

COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL E RÍGIDO CONFORME NORMATIVAS BRASILEIRAS, EM UMA RODOVIA FEDERAL

THOMAS, Elisa Tais.¹
SILVA, Iago Moenster Carvalho da.²
KAUL, Chirley Taina.³
BERNARDO, Luis Felipe Domingues.⁴

RESUMO

O presente estudo, através da exposição dos resultados de diferentes metodologias de dimensionamento de pavimento flexível e rígido, tem como objetivo a comparação dos mesmos de forma a elucidar como os métodos mais recentes de dimensionamento influenciam na estrutura final do pavimento, com o propósito de auxiliar em futuras tomadas de decisões quanto ao método a ser empregado. Para atingir tal objetivo, foi dimensionado com as mesmas características de tráfego e materiais disponíveis na região da BR-163/PR – Contorno Oeste de Cascavel, pavimento flexível pelo método DNER (1981) e MeDiNa e pavimento rígido pelo método PCA - 1966 e PCA - 1984, comparando-os entre si por tipo de pavimento. Verificou-se que as estruturas dimensionadas pelos métodos MeDiNa e PCA - 1984 se aproximam melhor da realidade, sendo eles mais assertivos ao considerarem fatores condicionantes como: características de materiais, formas de execução do pavimento e esforços aplicados à estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento, Pavimento Rígido, Pavimento Flexível, MeDiNa, PCA.

ABSTRACT

The present study, by exposing the results of different methods for dimensioning road structures for flexible and rigid pavement, aims to compare them to elucidate how the most recent methods of sizing influence the final structure of the pavement, to help in future decision-making as to the method to be used. To achieve this objective, it was designed with the same traffic characteristics and materials available in the region of BR-163 highway, Cascavel West Bypass in the state of Paraná, flexible pavement by the DNER (1981) and MeDiNa methods and rigid pavement by the PCA - 1966 and PCA - 1984 methods, comparing them by type of pavement. It was found that the structures designed by the MeDiNa and PCA - 1984 methods are closer to reality, being more assertive when considering conditioning factors such as material characteristics, pavement execution methods, and efforts applied to the structure.

KEY WORDS: Sizing, Flexible Pavement, Rigid Pavement, MeDiNa, PCA.

1. INTRODUÇÃO

Pavimentar uma via de circulação de veículos, segundo Balbo (2007), tem como objetivo garantir melhorias operacionais para um tráfego mais confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços oriundos de cargas e ações climáticas sem que apresentem processos

¹Discente, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR. E-mail: elisathomas@hotmail.com

²Discente, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR. E-mail: iago.moenster@hotmail.com.

³Docente, Especialista, Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR. E-mail: chirleykaul@gmail.com

⁴Especialista, Engenheiro Civil. E-mail: luisfelipedb@gmail.com

de deterioração de modo prematuro a um mínimo custo possível. Para Andrade (2017), uma rodovia com más condições de pavimento, além de não garantir o conforto e a segurança, aumenta o custo operacional do transporte e também causa prejuízos ambientais, pois danificam os veículos e aumentam o consumo de combustível. O transporte de cargas e passageiros no Brasil ocorre predominantemente através das rodovias, e este fato somado ao acréscimo expressivo do fluxo de veículos nas últimas décadas elevam a demanda por essa infraestrutura (COSTA, 2019).

Segundo Costa (2019), o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), comumente caracterizado como revestimento flexível e um importante componente dos pavimentos, é utilizado em mais de 99% dos trechos pavimentados no país. Nos últimos anos, o mesmo sofreu aumentos sucessivos em seu valor, devido ao preço do seu ligante o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), impactando diretamente nos custos das obras de implantação e manutenção de vias com a consequente diminuição da realização desses serviços essenciais, afetando o setor e a sociedade como um todo, isso somado aos fatos do expressivo crescimento do parque cimenteiro nacional e o pleno abastecimento do mercado, possibilitou a oferta maciça do pavimento rígido em concreto de cimento Portland (Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 2021).

Para tanto, visando melhorias e economicidade no emprego da pavimentação é necessário que seja realizado o adequado dimensionamento das camadas da estrutura do pavimento e escolha de materiais empregados. Dimensionar um pavimento, segundo Senço (1997), consiste em determinar suas camadas de forma que as mesmas resistam, transmitam e distribuam, sem que sofram ruptura ou deformações e desgastes excessivos, as pressões resultantes da passagem dos veículos ao subleito.

Para o estudo apresentado será dimensionado pavimento flexível e rígido, onde para a classificação são utilizados respectivamente como exemplos típicos segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006), pavimentos constituídos por misturas pétreas granulares revestidos por uma camada asfáltica e pavimento executado com lajes de concreto de cimento Portland.

Com essas informações, a justificativa para a realização dessa pesquisa no âmbito social é que, com o apropriado dimensionamento e escolha do tipo de pavimento, considerando a durabilidade, segurança e conforto, é possível a otimização de camadas, materiais e manutenção das vias, visto que grande parte das obras são financiadas pelo governo federal, estadual ou municipal.

Nesse sentido, realizar este trabalho se justifica dentro da relevância pessoal, científico e institucional, auxiliar em futuros dimensionamentos de pavimentos, tratar de quatro métodos de cálculo sendo dois para pavimento rígido e dois para flexível, trazer uma solução de dimensionamento

pouco usual na região (pavimento em concreto de cimento Portland) e trazer conhecimento sobre o método MeDiNa, o qual está em fase de implantação pelo DNIT.

A pergunta a ser respondida com a realização dessa pesquisa será a seguinte: Como é realizado o dimensionamento de pavimento flexível e rígido por diferentes métodos e como a diferença nas metodologias influenciam os resultados, utilizando como parâmetro dados de projeto pré-definidos da duplicação da BR-163/PR – Contorno Oeste de Cascavel?

Este estudo está limitado ao dimensionamento realizado para a BR-163/PR – Contorno Oeste de Cascavel, com 14,28 km de extensão para pavimentos classificados como flexível e rígido. O instrumento de coleta de dados para o dimensionamento será por meio do pré-projeto, projeto executivo e memorial de cálculo da rodovia. A apresentação dos métodos de dimensionamento de cada tipo de pavimento, de acordo com as normas brasileiras, e também dos materiais que serão utilizados nas camadas dos mesmos. Posteriormente, será realizada a comparação entre métodos expostos e sua influência em seus respectivos resultados.

De acordo com todas as informações expostas anteriormente, este trabalho terá como objetivo geral comparar como as metodologias influenciam nos diferentes resultados de dimensionamento de pavimento flexível e rígido para 10 e 20 anos de duração, respectivamente.

Salienta-se que para que este trabalho científico possa ter pleno êxito, os seguintes objetivos específicos serão propostos:

- a) Dimensionar pavimento flexível através dos métodos Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER de 1981 e MeDiNa;
- b) Dimensionar pavimento rígido através dos métodos desenvolvidos pela Portland Cement Association – PCA de 1966 e 1984;
- c) Comparar a diferença nos métodos de cálculo e sua influência nos resultados.

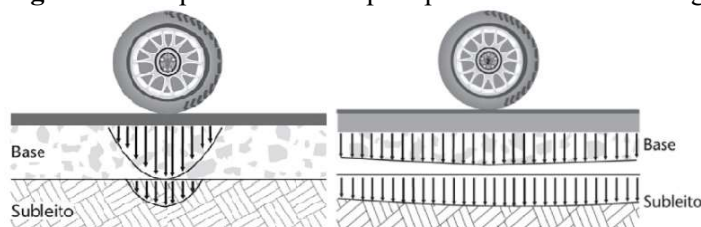
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos e itens de maior relevância para o entendimento e realização do dimensionamento dos diferentes tipos de pavimentos e comparação dos métodos e resultados.

2.1. TIPOS DE PAVIMENTOS

Segundo Balbo (2007), para a caracterização dos tipos de pavimento temos como diretriz de análise as respostas estruturais dos materiais analisados isoladamente e do pavimento com um todo, quando aplicado uma carga, conforme demonstrado na Figura 1. Para o pavimento flexível verifica-se um campo de tensão muito concentrado próximo a aplicação de cargas atuantes, em pavimentos rígidos é constatado um campo de tensão bem mais disperso, com cargas distribuídas na extensão de uma placa proporcionando menos esforços verticais nas camadas de base inferiores ao revestimento do pavimento.

Figura 1 - Resposta estrutural para pavimento flexível e rígido respectivamente



Fonte: Adaptado - Balbo (2007).

Para Pinto e Preussler (2010), o pavimento rígido é aquele o qual o revestimento absorve praticamente todas as tensões dos carregamentos aplicados na pista, ou seja, o revestimento tem uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores. No pavimento flexível a carga se distribui proporcionalmente entre todas as camadas inferiores ao revestimento, todas as camadas sofrem deformação elástica significativa nos seus respectivos materiais.

Para cada nova pista a ser implantada, a melhor escolha para o tipo de pavimento varia conforme características regionais, clima, disponibilidade de materiais e equipamentos, mão de obra, traçado da pista, solicitações na qual serão impostas e custos (MORAES, 2021).

2.2 CAMADAS DE PAVIMENTOS

O pavimento é constituído de uma estrutura em camadas, as quais possuem funções de receber e transmitir esforços aliviando a pressão nas camadas mais inferiores, onde as mesmas, não necessariamente, são menos resistentes. As cargas externas (veículos e demais utilitários) geram esforços verticais e horizontais que se tratam de solicitações de compressão e cisalhamento, assim sendo necessária a análise correta dos materiais empregados em cada camada. As camadas são

compostas por revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, não necessariamente constituído por todas as citadas (BALBO, 2015).

Conforme mostra a Figura 2, é possível verificar exemplos típicos de estruturas de camadas para pavimentos flexíveis e camadas para pavimentos rígidos.

Figura 2 - Exemplos típicos de camadas estruturais para pavimento flexível e rígido respectivamente

Revestimento asfáltico	
Base	Placa de concreto de cimento Portland
Sub-base	Sub-base
Reforço do subleito	Reforço do subleito
Subleito	Subleito

Fonte: Adaptado de Bernucci, *et al.* (2006).

2.2.1 Revestimento

Segundo Senço (1997), o revestimento trata-se da camada mais nobre do pavimento. Analisado de forma estrutural, esta é a qual recebe diretamente o tráfego da pista, trazendo durabilidade e também melhores condições de rolamento, conforto e segurança do mesmo. Para o seu dimensionamento é necessária a escolha de seu material a qual deve ser considerada a questão econômica, pois se trata da camada com o maior custo unitário do pavimento, onde o mesmo é determinante para o tipo de pavimento que será implantado e quais as próximas camadas a serem consideradas.

2.2.2 Base e sub-base

Sua função é de resistir e distribuir esforços verticais solicitados pelo tráfego da pista. A resistência da base está diretamente associada às propriedades de resistência e rigidez do material utilizado, que pode ser o mesmo para a sub-base, mas com características tecnológicas superiores. Sobre a camada de base é realizado o revestimento do pavimento, entre estas geralmente se faz necessário a execução de uma camada de imprimação ou pintura de ligação (camada fina de material asfáltico sobre a superfície), a qual promove impermeabilização, aderência entre as camadas e fixação de partículas soltas (CNT, 2017).

Quando necessário pode ser executado uma camada de sub-base, complementar a base, quando a mesma tiver espessura demasiadamente elevada. Possui a mesma função da base além de drenar infiltrações e controlar a ascensão capilar da água (CNT, 2017).

2.2.3 Reforço do subleito e subleito

O reforço do subleito é uma camada estabilizada granulometricamente, implementada quando necessário sobre o subleito para reduzir espessuras elevadas da sub-base que ocorre geralmente quando o subleito possui baixa capacidade de suporte (DNIT, 2010).

Para Castro Filho (2016), o subleito é a camada do pavimento composta por solo natural, beneficiado de compactação ou adensamento do mesmo, pode-se realizar a adição de agentes estabilizadores como cimento, cal e emulsões asfálticas visando a melhora de sua resistência de suporte às cargas oriundas das demais camadas.

Analisando as características de resistência do subleito entre tipos de pavimento, o pavimento de revestimento rígido possui maior indicação para solos que possui um baixo índice de suporte do subleito, ao contrário do revestimento flexível que exige uma alta resistência, sendo indicado para solos que possuem um alto índice de suporte. No caso analisado, a aplicação do revestimento flexível empregado corretamente traz economia na sua implantação, pois não seria necessária a execução de camada de reforço e ou sub-base, diminuindo a espessura do pavimento e volume de serviço (COSTA, 2013).

2.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL

O método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis DNER (1981), do atual DNIT, tem como base o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo do subleito e o Número de Equivalência de Eixos (N) que representa o tráfego a partir do número de repetições de carga de um eixo padrão e Fator de Equivalência de Carga (FEC) levando em conta o período de projeto, que tem como princípio, através destes parâmetros, dimensionar espessuras de camadas granulares para proteção do subleito (CHIARELLO *et al.*, 2019).

Segundo Franco (2007), os métodos empíricos são desenvolvidos com base em certos tipos de pavimentos, materiais e condições ambientais e de tráfego, que não atendem necessariamente as

características da região do projeto em questão, surgindo então a necessidade da modelagem mecanicista empírica para consideração destes efeitos.

Enquanto o método vigente se concentra na análise da deformação apenas do subleito, o novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) avalia as tensões, deformações e deslocamentos de todas as camadas do pavimento. Busca-se, com sua implementação, uma maior vida útil e consequente redução nos custos de manutenção do pavimento (DNIT, 2020).

O MeDiNa objetiva, de acordo com os preceitos do modelo empírico-mecanicista, vincular os dados relacionados aos materiais, condições ambientais e o tráfego aplicado da localidade do projeto ao dimensionamento. Para o cálculo das tensões e deformações, os melhores materiais e as espessuras das camadas são definidos por meio de correlações e da rotina de análise elástica de múltiplas camadas (AEMC), relacionando os valores críticos das tensões e deformações com a fadiga causada ao pavimento, resultando a verificação de espessura das camadas e análise de satisfação das resultantes do dimensionamento (CHIARELLO *et al.*, 2019).

2.4 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO

Segundo Balbo (2009), a pavimentação rígida em concreto se trata nos casos em que a camada de revestimento ou rolamento é projetada em concreto, trazendo em sua composição agregados e ligantes hidráulicos. As técnicas de execução disponíveis são *in loco* ou pré-moldadas, variando as especificações de projeto. Uma das características estruturais e construtivas dos pavimentos de concreto simples – PCS, são placas de concreto moldadas *in loco*, com presença de juntas transversais e longitudinais devida à retração hidráulica do concreto fresco (fissuração), nas juntas transversais é considerado barras de transferências de cargas, as quais possuem a função de fazer com que as cargas aplicadas no pavimento sejam distribuídas para as demais placas, provocando uma trabalhabilidade simultânea das mesmas. Nas juntas longitudinais são consideradas barras de ligações as quais tem a função de não permitir o deslocamento horizontal das placas de concreto.

A Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP divulga o método de dimensionamento de pavimento rígido de concreto simples (PCS), desenvolvida pela *Portland Cement Association* – PCA, a qual traz a teoria de *Westergaard* de placas apoiadas considerada como base teórica para o método de dimensionamento da versão de 1966 e 1984. É considerado para o cálculo a lei da fadiga do concreto sob a ação de cargas repetitivas aliada a lei de Miner para as tensões de tração na flexão

e também o parâmetro K , para o subleito que é o módulo de reação de *Winkler* (MEDINA e MOTTA, 2005).

O método PCA – 1966, considera que as trincas causadas pela fadiga das rodas dos caminhões são ocasionadas pela tensão máxima da placa na direção transversal na posição das juntas em placas largas, as quais resultam em trincas longitudinais, já o método PCA – 1984, considera que as trincas causadas pela fadiga são ocasionadas pela tensão máxima da placa na direção longitudinal também na posição das juntas em placas agora estreitas, as quais resultam em trincas transversais (MEDINA e MOTTA, 2005). Para essas análises, uma grande diferença entre os métodos é que para o método PCA – 1984 é considerada a adoção de barras de transferência de carga entre juntas e se o pavimento será constituído de acostamento pavimentado em concreto, o qual melhora o desempenho do pavimento (BALBO, 2009). Ainda segundo Balbo (2009), outra análise considerada para o método com relação a sua ruptura se trata da contaminação e erosão do subleito, motivada pelo bombeamento de finos do subleito, sendo ela mais importante em casos sem barras de transferência de cargas e placas aplicadas sobre solos de fundação ou bases granulares.

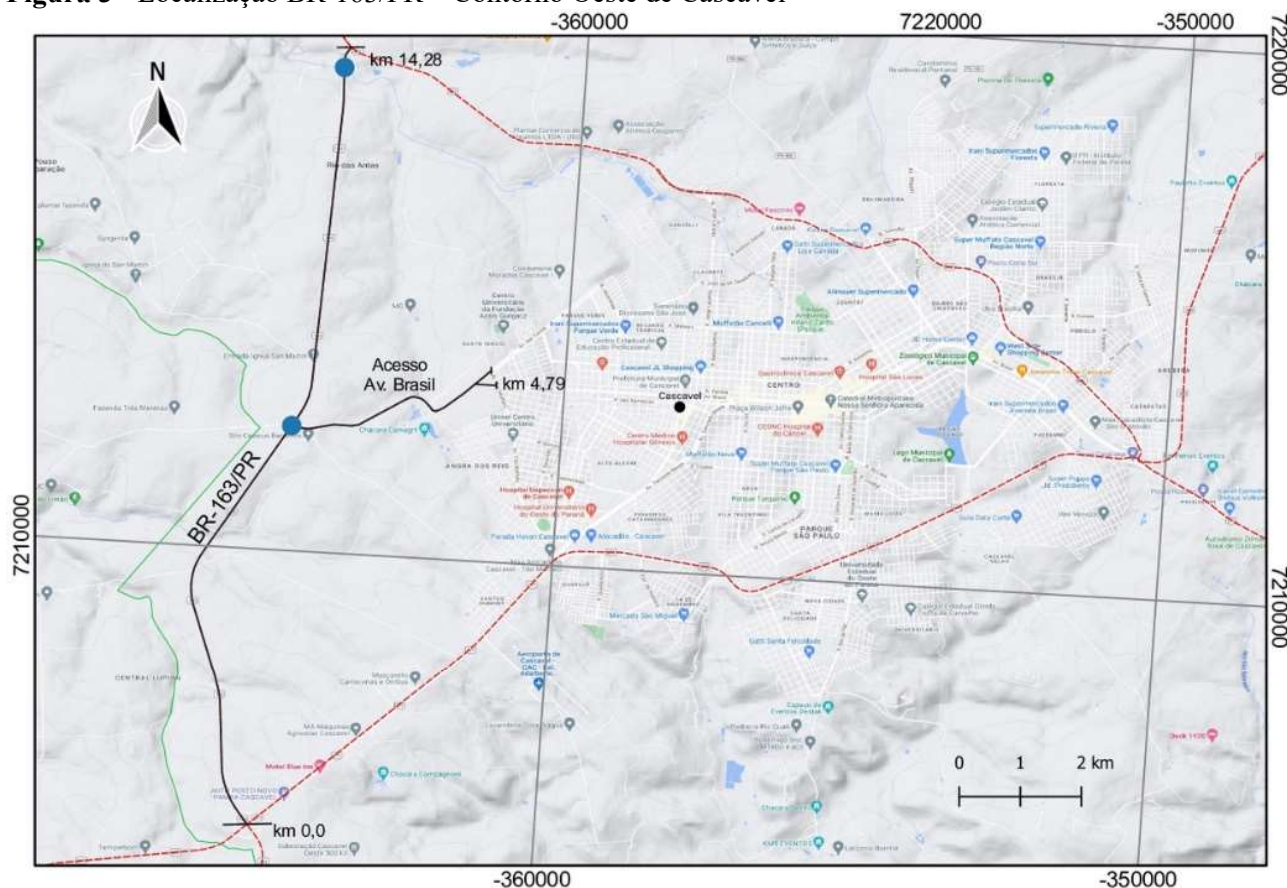
Para ambos os métodos é necessário que inicialmente seja realizado o cálculo de Números Equivalentes (N) de eixos totais por classe de carga a partir do volume total de tráfego, sendo os eixos classificados em eixos simples, eixos tandem duplos e eixos tandem triplos, com suas respectivas cargas que irão atuar no pavimento durante a vida útil prevista para o projeto (DNIT, 2006).

3. METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA E COLETA DE DADOS

Trata-se de uma pesquisa bibliográfica, de caráter descritivo e de cálculo com dimensionamento de pavimento flexível e rígido. O estudo utilizou como base de dados o trecho da BR-163/PR – Contorno Oeste de Cascavel, com 14,28 km de extensão, apresentado na Figura 3, por meio do pré-projeto, projeto executivo e memorial de cálculo da rodovia.

Figura 3 - Localização BR-163/PR – Contorno Oeste de Cascavel



Fonte: Autor (2022).

3.2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL

3.2.1 Estrutura dimensionada pelo método DNER (1981)

A estrutura de pavimento flexível foi dimensionada seguindo a norma do Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER de 1981, atual DNIT, e foi elaborada com posse do valor de Índice de Suporte Califórnia (CBR), obtido em laboratório por meio da norma NBR 6562 (ABNT, 2017), e também com o número equivalente (N) de operações de um eixo padrão, ambos os dados retirados de estudos do projeto de referência mencionado acima.

Conforme norma DNER (1981), os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constituintes do pavimento seguem a tabela 6 da mesma norma, e os mesmos foram designados genericamente por: Revestimento (Kr), Base (Kb), Sub-base (Ks), Reforço (Kref).

A fixação da espessura mínima para o revestimento betuminoso (R), e também, o seu tipo varia em relação ao número N e foram definidos conforme o recomendado pelo DNER (1981) através da tabela 7 da mesma norma.

Para a espessura total do pavimento (Hm), para a espessura acima do reforço do subleito (Hn) e para espessura acima da sub-base (H20), que se dá em função de N e do valor de ISC ou CBR, utilizou-se o gráfico da figura 2 da norma do DNER (1981).

Conforme DNER (1981), uma vez determinadas as espessuras Hm, Hn, H20, pelo gráfico da figura 2 e R, pela tabela 7, as espessuras da base (B), sub-base (h20) e reforço do subleito (hn) são obtidas pela resolução sucessiva das Inequações 1, 2 e 3:

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (1)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (2)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m \quad (3)$$

Tem-se que a espessura construtiva mínima para qualquer camada granular é de 15 cm (DNIT, 2006).

3.2.2 Estrutura dimensionada pelo método MeDiNa

A interface do *software* MeDiNa, apresentada na Figura 4, é dividida em três abas: Estrutura, Modelagem e Resultados. Ao abrir o *software* o mesmo direciona a aba de Estrutura, onde foram inseridas as informações de projeto, que é dividida em quatro seções: identificação do projeto; dados da estrutura do pavimento; dados sobre as informações do tráfego; e painel de resumo dos resultados das análises ou dos dimensionamentos (COSTA, 2021).

Figura 4 - Tela inicial do programa MeDiNa

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: iagomoenster EMPRESA: Iago Moenster

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

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	8,2	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaiss 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

Entre com os dados dos materiais

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

--- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---

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

Nível de confiabilidade da análise: 85%

Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 29,1%

Afundamento de Trilha de Roda: 4,8mm

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

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: MeDiNa (2022).

As características dos materiais que compuseram as camadas do pavimento foram inseridas no *software* na aba Estrutura. Os dados em comum necessários para a caracterização dos materiais foram espessura, coeficiente de Poisson, módulo de resiliência e massa específica. Além disso, para misturas asfálticas informou-se a granulometria da mistura, teor de asfalto, volume de vazios, abrasão Los Angeles e a curva de fadiga. Para material granular os dados foram, umidade ótima, abrasão Los Angeles e deformação permanente. Para bases cimentadas, inseriu-se os dados de teor ótimo de cimento, resistência à tração, umidade ótima e fadiga. Para subleito indicou-se a umidade ótima e os dados de deformação permanente.

Em cada material, ainda, verificou-se a condição de aderência entre as camadas, sendo aderido para os casos de camada asfáltica sobre outra camada asfáltica, camada asfáltica sobre camada antirreflexo de trincas e tratamento superficial sobre camadas asfálticas, e não aderido para as demais situações.

Após a definição das propriedades das camadas do pavimento selecionou-se o tipo de via, que define o nível de confiabilidade e os critérios de dimensionamento relativos à fadiga e ao Afundamento de Trilha de Roda, e então alterou-se o Volume Médio Diário (VMD) no ano de

abertura do tráfego de forma que o número equivalente total de passagem de um eixo padrão (N Total) atingisse o valor do projeto de referência, não sendo realizado o cálculo pelo *software*.

Realizado o preenchimento dos dados, foi selecionado o modo que o programa processou os mesmos, sendo neste caso Pavimento Novo (Nível A), onde as propriedades das camadas são obtidas por ensaios laboratoriais.

O dimensionamento pelo método MeDiNa foi realizado em primeiro momento de forma a reproduzir as mesmas espessuras e materiais da estrutura dimensionada pelo método DNER (1981), a fim de realizar a análise quanto ao desempenho da mesma a partir da opção “Avaliar a estrutura”. Por fim, realizou-se um novo dimensionamento, dessa vez determinando as espessuras das camadas através do *software*, possibilitando a comparação.

Na aba Resultados foram verificados os relatórios, que são descritos por Franco e Motta (2020):

- Evolução Mensal de Danos, que apresenta os resultados do comportamento da área trincada, da deformação permanente total e do Módulo Sigmoidal quando houver camadas cimentadas na estrutura;
- Afundamento da Trilha de Roda, com a contribuição de cada camada na deformação permanente total na estrutura ao fim do período de análise;
- Bacias de Campo, que apresenta as bacias de deflexão no topo de cada uma das camadas e no topo do subleito;
- Relatório Completo da Análise, que apresenta todas as informações utilizadas no dimensionamento da estrutura.

3.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO

3.3.1 Método PCA – 1966

O método PCA – 1966, descrito a seguir para o dimensionamento de pavimento rígido de concreto é normatizado e referenciado no Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005). Os passos seguidos foram:

1 – Definição dos parâmetros iniciais do pavimento:

a) Resistência característica à tração na flexão aos 28 dias, resistência referente ao concreto, aconselhado segundo o manual citado é a utilização de 4,5 MPa (cerca de 40kgf/cm²);

b) Fator de segurança (FSC), determinado por tipo de pavimento conforme quadro 25 apresentado na Figura 5. Para o referido dimensionamento foi considerado o valor de 1,2 devido que a rodovia dimensionada se trata de uma rodovia “classe A”, faixa dupla em cada sentido e com grande volume de caminhões pesados.

Figura 5 - Fatores de segurança para as cargas (FSC)

Quadro 25 - Fatores de segurança para as cargas (FSC)

Tipo de Pavimento	FSC
– estradas rurais, ruas residenciais e vias em geral, submetidas a tráfego leve de caminhões	1,0
– rodovias e vias urbanas, submetidas a tráfego de caminhões pesados	1,1
– auto-estradas, rodovias com mais de duas faixas por pista, ou em qualquer projeto para tráfego ininterrupto ou de grande volume de caminhões pesados	1,2

Fonte: DNIT (2005).

c) Tráfego esperado para cada nível de carga e de acordo com a vida de projeto do pavimento, trata-se do cálculo de eixos totais por classe de carga para um tempo de projeto mínimo de pavimento em concreto de 20 anos (Número de Repetições Previstas), conforme Quadro 10 do manual.

Os dados anteriormente citados e os de definição inicial de camadas, materiais, tráfego esperado e Índice Suporte Califórnia (CBR) citado a seguir, foram coletados de estudos do projeto de referência da BR-163/PR – Contorno Oeste de Cascavel.

2 – Adotou-se uma espessura-tentativa para o concreto conforme quadro 26 da norma.

3 – Determinou-se as tensões na placa de concreto com relação as cargas por eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, dependendo o caso, contendo:

a) Espessura (H) adotada para a placa;

b) Coeficiente de recalque do sistema (K) que se refere às pressões verticais transmitidas para o subleito e sub-base do pavimento pela placa do concreto. Para determinação utilizou-se a figura 11 (relação entre Índice Suporte Califórnia - CBR e Coeficiente de recalque) e figura 21 (Aumento de k devido à presença de sub-base concreto rolado) presentes na norma citada.

Com a relação de H e K foram utilizados os Ábacos apresentados nas figuras 31, 32 e 33 presentes no manual. Inseriu-se os valores encontrados no quadro 26, coluna 3.

4 – Calculou-se a Relação de Tensões dividindo a Tensão na Placa (coluna 3) pela Resistência Característica à Tração na Flexão do concreto, com o resultado desta operação determinou-se o Número de Repetições Admissíveis, utilizando o quadro de número 27. Inseriu-se os valores definidos nas colunas 4 e 5 do formulário-tipo do quadro 26.

5 – Na coluna 6 do formulário-tipo foi inserido o Número de Repetições Previstas de cargas para cada solicitação de carga e tipos de eixos, conforme apresentado no estudo do levantamento de tráfego já realizado, para o caso foram extraídas as informações de projeto de referência citado anteriormente.

6 – Calculou-se o consumo de resistência à fadiga para cada carga e tipo de eixo, onde foi dividido o Número de Repetições Previstas (coluna 6) pelo Número de Repetições Admissíveis (coluna 5), esta divisão resultou no Consumo de Resistência à Fadiga inserido na coluna 7 do formulário-tipo em porcentagem.

7 – Somou-se os valores de porcentagem de Consumos de Fadiga (coluna 7) do quadro 26, verificou-se se a espessura-teste, inicialmente determinada para o concreto, se atendida às solicitações, que a soma destas colunas não deve ultrapassar 100% da solicitação.

Foram analisados os valores totais resultantes da porcentagem do Consumo de Fadiga, para o caso em que estava próximo a zero (%), a espessura do pavimento foi considerada como satisfeita, porém estaria superdimensionada, sendo assim, foi feita uma nova análise com uma nova espessura-teste obtendo um resultado mais próximo a 100%. No caso em que ultrapassou a 100%, o pavimento foi considerado como insuficiente, sendo assim, repetiu-se a verificação acima descrita com uma espessura-teste maior.

3.3.2 Método PCA – 1984

O método PCA – 1984, descrito a seguir para o dimensionamento de pavimento rígido de concreto é normatizado e referenciado no Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005). Os passos seguidos foram:

1 – Definição dos parâmetros iniciais do pavimento:

- a) Tipo de acostamento e adoção ou não de barras de transferência;
- b) Resistência característica à tração na flexão aos 28 dias, resistência referente ao concreto, aconselhado segundo o manual citado é a utilização de 4,5 MPa (cerca de 40kgf/cm²);

c) Fator de segurança (FSC), determinado por tipo de pavimento conforme quadro 25 da Figura 5, onde, para o referido dimensionamento foi considerado o valor de 1,2 devido que a rodovia dimensionada se trata de uma rodovia “classe A”, faixa dupla em cada sentido e com grande volume de caminhões pesados.

d) Tráfego esperado para cada nível de carga e de acordo com a vida de projeto do pavimento, trata-se do cálculo de eixos totais por classe de carga para um tempo de projeto mínimo de pavimento em concreto de 20 anos (número de repetições previstas), conforme quadro 10, da norma.

Os dados anteriormente citados e os de definição inicial de camadas, materiais, tráfego esperado e Índice Suporte Califórnia (CBR) citado a seguir, foram coletados de estudos do projeto de referência da BR-163/PR – Contorno Oeste de Cascavel.

2 – Adotou-se uma espessura-tentativa para o concreto, conforme quadro 11, que se encontra na norma.

3 – Determinou-se Tensão Equivalente referente aos eixos dos veículos com as influências de acostamento no pavimento conforme Quadros 14 e 15 da norma citada, contendo:

a) Espessura (H) adotada para a placa;

b) Coeficiente de recalque do sistema (K) que refere as pressões verticais transmitidas para o subleito e sub-base do pavimento pela placa do concreto. Para determinação utilizou-se a figura 11 (relação entre Índice Suporte Califórnia - CBR e Coeficiente de recalque) e figura 21 (Aumento de k devido à presença de sub-base concreto rolado) presentes na norma citada.

Os valores encontrados foram inseridos nos campos 8, 11 e 14 conforme classificação de eixos simples, tandem duplos ou tandem triplos, do formulário do quadro 11.

4 – Determinou-se os Fatores de Erosão que se trata da força que uma carga tem para impor uma deformação vertical à placa, agregada ao parâmetro de erosão, considerando o tipo de junta utilizado para o pavimento e seu acostamento, sendo neste caso com barras de transferência e acostamento em concreto, conforme os quadros 22 e 23 da norma citada.

Foi informado a espessura (H) e (K) previamente determinados;

a) Determinou-se o Fator de Erosão, para os eixos simples, tandem duplos e tandem triplos;

b) Reescreveu-se os resultados para os espaços 10, 13 e 15 do formulário apresentado no quadro 11.

5 – Calculou-se os Fatores de Fadiga (tensão equivalente dividido pela resistência característica à tração na flexão aos 28 dias) conforme indicados nos campos 9, 13 e 16 do formulário apresentado no quadro 11, para os eixos simples, tandem duplos e tandem triplos.

6 – Após o cálculo do Fator de Fadiga e as cargas por eixos simples e tandem duplos, determinou-se o número de repetições admissíveis na coluna 4 do quadro 11, pela figura 27 da norma, Análise por Fadiga. Para o Consumo de Fadiga na Análise por Erosão foi utilizada a figura 29 da norma referenciada.

7 – Dividiu-se o número de repetições previstas pelas respectivas repetições admissíveis, determinadas pela Análise por Fadiga como na Análise por Erosão, resultando na determinação das porcentagens do Consumo de Fadiga, assim inserido os respectivos resultados para as colunas 5 e 7, do quadro 11.

8 – Somou-se os valores de porcentagem de fadiga (coluna 5) e porcentagem de erosão (coluna 6) contidos no quadro 9, foi verificado se a espessura-teste inicialmente determinada para o concreto atendeu às solicitações, sendo a soma destas colunas não ter ultrapassado 100% da solicitação.

Foram analisados os valores totais resultantes da porcentagem do Consumo de Fadiga, para o caso em que estava próximo a zero (%), a espessura do pavimento foi considerada como satisfeita, porém estaria superdimensionada, sendo assim, foi feita uma nova análise com uma nova espessura-teste obtendo um resultado mais próximo a 100%. No caso em que ultrapassou a 100%, o pavimento foi considerado como insuficiente, sendo assim, repetiu-se a verificação acima descrita com uma espessura-teste maior.

3.4 COMPARAR A DIFERENÇA NOS MÉTODOS DE CÁLCULO E SUA INFLUÊNCIA NOS RESULTADOS

Para a apresentação dos resultados obtidos pelo dimensionamento de ambos os pavimentos, foram realizados desenhos tipos no *software* AutoCad das camadas para cada tipo de pavimento com suas espessuras e materiais empregados. Para a comparação foram consideradas as espessuras das camadas e seus métodos de dimensionamento ao que tange as características técnicas consideradas em cada método e tipo de pavimento.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 PAVIMENTO FLEXÍVEL

4.1.1 Coleta de dados pavimento flexível

O dimensionamento do pavimento flexível para ambos os métodos se utilizou do mesmo número equivalente (N) de operações de um eixo padrão, dado este retirado do projeto de referência e com valor de $9,22E+07$ para o período de projeto de 10 anos.

O método DNER (1981) foi elaborado com posse do valor de CBR para o subleito de 11%, coletado do projeto de referência, e o CBR da base e sub-base de 80% e 20% respectivamente, sendo o mínimo estabelecido em norma.

O coeficiente de equivalência estrutural (K) foi fixado através da tabela 6 da norma do DNER (1981) após a definição das camadas do pavimento. Está apresentado seu valor para cada camada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição da camada e respectivo coeficiente de equivalência estrutural

Camada	Material	K
Revestimento	CBUQ	2,00
Base	BGTC	1,00
Sub-base	Macadame Seco	1,00
Subleito	Solo	1,00

Fonte: Autor (2022).

Não foi possível obter no projeto de referência todos os parâmetros exigidos para caracterização dos materiais das camadas no *software* MeDiNa, foram adotados então alguns dados de bibliografia e materiais padrões contidos na base de dados do próprio *software*, e até mesmo a combinação destes com os de projeto. Cabe ressaltar que em um dimensionamento real não é recomendada essa metodologia, mas sim realizar os ensaios com os materiais locais que serão utilizados no pavimento.

Para a primeira estrutura dimensionada, utilizou-se o revestimento concreto asfáltico CAPFLEX 60/85 - Faixa “C” modificado por polímero tipo SBS, cujos parâmetros e suas respectivas fontes estão apresentados na Tabela 2, sendo que para a curva de fadiga utilizou-se a mesma do CAPFLEX 65/90 SBS presente na base de dados do MeDiNa.

Tabela 2: Parâmetros do revestimento asfáltico

Parâmetros	Valor	Fonte
Coefficiente de Poisson	0,30	Projeto de referência
Módulo de resiliência (Mpa)	2354	Projeto de referência
Massa específica (g/cm ³)	2,599	Projeto de referência
Resistência a tração (Mpa)	0,98	Projeto de referência
Teor de Asfalto (%)	4,92	Projeto de referência
Volume de vazios (%)	3,62	Projeto de referência
Faixa granulométrica	#19,1 mm – Fx C	Projeto de referência
Abrasão Los Angeles	18,70	Projeto de referência
Coefficiente de regressão K1	3,0e-11	MeDiNa
Coefficiente de regressão K2	-3,535	MeDiNa

Fonte: Autor (2022).

Para a caracterização da base utilizou-se a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) ensaiada por Balbo em 1993, contida na base de dados do *software*. Optou-se por utilizar a “Brita Graduada – C6” também da base de dados do *software* devido a semelhança e a inexistência da caracterização de macadame seco para sub-base conforme metodologia adotada por Chiarello *et al.*, (2019).

Segundo estudos geológicos do projeto de referência, o solo da região é classificado como latossolo roxo, terra roxa estruturada (LR d6; TR). Portanto, para a obtenção do coeficiente c' e do índice e' da Metodologia MCT e a deformação permanente para a caracterização do subleito, utilizou-se a metodologia adotada por Biedacha (2020), onde foram utilizados os resultados obtidos para o solo de Argila de Ribeirão Preto/SP, no estudo da tese de doutorado de Guimarães (2009), o qual consiste na “terra roxa” de ampla ocorrência nos estados de São Paulo e Paraná. Estes e os demais dados para caracterização do subleito estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do subleito

Parâmetros	Valor	Fonte
Coefficiente de Poisson	0,45	Projeto de referência
Módulo de resiliência (Mpa)	900	Projeto de referência
Massa específica (g/cm ³)	1,493	Projeto de referência
Umidade ótima (%)	29,45	Projeto de referência
MCT – Coeficiente c'	1,81	Guimarães (2009)
MCT – Índice e'	1,08	Guimarães (2009)
DP - Coeficiente de regressão Ψ_1	0,206	Guimarães (2009)
DP - Coeficiente de regressão Ψ_2	-0,24	Guimarães (2009)
DP - Coeficiente de regressão Ψ_3	1,34	Guimarães (2009)
DP - Coeficiente de regressão Ψ_4	0,038	Guimarães (2009)

Fonte: Autor (2022).

4.1.2 Resultados pavimento flexível

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados para o dimensionamento pelo método DNER (1981).

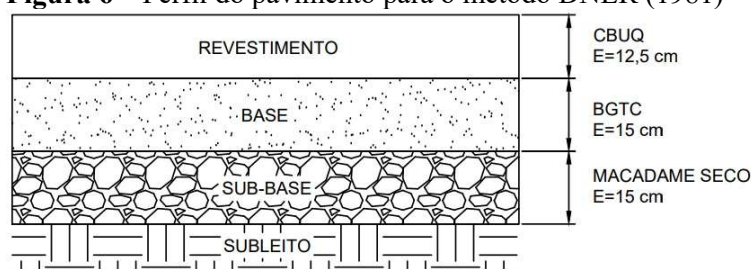
Tabela 4: Resultados – DNER (1981)

Camada	Espessura calculada	Espessura mínima
Revestimento	-	12,50 cm
Base	12,61 cm	15,00 cm
Sub-base	4,81 cm	15,00 cm

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 6 está apresentado o perfil do pavimento dimensionado, com espessuras para cada camada e os respectivos materiais considerados.

Figura 6 – Perfil do pavimento para o método DNER (1981)



Fonte: Autor (2022).

Conforme observado o dimensionamento obteve como resultado espessuras calculadas menores que as mínimas recomendadas pela norma para camadas granulares. A fixação da espessura mínima para o revestimento de concreto betuminoso varia em relação ao número N e foi fixada em 12,5 cm conforme o recomendado pelo DNER (1981) através da tabela 7 da mesma norma para $N > 5E+07$. Não foi necessária camada de reforço do subleito devido ao dimensionamento não resultar em camadas espessas.

Como $N > 10^7$, na inequação (1) apresentada na metodologia, substituiu-se H_{20} por $1,2 \times H_{20}$, conforme recomenda a norma.

Utilizou-se para os dimensionamentos pelo MeDiNa o tipo de via “Sistema Arterial Principal”, onde o nível de confiabilidade é de 95% e os critérios de dimensionamento relativos à fadiga e ao Afundamento de Trilha de Roda são de área trincada de 30% e de deformação permanente de 10 mm.

Ao inserir a estrutura dimensionada pelo método DNER (1981) no MeDiNa e avaliar o seu desempenho utilizando a rotina “Avaliar estrutura”, tem-se que no 25º mês a mesma já estaria comprometida quanto à fadiga, apresentando 31,39% de área trincada. O afundamento de trilho de roda previsto para o pavimento no fim do período foi de 3,76 mm, não ultrapassando o limite de 10 mm para este tipo de via.

Diante da verificação de ineficiência dessa estrutura, foi realizado um novo dimensionamento, considerando as camadas determinadas para o método do DNER (1981) caracterizando-as no MeDiNa com os mesmos materiais especificados anteriormente, em seu máximo de espessura permitido no *software* somente para fim comparativo apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados – MeDiNa

Camada	Material	Espessura máxima
Revestimento	CAPFLEX 60/85 – Faixa “C” com polímero SBS	15 cm
Base	BGTC	30 cm
Sub-base	Macadame Seco	40 cm

Fonte: Autor (2022).

Ao avaliar a estrutura com as espessuras máximas, tem-se que o seu desempenho resultou em uma vida útil de 34 meses, a Tabela 6 apresenta a evolução dos danos no pavimento em relação à fadiga e a deformação permanente conforme o aumento do tráfego no período apresentado.

Tabela 6: Resultados – MeDiNa

Mês	N Equivalente	Área Trincada	Afundamento de Trilho de Roda
1	2,083e+05	2,60%	1,13 mm
6	1,310e+06	5,61%	1,26 mm
12	2,774e+06	8,69%	1,32 mm
18	4,411e+06	12,40%	1,35 mm
24	6,242e+06	17,30%	1,38 mm
30	8,288e+06	23,89%	1,40 mm
34	9,785e+06	29,48%	1,42 mm
35	1,018e+07	31,04%	1,42 mm

Fonte: Autor (2022).

Na tabela apresentada verifica-se que o N equivalente suportado pela estrutura é de 9,785e+06 aos 34 meses. Consta-se que para 35 meses a estrutura possui área trincada de 31,04%, superior aos 30% permitido, constatando a sua ineficiência. Para o afundamento de trilho de roda a estrutura

proposta obteve êxito em seus resultados, sendo que em 120 meses, ou seja, 10 anos de vida útil, apresentou 1,42 mm para o parâmetro máximo de 10,0 mm.

4.2 PAVIMENTO RÍGIDO

4.2.1 Coleta de dados pavimento rígido

Para o dimensionamento do pavimento rígido pelo método PCA de 1966 e PCA de 1984 os seguintes dados, apresentados na Tabela 7, foram coletados do projeto de referência da BR-163/PR – Contorno Oeste de Cascavel.

Tabela 7: Coleta de dados pavimento rígido

Método aplicado	Dados	Resultados
PCA 1966 e 1984	CBR (%)	11
PCA 1984	Acostamento em concreto	Sim
PCA 1984	Barras de transferência	Sim
PCA 1966 e 1984	Material da sub-base	Concreto Rolado
PCA 1966 e 1984	F _{ctm,k} (MPa)	4,5
PCA 1966 e 1984	FSC	1,2

Fonte: Autor (2022).

Encontra-se no Anexo A o estudo de tráfego para cada nível de carga, considerando o número de eixos da frota durante o período de 20 anos de projeto (2019 a 2038). Adotou-se o tráfego no sentido que foi implantada a duplicação e projetado com taxa de correção de 3,16% para ônibus e 4,48% para caminhões para o ano de abertura, conforme apresentado em projeto da rodovia.

4.2.2 Resultados pavimento rígido

Para os dimensionamentos propostos, em ambos os casos, os cálculos se iniciaram com a determinação do coeficiente de recalque (K) resultando no valor de 58 MPa/m, obtido em função do CBR. Conforme coleta de dados foi considerado como sub-base do pavimento o concreto rolado, devida esta consideração obtivemos através do dimensionamento um aumento do coeficiente de recalque para 164 MPa/m, a normativa seguida sugere que limite este quesito em 150MPa/m.

Em consideração ao estudo de tráfego para cada nível de carga, foi verificado que veículos de eixos tandem simples possuem mais consumo a fadiga do que os veículos de eixos tandem duplos e

triplos. Isto se deve a forma em que as cargas são transmitidas ao pavimento e suas constantes de regressão relacionado ao módulo de resistência do subleito (K), onde a espessura da placa é a variável mais sensível às tensões causados por eixos simples de rodas duplas do que os demais tipos, segundo Balbo (2009).

Na Tabela 8 estão apresentados os valores do método PCA versão de 1966, em que o dimensionamento da espessura-teste aceita encontra-se no Apêndice A.

Tabela 8: Resultados – PCA 1966

Método	Espessura-teste	Análise de fadiga %	Aceitação
PCA - 1966	22 cm	0%	Não
PCA - 1966	20 cm	0%	Não
PCA - 1966	18 cm	0%	Sim
PCA - 1966	17 cm	1012,26%	Não

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 7 está apresentado o perfil do pavimento dimensionado aceito, com espessuras para cada camada e os respectivos materiais considerados.

Figura 7 – Perfil do pavimento aceito para o método PCA - 1966



Fonte: Autor (2022).

O dimensionamento tratado faz a análise a fadiga da placa de concreto, em que é possível verificar que é expressiva a diferença no valor de 0% a 1012,26% para a variação de apenas 1 cm na espessura da placa.

Essa variação é devida a relação de tensões recebida pela placa através da carga dos veículos, onde segundo o manual a relação menor que 0,50 é desprezível. Senço (1997), salienta a importância de classificar os veículos que irão utilizar a via devido as cargas que transmitem à placa, pois a tensão de tração é a que provoca o rompimento da placa de concreto quando atinge a sua resistência limite de fadiga.

O dimensionamento com espessura-teste de 17 cm obteve uma relação de tensão de 0,51, trazendo um resultado de análise à fadiga aproximadamente dez vezes maior, nas condições impostas, que o fator 0,50. Esta relação de tensão define o número admissível de repetições de carga, sendo o

caso dimensionado e aceito, não ter um limite de carga de roda para provocar o rompimento da placa por fadiga.

Na Tabela 9, estão apresentados os valores do método PCA versão de 1984, em que o dimensionamento da espessura-teste aceita encontra-se no Apêndice B.

Tabela 9: Resultados – PCA 1984

Método	Espessura-teste	Análise de fadiga %	Análise de erosão%	Aceitação
PCA - 1984	23 cm	0%	0%	Não
PCA - 1984	22 cm	0%	18%	Sim
PCA - 1984	21 cm	225%	20%	Não
PCA - 1984	17 cm	2024,52%	753%	Não

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 8 está apresentado o perfil do pavimento dimensionado aceito, com espessuras para cada camada e os respectivos materiais considerados.

Figura 8 - Perfil do pavimento aceito para o método PCA - 1984



Fonte: Autor (2022).

As considerações para este método iniciam-se pela adoção em juntas de barras de transferência e adoção da existência de acostamento de concreto no dimensionamento, os quais segundo Balbo (2009) trazem para o dimensionamento uma realidade mais aproximada ao método executivo e reduz os esforços nas placas. A importância da consideração desses itens para o dimensionamento se reflete na tensão equivalente, em que ainda segundo Balbo (2009), garante igual consumo de fadiga simulado para uma situação real, de distribuição transversal do tráfego nas pistas de rolamento.

O valor dimensionado e aceito de espessura-teste para o método foi de 22 cm, tendo a análise a fadiga de 0% e a erosão de 18%.

A análise da fadiga por erosão de um material é analisada na camada de sub-base e subleito, o qual se correlaciona diretamente com o coeficiente de recalque (K), sendo ele inversamente proporcional, e também com a espessura da placa. O mesmo não apresentou grande relação com o resultado final do dimensionamento, nas condições impostas, considerando barras de transferência de

carga, acostamento pavimentado em concreto e sub-base em concreto rolado, como demonstrado nos resultados apresentados. No caso de sub-bases granulares e valores de (K) inferiores a 60MPa/m a análise por erosão tem mais influência no dimensionamento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para os métodos apresentados de dimensionamento para pavimento flexível, observou-se que a estrutura obtida pelo DNER (1981) não apresentou desempenho suficiente para atingir o período de projeto de 10 anos quanto a área trincada, apenas ao afundamento de trilho de roda, utilizando os critérios do método MeDiNa.

A estrutura dimensionada no MeDiNa, tendo como base os materiais disponíveis em projeto, mesmo com as espessuras máximas permitidas para cada camada também não foi suficiente para que o software desse como aceito no fim do período de projeto. Conforme estudo de Chiarello et al., (2019), ao analisar uma estrutura dimensionada pelo método DNER (1981) no MeDiNa que também não atendeu ao período de 10 anos, duas novas estruturas foram dimensionadas de forma que fossem aceitas, em que na primeira quase triplicou a espessura do revestimento asfáltico e na segunda utilizou-se um revestimento da base de dados do software, de classe superior a ensaiada para esse projeto disponível na região, visando diminuir a espessura de revestimento da primeira estrutura. Posto isso, verifica-se a significância da especificação correta dos materiais e para este estudo, optou-se em manter os materiais disponíveis em projeto demonstrando a realidade local e uma estrutura coerente de ser executada e de atender em campo as especificações do material do projeto disponível.

Para fim comparativo no que tange ao pavimento rígido, foi realizado o dimensionamento pelos dois métodos para uma espessura teste de 17 cm de placa, tendo como não aceito para os 2 casos, considerando o mesmo tipo de base em concreto rolado. O método PCA 1984 possui exatamente o dobro de consumo à fadiga que o método PCA 1966, onde uma consideração interessante analisada no cálculo é que o número de repetições previstas de veículos é o mesmo e como resultado, o número de repetições admissíveis de veículos é metade para o método PCA 1984, o qual considera a existência das barras de transferência de carga entre placas e acostamento em placas de concreto.

Em consideração ao método PCA de 1984 e sua inclusão à análise do fator de erosão abaixo da placa (base e subleito), em análise aos resultados foi possível verificar que não é um valor decisivo

para o dimensionamento, nas condições impostas deste estudo, sendo que quanto menor o valor do K, maior o potencial de erosão e quanto maior o módulo de elasticidade do concreto e espessura da placa diminui o potencial de erosão.

A expressiva diferença entre o consumo de fadiga de 1 centímetro, conforme apresentado nos resultados para o método PCA de 1966 entre 17 e 18 cm e no método PCA de 1984 entre 22 e 21 cm, é de importante indagação visto que a norma (DNIT 049/2013-ES) permite como controle do produto, durante a execução do pavimento, que a placa possua uma espessura não menor que o valor do projeto menos 1 centímetro, contrário ao demonstrado no dimensionamento.

Conclui-se que para os métodos apresentados do dimensionamento de pavimento flexível e rígido, o método indicado para ser utilizado no cálculo das espessuras de suas camadas se trata do método MeDiNa e PCA de 1984, devido sua maior proximidade com a realidade, sendo eles mais assertivos ao considerarem fatores condicionantes como características de materiais, formas de execução do pavimento e esforços aplicados à estrutura.

Por fim, para as mesmas condições postas aos dimensionamentos dos dois tipos de pavimento, flexível e rígido, a estrutura que melhor atende às necessidades da região com os materiais disponíveis trata-se do pavimento rígido dimensionado pelo método PCA de 1984, para uma vida útil do pavimento de 20 anos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pavimento de Concreto Amplia Presença no País**. 2021. Disponível em: <<https://abcp.org.br/pavimento-de-concreto-amplia-presenca-no-pais-2/>>. Acesso em: 4 abr. 2022.

BIEDACHA, M. M. **Dimensionamento de pavimento asfáltico pelo método DNER e comparativo com o atual método mecanístico-empírico MeDiNa**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27496/1/PB_COECI_2020_1_09.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

_____. **Pavimentos de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BERIUCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2006. 501 p.

CASTRO FILHO, A. M. **Noções Básicas Sobre Pavimentos Asfálticos**. 1. ed. São Luís - MA: [s. n.], 2017. 52 p. Disponível em: <<http://armandocastro.com.br/wp-content/uploads/2017/08/Ebook29.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2022.

CHIARELLO, G. P.; PASCOAL, P. T.; SANTOS, T. A.; PEREIRA, D. S.; BARONE, M.; GERGING, R. P. Avaliação Estrutural e Financeira de Pavimento Flexível Dimensionado Pelo Método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): Estudo de Caso da Duplicação da BR-287 - Trecho Santa Cruz do Sul à Tabai/RS. **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, 2019. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20II/6_580_AC.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** – Brasília: CNT, 2017. Disponível em: <<https://cnt.org.br/por-que-pavimentos-rodovias-nao-duram>> Acesso em: 12 mar. 2022.

_____. **Transporte rodoviário: impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário**. – Brasília: CNT, 2019. Disponível em: <<https://cnt.org.br/impactos-qualidade-asfalto-transporte-rodoviario>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

COSTA, B. R. **Avaliação da Implantação do Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis pelo Método MeDiNa no Contexto Brasileiro**. Orientador: Liseane Padilha Thives. 2021. 164 p. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) - UFSC, Florianópolis, 2021.

COSTA, J. S. **Análise Comparativa de Alternativas para Pavimentação de Rodovias: Pavimento Flexível x Pavimento Rígido**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/36201/3/2013_tcc_jdscosta.pdf>. Acesso em: 18 maio 2022.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/719_manual_de_pavimentacao.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2022.

_____. **Manual de Pavimentos Rígidos**. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/714_manual_de_pavimentos_rigidos.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2022.

. **DNIT inicia procedimentos para transição do método de dimensionamento de pavimentos**, 2020.

Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-procedimentos-para-transicao-do-metodo-de-dimensionamento-de-pavimentos>>. Acesso em: 27 mar. 2022.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa**, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.coc.ufjf.br/pt/teses-de-doutorado/153-2009/1199-antonio-carlos-rodrigues-guimaraes>>. Acesso em: 12 out. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - IPR. 2010. **NORMA DNIT 138/2010 - ES: Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço**, 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_138_2010_es-1.pdf> Acesso em: 18 mar. 2022.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

MORAES, J. M. M. **Estudo Comparativo Entre Pavimento Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária: Um Estudo de Caso da Obra da Extensão da Avenida Litorânea em São Luís - MA**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco São Luís, 2021. Disponível em: <<http://repositorio.undb.edu.br/jspui/bitstream/areas/571/1/JONAS%20MAGNO%20MACHADO%20MORAES.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2022.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2010. 220 p.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997. 746 p. v. 1.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, 1981 (IPR. Pub. 667).

ANEXO A - Estudo de tráfego para cada nível de carga de acordo com a vida de projeto do pavimento

CARGA (t)	CARGA/EIXO	EIXOS	%				
EIXOS SIMPLES RODA SIMPLES				21.072.994			ESRS
4	4	5.268.249	25,00%	7.443.872			
6	6	15.804.746	75,00%	13.629.122			
total		21.072.994					
EIXOS SIMPLES RODA DUPLA				4.049.035			ESRD
0 - 2	1,2	0					
2 - 4	3,6	0					
4 - 6	6	0					
6 - 8	8,4	0					
8 - 10	10,8	0					
10 - 12	13,2	4.049.035	100,00%				
total		4.049.035	100,0%				
EIXOS TANDEM DUPLOS				24.070.644			ETD
0 - 2	1,2	0					
2 - 4	3,6	0					
4 - 6	6	0					
6 - 8	8,4	0					
8 - 10	10,8	0					
10 - 12	13,2	0					
12 - 14	15,6	0					
14 - 16	18	0					
16 - 18	20,4	0					
18 - 20	22,8	24.070.644	100,00%				
total		24.070.644	100,0%				
EIXOS TANDEM TRIPLOS				15.826.277			
EIXOS SIMPLES				5.275.426			ETT
0 - 2	1,2	0					
2 - 4	3,6	0					
4 - 6	6	0					
6 - 8	8,4	0					
8 - 10	10,8	0					
10 - 12	13,2	0					
12 - 14	15,6	0					
14 - 16	18	0					
16 - 18	20,4	0					
18 - 20	22,8	0					
20 - 22	25,2	0					
22 - 24	27,6	0					
24 - 26	30	0					
26 - 28	32,4	5.275.426	100,00%				
total		5.275.426	100,0%				

Fonte: Projeto Executivo DNIT, Vol. 03 (2019).

APÊNDICE A – Dimensionamento do pavimento rígido pelo método PCA – 1966

CÁLCULO DA ESPESSURA DE PAVIMENTO DE CONCRETO - MÉTODO PCA 1966						
Espessura-tentativa		18	cm	Fctm, K em MPa		4,50
Ksb		150,0	MPa/m	Período de projeto em anos		20
Fator de segurança de cargas, Fsc		1,2	Pavimento com ou sem acostamento de concreto.			
Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	Tensão na placa (MPa)	Relação de Tensões (Col. 3: Fctm,k)	Nº de repetições admissíveis	Nº de repetições previstas	Consumo de resistência à Fadiga (Col. 6: Col. 05) x100
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixos Simples						
0 - 2	1,2	-	-	-	0	0
2 - 4	3,6	-	-	-	0	0
4 - 6	6	-	-	-	0	0
6 - 8	8,4	-	-	-	0	0
8 - 10	10,8	-	-	-	0	0
10 - 12	13,2	2,1	0,47	ilimitado	4.049.035	0
Sub-total						0%
Eixos Tandem Duplos						
0 - 2	1,2	-	-	-	0	0
2 - 4	3,6	-	-	-	0	0
4 - 6	6	-	-	-	0	0
6 - 8	8,4	-	-	-	0	0
8 - 10	10,8	-	-	-	0	0
10 - 12	13,2	-	-	-	0	0
12 - 14	15,6	-	-	-	0	0
14 - 16	18	-	-	-	0	0
16 - 18	20,4	-	-	-	0	0
18 - 20	22,8	2	0,44	ilimitado	24.070.644	0
Sub-total						0%
Eixos Tandem Triplos						
0 - 2	1,2	-	-	-	0	0
2 - 4	3,6	-	-	-	0	0
4 - 6	6	-	-	-	0	0
6 - 8	8,4	-	-	-	0	0
8 - 10	10,8	-	-	-	0	0
10 - 12	13,2	-	-	-	0	0
12 - 14	15,6	-	-	-	0	0
14 - 16	18	-	-	-	0	0
16 - 18	20,4	-	-	-	0	0
18 - 20	22,8	-	-	-	0	0
20 - 22	25,2	-	-	-	0	0
22 - 24	27,6	-	-	-	0	0
24 - 26	30	-	-	-	0	0
26 - 28	32,4	-	-	-	15.826.277	0
Sub-total						0%
Total						0%

Fonte: Adaptado - DNIT (2005).

APÊNDICE B – Dimensionamento do pavimento rígido pelo método PCA – 1984

CÁLCULO DA ESPESSURA DE PAVIMENTO DE CONCRETO - MÉTODO PCA 1984						
Espessura-tentativa	22	cm	Fctm, K em MPa	4,50		
Ksb	150,0	MPa/m	Período de projeto em anos	20		
Fator de segurança de cargas, Fsc	1,2					
Juntas BT	sim	Acostamento de Concreto	Sim			
Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROÇÃO	
			Nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	Nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
EIXOS SIMPLES		4.049.035	Tensão Equivalente (8)	1,07		
			Fator de Erosão (9)	2,21		
			Fator da Fadiga (10)	0,238		
0 - 2	1,2	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
2 - 4	3,6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
4 - 6	6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
6 - 8	8,4	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
8 - 10	10,8	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
10 - 12	13,2	4.049.035	Ilimitado	-	22.900.000	18%
TOTAL				0%		18%
EIXOS TANDEM DUPLOS		24.070.644	Tensão Equivalente (11)	0,89		
			Fator de Erosão (12)	2,21		
			Fator da Fadiga (13)	0,198		
0 - 2	1,2	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
2 - 4	3,6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
4 - 6	6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
6 - 8	8,4	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
8 - 10	10,8	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
10 - 12	13,2	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
12 - 14	15,6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
14 - 16	18	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
16 - 18	20,4	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
18 - 20	22,8	24.070.644	Ilimitado	-	Ilimitado	0
TOTAL				0%		0%
EIXOS TANDEM TRIPLOS		15.826.277	Tensão Equivalente (14)	0,7925		
			Fator de Erosão (15)	2,2375		
			Fator da Fadiga (16)	0,176		
0 - 2	1,2	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
2 - 4	3,6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
4 - 6	6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
6 - 8	8,4	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
8 - 10	10,8	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
10 - 12	13,2	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
12 - 14	15,6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
14 - 16	18	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
16 - 18	20,4	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
18 - 20	22,8	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
20 - 22	25,2	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
22 - 24	27,6	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
24 - 26	30	0	Ilimitado	-	Ilimitado	0
26 - 28	32,4	15.826.277	Ilimitado	-	Ilimitado	0
TOTAL				0%		0%
TOTAL				0%		18%

Fonte: Adaptado - DNIT (2005).