civil (em curso), pelo Centro Universitário UNIFACVEST. E-mail: tulio.frare@gmail.com

²Professor, no Centro Universitário UNIFACVEST. E-mail: prof.aldori.anjos@unifacvest.edu.br

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE DNER EMPIRICAL METHOD OF FLOOR SIZING AND THE NEW NATIONAL FLOOR SIZING METHOD - MEDINA

Túlio Cancian¹

Aldori Batista dos Anjos²

ABSTRACT

The accomplishment of the present work had initially demanded the collection of data and information through bibliographic reviews: thorough search of academic journals, magazines, newspapers, articles available on the internet, legislation. Aiming to gather subsidies and analyze the design of pavements using the DNER method and the new National Pavement Design Method – MeDiNa. The work mainly studies the National Pavement Sizing Method, which is a new empirical mechanistic proposal for calculating asphalt pavements that aims to replace the current empirical method. Initially, the processes for correct sizing are presented using the empirical method currently used. Subsequently, a detailed approach to the MeDiNa dealing with the fundamental concepts that govern its empirical mechanistic methodology. Finally, the two methods are compared, and through the conclusion the most successful method is distinguished.

Keywords: Paving; Sizing; DNER; MeDiNa.

¹Graduação em Engenharia Civil (em curso), pelo Centro Universitário UNIFACVEST. E-mail: tulio.frare@gmail.com

²Professor, no Centro Universitário UNIFACVEST. E-mail: prof.aldori.anjos@unifacvest.edu.br

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção típica pavimento flexível.	16
Figura 2 – distribuição de tensões pavimento flexível.	17
Figura 3 – Curvas de fatores de equivalência de operação.....	24
Figura 4 – esquemas das camadas para dimensionamento DNER.....	27
Figura 5 – Ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no Método DNER.	29
Figura 6 – Programa MeDiNa (tela inicial).....	32
Figura 7 – Programa MeDiNa (tela inicial).....	33
Figura 8 – Fluxograma do método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos.	35
Figura 9 – Esquema de modelagem da teoria da elasticidade no interior do pavimento asfáltico.	36
Figura 10 – Interface AEMC.....	37
Figura 11 – Eixo padrão rodoviário assumido no software MeDiNa.....	39
Figura 12 – Aparelhagem para determinação do MR dos Solos.....	45
Figura 13 – Pavimento com dano por ruptura estrutural.....	47
Figura 14 – Pavimento com dano por ruptura funcional.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores da relação entre o índice de grupo e o índice de suporte.....	21
Tabela 2 – Faixas granulométricas para material de base.	23
Tabela 3 – coeficiente de equivalência estrutural.....	28
Tabela 4 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.	30
Tabela 5 – Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa.	39
Tabela 6 – estimativa de MR para diversos materiais.	42
Tabela 7 – Valores típicos de coeficiente de Poisson.....	43
Tabela 8 – Parâmetros do Modelo de Previsão da Deformação Permanente.....	52
Tabela 9 – Estrutura do pavimento pelo método DNER.....	54
Tabela 10 – Estrutura do pavimento pelo método MeDiNa.....	55
Tabela 11 – Otimização da estrutura com o MeDiNa.	55
Tabela 12 – Redução das camadas de solos.	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	PAVIMENTO	15
2.1.1	Comportamento estrutural.....	16
2.2	MÉTODO EMPÍRICO DO DNIT	19
2.2.1	Capacidade de suporte.....	20
2.2.2	Classificação dos materiais granulares empregados no pavimento.....	22
2.2.3	Determinação do trafego	23
2.2.4	Fator climático regional.....	26
2.2.5	Dimensionamento.....	26
2.3	MeDiNa- MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL MECANÍSTICO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	30
2.3.1	Software MeDiNa.....	31
2.3.2	Metodologia Mecanística Empírico	34
2.3.3	Comportamento estrutural dos pavimentos asfálticos.....	36
2.3.4	Carregamento da estrutura.....	38
2.3.5	Tipos de vias.....	39
2.3.6	Propriedades dos materiais de pavimentação.....	40
2.3.7	Materiais de solo	43
2.3.8	Modelo de desempenho dos pavimentos asfálticos.....	46
3	AValiação DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS PELO MEDINA	54
➤	RODOVIA AL-145.....	54

4	CONCLUSÃO.....	57
5	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

Com o constante crescimento e desenvolvimento tecnológico é comum o surgimento de novas técnicas de construção no campo da Engenharia. Técnicas que permitem uma maior produtividade com um menor custo e que promovem segurança às pessoas que desfrutam de tal serviço. Além disso, a tecnologia pode ser utilizada nesse campo para a preservação do meio ambiente, até porque o setor da construção civil é pouco sustentável até o momento.

O desenvolvimento do transporte rodoviário no país é contínuo, a todo momento surgem ideias que melhoram e evoluem as técnicas de trabalho já existentes nesse campo, como novos métodos de dimensionamentos de pavimentos. No passado não utilizavam métodos de dimensionamento, era empregado a mesma espessura de pavimento sobre qualquer solo. Desse modo, alguns trechos apresentavam bons comportamentos, em contrapartida outros apresentavam rupturas. Com base nisso, surgiu um método de dimensionamento de pavimentos, com a ideia de fornecer espessura de pavimento compatível com o comportamento do solo. A partir daí, começaram a utilizar métodos de dimensionamento de pavimentos no mundo inteiro, desenvolvimento pelo órgão responsável no país ou adaptações de outros já existentes.

Os métodos de dimensionamento foram concebidos de duas maneiras distintas, métodos empíricos e métodos mecanísticos: sendo o primeiro através de experiências de campo, com base na observação do desempenho de pavimentos ao longo do tempo, e o segundo a partir da aplicação de uma teoria elástica das multicamadas, considerada adequada para a interpretação do comportamento mecânico do conjunto pavimento/subleito (SILVEIRA, 2004).

O método empírico do DNER é predominante para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Esse método foi desenvolvido pelo corpo de engenheiros do exército dos estados unidos, com a inclusão de alguns resultados da pista experimental da AASHO, foi adaptado pelo engenheiro Murillo Lopes de Sousa, em 1966 para sua inclusão no Brasil.

O método do DNER baseia-se fundamentalmente nas características de suporte do solo de fundação e dos materiais que constituem a estrutura do pavimento, bem como nos parâmetros de tráfego. Atende à limitação de deformações permanentes excessivas e de tensões que possam provocar ruptura por cisalhamento dos solos de base, sub-base e subleito. Contudo,

a limitação das deformações recuperáveis ou resilientes, cuja repetição sob ação do tráfego provoca a ruptura por fadiga dos revestimentos asfálticos, não é considerada (PINTO, 1991). Esse método só poderia ser aplicado adequadamente nos locais com condições climáticas semelhantes ao ambiente onde o método foi desenvolvido.

Com a finalidade de se prever o comportamento dos pavimentos e buscar uma alternativa mais eficaz para as rodovias brasileiras, a divisão de pesquisa do departamento nacional de infraestrutura e transportes – DNIT, o instituto de pesquisas rodoviárias (IPR), elaborou um método mecanísticos–empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos (MeDiNa). Esse método mecanísticos–empírico, possibilita um dimensionamento a partir de previsão da vida útil dos materiais empregados, ao analisar o conjunto dos materiais constituintes e considerar um conjunto de variáveis, tais como as características elásticas de cada material (FRANCO, 2000; FONSECA, 2013).

O novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa busca um aumento na vida útil dos pavimentos pelas intervenções de reforço, garantindo condições de segurança e conforto aos seus usuários. Isso o torna mais eficiente comparado ao método de dimensionamento empírico do DNIT.

1.1 JUSTIFICATIVA

A qualidade dos pavimentos se configura como um dos principais entraves para o desenvolvimento econômico do Brasil, visto que este é um país de modal primordialmente rodoviário onde, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), 60% das cargas que circulam internamente e 90% dos passageiros utilizam transporte rodoviário. As más condições das rodovias do país aumentam significativamente o custo operacional do transporte de cargas e mercadorias, ao passo que danifica veículos e reduz a velocidade de transporte, além de comprometer a segurança e conforto para os usuários.

A vigésima terceira pesquisa da CNT de rodovias relata que a qualidade das rodovias brasileiras piorou em relação ao ano anterior. Foram avaliados 108.863 quilômetros de rodovias, e apresentaram problema em 59% da extensão dos trechos avaliados. Especificamente o pavimento da rodovia representa 52,4% com problemas, ou seja, mais de 57 mil quilômetros. Segundo a CNT, as más condições das rodovias impactam diretamente nos custos do transporte, estima-se um aumento em 28,5%. Com o transporte mais caro o produto

chega em seu ponto final com um valor de mercado mais alto, e isso afeta diretamente o consumidor.

Atualmente no país as empresas de pavimentação, mais especificamente o DNER, trabalham com método de dimensionamento de pavimentos empíricos. Uma resposta para as más condições das rodovias pode ser o método de dimensionamento, uma vez que, pavimentos dimensionados para durar 10 anos com 6 meses já apresentam deformações.

O método desenvolvido pelo engenheiro Murilo Lopes na década de 50 até hoje permanece como um método usual e muito importante no dimensionamento de pavimentos. No entanto, com o passar dos anos as cargas sobre as rodovias mudaram, e o transporte trouxe consigo maiores cargas. Hoje em dia essas cargas com eixos extremamente pesados transitam por rodovias dimensionadas a um tempo atrás onde não havia auxílio de ferramentas computacionais, tais ferramentas que proporcionam mais qualidade e segurança para os estudos do campo da engenharia.

Com o auxílio da tecnologia, e buscando tornar os pavimentos mais resistentes e seguros, foram desenvolvidos métodos mecanísticos-empírico de dimensionamento de pavimentos. O novo método de dimensionamento nacional de pavimentos- MeDiNa, se configura como um método mecanísticos-empírico, e estima-se que realizando o dimensionamento de maneira correta, é possível obter resultados superiores a metodologia CBR.

Com base nessas informações o presente trabalho apresenta dois dos principais métodos de dimensionamento de pavimentação asfáltica utilizados no Brasil, buscando detalhar cada método e apontar o mais adequado para o sistema de pavimentação atualmente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho propõe uma análise comparativa e a reunião de subsídios teóricos necessários à avaliação do dimensionamento de pavimentos flexíveis através do método empírico do DNER e o método mecanístico-empírico MeDiNa (novo método de dimensionamento nacional de pavimentos), bem como a comparação entre os métodos de

dimensionamento mais utilizados no Brasil, IPR. Publ., 714, fornecidos pelo DNIT, e um método avaliativo através de sua aplicação em um estudo de caso em uma rodovia.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

a) Reunião de subsídios teóricos e informações importantes relacionadas ao sucesso do dimensionamento através dos métodos empíricos do DNER, e do novo método de dimensionamento nacional de pavimentos;

b) Comparação econômica, social e cultural entre os investimentos realizados para cada alternativa de pavimentação utilizando como base os catálogos do DNIT e demais revistas de pesquisas;

c) Descrever o dimensionamento de pavimentos pelo método do DNER, e pelo novo método nacional.

d) apresentar o software MeDiNa de dimensionamento de pavimentos asfálticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTO

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

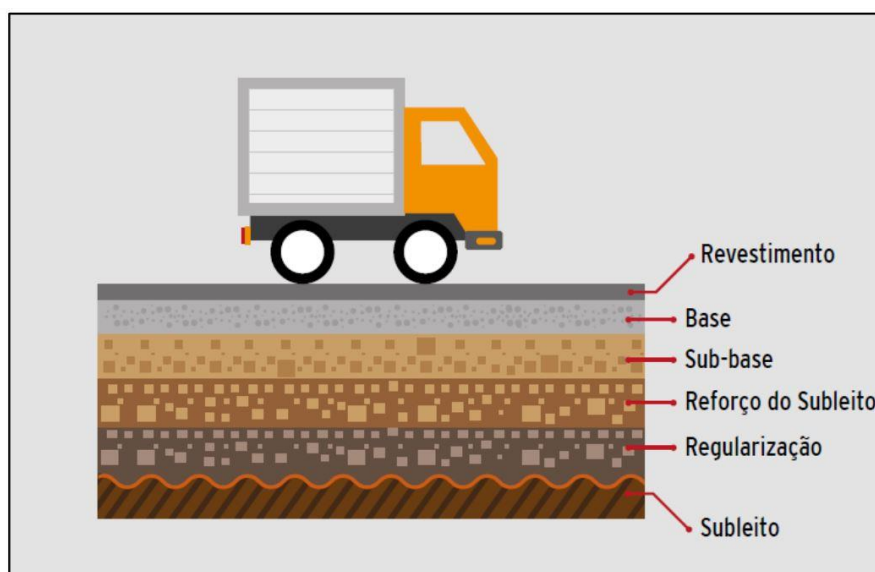
Seu trabalho estrutural se dá em receber e transmitir esforços de modo a atenuar as pressões às camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes. Para que a estrutura trabalhe satisfatoriamente todos os elementos constituintes precisam ser solicitados dentro de suas capacidades. Isso impede que haja deformações ou mesmo rupturas incompatíveis que levem o pavimento à ruína prematura (BALBO, 2007).

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de *binder*, embora essa designação possa levar a uma certa confusão, uma vez que esse termo é utilizado na língua inglesa para designar o ligante asfáltico. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros.

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizando o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança).

A figura (1) representa um esquema de seção de um pavimento flexível composta por subleito, reforço de subleito, sub-base, base e revestimento.

Figura 1 – Seção típica pavimento flexível



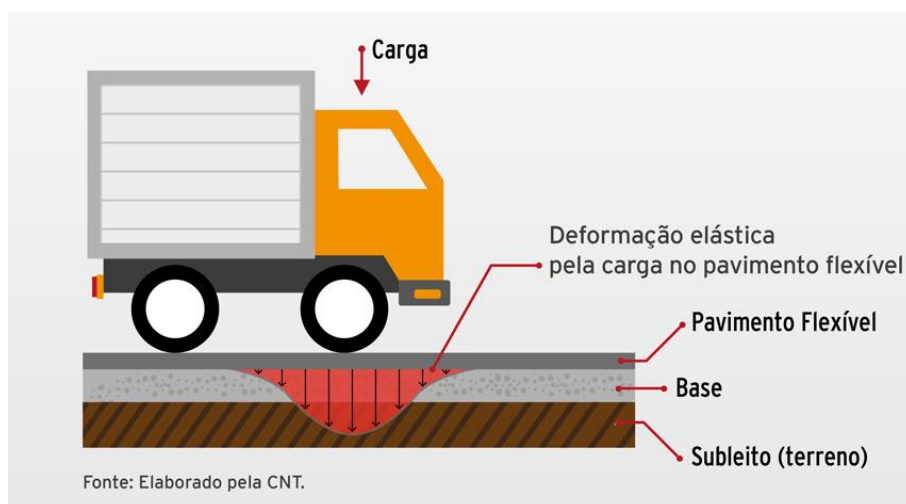
Fonte: CNT (2016).

2.1.1 Comportamento estrutural

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizando o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança). As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas ao trincamento por fadiga dessa camada. Ela ainda pode apresentar trincamento por envelhecimento do ligante asfáltico, ação climática etc. Parte de problemas relacionados à deformação permanente e outros defeitos pode ser atribuída ao revestimento asfáltico. Nos pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural. Limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento, por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes, é o objetivo da mecânica dos pavimentos (Medina, 1997).

A principal característica dos pavimentos flexíveis é a sua deformação elástica significativa. A carga decorrente do tráfego se distribui de forma aproximadamente equivalente entre as camadas, o que gera um campo de tensões concentrado nas proximidades do ponto de aplicação da carga e conseqüentemente baixa dissipação dos esforços. Por isso as camadas do pavimento são mais espessas a fim de proteger o subleito do pavimento (BALBO, 2007).

Figura 2 – Distribuição de tensões pavimento flexível



Fonte: CNT (2016).

Os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e de materiais asfálticos, podendo ser de duas maneiras principais, por penetração ou por mistura. Por penetração refere-se aos executados através de uma ou mais aplicações de material asfáltico e de idêntico número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas. No revestimento por mistura, o agregado é pré-envolvido com o material asfáltico, antes da compressão. Quando o pré-envolvimento é feito na usina denomina-se pré-misturado propriamente dito. Quando o pré-envolvimento é feito na pista denomina-se pré-misturado na pista.

Balbo (2007) estabelece as seguintes definições para as camadas do pavimento:

➤ Subleito

O subleito é o terreno natural de fundação em que é apoiado o pavimento. É responsável por absorver definitivamente os esforços verticais causados pelo tráfego, por isso precisa ser consolidado e compactado. O subleito precisa ser conhecido até a profundidade onde as cargas impostas pelo tráfego são significativas, normalmente no primeiro metro. Acima do subleito é encontrada a Regularização, ou seja, uma faixa de nivelamento do subleito, construída sobre ele com o objetivo de conformá-lo transversal e longitudinalmente. Não constitui uma camada do pavimento propriamente dita.

➤ Reforço de subleito

É uma camada de espessura transversalmente constante, que, quando se faz necessária, é construída acima do subleito regularizado. Sua espessura longitudinal é variável de acordo

com o dimensionamento do pavimento. É parte constituinte do pavimento e complementa a sub-base. Dessa forma, o reforço do subleito tem a função de resistir e distribuir esforços verticais provenientes da ação do tráfego.

Geralmente, é executado no caso de estruturas espessas, devido à fundação de baixa qualidade ou ao tráfego de cargas muito pesadas, ou, ainda, uma combinação desses fatores. Em qualquer caso, o material utilizado nessa camada deve atender a condições mínimas de qualidade, possuindo características técnicas superiores ao material do subleito e inferiores ao material que vier na camada superior.

➤ Sub-base

É a camada complementar à base executada por circunstâncias técnico-econômicas, quando a camada da base exigida for muito espessa. Exerce função de complemento da base, portanto tem a função de resistir e distribuir os esforços verticais provenientes da ação do tráfego. Além disso, quando necessário, tem a função de drenar infiltrações e controlar a ascensão capilar da água. O material empregado na constituição da sub-base deve ter características tecnológicas superiores às do material de reforço e inferiores às do material da base (camada superior). Podem ser constituídas por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concreto, entre outros.

➤ Base

É a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego. É sobre a base que é construído o revestimento. Alguns autores constatam que, na realidade, pode-se considerar que o pavimento é composto apenas de base e revestimento, sendo que, em alguns casos, a base poderá ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.

A capacidade estrutural da base está relacionada às propriedades de resistência e rigidez dos materiais empregados em sua constituição, que podem ser os mesmos listados para a sub-base, mas de melhor qualidade (características tecnológicas superiores). Entre as camadas do pavimento, em muitos casos, se faz necessária a execução da imprimação ou da pintura de ligação. Ambas consistem na aplicação de uma camada fina de material asfáltico sobre a superfície.

A imprimação (ou imprimadura) serve para aumentar a coesão da superfície, fixar as partículas eventualmente soltas e impermeabilizar a camada antes da execução da camada

superior. Geralmente é executada entre a base e a camada asfáltica a ser sobreposta (revestimento), podendo em alguns casos ser executada sobre a camada de sub-base.

A pintura de ligação (ou imprimadura ligante) tem a função de promover aderência entre as camadas. É executada sobre a superfície de uma camada asfáltica nova ou antiga, no caso de reforço ou recapeamento. Também pode ser executada sobre camadas não asfálticas impermeáveis. Os dois processos são muito semelhantes e se diferem mais em função das condições das camadas subjacentes do que dos materiais empregados nas pinturas. Além disso, no caso da imprimação, ocorre penetração do material na camada, enquanto na pintura de ligação, isso não ocorre.

➤ Revestimento

É a camada que recebe diretamente a ação do tráfego. Tem o objetivo de melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e à segurança e deve ter capacidade de resistir aos desgastes, a fim de aumentar a durabilidade do pavimento. Também deve ser, tanto quanto possível, impermeável.

O CBUQ é o mais nobre dos revestimentos flexíveis. É uma mistura de agregados feita em usina seguindo rigorosas especificações. A execução desse revestimento é o serviço que requer mais acurado controle dentre os que compõem as etapas de pavimentação. A aplicação do CBUQ é feita por uma vibroacabadora, máquina que promove o espalhamento da massa na espessura e largura desejada e executa parte do trabalho de compactação. Imediatamente após a distribuição da massa, inicia-se a operação de rolagem para compactação final da camada.

2.2 MÉTODO EMPÍRICO DO DNIT

Desde o fim da década de 50 até os dias de hoje os pavimentos asfálticos brasileiros têm sido dimensionados pelo método do DNER. Cujo método foi desenvolvido pelo Eng^o Murillo Lopes de Souza, baseado no método do CBR (Índice de Suporte Califórnia), que foi desenvolvido pelo corpo de engenheiros do Exército Americano (USACE), na versão apresentada por W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, tendo como trabalho “Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume”, e algumas conclusões como o coeficiente de equivalência estrutural obtido na pista experimental da AASHO (American Association of State Highway Officials).

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) foi desenvolvido por O. J. Porter em 1929 e compara a capacidade de suporte dos subleitos, relativa à de uma brita tomada como padrão (MEDINA e MOTTA, 2015). Este ensaio foi aplicado a um método de dimensionamento a partir do estudo sobre as condições das rodovias do estado da Califórnia nos EUA. Nos trechos em que havia ruptura, foram estudados os fatores que teriam influenciado nesta ruptura. Foi constatado que as principais causas das rupturas eram: a má compactação, o excesso de umidade no subleito, as espessuras de base insuficientes e as bases compostas por materiais com pouca resistência à tensão cisalhante (COUTINHO, 2011).

Do primeiro trabalho obtido TURNBULL, FOSTER E AHLVIN, retiraram-se principalmente os gráficos para dimensionamento do pavimento e a determinação das equivalências de operação entre diferentes cargas por eixo e a carga por eixo padrão. Das conclusões das pistas da AASHTO foram retiradas as ideias de se atribuir aos materiais utilizados no pavimento, coeficientes de equivalência estrutural e também fatores climáticos regionais (COUTINHO, 2011).

Com isso, o método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do DNIT, tem como base o método desenvolvido pelo USACE, o qual utiliza o ensaio CBR, e no coeficiente de equivalência estrutural estabelecido na pista experimental da AASHO, acrescido das adaptações do Eng. Murilo Lopes de Souza (COUTINHO, 2011). O método foi normatizado pelo DNER (atual DNIT) em 1966, desde então sua utilização passou a ser obrigatória em projeto de rodovias brasileiras. Inicialmente destinado apenas a pavimentos flexíveis, a adoção desse critério consolidou-se também no dimensionamento de pavimentos rígidos (CNT, 2016).

2.2.1 Capacidade de suporte

O Índice de Suporte (I.S) é o CBR corrigido em função do Índice de Grupo (I.G), que é adicionado no dimensionamento quando se deseja e for justificável uma segurança maior, a determinação da espessura do pavimento é baseada principalmente em função do IS, número de tráfego diário e a sua carga máxima por roda e a influência ambiental.

A determinação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais granulares construtivos do pavimento é feita pelo CBR, em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório, nas condições de massa específica e umidade específicas para o serviço no

campo e submetidas a embebição durante quatro dias (IPR. Publ. 667). O IS nunca poderá ser maior que o valor de CBR.

Tabela 1 – Valores da relação entre o índice de grupo e o índice de suporte

Índice de Grupo (I.G)	C. B. R_{I.G}
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Fonte: SOUSA (1981).

O Índice de suporte é dado por:

$$IS = \frac{CBR + CBR_{IG}}{2} \quad (1)$$

Onde:

CBR= valor de CBR determinado no ensaio respectivo;

CBR_{IG}= valor dado na tabela;

IS= Índice de Suporte;

2.2.2 Classificação dos materiais granulares empregados no pavimento

A determinação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes do pavimento é feita pelo ensaio CBR, adotando-se o método preconizado pelo DNER, em corpos-de-prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições esperadas no campo.

Os materiais empregados na pavimentação devem atender aos seguintes critérios:

- Subleito Os materiais de subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio CBR, inferior ou igual a 2% e um CBR menor ou igual a 2%.
- Reforço do subleito: IS ou CBR maior que o subleito;
Expansão menor ou igual a 2%.
- Sub-base: IS ou CBR maior ou igual a 20;
IG = 0.
Expansão menor ou igual a 1% (medida com sobrecarga de 10 lbs).
- Base: CBR maior ou igual a 80;
Expansão menor ou igual 0,5% (medidas com sobrecarga de 10 lbs);
Limite de liquidez menor ou igual 25;
Índice de plasticidade menor ou igual a 6.

Caso o limite de liquidez seja superior a 25% ou o índice de plasticidade seja superior a 6, o material pode ser empregado em base (satisfeita as demais condições), desde que o equivalente de areia seja superior a 30%.

Os materiais para base granular devem se enquadrar numa das seguintes faixas granulométricas:

Tabela 2 – Faixas granulométricas para material de base

PENEIRAS	PORCENTAGEM QUE PASSA			
	A	B	C	D
2"	100	100	-	-
1"	-	75-90	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100
N 4	25-55	30-60	35-65	50-85
N 10	15-40	20-45	25-50	40-70
N 40	8-20	15-30	15-30	25-45
N 200	2-8	5-15	5-15	5-20

Fonte: SOUSA (1981).

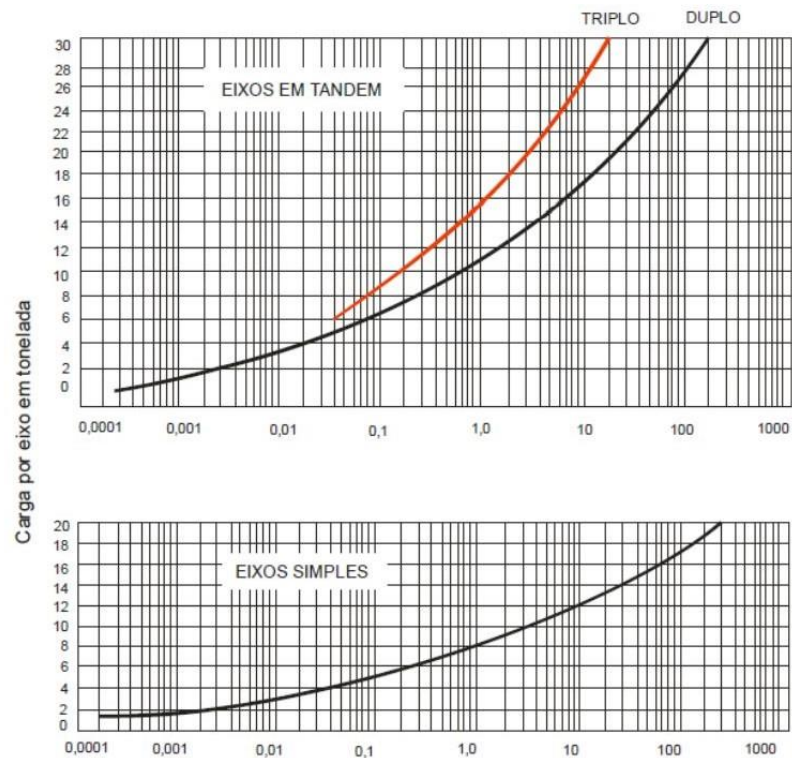
A fração que passa na peneira de número 200 deve ser inferior a 2/3 de fração que passa na peneira de número 40. A fração graúda deve apresentar um desgaste Los Angeles inferior a 50. Pode ser aceito um valor de desgaste maior, desde que haja experiência no uso do material. Em casos especiais podem ser especificados outros ensaios representativos da durabilidade da fração graúda. (DNIT, 2006).

2.2.3 Determinação do tráfego

O tráfego rodoviário é um parâmetro complexo de ser avaliado. São diversos tipos de veículos, diversas configurações de pneus com distintas cargas transportadas. A sua modelagem requer a contagem de veículos, distribuição do peso sobre os eixos, velocidade de passagem, variação lateral em relação ao eixo da rodovia, geometria dos eixos, pressão dos pneus (FRANCO, 2007).

O tráfego tem influência predominante no dimensionamento do pavimento, pois este é dimensionado em função do número equivalente de operações de eixo padrão (N) durante a vida útil do projeto (COUTINHO, 2011). Fatores de equivalência de operação entre eixos simples e em “tandem”, com diferentes cargas e o eixo simples padrão com carga de 8,2t podem ser encontrados na Figura 1 (DNIT, 2006).

Figura 3 – Curvas de fatores de equivalência de operação



Fonte: DNIT (2006).

Para o cálculo de N , antes é necessário calcular o volume total de tráfego durante o período de projeto (Vt), e outras duas variáveis: fator de veículos (Fv) e o fator climático regional (Fr).

Vt é dado por (DNIT, 2006):

$$Vt = \frac{365V1[(1 + \frac{t}{100})^P - 1]}{t/100} \quad (2)$$

Onde:

$V1$ é o volume médio diário de tráfego no ano de abertura, em um sentido;

t é a taxa de crescimento anual (%) em progressão aritmética;

P é o período de projeto em anos.

O fator de veículos é função de dois fatores, o fator de eixos e o fator de carga. Para efeito de cálculo, faz-se necessária a transformação de todas as cargas dos diferentes tipos de veículos em cargas que sejam equivalentes, em poder destrutivo, à carga do eixo padrão.

Fv é dado por (DNIT, 2006):

$$Fv = Fe.Fc \quad (3)$$

Onde:

Fe é o fator de eixos, um número que multiplicado pelo número de veículos, fornece o número de eixos correspondentes;

Fc é o fator de carga, um número que multiplicado pelo número de eixos que operam, fornece o número de eixos equivalentes ao eixo padrão, isto é, transforma o poder de dano dos eixos dos vários tipos de veículos que compõem o tráfego em dano equivalente ao eixo padrão. Os valores dos fatores de equivalência de operação entre eixos simples e em “tamdem”, podem ser obtidos por meio de gráficos representado na figura 3.

O fator de eixos pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$Fe = \frac{n}{Vt} \quad (4)$$

Onde:

n é o número de eixos

Vt é o volume total de veículos.

O fator de carga é dado por:

$$Fc = \frac{\sum Pj.FCj}{100} \quad (5)$$

Onde:

Pj é a porcentagem de incidência que cada categoria de veículo “j” ocorre na estrada obtido por meio da contagem dos veículos;

FCj é o fator de equivalência de operação para cada categoria de veículo “j” que é determinado com o gráfico da figura.

Após o cálculo das três variáveis (Vt , Fv e Fr) calcula-se N pela expressão:

$$N = Vt.Fv.Fr \quad (6)$$

2.2.4 Fator climático regional

O fator climático regional ou fator de chuva, corresponde às variações de umidade dos materiais do pavimento durante o ano que afetam a capacidade de suporte.

Para levar em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano (o que se traduz em variações de capacidade de suporte desses materiais), o número equivalente de operações do eixo tomado como referência ou padrão, que é um parâmetro de tráfego – deve ser multiplicado por um coeficiente (FR) que na pista experimental de AASHTO variou de 0,2 (ocasiões em que prevalecem baixos teores de umidade) a 5,0 (ocasiões em que os materiais estão praticamente saturados) (SENÇO, 1997). Pesquisas no IPE/DNER indicam o uso de FR=1. Esse coeficiente deve multiplicar o número de operações do eixo padrão (N), desse modo, o fator climático no método DNER não influi sobre o dimensionamento.

2.2.5 Dimensionamento

O pavimento é uma estrutura que não é considerável perene, exigindo manutenção ao longo da sua vida útil, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito. A estrutura tem como objetivo receber e transmitir esforços de maneira a aliviar o bulbo de pressões sobre as camadas inferiores, nas quais geralmente são constituídas de materiais menos resistentes. O corpo estratificado da pavimentação para que funcione de forma mais adequada, necessita que todas as peças que a componha, trabalhem com as deformações compatíveis com a sua natureza e capacidade portante, ou seja, de modo que não ocorram processos de ruptura ou danificação de forma precoce e precipitada nos materiais que consiste nas camadas dos pavimentos (FONSECA 2013).

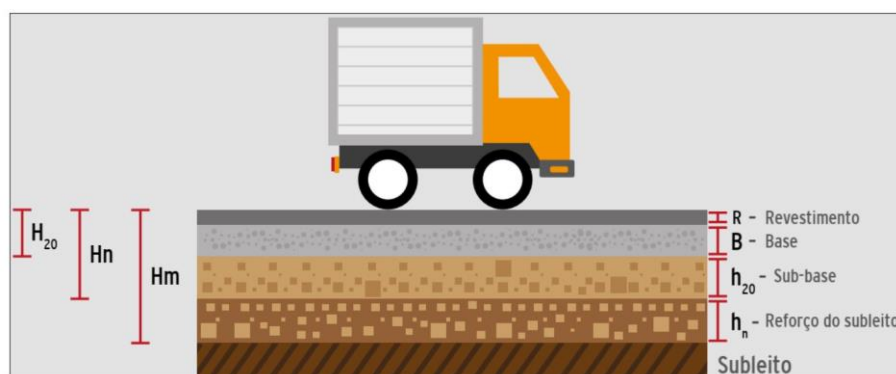
O pavimento é constituído das seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, sendo este último a fundação e parte da estrutura do corpo estradal. O pavimento, dependendo do caso, poderá não possuir camada de sub-base ou de reforço do subleito, porém a existência de revestimento, nem que seja primário na forma de cascalhamento

ou agulhamento, e de fundação denominada subleito é essencial para que a estrutura seja classificada como pavimento.

De acordo com Godim (2008), no dimensionamento de pavimentos como um sistema de camadas, é fundamental o estabelecimento de modelos estruturais de comportamento tensão-deformação dos materiais e do conjunto estrutural formado entre o pavimento (revestimento) e o subleito (fundação).

De acordo com Senço (2007), a camada é construída para resistir e distribuir os esforços resultantes das cargas do tráfego de veículos, que são predominantemente na direção vertical, é denominado de base do pavimento. A camada superficial e que tem contato direto com os pneumáticos, construída para resistir aos esforços horizontais, recebe o nome de revestimento ou capa de rolamento, ou simplesmente capa. Esses esforços horizontais acabam gerando abrasão da superfície por fadiga, devido ao tráfego durante a vida útil da pavimentação, logo, que periodicamente deve ser superposto por nova camada, recapeamento, reforçado ou até mesmo substituído.

Figura 4 – Esquemas das camadas para dimensionamento DNER



Fonte: DNIT (2016).

Onde:

R – Espessura da camada de revestimento;

B – Espessura da camada de base;

h_{20} – Espessura da camada de sub-base;

h_n – Espessura da camada de reforço do subleito;

H_{20} – Espessura do pavimento sobre a sub-base;

H_n – Espessura do pavimento sobre o reforço do subleito;

H_m – Representa a espessura sobre o subleito.

O Primeiro passo na definição das espessuras das camadas é o estabelecimento dos coeficientes de equivalência estrutural tabela (3). O Coeficiente de Equivalência representa a comparação entre a espessura necessária da camada feita com o material padrão (base granular) com a espessura equivalente da camada que irá constituir o pavimento de fato.

Tabela 3 – Coeficiente de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,7
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 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: DNIT (2016).

Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

- Revestimento: K_R ;
- Base: K_B ;
- Sub-base: K_S ;
- Reforço: K_{Ref} .

O cálculo das espessuras de cada camada é feito a partir das seguintes inequações:

$$(R \cdot K_R) + (B \cdot K_B) \geq H_{20} \quad (7)$$

$$(R \cdot K_R) + (B \cdot K_B) + (h_{20} \cdot K_S) \geq H_n \quad (8)$$

$$(R \cdot K_R) + (B \cdot K_B) + (h_{20} \cdot K_S) + (h_n \cdot K_{Ref}) \geq H_m \quad (9)$$

Onde:

K_R – Coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

R – Espessura do revestimento;

K_B – Coeficiente de equivalência estrutural da base;

B – Espessura da base;

H_{20} – Espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;

K_S – Coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

h_{20} – Espessura da sub-base;

h_n – Espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;

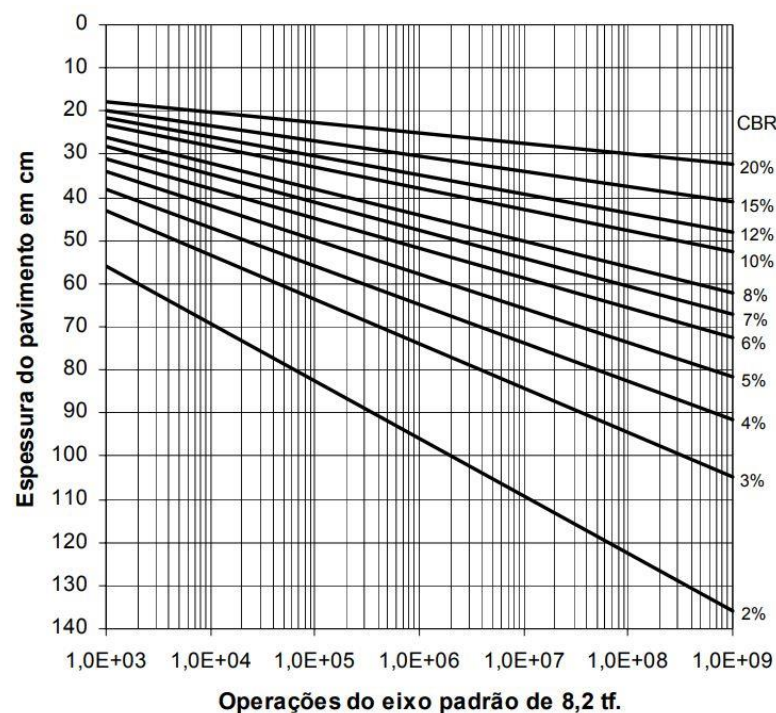
K_{Ref} – Coeficiente de equivalência estrutural do reforço de subleito;

H_n – Espessura do reforço do subleito;

H_m – Espessura total de pavimento necessária para proteger um material com CBR igual a $m\%$.

As espessuras H_{20} , h_n e H_m são calculadas por meio do ábaco representado pela Figura (5). Para sua utilização, considera-se o CBR da sub-base, do reforço do subleito e do subleito, respectivamente, o coeficiente de equivalência em termos de pedra britada ($K=1,00$) e o valor de N projetado.

Figura 5 – Ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no Método DNER



Fonte: DNIT (2006).

Alternativamente ao ábaco pode-se usar a expressão:

$$H_t = 77,67 \cdot N \cdot CBR^{-0,598} \quad (10)$$

A fixação da espessura mínima a adotar para os revestimentos betuminosos é um dos pontos ainda em aberto na engenharia rodoviária, quer se trate de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, quer se trate de evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. As espessuras a seguir recomendadas, Tabela 4, visam especialmente as bases de comportamento puramente granular e são definidas pelas observações efetuadas. (DNIT, 2006)

Tabela 4 – 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: DNIT (2016).

2.3 MeDiNa- MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL MECANÍSTICO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

O MeDiNa é um software que realiza a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos, por meio da rotina AEMC “Análise Elástica de Múltiplas Camadas”. Esta rotina calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário e aplica modelos de fadiga e deformação permanente para ajustar as espessuras das camadas (FRANCO, 2018).

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos-MeDiNa é produto de uma pesquisa desenvolvida entre 2015 e 2018 pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE com a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES e de diversas Universidades do Brasil. O referido trabalho se intitula, *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos* (IPR, 2018).

A análise de uma estrutura de pavimento ou mesmo o seu dimensionamento requer um conjunto amplo de informações para que os resultados obtidos sejam confiáveis. As informações passam pelo conhecimento do subleito, como seu módulo e curva de deformação permanente. Outra informação que é chave para o correto funcionamento do software MeDiNa é a definição do Número Equivalente de Eixos, o número N. Os modelos utilizados no programa MeDiNa mostram-se sensíveis a pequenas variações do Número N, e, portanto, uma estimativa apurada é de grande importância para o sucesso do projeto (FRANCO, 2018).

O objetivo do IPR com esse trabalho é desenvolver pesquisas, metodologias, e procedimentos, visando a implantação no DNIT de um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos, para realizar projetos de estruturas de pavimento mais adequadas às condições de solicitação do tráfego, proporcionando melhoria dos processos de avaliação dos projetos contratados e confiabilidade de estimativa da vida útil.

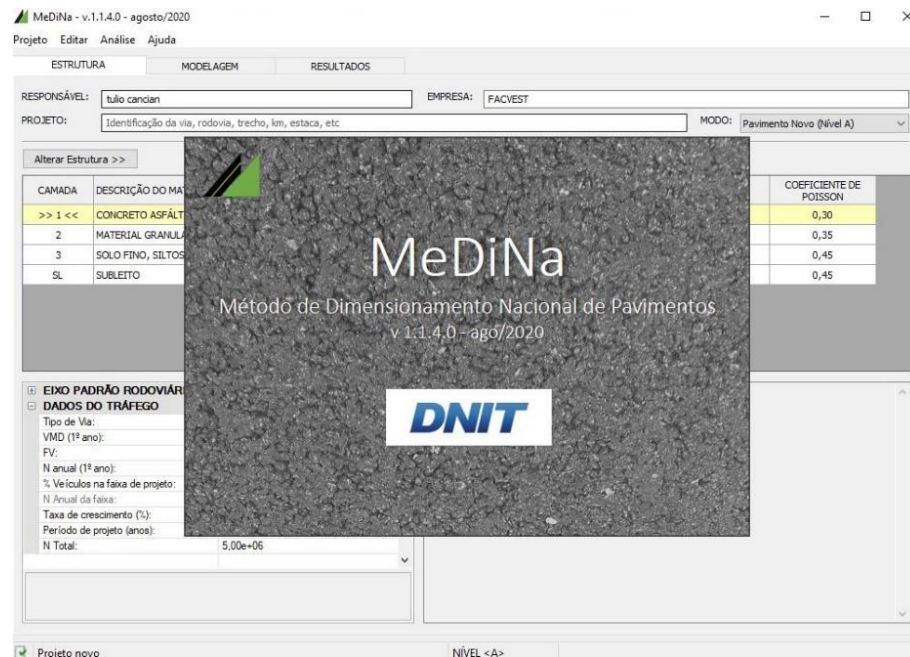
O IPR destaca os seguintes objetivos específicos para com a pesquisa:

- a) Análise crítica dos métodos existentes em vigor no IPR
- b) Análise crítica dos bancos de dados existentes no IPR e DNIT de interesse direto no escopo deste projeto
- c) Estabelecimento dos princípios do novo método de dimensionamento
- d) Elaboração de sistema de dimensionamento; ferramentas de análise de tensões e deformações e aplicação de critérios de ruptura ou equações de desempenho. (software MeDiNa)
- e) Estabelecimento de critérios de calibração das equações de desempenho.
- f) Elaboração de manuais e treinamentos.
- g) Implantação e acompanhamento das funcionalidades do sistema.
- h) Fechamento do projeto e entrega do “Método”.

2.3.1 Software MeDiNa

O MeDiNa é um programa de computador que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas (IPR, 2018).

Figura 6 – Programa MeDiNa (tela inicial)



Fonte: MeDiNa (2020).

O software tem sua interface dividida em abas, sendo denominadas: estrutura; modelagem e resultados. Ao iniciar o software, o mesmo sempre se apresenta na aba estrutura, onde são inseridas as informações de identificação do projeto; estrutura do pavimento; tráfego e painel onde o software registra o resumo dos resultados das análises ou dos dimensionamentos. Antes de preencher os dados do projeto, define-se em qual modo o programa irá tratar os dados. Na versão utilizada apenas dois modos estão disponíveis:

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

Figura 7 – Programa MeDiNa (tela inicial)

MeDiNa - v.1.1.4.0 - agosto/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: EMPRESA:

PROJETO: MODO:

Alterar Estrutura >>

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

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

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

Primito novo NÍVEL <A>

Fonte: MeDiNa (2020).

A tela inicial do software pode ser observada na figura 6, apresentando uma interface inicial de fácil acessibilidade, composta por quatro camadas, concreto asfáltico, material granular, solo fino, siltoso ou argiloso e incluído o subleito, podendo ser adicionadas ou retiradas camadas da estrutura (são permitidas, no mínimo três e, no máximo, oito camadas, contando com o subleito), bem como alterar o tipo de material que a camada é constituída. Na tabela que exibe a estrutura do pavimento são apresentadas informações resumidas das propriedades de cada uma das camadas da estrutura do pavimento, como: material constituinte e o tipo selecionado, espessura, módulo de resiliência (se linear ou sigmoidal), e coeficiente de Poisson.

É essencial que para um bom dimensionamento adequado e seguro, o conjunto de informações de entrada sejam suficientemente preciso. Sem o conjunto de informações completo e preciso, não se recomenda a utilização dos resultados do programa MeDiNa para o dimensionamento de pavimentos. Através de ensaios laboratoriais se torna confiável as informações do subleito e das demais camadas constituintes do pavimento, como qualquer variável é necessário conhecê-las.

2.3.2 Metodologia Mecanístico-Empírico

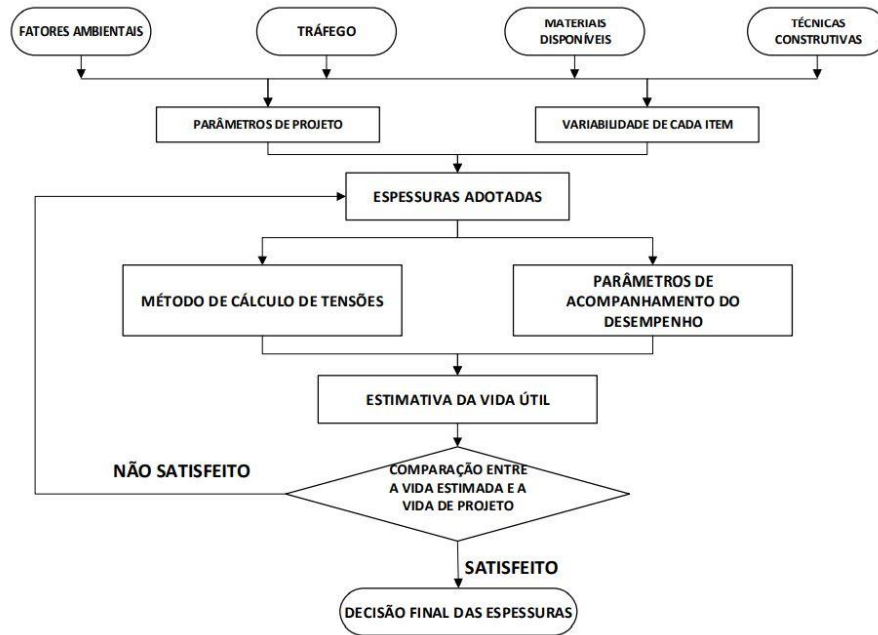
Segundo COUTINHO (2011), um método mecanístico de dimensionamento de pavimentos consiste na aplicação dos princípios da Mecânica dos Pavimentos no 16 dimensionamento, considerando o pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas sujeita às cargas do tráfego e do clima.

FRANCO (2007) resume o dimensionamento mecanístico empírico:

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

MOTTA (1991) apresentou em sua tese de doutorado um método mecanístico de dimensionamento de pavimentos flexíveis, com o procedimento seguinte: adota-se uma estrutura inicial, define-se a variabilidade dos dados e o nível de confiabilidade a ser utilizado no projeto. A análise mecanística é efetuada utilizando-se um programa computacional, usando um modelo elástico linear para o revestimento asfáltico e elástico não-linear para as camadas subjacentes, verificando-se as tensões e deformações e comparando-as com critérios de aceitação pré-estabelecidos. Caso algum critério não seja satisfeito, as espessuras e/ou camadas são alteradas e os cálculos refeitos. Os critérios que podem ser adotados são os seguintes: deflexão máxima admissível na superfície; diferença de tensões no revestimento; tensão vertical admissível no topo do subleito; tensão e deformação de tração na fibra inferior do revestimento.

Figura 8 – Fluxograma do método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos



Fonte: MOTTA (1991).

O fluxograma apresentado na Figura (8) expõe as etapas necessárias para o dimensionamento de um pavimento novo por um método mecânico-empírico. Também, o fluxograma deixa claro que, nesse método de dimensionamento é preciso ter conhecimento dos dados sobre o clima da região onde o pavimento será construído, pois este indica em que condições se devem obter a caracterização dos materiais.

O conhecimento das técnicas construtivas é importante na definição da variabilidade dos fatores do projeto, como, por exemplo, grau de compactação, teor de umidade, etc. Outros dados de entrada são o volume e composição do tráfego que utilizará a via e a caracterização dos materiais disponíveis na região e do subleito (MEDINA e MOTTA, 2015).

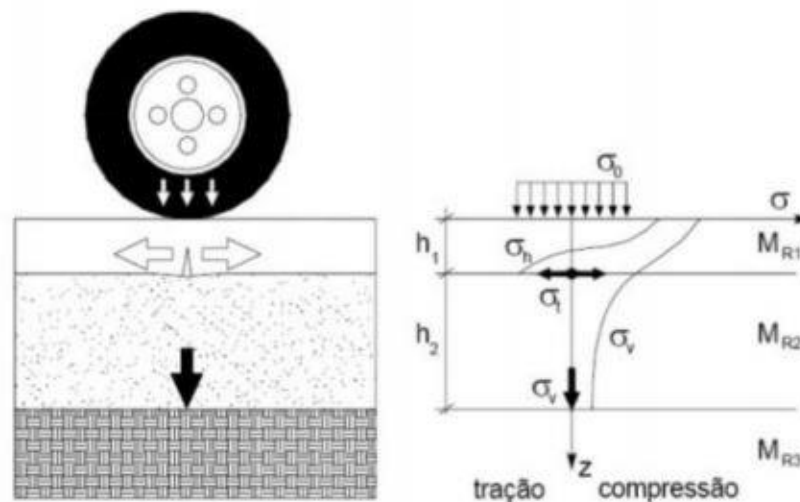
A etapa do fluxograma relativa ao cálculo de tensões refere-se às oriundas das cargas de tráfego impostas à estrutura e ao cálculo das deformações, em função destas tensões. Os métodos de cálculo consideram dois tipos de comportamento tensão-deformação para os materiais do pavimento: elástico-linear e elástico não linear. Os materiais classificados como elástico linear são os que apresentam módulo de resiliência constante ao longo de toda a espessura da camada. Os materiais de comportamento não linear têm módulo de resiliência variável ao longo da espessura e horizontalmente e neste caso o Módulo de Resiliência depende do estado de tensões a que o material está submetido. O módulo de resiliência pode ser obtido com a realização do ensaio triaxial de carga repetida, no caso de solos e materiais granulares,

ou através do ensaio de compressão diametral de carga repetida, para misturas asfálticas. Seu valor é calculado pela relação entre a tensão desvio aplicada repetidamente e a deformação resiliente (MEDINA e MOTTA, 2015).

2.3.3 Comportamento estrutural dos pavimentos asfálticos

A estrutura de um pavimento é caracterizada por um meio multicamadas solicitadas por um carregamento superficial distribuído em uma área circular podendo ser modelada pelas teorias da elasticidade linear em sistemas multicamadas e contínuos (FRANCO,2007). Boussinesq em 1885 e Burmister em 1943 foram os autores que desenvolveram os trabalhos.

Figura 9 – Esquema de modelagem da teoria da elasticidade no interior do pavimento asfáltico



Fonte: MOTTA, MEDINA (2005).

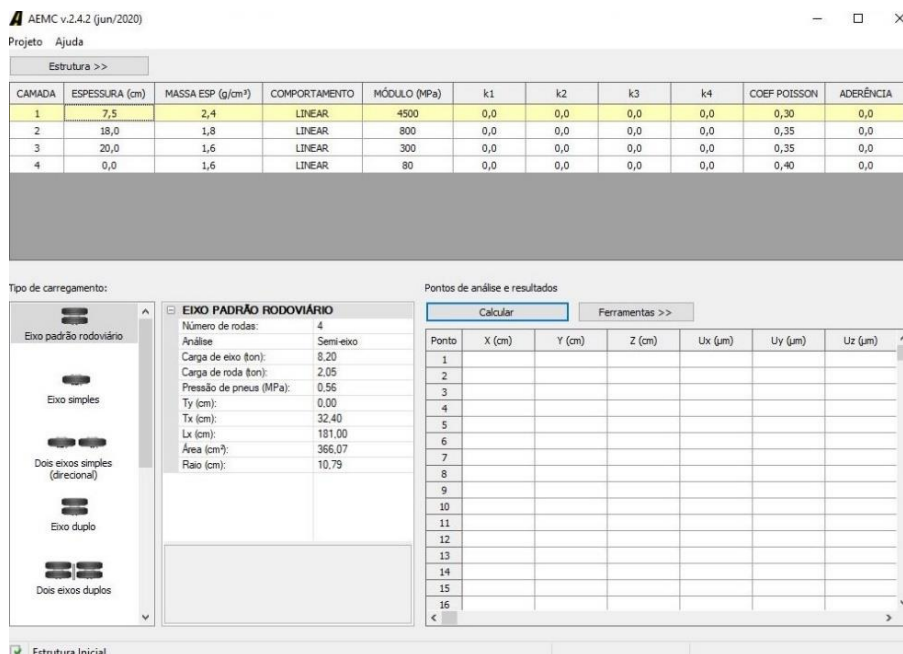
Boussinesq desenvolveu a solução geral formal para os vários tipos de carregamento, cargas concentradas ou uniformemente distribuídas, aplicados em um meio semi-infinito, elástico, homogêneo e isotrópico. Já a teoria desenvolvida por Burmister, foi formulada para meios estratificados de duas e três camadas elásticas, portanto, é mais adequada em se tratando de pavimentos (MEDINA e MOTTA, 2015).

Desde então, surgiram diversos programas computacionais para auxiliar no cálculo de tensões e deformações em estruturas estratificadas, como o FEPAVE, ELYM5 e o SisPavBR. O SisPavBR foi desenvolvido na COPPE/UFRJ por Filipe Franco em 2007, e posteriormente

na COPPE/UFRJ foi adaptado e desenvolvido o método de dimensionamento nacional de pavimentos – MeDiNa, o qual será discutido adiante.

O MeDiNa tem uma sub-rotina, o programa de análise elástica de múltiplas camadas (AEMC), para efetuar o cálculo das tensões e deformações no interior do pavimento.

Figura 10 – Interface AEMC



Fonte: AEMC (2020).

A análise das camadas feita no software AEMC, baseia-se na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos. Possui a vantagem de combinar carregamentos com mais de uma roda por meio da superposição e da hipótese de elasticidade linear, também é possível obter os resultados de tensão, deformação e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura. As hipóteses assumidas na modelagem da estrutura do pavimento são as seguintes:

- os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- as camadas não têm peso, para efeito do cálculo do estado de tensões e deformações;
- as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior

- que é considerada semi-infinita;
- f) a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
 - g) na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
 - h) a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
 - i) a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
 - j) as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

2.3.4 Carregamento da estrutura

Segundo FRANCO (2018), o eixo padrão rodoviário é o eixo utilizado nas análises e no dimensionamento das estruturas de pavimento. Essa consideração foi definida em função da calibração dos modelos de fadiga, que se baseou na comparação da evolução da área trincada com o número estimado de passagens do eixo padrão. O software pode ser utilizado para calcular automaticamente o número equivalente de passagens do eixo padrão rodoviário. Este pode ser obtido a partir do volume médio diário (VMD) em conjunto com o fator de veículo (FV). A partir destes dois valores, o software MeDiNa calcula o número anual equivalente de eixos (N anual) automaticamente. Caso o projetista já tenha o N anual, ele pode entrar direto com o valor na caixa correspondente. Todos os veículos com suas diversas configurações de carga e eixo, junto das suas respectivas repetições são transformadas em Número Equivalente de Passagens do Eixo padrão Rodoviário. O procedimento para obtenção do número N segue o mesmo roteiro do Método Empírico.

$$N = V_t \cdot F_V \quad (11)$$

Figura 11 – Eixo padrão rodoviário assumido no software MeDiNa



Fonte: FRANCO (2018).

O eixo padrão rodoviário brasileiro é um eixo simples de rodas duplas e que transmite ao pavimento uma carga total de 8,2 toneladas (80 kN). Neste eixo a superfície de contato dos pneus com o pavimento é representada por uma área circular de 10,8 cm de raio e tensão de contato de 5,6 kgf/cm².

2.3.5 Tipos de vias

De acordo com FRANCO (2018), há a necessidade de se informar o tipo de via a ser analisado ou dimensionado. A cada tipo incide um critério de parada do dimensionamento, bem como os graus de confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa. Os diferentes tipos de vias foram definidos em conformidade com a hierarquia dos sistemas funcionais publicada pelo DNIT.

A confiabilidade pode ser definida como a medida da probabilidade de a serventia do pavimento permanecer em um nível adequado através da vida de serviço. É a probabilidade de um sucesso no projeto do pavimento. A tabela (5) mostra os valores de confiabilidades necessários para o tipo de rodovia. Esses valores são usados pelo MeDiNa no dimensionamento.

Tabela 5 – Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa

Tipo de Via	Confiabilidade	Área Trincada	Deformação Permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm

Sistema Local	65%	30%	20mm
---------------	-----	-----	------

Fonte: FRANCO (2018).

Como já justificado o entendimento e quantificação das diversas variáveis necessárias ao projeto de rodovia são complexas. São assumidas simplificações, valores médios além do empirismo. Numa avaliação determinística do pavimento, a ferramenta utiliza os parâmetros médios para a previsão dos principais tipos de danos ao longo da vida de serviço do pavimento. Essa previsão, na condição de ser baseada em valores médios de todas as variáveis de entrada, representa um dano estimado com uma confiabilidade de 50%. Em outras palavras, existe uma probabilidade de 50% do dano ser maior ou menor que o dano previsto (FRANCO,2007).

2.3.6 Propriedades dos materiais de pavimentação

A caracterização dos materiais de pavimentação é uma tarefa complexa devido a sua heterogeneidade em relação aos fatores que afetam as propriedades dos materiais, tais como: questões ambientais, frequência de cargas, estado de tensões e deformações, envelhecimento dos ligantes asfálticos e magnitude das tensões (FRITZEN, 2016).

A avaliação da resistência da estrutura global do pavimento requer prévia caracterização das capacidades dos seus materiais constituintes. Conforme Motta (1991) apud Franco (2007), essas capacidades são avaliadas por meio de ensaios que reproduzem o estado de tensões e as condições ambientais a que os pavimentos estarão sujeitos no campo.

Para um dimensionamento analítico da camada asfáltica, é indispensável conhecer seu comportamento mecânico, especialmente quanto à sua deformabilidade elástica, ou seja, conhecer o módulo de elasticidade e o seu coeficiente de Poisson (SILVA, 2018, p. 38).

Para Franco (2007) numa avaliação ME, o Módulo de Resiliência e Coeficiente de Poisson constituem os principais parâmetros necessários à caracterização da capacidade dos materiais (asfálticos ou granulares) do pavimento asfáltico.

As misturas asfálticas têm módulos de deformabilidade subordinada à carga aplicada, tempo de aplicação da carga e pela temperatura do revestimento. Assim, seu comportamento é classificado como visco-termo-elástico. Porém, devido à complexidade no entendimento desse tipo de comportamento, o revestimento asfáltico é tomado simplificadaamente como de comportamento elástico linear, Módulo de Resiliência constante (MOTTA,1991).

Segundo Coutinho (2011), Módulo de Resiliência - MR é um “módulo de elasticidade” que expressa a relação tensão-deformação dos materiais. O coeficiente de Poisson é dado pelo inverso da relação entre a deformação vertical imposta ao material, pela deformação horizontal sofrida no corpo de prova durante o ensaio de compressão uniaxial.

De acordo com a norma do DNIT 135/2018 (*Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio*), através de ensaios é determinado o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson.

O coeficiente de Poisson é dado pela equação:

$$\mu = \frac{-0,23 + 1,07 \left| \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} \right|}{0,78 - 0,31 \left| \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} \right|} \quad (12)$$

Onde:

μ - coeficiente de Poisson;

ΔH_t - Deslocamento horizontal medido no meio do diâmetro do corpo de prova;

ΔV_t - Deslocamento vertical medido no meio no diâmetro do corpo de prova.

O Módulo de Resiliência é a relação entre a tensão horizontal (tração) resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente).

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|.t} (0,2692 + 0,9976)\mu \quad (13)$$

Onde:

MR – É o módulo de resiliência, expresso em MPa;

P – É a carga cíclica, expressa em N;

ΔH – É o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente) mm;

t – É a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm;

μ – É o coeficiente de Poisson.

O MR não é um parâmetro constante ou fixo para a maioria dos materiais de pavimentação. De acordo com Fonseca (1995) *apud* Franco (2007), a anisotropia ou a não

homogeneidade podem fazer com que o Módulo de Resiliência varie pontualmente dentro de um material específico.

Motta *et al.* (2002) descrevem a variação do comportamento do MR com a variação das características da mistura. Segundo eles, de forma geral, pode-se dizer que o módulo de resiliência:

- Varia com a granulometria da mistura sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada;
- Varia com o ligante asfáltico sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade;
- Não é muito sensível ao teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem;
- É influenciado pela relação asfalto/ fíller e a própria natureza do fíller.

Tabela 6 – estimativa de MR para diversos materiais

Camada	Material	Valores sugeridos para estudos e projetos (MPa)
Subleitos	Laterítico (ILA'e LG)	$MR = 22 \cdot CBR^{0,8}$
	Não laterítico (NS'NG')	$MR = 18 \cdot CBR^{0,64}$
	Arenosos pouco ou não coesivo (LA, NA e NA')	$MR = 14 \cdot CBR^{0,7}$
Reforço	Leterítico (NA e NG)	$MR = 22 \cdot CBR^{0,8}$
	Não laterítico (NS e NG')	$MR = 18 \cdot (CBR_{REF})^{0,64} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot CBR_{SL}}{CBR_{REF}}}$
Sub-base	Granular	$MR = 18 \cdot (CBR_{REF})^{0,64} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot CBR_{SL}}{CBR_{REF}}}$
Base	Granular	$100 \leq MR \leq 500$
	Asfáltica	$800 \leq MR \leq 1000$
	Cimentada-BGTC	$5000 \leq MR \leq 15.000$
Revestimentos asfálticos	Concreto Asf;altico CAUQ	$3.000 \leq MR \leq 5.000$
	Pré-misturado à quente – PMQ binder	$2.000 \leq MR \leq 2.500$
	Pré-misturado à frio-PMF ou macadame betuminoso	$1.400 \leq MR \leq 1.800$

Selado - MB

 $1.000 \leq MR \leq 1.400$

Fonte: Balbo (2007).

Tabela 7 – Valores típicos de coeficiente de Poisson

Material	Faixa de variação
Concretos asfálticos	0,32-0,38
Concreto de cimento Portland	0,15-0,20
BGS, MH, BC	0,35-0,40
CCR, BGTC	0,15-0,20
SC, SMC	0,20-0,30
SCA	0,25-0,30
Solos arenosos	0,30-0,35
Areias compactadas	0,35- 0,40
Solos finos	0,40-0,45

Fonte: BALBO (2007).

2.3.7 Materiais de solo

Muitas das características de engenharia da camada de material de solo usado no pavimento dependem das propriedades de suas partículas constituintes. Isso está relacionado à geologia da rocha mãe, sua composição mineral e à sua dureza. Possíveis materiais contaminantes também podem afetar as características do material, pois interferem no atrito entre agregados e a sua durabilidade (SILVA, 2018, p. 42).

Os solos finos, siltosos ou argilosos, salvo os solos lateríticos, comumente não são aplicados na confecção das camadas estruturais de pavimento. Graças a sua baixa qualidade de resistência ou capacidade de suportar deformações permanentes, a construção das camadas do pavimento é reservada ao uso de materiais granulares de solo. Contudo, solos finos são encontrados no subleito por ser ordinariamente uma camada natural em que não há substituição de material.

Materiais de solos apresentam um comportamento elasto-plástico complexo quando submetidos a um carregamento de veículos em movimento. Assim sendo, as respostas dessas camadas às solicitações das operações dos veículos são caracterizadas por

deformações recuperáveis ou resilientes e pelas deformações residuais ou permanentes (SILVA, 2018, p. 24).

Para Medina e Motta, (2005), pavimentos asfálticos com camadas granulares espessas precisam da consideração da não linearidade da camada. O programa MeDiNa em sua sub-rotina AEMC de cálculo de estado de tensões dá ao projetista a seu critério, a opção de simular os materiais granulares e solos finos com o seu Módulo de Resiliência constante ou variável.

Em um material de solo em que é assumida a aplicação da lei de Hooke generalizada, obtêm-se os valores MR por ensaio triaxial cíclico de acordo com a norma do DNIT 134/2017 (*Pavimentação – Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*). O MR dos solos é dado pela relação entre a tensão-desvio aplicada repetidamente na amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável, conforme a equação abaixo.

$$MR = \frac{\sigma d}{\varepsilon r} \quad (14)$$

$$\sigma d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (15)$$

Onde:

MR – Módulo de resiliência ou relação tensão-deformação do material;

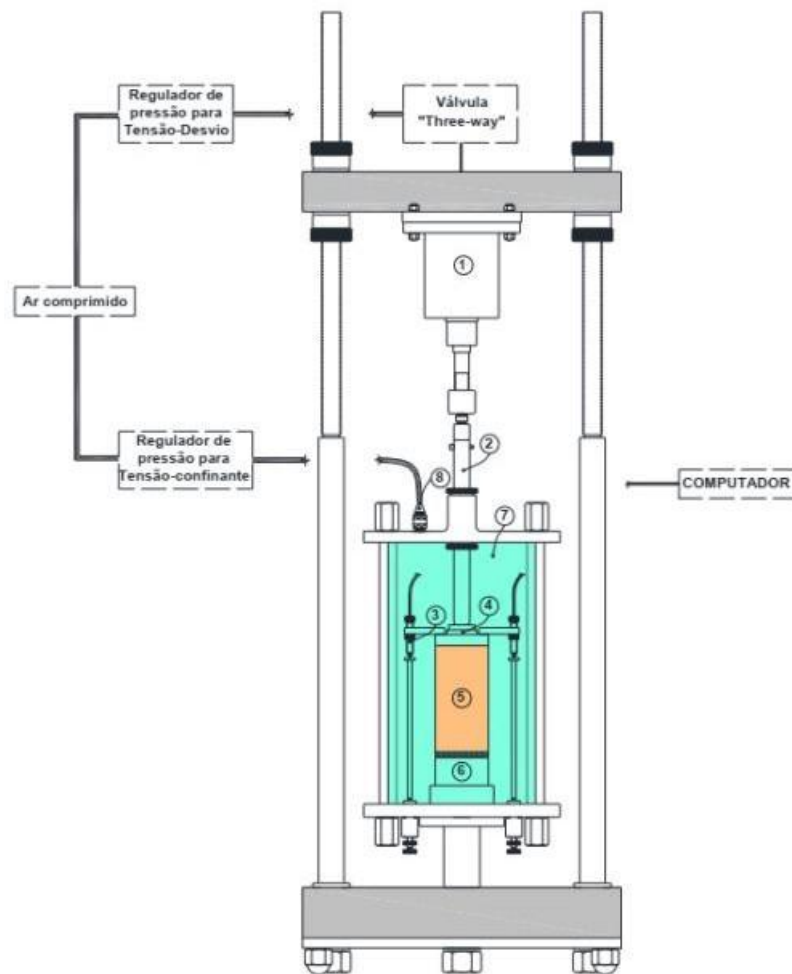
σd – Tensão desvio;

εr – Deformação específica axial resiliente;

σ_3 – Tensão confinante;

σ_1 – Tensão vertical.

Figura 12 – Aparelhagem para determinação do MR dos Solos



Fonte: DNIT (2017).

No entanto, quando o material de solo é investigado com mais rigor é considerado elástico não linear, ou plástico, ou viscoso, ou mesmo a combinação variada destes fatores. Esses comportamentos diferenciados do material obrigam a busca de modelos empíricos mais específicos que descrevam em função do MR, as tensões e deformações (COUTINHO, 2011).

Para a modelagem desse comportamento elástico não linear o programa MeDiNa usa a abordagem clássica. Essa linha de trabalho é caracterizada pelo uso das tensões e deformações de desvio e de confinamento (FRANCO, 2007). A modelagem é dada na equação:

$$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3} \cdot \theta^{K_4} \quad (16)$$

Onde:

K_1, k_2, k_3 e k_4 são constantes apuradas em laboratório por meio de ensaio triaxial no qual o corpo de prova é submetido à deformações plásticas.

θ – Tensão octaédrica (igual à soma das tensões principais $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$);

σ_d – Tensão desvio;

σ_3 – Tensão de confinamento;

MR – Módulo de resiliência em MPa.

2.3.8 Modelo de desempenho dos pavimentos asfálticos

A avaliação do desempenho dos pavimentos asfálticos é feita pela análise de dois critérios de ruptura: a ruptura estrutural e a ruptura funcional. A ruptura estrutural caracteriza o colapso efetivo da estrutura do pavimento ou de seus elementos, incapacitando o pavimento de suportar qualquer carga imposta na superfície. A ruptura funcional caracteriza um estado de degradação que gera desconforto ao rolamento dos veículos, diminuição da segurança das operações, aumento do risco de aquaplanagem devido às irregularidades e defeitos gerados pelo trincamento, ou ainda por grandes deformações permanentes (FRANCO, 2007).

Segundo Rodrigues (1991), os pavimentos asfálticos se deterioram por meio de:

- Formação e crescimento de fissuras nas camadas de revestimento, decorrentes da fadiga provocada pela repetição das cargas de tráfego;
- Geração de afundamentos em trilha de roda ou ondulações na superfície em decorrência do acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas, sob a repetição das cargas de tráfego;
- Desgaste em decorrência da abrasão provocada pelos veículos, acelerado pelo intemperismo, levando à queda do coeficiente de atrito;
- Envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação.

No Brasil, o mecanismo de degradação dominante nas rodovias de tráfego médio ou pesado é o trincamento por fadiga. Nas vias urbanas, os afundamentos plásticos têm sido predominantes quando os pavimentos não atendem às exigências de espessura ou de compactação preconizadas pelos métodos de projeto (SILVA, 2018, p. 24).

A fadiga é uma degradação estrutural progressiva provocada por solicitações repetidas ou oscilantes com intensidade inferior à tensão de ruptura do material asfáltico que podem gerar trincas ou efetiva ruptura após um número suficiente de repetições. No pavimento essa fadiga

ocorre pela repetição das operações dos veículos que geram microfissuras acumulativas que por fim acometem a estrutura do revestimento (FRANCO, 2007).

Figura 13 – Pavimento com dano por ruptura estrutural



Fonte: Inova Civil (2019).

Figura 14 – Pavimento com dano por ruptura funcional



Fonte: Inova Civil (2019).

O entendimento desses processos de deterioração é feito através de modelos de previsão de desempenho. Um modelo de previsão de desempenho é uma função que permite quantificar a redução do nível de serventia ou a geração de defeitos ao longo da vida de serviço do

pavimento. Para o DNIT (2016), tal modelo é denominado "mecanístico-empírico" quando é constituído por três partes:

- Um Modelo Estrutural para cálculo na forma de tensões, deformações ou deflexões elásticas provocadas pelas cargas de roda em movimento nas camadas do pavimento, que estejam relacionadas ao surgimento ou à propagação de defeitos na estrutura;
- Funções de Transferência, capazes de relacionar as respostas da estrutura às cargas do tráfego, à geração e propagação de defeitos. Além de atenderem a determinadas condições de contorno, exigidas pelo problema, essas funções deverão basear-se em teorias empiricamente validadas, que descrevem o mecanismo com que a deterioração acontece.
- Fatores ou Funções de Calibração, que ajustam as previsões das Funções de Transferência de modo a se reproduzir dados de uma determinada base empírica. São responsáveis, portanto, pela consideração de parâmetros que não puderam ser explicitados, seja no modelo estrutural ou nas Funções de Transferência, tais como: clima, características específicas do tráfego atuante, particularidades dos materiais e de sua variabilidade.

Na metodologia MeDiNa o revestimento asfáltico é dimensionado unicamente à base dos danos por fadiga. O dano por fadiga é evidenciado pelas trincas que surgem no revestimento asfáltico, onde a área trincada em percentual é dada pela equação abaixo:

$$AT(\%) = \frac{N_{trincado}}{N_{total}} \cdot 100 \quad (17)$$

Onde:

$AT(\%)$ –Área Trincada (%);

$N_{trincado}$ –Número de células trincada;

N_{total} –Número total de células do segmento experimental.

O comportamento de misturas asfálticas quanto à fadiga sob carregamento repetido pode ser equacionado pela função curva de fadiga.

$$N_f = K_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2} \quad (18)$$

Onde:

N_f –Número de aplicações de carga;

K_1 e K_2 – Coeficientes obtidos por ensaio que dependem da mistura asfáltica;

ε_t –Deformação específica resiliente.

A caracterização dos coeficientes K_1 e K_2 são proposta pela da norma do DNIT ainda em fase de consulta pública *Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada – Método de ensaio*. Essa norma foi criada especialmente nos estudos do DNIT para uso no Método de Dimensionamento Nacional de Pavimento.

O trabalho de Fritzen (2016), estabelece uma correlação entre o dano por fadiga e a área trincada. Seu estudo se desenvolveu em torno de avaliações em 6 tipos de misturas asfálticas e 45 pistas experimentais com diferentes condições de tráfego. Essa modelagem foi desenvolvida especificamente para ser aplicada no Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos-MeDiNa. O padrão da evolução da área trincada na função de transferência foi representado por uma curva sigmoidal definida pela equação:

$$AT (\%) = \frac{e^{-A}}{1 - e^{-B}} \quad (19)$$

$$A = \left(\frac{N' - 1}{Z - 1} \right) \quad (20)$$

$$B = \left(\frac{-1}{Z - 1} \right)^n \quad (21)$$

Onde:

Z e n - Parâmetros da curva sigmóide;

$AT (\%)$ - Área trincada estimada em percentual;

N' - Número equivalente deslocado.

N' é uma calibração do número de passagens do Eixo Padrão Rodoviário, foi implementado na expressão da curva sigmóide para minimizar o erro com a evolução da área trincada. A expressão do Número N ajustado pelo Fator de Deslocamento está apresentada a equação abaixo:

$$N' = (N \cdot fS) \cdot 10^{-10} \quad (192)$$

Onde:

N - Número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição da área trincada;

fS - Fator de deslocamento atribuído de forma aleatória até minimizar o erro entre a evolução da área trincada com a curva sigmóide padrão;

N' – Número N ajustado.

De posse da tensão solicitante da passagem do eixo padrão, espessura do revestimento, e suas propriedades elásticas, o *software* MeDiNA calcula a estado de tensões em 10 pontos na face superior e 10 pontos na face inferior da camada de revestimento. Os pontos são distribuídos em uma grade com os 10 pontos dispostos na direção horizontal a partir do centro do carregamento (considerando o eixo padrão) – ponto 0 cm até 32,85 cm na superfície e na face inferior da camada asfáltica.

De cada ponto é extraído a informação da deformação específica, e com o uso da curva de fadiga do material asfáltico é determinado sua respectiva vida de fadiga (N_f). O dano médio dos 20 pontos é calculado pela divisão de uma aplicação do eixo de carga padrão rodoviário pelo número permissível de aplicações de eixos de carga (N), expresso por:

$$D_{médio} = \frac{1}{20} \sum \left(\frac{1}{N_f} \right) \quad (203)$$

A informação do dano médio dos 20 pontos é levado à função de transferência por meio da expressão da Função Deslocamento apresentado na equação abaixo, onde os fatores $C1$ e $C2$ são definidos por 1993,7 e 0,3737 respectivamente.

$$fS = C1 \cdot (D_{médio})^{C2} \quad (214)$$

Com todas essas expressões é possível relacionar informações da estrutura resistiva do pavimento- informações laboratoriais- com informações de campo que é a área trincada nas condições reais. Isso garante uma suficiente modelagem do desempenho do pavimento. A expressão final da modelagem da fadiga da camada asfáltica em termos de área trincada e dado na equação abaixo:

$$AT(\%) = \frac{\left\{ e^{-\left[\frac{N \cdot \left(1,993 \left(\frac{1}{20} \sum \frac{1}{N_f} \right)^{0,3737} \right) \cdot 10^{-10}}{0,25-1} \right]^5} \cdot \left\{ e^{-\left[\frac{-1}{0,25-1} \right]^5} \right\} \right\}}{1 - \left\{ e^{-\left[\frac{-1}{0,25-1} \right]^5} \right\}} \quad (225)$$

São duas as deformações, deformações elásticas (reversíveis, resilientes) e deformações plásticas. As últimas, por terem um caráter irreversível, se acumulam a cada operação dos veículos e geram o afundamento de trilha de roda. Cada camada do pavimento é acometida por alguma parcela de deformação permanente total da estrutura. Assim, para estimar-se os afundamentos totais na trilha de roda, é necessário discretizar o mecanismo de deformação de cada um dos materiais componentes das camadas do pavimento.

Esses afundamentos ao longo das trilhas de roda, dificultam a drenagem de água e aumentam o risco de aquaplanagem. Consequentemente, isso traz prejuízos aos níveis de segurança e conforto (SILVA, 2018, p. 52).

Segundo Balbo (2007), a deformação permanente pode resultar na perda de qualidade do pavimento em relação ao rolamento, ocorrendo comumente onde este apresenta baixa capacidade de resistência das camadas inferiores, onde há fluxo de veículos mais pesados e faixas de tráfego estreitas ou canalizadas.

Para o MeDiNa a deformação permanente total do pavimento é a soma da contribuição das deformações de cada camada de solo. A deformação nessas camadas é avaliada pela modelagem dada na equação abaixo XXX proposta de Guimarães (2009). Esse modelo de desempenho foi formulado a partir de ensaios triaxiais em que foi avaliado um padrão de relação entre deformação permanente, estado de tensões e repetições de aplicação da tensão desviadora.

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (236)$$

Onde:

$\varepsilon_p(\%)$ – Deformação Permanente Específica;

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ – parâmetros de regressão do modelo obtidos por ensaio;

σ_3 – tensão confinante em kgf/cm²;

σ_d – tensão desvio em kgf/cm²;

ρ_0 – tensão de referência, considerada com a pressão atmosférica igual a 1 kgf/cm²;

N – número de ciclos de aplicação de carga.

Guimarães (2009), indica os principais fatores que afetam a deformação permanente em solos, quais sejam:

- Tensão: estado de tensões, rotação das tensões principais com o deslocamento da carga de roda e história de tensões.
- Carregamento: magnitude, número de aplicações, duração, frequência e sequência de carga.
- Umidade: percentual, permeabilidade do material, grau de saturação e poropressão.
- Agregado: tipo de agregado, forma da partícula, granulometria, porcentagem de finos, tamanho máximo dos grãos e massa específica real dos grãos.

A determinação dos coeficientes ψ é feita por ensaio triaxial de carga repetida (o método de ensaio ainda não está normatizado pelo DNIT). O equipamento de ensaio é o mesmo do mostrado na figura 12. É aplicado uma série de repetidos carregamentos, variando os valores de tensão confinante e tensão desviadora, e registrado as deformações plásticas que o corpo de prova assume.

A tabela abaixo reúne alguns parâmetros Ψ_i do modelo proposto para diversos materiais, bem como os respectivos coeficientes de correlação obtidos e a classificação dos materiais

Tabela 8 – Parâmetros do Modelo de Previsão da Deformação Permanente.

Item	Material	Classificação	$\varepsilon_p^{esp}(\%) = \Psi_1(\sigma_3)^{\Psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\Psi_3} \cdot (N)^{\Psi_4}$				R^2
			Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	
1	Lateira Acre	Pedregulho	0,105	0,839	- 0,014	0,041	0,939
2	Brita Graduada Chapecó	Pedregulho	0,079	- 0,598	1,243	0,081	0,951
3	Cascalho Corumbaíba	Pedregulho	0,180	- 0,212	0,840	0,443	0,898

4	Laterita de Porto Velho	Pedregulho	0,180	0,470	0,336	0,047	0,809
5	Argila de Ribeirão Preto	LG'	0,206	-0,24	1,34	0,038	0,986
6	Areia Argilosa do ES	LG'	0,643	0,093	1,579	0,055	0,909
7	Solo Papucaia	NS'/NA'	0,244	0,419	1,309	0,069	0,946
8	Areia Fina de Campo Azul/MG	NA	0,050	- 1,579	1,875	0,064	0,868
9	Tabatinga Acre	NG'	Não recomendado				

Fonte: Guimarães (2009).

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

A deformação permanente calculada para cada camada é somada para compor a deformação permanente total utilizada no dimensionamento. Ela é dada pela equação:

$$\delta_{p_{total}} = \sum_i^n (\varepsilon_{p(i)} \cdot h_1) \quad (247)$$

$\delta_{p_{total}}$ – Deformação permanente total;

$\varepsilon_{p(i)}$ – Deformação específica da camada (i);

h_1 – Espessura da camada (i).

3 AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS PELO MEDINA

Neste capítulo será apresentado estruturas dimensionadas através do novo método nacional de dimensionamento de pavimentos. Em seguida os resultados da devida análise comparativa do novo método com o método convencional do DNIT.

➤ RODOVIA AL-145

Tabela 9 – Estrutura do pavimento pelo método DNER.

Camada	Material	CBR	Espessura (cm)
Revestimento	CBUQ	-	4,0
Base	Pedregulho com areia	66%	20,0
Sub-Base	Areia siltosa	31%	15,0
Subleito	Areia siltosa e silte	10%	∞

Fonte: DNER (2009).

Conforme o manual de projeto geométrico do DNIT, essa rodovia é classificada em Sistema Arterial Primário. Com base nessa classificação o MeDiNa avalia a estrutura sob um nível de confiabilidade de 85% e com os seguintes limites de vida de serviço:

- Área trincada admissível no fim da vida de serviço é 30%;
- Deformação permanente total máxima de 13 mm.

Desfrutando da automatização no processo de análise oferecido pelo MeDiNa, o projetista ganha a prerrogativa de poder fazer diversas simulações em seu projeto de pavimentação. A exemplo de: Estabelecer uma configuração de pavimento-espessuras e materiais em cada respectiva camada- e como resultado, o tempo de serviço que essa estrutura suporta o tráfego solicitante; fixar o tráfego e tempo de serviço, e encontrar a estrutura mínima suficiente; avaliar o arranjo das camadas e descobrir qual a melhor solução econômica. (SILVA, 2018, p. 72).

Os resultados apresentados mostram uma folga considerável entre os danos estimados e os danos limites máximos admitidos. Isso sugere que a estrutura pode suportar um número de operações do Eixo Padrão Rodoviário maior, em outras palavras, uma vida de serviço superior aos 10 anos do projeto real. O programa MeDiNa admite avaliações de rodovias com vida de serviço de até 20 anos

Tabela 10 – Estrutura do pavimento pelo método MeDiNa.

Camada	Material	Módulo (MPa)	Espessura (cm)
Revestimento	Concreto asfáltico	3500	5,0
Base	Material granular	400	20
Sub-Base	Solo fino, siltoso ou argiloso	248	15
SL	Subleito	70	0,0

Fonte: MeDiNa (2018).

Com base nos dados apresentados pelo MeDiNa, o pavimento suporta aproximadamente 15 anos de tráfego. A deformação permanente se mantém dentro do admissível durante os 20 anos, no entanto o percentual de área trincada atinge o valor máximo de 30% aos 196 meses de serviço. (Silva, 2018) Além de indicar uma vida de serviço maior que os 10 anos, a robustez da estrutura proposta no projeto básico sugere a possibilidade de uma otimização nas camadas dos materiais e assim fazê-las mais delgadas. Até então, a partir de uma estrutura estabelecida foi avaliado os danos causados pela passagem do eixo padrão dentro de uma vida de serviço. O programa MeDiNa também conta com o recurso de dimensionamento de camada. Neste, o programa retorna a espessura mínima que atende as condições de dano máximo admitidos e a vida de projeto fixada.

A tabela abaixo mostra os resultados da otimização da estrutura com os mesmos materiais e para uma vida de serviço de 10 anos. (Silva, 2018) A camada de base pode ser reduzida pela metade e a sub-base ficou 5 cm mais fina. Os resultados dos danos, sugerem ainda que o critério usado pelo programa para estabelecer essas espessuras foi a espessura mínima executável de camada de solos, 10cm.

Tabela 11 – Otimização da estrutura com o MeDiNa

Camada	Espessura	
Revestimento asfáltico – CBUQ	5,0	
Base	10	
Sub-Base	10	
Danos	Deformação Permanente	7,1 mm
	Área trincada	24,8%

Fonte: MeDiNa (2018).

As conclusões do redimensionamento da estrutura apresentado na tabela acima implicam inteiramente na estrutura monetária para executar tal projeto. Reduzindo a espessura das camadas da base e da sub-base, é possível obter uma economia considerável, tal redução não implica negativamente na segurança da rodovia, pelo contrário, proporciona mais segurança e conforto às pessoas que usufruem da mesma.

Tabela 12 – Redução das camadas de solos

Camada	Valor inicial (cm)	Valor final (cm)	Redução (cm)	Redução percentual (%)
Base	20	10	10	50
Sub-base	15	10	5	33,3

Fonte: Autor (2020).

Aplicando a redução de 50 e 33% no preço total da camada de Base e Sub-Base respectivamente, temos uma redução de aproximadamente 2,2% do preço global da obra. A simples redução nas espessuras das camadas, já concederia um tempo de execução reduzido. A obra ficaria pronta mais cedo e inclusive requerendo menor tempo de interdição das vias para os trabalhos de execução.

4 CONCLUSÃO

De acordo com os objetivos desta dissertação, foram levantados subsídios teóricos sobre os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, do DNER e pelo mecânicos empírico (MeDiNa). Foi realizado um estudo através de bibliográficas, visando discutir o dimensionamento de pavimentos, detalhar os dois métodos de dimensionamento, e posteriormente realizar uma minuciosa comparação entre eles.

A possibilidade de analisar diversas configurações estruturais de pavimentos de forma prática e rápida como a fornecida pelo MeDiNa, configura-se como uma imensa vantagem proporcionada ao projetista. É de suma importância destacar que um projeto de pavimentação requer conhecimento amplo das informações próximo das características e propriedades físicas dos materiais, tal conhecimento é dado no dimensionamento através do MeDiNa, só assim os resultados obtidos poderão ser aplicados de forma correta e precisa.

O MeDiNa, em contrapartida ao dimensionamento pelo método do DNER, indica uma possibilidade de otimização da estrutura no que diz respeito a sua espessura de projeto. A otimização da estrutura se configura como uma das conclusões mais interessantes e importantes desse trabalho, pois exemplificam que diferentes técnicas de dimensionamento, ainda que façam uma concepção suficiente, podem conduzir a estruturas consideravelmente distintas, sobretudo no seu custo.

Tratando-se de economia e custo-benefício, os resultados mostram uma possibilidade significativa de economia ao dimensionar um projeto de pavimentação pelo MeDiNa. Essas oportunidades precisam da devida atenção, sobretudo pela importância que obras de infraestrutura apresentam no país.

5 REFERÊNCIAS

- AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS), **Guide for design of pavement**, Washington, EUA, 1993.
- ALBUQUERQUE, F. S. **Sistema de gerência de pavimento para departamentos de estradas do nordeste brasileiro**. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Ed. Oficina de textos, 2007.
- Benevides, S. A. S, Motta L. M. G., SOARES J. B. **Análise comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos** – empírico do DNER e resiliência da COPPE/UFRJ – em XIV ANPET – Volume 1 – 591-602 – Gramado (2000).
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens-DNIT. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos**. Publicação IPR 704. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, 1998.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR – 719. Rio de Janeiro, 2017.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 134-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 135-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.
- COUTINHO, J.C.P. **Dimensionamento de Pavimento Asfáltico: Comparação do Método do DNER com um Método Mecânico - Empírico aplicada a um trecho**. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP, Ouro Preto, Brasil, 2011.

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

GUIMARÃES, A.C.R **Um método mecanístico-empírico para previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. Tese de Doutorado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Execução de estudos e pesquisas para elaboração de método mecanísticos – empírico de dimensionamento de Pavimentos asfálticos. Convenio UFRJ/DNIT**. Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa>>. Acesso em: 12 de junho de 2020.

MARQUES, Prof. Geraldo Luciano de Oliveira. **Dimensionamento de Pavimentos – Método do DNER**. Universidade Federal de Juiz de Fora Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnia TRN 032 – Pavimentação – UFJF em notas de aula. 2004.

MEDINA, J. MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora Interciência, 3 ed., Rio de Janeiro/RJ, 619 p, 2015.

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, RJ, Brasil, 1991.

PINTO, R. L. **Comparação entre o Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Asfálticos pelo Método Mecanístico-Empírico e os Métodos DNER-PRO 11/79 e DNER-PRO 269/94 para um Segmento Homogêneo da BR-222/CE e Análise de Sensibilidade do Programa SisPavBR/** Rodrigo Lemos Pinto. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2008.

PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. **Pavimentação rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis**. 2ª edição. Rio de Janeiro/RJ, 220p. 2010.

SILVA, R. C.; SOUZA JÚNIOR, J. G.; COSTA, D. P.; AMARAL, L. S.; ROMEIRO JUNIOR, C. L. S.; MUNIZ, D. D. **Análises do Comportamento e Desempenho dos Pavimentos da Via040 - Brasília/DF a Juiz de Fora/MG**. In: X Workshop RDT Recurso de Desenvolvimento Tecnológico nas Concessões Rodoviárias, Brasília/DF. Soluções Técnicas e Aplicadas, 2016.

SOUZA JÚNIOR, J. G. **Aplicação do Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos a Trechos de Uma Rodovia Federal**. Tese de mestrado. UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

SILVA, JOSÉ EMERSON GONÇALVES. **Método nacional de dimensionamento de pavimentos- medina, avaliação da duplicação da AL-145**. 2018. 78 f. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em engenharia civil) – Universidade federal de alagoas, Delmiro Gouveia, 2018. [Orientador: prof. Me. David Anderson Cardoso Dantas]. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/>>. Acesso em: 12 de junho de 2020.