



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

ANÁLISE COMPARATIVA DA VIDA ÚTIL DE PROJETO ENTRE METODOLOGIAS EMPÍRICA, SEMI-EMPÍRICA E EMPÍRICO- MECANÍSTICA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Priscila Rosa Pizutti¹

RESUMO

A referência que baseia os projetos de pavimentação no Brasil é o método do CBR, preconizado no Manual de Pavimentação do DNIT, fundamentando-se nas informações de tráfego, capacidade de suporte do subleito e demais camadas e definição de categorias de materiais a serem empregados. A metodologia é datada da década de 60 e na atualidade as condições de projeto tiveram significativas mudanças, como o aumento da capacidade de carga dos veículos e a utilização de novos materiais de pavimentação. Este trabalho trata-se de um comparativo de vida útil, partindo de seis estruturas pré-dimensionadas pelo método empírico, fixado o período de projeto em 10 anos. Foram estimados números N acumulados para os cenários e na sequência analisados através de verificação mecânica e aplicação de modelos de ruína para a deflexão do revestimento, a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento e a deformação vertical de compressão no subleito. Também foram comparadas as estruturas pelo método da AASHTO (1993), isolando-se o número N. Os resultados foram correlacionados com o cálculo de N acumulado a cada ano, previamente realizado. Constatou-se que para tráfegos leves o método do CBR atende aos esforços solicitantes, podendo até ser considerado um superdimensionamento, já para tráfegos pesados, não se recomenda a finalização do projeto sem a utilização de análises empírico-mecanísticas, visto que a vida útil estaria comprometida. Como linha de corte, para as premissas adotadas, até um N_{USACE} de $1,50 \times 10^6$ o método empírico será eficiente para atender aos esforços solicitantes.

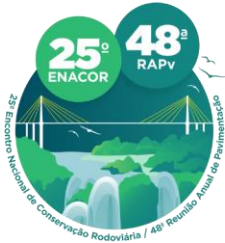
PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento de pavimentos, empírico, mecânico, vida útil.

ABSTRACT

The reference that underlies pavement projects in Brazil is the CBR method, advocated in the Pavement Manual of DNIT, based on traffic information, subgrade support capacity, and other layers, as well as the definition of material categories to be employed. The methodology dates back to the 1960s, and currently, the design conditions have undergone significant changes, such as increased vehicle load capacity and the use of new pavement materials. This work is a comparative analysis of service life, starting from six structures pre-dimensioned by the empirical method, with a fixed design period of 10 years. Cumulative N-values were estimated for the scenarios and subsequently analyzed through mechanistic verification and the application of ruin models for pavement deflection, horizontal tensile strain in the bottom fiber of the pavement, and vertical compressive strain in the subgrade. The structures were also compared using the AASHTO method (1993), isolating the N-value. The results were correlated with the calculation of cumulative N-values performed each year beforehand. It was found that for light traffic, the CBR method meets the demand, and it can even be considered an overdesign. However, for heavy traffic, it is not recommended to finalize the project without the use of empirical-mechanistic analyses, as the service life would be compromised. As a cut-off point, based on the assumptions adopted, up to a N_{USACE} of 1.50×10^6 , the empirical method will efficiently meet the demand.

KEY WORDS: Pavement design, empirical, mechanistic, service life.

¹ Consórcio Supervisor Strata-Proes, lotada no Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, e-mail: priscilapizutti@der.pr.gov.br



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

O intenso crescimento nos volumes de tráfego traz a necessidade de construção de estruturas rodoviárias cada vez mais robustas, capazes de atender esta demanda e as futuras previstas. O acréscimo de investimento trará benefícios de diversos tipos, dentre eles pode-se citar a redução no tempo de viagem, a melhoria no conforto de rolamento, a redução de acidentes e a redução de custos de manutenção (PINTO e PREUSSLER, 2010).

Dentre os principais defeitos verificados nos pavimentos flexíveis pode-se citar o trincamento causado pela fadiga da mistura asfáltica, o afundamento de trilha de roda causado pelo acúmulo de deformação permanente das camadas, desgastes superficiais, envelhecimento do ligante e drenagem insuficiente, sendo os dois primeiros predominantes (RODRIGUES, 2020).

O fenômeno de fadiga é identificado pelo surgimento de fissuras, com origem na face inferior do revestimento e se ramificam até atingir a superfície de rolamento. O trincamento é gerado pelas tensões de tração causadas pela aplicação de carga (GONTIJO *et al*, 2022).

A deformação permanente, causada pela excessiva exposição ao carregamento de veículos, pode ser constatada através de mensuração de trilhas de roda, no entanto, deve-se tomar atenção no momento da classificação do tipo de defeito, pois há manifestações patológicas com características similares, como exemplo as causadas por instabilidade nas misturas (GONTIJO *et al*, 2022).

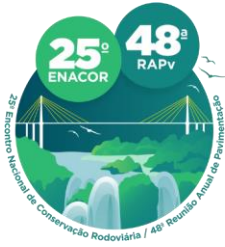
Com o objetivo de proteger o subleito existente dos esforços de tração e compressão advindos das repetições de cargas dos veículos, é projetado o leito estradal, composto de camadas sobrepostas, devidamente dimensionadas, utilizando materiais com propriedades capazes de absorver as solicitações aplicadas em um determinado período de projeto. Balbo (2007) descreve três métodos de dimensionamento, sendo empírico (Método da AASHTO de 1993), obtido através de observações em campo, semiempírico (Método do CBR), obtido pela extrapolação dos resultados de campo e aplicação em base teórica, e o empírico-mecanístico (Análises de tensões e deformações), em que são modelos de laboratório, calibrados e ajustados para modelos teóricos. Há também de se considerar que cada método faz uso de diferentes critérios de ruptura, não sendo possível indicar de modo geral o melhor método a ser adotado.

Motta (1991) salienta que os métodos empíricos são baseados em índices para determinar o comportamento da estrutura, já os métodos mecânicos fazem uso de análises de tensões e deformações para verificar o desempenho em operação.

Em 2018 o DNIT, lançou o novo Método de Dimensionamento Nacional, denominado MeDiNa em homenagem ao engenheiro Jacques de Medina, que introduziu a mecânica dos pavimentos no Brasil. O método foi desenvolvido através do Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR em um Termo de Execução Descentralizado TED 682/2014 com o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro – COPPE. O grande diferencial do método está nos novos ensaios tecnológicos exigidos para a caracterização de todos os materiais constituintes do pavimento, sendo eles: classificação MCT, módulo de resiliência, fadiga e deformação permanente (DNIT, 2020).

OBJETIVO

Este estudo tem por objetivo verificar a sensibilidade de utilização de metodologias de dimensionamentos de pavimento, baseando-se na vida útil, comparando o método do CBR com resultados baseados em modelos de ruína consagrados na literatura para verificação de: deslocamento vertical recuperável na superfície do pavimento, deformação específica de tração na camada betuminosa do revestimento asfáltico e deformação vertical de compressão do subleito. Em complementação, foi realizado comparativo com relação ao método da AASHTO.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



METODOLOGIA

Considerando questões relacionadas ao desenvolvimento de projetos na área de pavimentação, foi realizado o estudo comparativo entre metodologias de dimensionamento.

Inicialmente foram analisadas 5 estruturas pelo método empírico, em que foram variados os carregamentos de tráfego por meio do tipo número N, sendo $1,10 \times 10^5$, $1,10 \times 10^6$, $5,5 \times 10^6$, $1,10 \times 10^7$ e $1,10 \times 10^8$ (USACE), de modo a obter uma seção para cada espessura de revestimento recomendada pelo método.

Posteriormente, no software de análise AEMC, foram avaliadas as deflexões e deformações atuantes pelo eixo padrão rodoviário para cada cenário proposto.

Aplicou-se as equações constantes na instrução normativa do DER-SP (2006) e encontrou-se o N limite para a estrutura em cada uma das verificações. De modo a encontrar a linha de corte entre intercepção da vida útil entre os dois métodos, foi avaliado um sexto cenário (denominado 2.a) em que os 10 anos, utilizados como período de projeto, fossem igualmente atingidos.

Por fim, como complementação ao estudo, foi avaliado o N admissível para ambos os cenários pelo método da AASHTO (1993).

O processo envolveu as etapas de (i) avaliação das metodologias; (ii) cálculo de número N; (iii) dimensionamento pelo método DNER; (iv) verificação empírico-mecanística e (v) aplicação do método da AASHTO.

Método do CBR

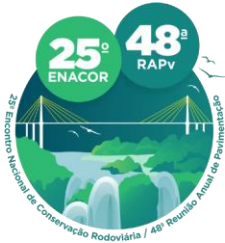
O método vigente no Brasil é datado da década de 60, sendo atualizado na década de 80 pelo Eng^o Murillo Lopes de Souza, encontra-se oficializado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Tem como objetivo principal a proteção do subleito, usualmente denominado método do CBR. Foi baseado no método do *United States Army Corps of Engineers* (USACE), em que as condições climáticas eram diferentes do Brasil, podendo acarretar em superdimensionamentos (DNIT, 2006).

O método do CBR consiste na resolução de um sistema de inequações que determinam as espessuras das diversas camadas, considerado coeficientes estruturais para os tipos de materiais analisados, capacidade de suporte do subleito e esforços solicitantes. O método também fixa espessuras de revestimento baseadas no volume de tráfego, que variam de um tratamento superficial à um revestimento de 12,5 cm de material asfáltico, conforme tabela 1 (DNIT, 2006).

Tabela 1 - 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

Apesar das espessuras expostas de revestimento, o cálculo estrutural deve prevalecer, sendo que as condições específicas de cada obra determinam a necessidade de adequações na estrutura de projeto, ou seja, a espessura do revestimento pode ser rearranjada, desde que as demais camadas sejam redimensionadas, sendo a vida útil atendida (PESSOA JÚNIOR, 2019).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Com o objetivo de verificar as 5 faixas de tráfego previstas na Tabela 1, este trabalho previu uma estrutura dimensionada para cada faixa e, conseqüentemente, cada espessura de revestimento asfáltico. Ao final foi complementado o estudo com uma sexta seção dimensionada para apurar o tráfego limite em metodologia complementar, situando-se entre os Cenários 2 e 3, sendo mais próximo do Cenário 2, sendo denominado de Cenário 2.a.

As variáveis de dados de entrada são o tráfego solicitante, o Índice de Suporte Califórnia e a definição do tipo de material a ser empregado. A equação geral 1 para a obtenção da espessura total se dá por:

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (1)$$

Com a espessura total, aplicam-se as inequações 2 a 4 para se determinar a espessuras das demais camadas necessárias a combater os esforços solicitantes.

$$R K_R + B K_B \geq H_{20} \quad (2)$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S \geq H_n \quad (3)$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} \geq H_m \quad (4)$$

Onde:

R = espessura do revestimento betuminoso, [cm];

K_R = coeficiente estrutural do revestimento betuminoso, [adimensional];

B = espessura da base, [cm];

K_B = coeficiente estrutural da base, [adimensional];

h_{20} = espessura da sub-base, [cm];

K_S = coeficiente estrutural da sub-base, [adimensional];

h_n = espessura do reforço de subleito, [cm];

K_{Ref} = coeficiente estrutural do reforço de subleito, [adimensional];

H_{20} , H_n , H_m = espessuras do pavimento determinadas pela equação 1, [cm].

Crítérios de referência para a análise empírico-mecânica

Com a mecânica dos pavimentos é possível avaliar uma estrutura quanto aos esforços atuantes e solicitante, para que seja garantida a vida útil e as necessárias condições de uso da via, desde que sejam adequadas as premissas de acordo com as características da região de estudo (PINTO e PREUSSLER, 2010).

Para garantir a estabilidade da estrutura, faz-se necessário verificar as possíveis rupturas por cisalhamento, as deformações permanentes e as deformações elásticas. O método do CBR não abrange a verificação da fadiga causada pelas deformações elásticas, fazendo com que os pesquisadores utilizem a Teoria da Elasticidade, determinando módulos para os materiais, a partir de ensaios laboratoriais (PINTO e PREUSSLER, 2010).

Este trabalho baseou-se nos parâmetros e modelos de ruptura preconizados na Instrução de Projeto do DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) para verificar os pontos críticos mencionados:

- Para a verificação do deslocamento vertical recuperável na superfície do pavimento (D_{adm}) a instrução referencia a equação do DNER-PRO 269/94, expressa por:



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



$$\log D_{adm} = 3,148 - \log N_{USACE} \quad (5)$$

- O critério da deformação específica de tração (ϵ_t) na camada betuminosa do revestimento asfáltico indicado na referência se dá pela equação da FHWA de 1976 e é expresso por:

$$N_{AASHTO} = 1,09 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3,512} \quad (6)$$

- A análise do subleito é realizada por comparação da máxima deformação específica vertical de compressão, ϵ_v , atuante no topo do subleito, considerando-se sistema de camadas elásticas, com os valores admissíveis. O critério de fadiga para deformações verticais de compressão do subleito adotado pelo DER/SP (2006) foi proposto por Dormon & Metcalf em 1965 e é expresso pela equação:

$$N_{USACE} = 6,6069 \times 10^{-10} \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^{4,762} \quad (7)$$

Método da AASHTO

Na década de 50, em Ottawa (EUA), foi construída a *AASHTO Road Test*, composta de seis circuitos e durante o período de monitoramento foram verificadas as características de irregularidade, serventia, defeitos, deflexões e deformações. As temperaturas médias variaram de $-2,8^\circ\text{C}$ e $24,5^\circ\text{C}$, com índice pluviométrico anual de 837 mm e profundidade média de congelamento de 711 mm (BALBO, 2007).

Através das constatações em campo obtidas nas pistas teste, elaborou-se o método de dimensionamento da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), em que é prevista a perda de serventia ao longo do período de operação da via. Como trata-se de um método empírico, por observação acelerada, são previstos níveis de confiabilidade para garantir o desempenho da estrutura dimensionada (RODRIGUES, 2020).

A serventia de um pavimento pode ser definida como o nível em que a estrutura satisfaz as condições necessárias para gerar conforto de rolamento e segurança ao usuário. O método da AASHTO prevê o grau de serventia através de uma escala de 0 a 5, sendo que as melhores condições se encontram mais próximas de 5. A obtenção dos índices de serventia se deu através de correlações após os estudos nas pistas experimentais (RODRIGUES, 2020).

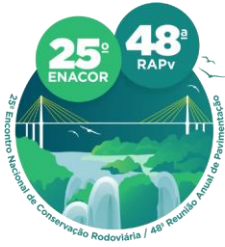
Dentre as variáveis do método tem-se: serventia, número estrutural, módulo de resiliência, nível de confiança e condições de drenagem. Por se tratar de um método empírico, algumas restrições podem ser elencadas, como: limitadas seções de pavimento (tanto em camadas, como em subleito), pouca variação de veículos tipo e condições climáticas, incompatíveis especialmente com o Brasil (BALBO, 2007).

A equação geral de desempenho pelo método é dada por:

$$\log(W_{18}) = Z_R \times S_0 + 9,36 \log_{10}(SN - 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{(\Delta PSI)}{(4,2 - 1,5)} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10}(M_R) - 087 \quad (8)$$

Onde:

W_{18} = Número previsto de solicitações;



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Z_R = Desvio padrão geral;

S_0 = Desvio padrão combinado com performance;

ΔPSI = Variação da serventia;

M_R = Módulo de resiliência;

SN = Número estrutural do pavimento.

O desvio padrão é baseado no nível de confiabilidade das informações. A variação da serventia é dada pela diferença da serventia inicial e serventia inicial. O número estrutural é calculado a partir da seleção das características dos materiais a serem empregados e sua capacidade de drenagem.

Cálculo do número N

Previamente ao cálculo do número de solicitações correspondentes a um eixo padrão de 8,20 ton., um tráfego teórico foi distribuído em classes padrão do DNIT, bem como os eixos com suas respectivas cargas.

A partir da alternativa 5 estimou-se percentuais de Volume Médio Diário (VMD) para as outras quatro alternativas: 1 (0,1%), 2 (1,0%), 3 (1,4%), 4 (5,0%) e 5 (10%), para que a proporção de fatores de veículo se mantenha e a faixa de tráfego fosse distante em termos de número N. Com o objetivo de encontrar a confluência de vida útil entre as metodologias semi-empírica e empírico-mecanística, chegou-se ao cenário 2.a (2,1% do VMD do cenário 5), já para a interseção da metodologia semi-empírica com a empírica obteve-se o cenário 4.a (15% do VMD do cenário 5), conforme resumido na tabela 2.

Tabela 2 - Volume Médio Diário (AUTOR, 2023)

Cenário	1	2	2.a	3	4	4.a	5
VMD	3	25	53	125	250	375	2500

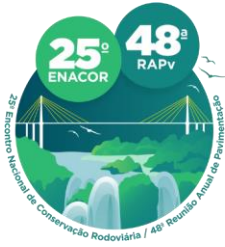
Cabe ressaltar que o VMD ora adotado é fictício, sendo que para projetos sempre devem ser realizadas contagens, correções sazonais, estudos de séries históricas, cálculo de taxas de crescimento, interrelações com o meio em que a via se encontra (PESSOA JÚNIOR, 2019).

O cálculo dos fatores de veículos foi desenvolvido segundo as metodologias USACE e AASHTO, mediante emprego das expressões constantes da Publicação IPR 723 – Manual de Estudos de Tráfego (DNIT – 2006).

Considerou-se o perfil de carregamento da frota com 85% carregado, contendo 5% de excesso de carga permitido pela Lei da Balança (CONTRAN, 2021), e 15% vazio. Com a aplicação da metodologia presente no Manual do DNIT (2006), obteve-se os fatores de veículo (FV) para ambas metodologias, sendo encontrado $FV_{USACE} = 10,86$ e um $FV_{AASHTO} = 3,82$, posteriormente sendo aplicada uma taxa de crescimento de 3,0% ao ano e um fator de faixa de 0,5, sendo calculado o número N ano-a-ano do número N para cada um dos cenários propostos (Tabelas 3 e 4).

O N_{USACE} do décimo ano calculado foi utilizado para o dimensionamento pelo método do DNIT, variando por todas as faixas de tráfego previstas pelo método para determinação de revestimento. Posteriormente, com o cálculo do número N limite das outras metodologias, foi verificado o N acumulado, sendo que em alguns casos foi necessário projetar o acúmulo de solicitações de tráfego para os demais anos, de modo a identificar o período de projeto.

As tabelas 3 e 4 apresentam o número N acumulado pelas metodologias USACE e AASHTO até o décimo ano.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 3 - N_{USACE} acumulado

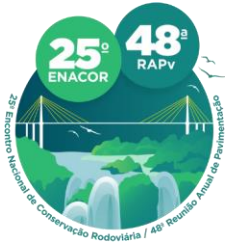
Período de Projeto	Cenários						
	1	2	2.a	3	4	4.a	5
1	9,5E+03	9,5E+04	2,0E+05	4,8E+05	9,5E+05	1,4E+06	9,5E+06
2	1,9E+04	1,9E+05	4,1E+05	9,7E+05	1,9E+06	2,9E+06	1,9E+07
3	3,0E+04	3,0E+05	6,2E+05	1,5E+06	3,0E+06	4,4E+06	3,0E+07
4	4,0E+04	4,0E+05	8,4E+05	2,0E+06	4,0E+06	6,0E+06	4,0E+07
5	5,1E+04	5,1E+05	1,1E+06	2,5E+06	5,1E+06	7,6E+06	5,1E+07
6	6,2E+04	6,2E+05	1,3E+06	3,1E+06	6,2E+06	9,3E+06	6,2E+07
7	7,3E+04	7,3E+05	1,5E+06	3,7E+06	7,3E+06	1,1E+07	7,3E+07
8	8,5E+04	8,5E+05	1,8E+06	4,2E+06	8,5E+06	1,3E+07	8,5E+07
9	9,7E+04	9,7E+05	2,0E+06	4,8E+06	9,7E+06	1,5E+07	9,7E+07
10	1,1E+05	1,1E+06	2,3E+06	5,5E+06	1,1E+07	1,6E+07	1,1E+08

Tabela 4 - N_{AASHTO} acumulado

Período De Projeto	Cenários						
	1	2	2.a	3	4	4.a	5
1	3,5E+03	3,5E+04	7,3E+04	1,7E+05	3,5E+05	5,2E+05	3,5E+06
2	7,1E+03	7,1E+04	1,5E+05	3,5E+05	7,1E+05	1,1E+06	7,1E+06
3	1,1E+04	1,1E+05	2,3E+05	5,4E+05	1,1E+06	1,6E+06	1,1E+07
4	1,5E+04	1,5E+05	3,1E+05	7,3E+05	1,5E+06	2,2E+06	1,5E+07
5	1,9E+04	1,9E+05	3,9E+05	9,3E+05	1,9E+06	2,8E+06	1,9E+07
6	2,3E+04	2,3E+05	4,7E+05	1,1E+06	2,3E+06	3,4E+06	2,3E+07
7	2,7E+04	2,7E+05	5,6E+05	1,3E+06	2,7E+06	4,0E+06	2,7E+07
8	3,1E+04	3,1E+05	6,5E+05	1,5E+06	3,1E+06	4,6E+06	3,1E+07
9	3,5E+04	3,5E+05	7,4E+05	1,8E+06	3,5E+06	5,3E+06	3,5E+07
10	4,0E+04	4,0E+05	8,4E+05	2,0E+06	4,0E+06	6,0E+06	4,0E+07

Pré-dimensionamento pelo método do CBR

Neste estudo adotou-se a formulação de pavimento do tipo flexível, ou seja, revestimento asfáltico (coeficiente $k=2,0$), base e sub-base granular (coeficiente $k=1,0$) e $CBR_{subleito}=7,0\%$. Ao aplicar as inequações e premissas prevista pelo método tem-se as seguintes estruturas para cada um dos seis cenários propostos pelos tráfegos calculados (Figura 1):



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Cenário	Seções pelo método CBR	Cenário	Seções pelo método CBR
1		4	
2		4.a	
2.a		5	
3			

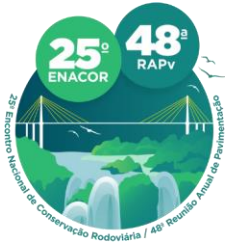
Figura 1 - Seções por cenário (AUTOR, 2023)

Percebe-se similaridade nas seções, com maior variação na espessura de revestimento. Ressalta-se que, para materiais granulares, a espessura mínima é de 15 cm.

Verificação mecânica

Na próxima etapa do estudo, verificou-se estas estruturas, previamente dimensionadas, por análise empírico-mecânica empregando-se o programa computacional AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), o qual permite a obtenção de respostas elásticas em estruturas de pavimento com camadas múltiplas, sob a ação de carregamentos formados por áreas de contato circulares. O AEMC, originalmente chamado SISPAV, foi desenvolvido por Filipe Augusto Cinque de Proença Franco, D.C., como complemento aos programas MeDiNa e BackMeDiNa. A formulação do programa pela teoria da elasticidade linear permite combinar carregamentos de múltiplas rodas, além disso possibilita a obtenção dos resultados de tensão, deformação e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura, sem a necessidade de subdividir o meio contínuo em Elementos Finitos. Dessa forma, torna-se uma alternativa eficiente e simplificada para análises mecânicas e estruturais (DNIT, 2020).

Como parâmetro de entrada se faz necessária a caracterização do material a ser empregado através do módulo de resiliência, espessuras e coeficientes de Poisson. Também é definido o carregamento, pressão de enchimento dos pneus e disposição dos pneus. Para o estudo considerou-se uma pressão de enchimento de pneus de 5,6 kgf/cm² e um espaçamento entre rodas de 32,4 cm. Os módulos e coeficientes adotados neste estudo são listados na tabela 5, a seguir:



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 5 - Características por camada (AUTOR, 2023)

CAMADA	E (kgf/cm ²)	μ
CBUQ	35000	0,30
Tratamento Superficial	1000	0,25
Base Granular	2500	0,35
Sub-base Granular	1500	0,40
Subleito	700	0,45

Salienta-se que os tratamentos superficiais não oferecem um suporte estrutural significativo (PESSOA JÚNIOR, 2019). De acordo com Bernucci, et al. (2022), a utilização dos tratamentos não acarreta em melhoria estrutural no pavimento. No método MeDiNa, apesar de serem indicadas características modulares, os tratamentos superficiais não são avaliados quanto à fadiga, compondo a estrutura, porém é avaliada a deformação permanente nas camadas inferiores (DNIT, 2020).

Após o cálculo das deflexões, tensões e deformações nos pontos definidos e na sequência aplicou-se modelos de literatura para obter os valores admissíveis para cada parâmetro de análise. Para o pavimento flexível na análise mecânica verifica-se três pontos críticos: a deflexão no topo do revestimento, a tração na fibra inferior do revestimento e a compressão no subleito.

Ao aplicar os três modelos de ruína, para cada uma das estruturas base, tem-se os seguintes resultados de esforços solicitantes e, conseqüentemente, tráfego admissível (Tabela 6):

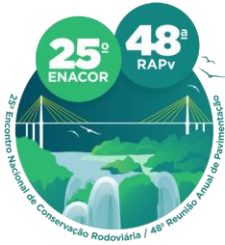
Tabela 6 - Resultados Elsym5 (AUTOR, 2023)

Critério	D x10 ⁻² mm	ε _t (m/m)	ε _v (m/m)
Cenário 1	104,1	-	8,7E-04
Cenário 2	91,0	3,6E-04	4,1E-04
Cenário 2.a	89,7	3,5E-04	3,9E-04
Cenário 3	80,7	3,4E-04	3,5E-04
Cenário 4	71,6	2,9E-04	3,1E-04
Cenário 4.a	71,9	2,9E-04	3,0E-04
Cenário 5	63,7	2,5E-04	2,4E-04

Aplicando os resultados obtidos pelo software nas equações pré-estabelecidas, obteve-se o número N limite da estrutura, expostos na tabela 7.

Tabela 7 - Vida útil em N pelo método empírico-mecânico (AUTOR, 2023)

CENÁRIO	1	2	2.a	3	4	4a	5
DNER - PRO 269/94 (NUSACE)	1,03E+06	2,11E+06	2,28E+06	4,00E+06	7,56E+06	7,41E+06	1,47E+07
FHWA (NAASHTO)	-	1,31E+06	1,45E+06	1,69E+06	2,83E+06	2,80E+06	5,24E+06
Dormon & Metcalf (NUSACE)	2,31E+05	7,74E+06	1,03E+07	1,69E+07	3,30E+07	3,68E+07	9,88E+07



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Avaliação da vida útil pelo método da AASHTO

Através dos resultados obtidos nas pistas experimentais, foi desenvolvido um método para mensurar a variação da serventia de um pavimento ao longo da vida útil, através do conceito de número estrutural de pavimento (SN).

Como comparativo, foram adotados os mesmos módulos do método anterior, acrescido dos parâmetros expostos da tabela 8, necessários à aplicação da metodologia:

Tabela 8 – Premissas Método da AASHTO (AUTOR, 2023)

Qualidade de drenagem	Regular
Coefficiente de drenagem	1,0
So	0,35
PSI i	4,2
PSI f	2,5
R%	0,5

Aplicando a equação geral do método as variáveis são o tráfego, o nível de confiança, o número estrutural, a serventia e o módulo de resiliência. Isolando o número N obteve-se os seguintes resultados, na tabela 9:

Tabela 9 – Vida útil pelo método da AASHTO (AUTOR, 2023)

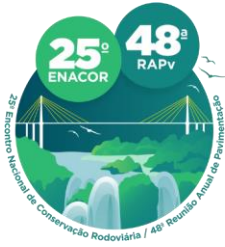
	N admissível	N proposto
Cenário 1	$2,93 \times 10^5$	$4,0 \times 10^4$
Cenário 2	$1,42 \times 10^6$	$4,0 \times 10^5$
Cenário 2.a	$1,75 \times 10^6$	$8,4 \times 10^5$
Cenário 3	$3,26 \times 10^6$	$2,0 \times 10^6$
Cenário 4	$5,37 \times 10^6$	$4,0 \times 10^6$
Cenário 4.a	$6,29 \times 10^6$	$6,0 \times 10^6$
Cenário 5	$1,32 \times 10^7$	$4,0 \times 10^7$

Verifica-se que a serventia para o pavimento proposto para o tráfego até o cenário 4.a será atendida na vida útil de projeto com previsão até superior. Já para o pavimento do cenário 5 a estrutura proposta não atingirá a vida útil necessária.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme verificado na análise mecânica e posteriormente no método da AASHTO, houve divergência na vida útil do pavimento para as estruturas quando comparadas ambas metodologias. Com o N acumulado ano-ano foi possível determinar o período de projeto limite para cada cenário, para cada um dos métodos propostos.

Constata-se que para os tráfegos mais baixos analisados, $N_{USACE} 1,1 \times 10^5$ e $1,1 \times 10^6$, o pavimento base dimensionado pelo método semi-empírico tem vida útil superior à prevista de projeto, atendendo tanto aos modelos de verificação empírico-mecânica, como pelo puramente empírico.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Na proposta de tráfegos acima de $N_{USACE} 1,5 \times 10^6$, a mesma estrutura dimensionada pelo método semi-empírico entraria em ruína antes dos 10 anos de projeto, fato constatado pelo método empírico-mecanístico.

Quando comparado com o método empírico, o método semi-empírico trará respostas de vida útil aceitáveis até um tráfego com $N_{USACE} 1,1 \times 10^7$.

Os resultados são expostos na figura 3 conforme denominação de Balbo (2007), sendo empírico, semiempírico e empírico-mecanístico.

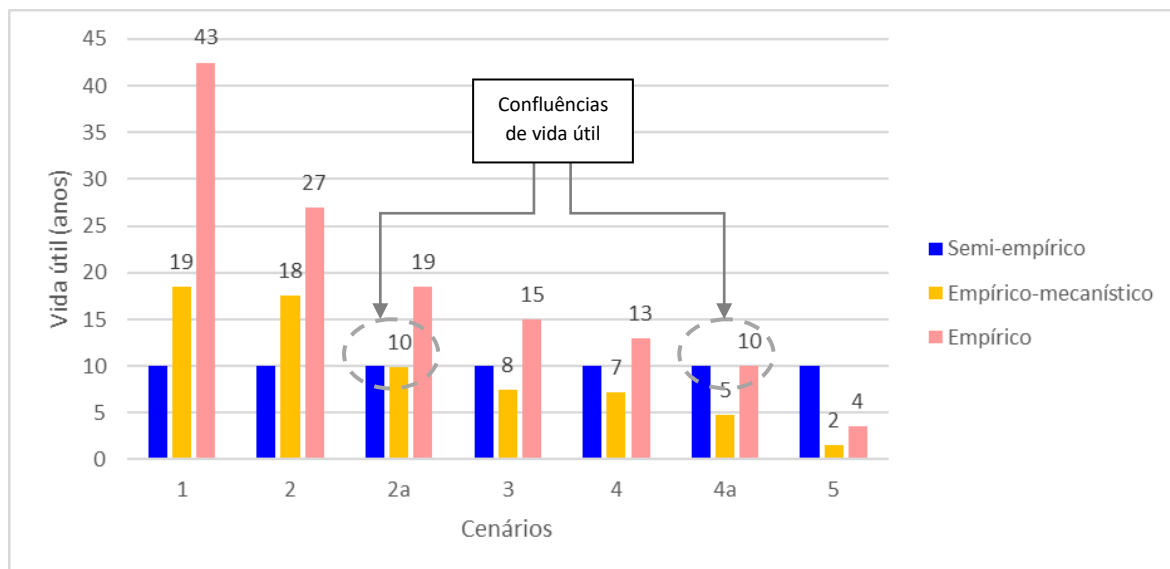


Figura 2 - Comparativo de vida útil (AUTOR, 2023)

CONCLUSÃO

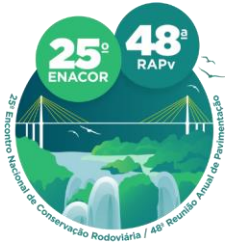
O método DNIT, quando em caso de tráfegos baixos, pode superdimensionar a estrutura de pavimento, no entanto há uma segurança ao projetista quanto ao atendimento da vida útil verificado pela análise empírico-mecanística.

Quando se trata de elevados volumes de tráfego, com as condições apresentadas, não é recomendada a adoção de apenas um método, visto que o risco de ruína se constatou altamente elevado. Para o caso do estudo proposto, os volumes foram teóricos e para um grau de carregamento da ordem de $N_{USACE} 10^8$ é necessária a adoção de pavimentos mais robustos, com camadas mais espessas, ou materiais com módulos de resiliência superiores, capazes de suportar maiores repetições de cargas.

Em uma hipótese de dimensionamento pelo método empírico da AASHTO, a necessidade de complementação de estudo somente aconteceria em tráfego superiores a $N_{USACE} 10^7$, porém não haveria garantia pelo método empírico-mecanístico de que as tensões e deformações ocasionadas pelas solicitações atenderiam a vida útil do pavimento.

Uma das principais questões que influenciam a diferença entre os métodos é que para o método semi-empírico os materiais tem coeficientes estruturais padrões, a exemplo de materiais granulares que usualmente utiliza-se o valor de 1,0 tanto para BGS, como Bica Corrida ou até mesmo Macadame Seco, no entanto, para análises dos outros dois métodos considera-se o módulo de resiliência, diferenciando o material empregado na base da sub-base.

Há também considerações a serem feitas com relação ao revestimento, a depender do tipo de ligante seu comportamento à fadiga pode variar. Para o subleito, equações de correlação pelo tipo de solo,



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



como o caso de lateríticos, podem variar a estrutura dimensionada, não sendo contempladas estas questões pelo método do presente no Manual de Pavimentação (2006), sendo que a caracterização dos materiais é o grande diferencial do Método MeDiNa que, apesar de já lançado oficialmente pelo DNIT, necessita de diversos ensaios das camadas, tem uso dificultado, pois o país ainda passa por transição com relação a adequação dos laboratórios de ensaios tecnológicos.

Para o método da AASHTO por exemplo foram adotadas características da região de estudo, com aspectos diferentes das encontradas no Brasil, como exemplo o congelamento, havendo possível dificuldade de adaptação para a realidade brasileira, sendo adotado nesse estudo apenas com a finalidade comparativa.

Há necessidade de se testar também outras configurações de pavimento, tráfegos, subleitos e até mesmo modelos de ruína na análise mecânica. Sugere-se também a realização de ensaios de caracterização para comparação pelo Método MeDiNa.

Conclui-se que é imprescindível a verificação por mais de um método de dimensionamento, principalmente em tráfegos elevados, de modo a fornecer segurança para o projetista. Sugere-se também que seja incluído em termos de referência de projetos executivos a necessidade de complementação do dimensionamento. Apesar das simulações baseadas em históricos da literatura de características modulares serem uma ferramenta, apenas a realização de ensaios tecnológicos específicos para os materiais empregados em cada projeto fornecerá resultados mais próximos da realidade da obra. Levantamentos deflectométricos para realização de retroanálise, também são aliados na caracterização do pavimento e estimativa da vida útil do pavimento construído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO, AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO. Washington, 1993.

BALBO, T. J. *Pavimentação Asfáltica*. 3ª ed. Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. *et al.* *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras; ABEDA, 2008.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **Resolução nº 882/2021**. Brasília, 2021.

DEPARTAMENTO ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER-SP. **IP-DE-P00/001: Instrução de projeto – Projeto de Pavimentação**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **IPR-719: Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Manual de Utilização do programa MeDiNa**. Rio de Janeiro, 2020.

GONTIJO, P, *et al.* *Metodologia Paragon*. Brasília: Renovacio Criação, 2022.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Tese de Doutorado. COPPRE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

PESSOA JUNIOR, E. **Manual de Obras Rodoviárias e Pavimentação Urbana**. 2ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, 2019.

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

RODRIGUES, R.M., **Engenharia de Pavimentos – parte 1**. 1ª ed., Padda Comunicação, Porto Alegre – RS, 2020.