

## ANEXO 4

### FICHA FINAL DE AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

<b>IDENTIFICAÇÃO:</b>
<b>Data:</b> 18/12/2020
<b>Aluno:</b> VANESSA REBOUÇAS SANTANA
<b>Orientador:</b> Prof. Mario Sergio de Souza Almeida, DSc.
<b>Co-orientador:</b>
<b>Título de Trabalho:</b> EFEITO DA SOBRECARGA E CONDIÇÃO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS NA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: ESTUDO DE CASO DA BR-116/BA

Concluída a apresentação, procedeu-se o julgamento tendo sido atribuídas as seguintes notas parciais:

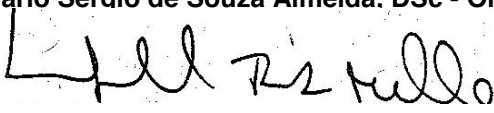
Banca Examinadora:	Notas
Prof. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, DSc.	100
Eng. Civil Hermes William Bressanin	94
Prof. Mario Sergio de Souza Almeida, DSc	100

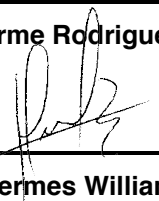
<b>Média Final:</b>	<b>98</b>	<b>NOVENTA E OITO</b>
---------------------	-----------	-----------------------

Concluída a avaliação o(a) aluno(a) foi (APROVADO/REPROVADO): APROVADA

Defesa realizada em: 18/12/2020

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Mario Sergio de Souza Almeida, DSc - Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, DSc..

  
\_\_\_\_\_  
Eng. Civil Hermes William Bressanin

# EFEITO DA SOBRECARGA E CONDIÇÃO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS NA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: ESTUDO DE CASO DA BR-116/BA

**Vanessa Rebouças Santana**

**Mario Sergio de Souza Almeida**

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas

## RESUMO

É consenso que sobrecargas nos eixos dos veículos aceleram a degradação dos pavimentos asfálticos, com efeitos diretos sobre a vida útil dessas estruturas. Nesse contexto, o presente estudo buscou avaliar o efeito da sobrecarga do tráfego na estimativa de vida útil do pavimento asfáltico da BR-116/BA através da análise tensão-deformação, considerando diferentes condições de aderência entre as camadas do pavimento (aderida e não aderida) e bacias deflectométricas médias e máximas obtidas de ensaios com FWD. Foram utilizados dados de três Segmentos Homogêneos (SHs) os quais fazem parte das obras de duplicação e restauração em curso da rodovia (km 387,41 ao km 427,75) e se encontram em fase de projeto de reforço do pavimento. Os dados deflectométricos foram retroanalisados com auxílio do software BackMeDiNa, cujos módulos de resiliência obtidos foram utilizados na análise tensão-deformação no software AEMC para determinação das respostas elásticas da estrutura e, conseqüentemente, das espessuras da camada de reforço em concreto asfáltico demandadas por cada SH. Os resultados apontaram para previsões de vidas úteis intimamente relacionadas aos percentuais de sobrecarga testados para os eixos dos veículos, indicando uma relação decrescente, e não linear entre estes parâmetros. Por outro lado, embora a condição de aderência entre camadas não tenha ocasionado grandes diferenças nas espessuras de reforço entre os SHs, a avaliação do efeito da sobrecarga demonstrou uma tendência de maior comprometimento estrutural do pavimento na condição não aderida.

**Palavras-chave:** retroanálise; tensão-deformação; AEMC; BackMeDiNa; MeDiNa.

## ABSTRACT

It is a consensus that vehicle axle overloads accelerate the degradation of asphalt pavements, with direct effects on the useful life of these structures. In this context, the present study sought to evaluate the effect of traffic overload on the estimated life of the asphalt pavement of BR-116 / BA through stress-strain analysis, considering different adhesion conditions between pavement layers (adhered and non-adhered) and medium and maximum deflectometric basins from FWD tests. Data from three Homogeneous Segments (SHs) were used, which are part of the highway's duplication and restoration works (km 387.41 to km 427.75) and are known in the pavement reinforcement project phase. The deflectometric data were retroanalyzed with the aid of BackMeDiNa software, divided by resilience were used in the stress-strain analysis in the AEMC software to determine the elastic responses of the structure and, consequently, the thicknesses of the asphalt concrete reinforcement layer required by each SH. The results pointed to useful life functions closely related to the overload percentages tested for the vehicle axles, indicating a decreasing and non-linear relationship between these parameters. On the other hand, although the condition of adhesion between layers did not cause great differences in the reinforcement thicknesses between the SHs, an evaluation of the effect of the overload showed a trend of greater structural impairment of the pavement in the non-adhered condition.

**Keywords:** retroanalysis; stress-strain; AEMC; BackMeDiNa; MeDiNa.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor rodoviário brasileiro, que corresponde, de acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT), a 60% do transporte de cargas do país (CNT, 2019), está vivenciando um momento histórico. Após mais de 60 anos da concepção do método nacional de dimensionamento de pavimentos asfálticos vigente, encontra-se em curso os preparativos para implantação do novo Método de Dimensionamento Nacional Mecânico-Empírico batizado de MeDiNa. O MeDiNa contempla projetos de pavimentos asfálticos novos e dimensionamento de camada de reforço. A principal característica do novo método é utilizar a fadiga das camadas asfálticas e estabilizadas e a deformação permanente dos materiais granulares como critérios de ruptura, além de adotar equações de desempenho desenvolvidas no país, com a exigência das respectivas calibrações para as diferentes regiões do Brasil.

Dentre os principais desafios relacionados a assertividade da previsibilidade do novo método, destacam-se a qualidade do estudo de tráfego, sobretudo em função da influência da

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal do Recôncavo da Bahia**  
 Campus Universitário de Cruz das Almas  
**Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas**  
**Bacharelado em Engenharia Civil**

ANEXO 11

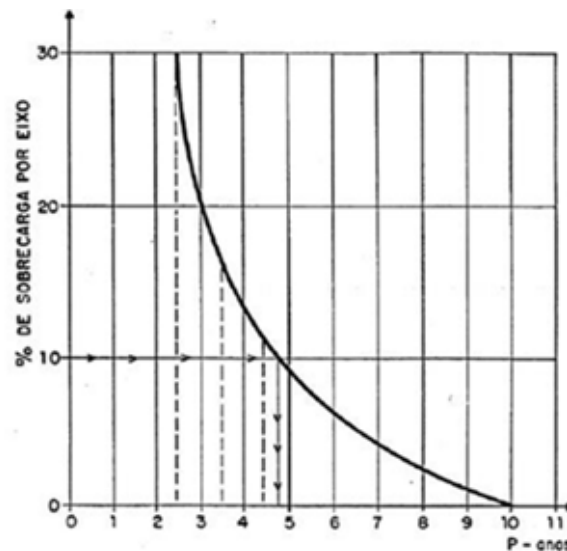
<b>RELATÓRIO DE DEFESA DO TRABALHO MONOGRÁFICO</b>		
<b>GCET297 - TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA CIVIL II</b>		
<b>1. Identificação do Estudante</b>		
Nome: Vanessa Rebouças Santana	Matrícula: 2018215385	
<b>2. Sessão de Defesa de Monografia</b>		
Título: EFEITO DA SOBRECARGA E CONDIÇÃO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS NA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: ESTUDO DE CASO DA BR-116/BA		
<b>3. Comissão Examinadora (Média inferior a 6,0 indica Reprovação)</b>		
Nome Completo:	Função	Nota (0 - 10)*
Mario Sergio de Souza Almeida	Examinador 1 (Orientador)	10,0
Luiz Guilherme Rodrigues de Mello	Examinador 2	10,0
Hermes William Bressanin	Examinador 3	9,4
	Suplente	
	<b>Média</b>	<b>9,8</b>
<b>4. Resultado</b>		
A comissão avaliadora, em 18/12/2020 após exame da Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso e arguição do candidato, decidiu:		
<input checked="" type="checkbox"/> Pela aprovação do trabalho monográfico.	<input type="checkbox"/> Pela revisão de forma, indicando o prazo máximo de 5 (cinco) dias para as alterações e nova apresentação.	
<input type="checkbox"/> Pela reprovação do trabalho monográfico.		
<b>5. Homologação</b>		
Autenticação Presidente da Comissão Avaliadora	Autenticação Coordenador do Colegiado de Curso	
18/12/2020	18/12/2020	
* A avaliação do trabalho monográfico deve levar em consideração os seguintes aspectos: I. Coerência entre a problematização, os objetivos e a argumentação; II. Normas da ABNT; III. Relevância e coerência no trato da questão; IV. Clareza e precisão vocabular; V. Resultados obtidos.		

sobrecarga na vida útil do pavimento dimensionado, bem como a consideração a ser feita em relação a condição de atrito entre as camadas constituintes do pavimento, ou seja, não aderida ou aderida.

Em relação ao desafio relacionado ao tráfego, Klamt et al. (2017) reiteram o protagonismo do modo rodoviário de transporte de cargas, em relação aos demais, caracterizado pelo constante registro de sobrecargas, que interferem diretamente na vida útil dos pavimentos. Para Réus et al. (2014a) os excessos de carga por eixo são vistos pelos transportadores como forma de aumentar a produtividade dos fretes, então mesmo quando há fiscalização e autuação pelo sobrepeso, a relação frete/multa é economicamente vantajosa.

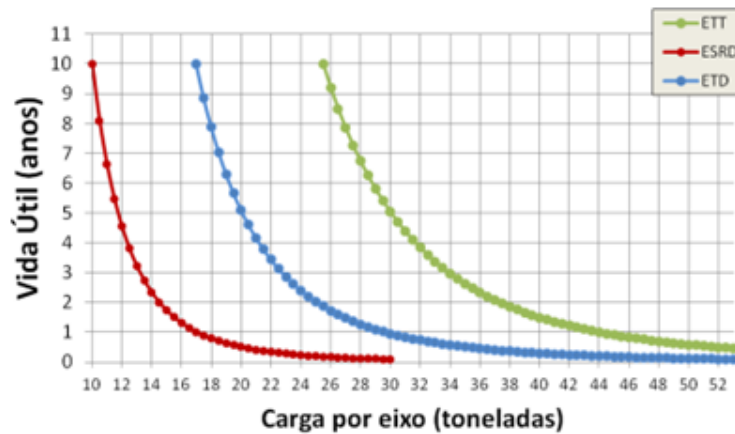
Para quantificar estas ocorrências, Réus et al. (2014b) realizaram pesagens diárias no ano de 2014, utilizando duas balanças localizadas na região norte do estado do Paraná, cujos resultados mostraram que o maior número de excessos no Peso Bruto Total (PBT) se concentraram nos meses de setembro a dezembro, onde 16% das carretas apresentaram sobrepeso, 12% dos caminhões e dos ônibus e 11% dos veículos especiais. Nesta pesquisa ganhou destaque o fato de que o maior percentual de excesso de carga ocorreu nos ônibus, no mês de outubro, onde 70% dos veículos fiscalizados trafegavam acima do limite de carga permitido.

O efeito da sobrecarga no eixo dos veículos comerciais sobre a serventia do pavimento foi estimado por Pinto e Preussler (2002). Percebe-se na Figura 1 que a variação da vida útil do pavimento idealizada pelos autores obedece a um comportamento exponencial, onde pequenos incrementos na sobrecarga por eixo, de 10% por exemplo, acarretará uma redução de mais de 50% na vida útil de 10 anos originalmente projetada.



**Figura 1:** Curva de sobrecarga por eixo versus a redução da vida útil de pavimentos (Pinto e Preussler, 2002)

Vallejo e Bernucci (2019) ratificaram a estimativa de Pinto e Preussler (2002), mostrando os efeitos do excesso de carga de diferentes eixos ao trafegarem numa via projetada para vida útil de 10 anos (Figura 2). Pode-se observar que se todos trafegassem com carga máxima nominal nos eixos, a vida útil estimada de 10 anos seria alcançada. Entretanto, quando as cargas são maiores que as máximas nominais, o pavimento tende a durar menos tempo. Neste estudo, com um incremento de 10% de excesso de carga para o Eixo Tandem Duplo (ETD), por exemplo, ou para o Eixo Tandem Triplo (ETT), a vida útil cai de 10 para menos de 7 anos, enquanto que para o Eixo Simples de Rodagem Dupla (ESRD) essa mesma sobrecarga reduz a expectativa de vida do pavimento para 8 anos, aproximadamente.



**Figura 2:** Redução de vida útil do pavimento inicial de 10 anos em projeto devido ao aumento de carga nos eixos dos veículos (Vallejo e Bernucci, 2019)

Já em relação a análise mecânica, com o objetivo de prever o comportamento de pavimentos asfálticos sujeitos a cargas diversas e dimensionados pelo método empírico (DNIT, 2006), é prática atual a adoção de análises tensão-deformação para avaliação da fadiga e deformação permanente em pontos críticos da estrutura, tais como a fibra inferior do revestimento e o topo do subleito, por exemplo. Estas análises tensão-deformação são realizadas com uso de softwares que consideram diferentes condições de atrito entre as camadas constituintes do pavimento. Silva e Motta (2003) avaliaram o comportamento mecânico de uma camada de reforço de pavimento composto por Whitetopping (WT), assente sobre pavimento flexível com revestimento em Concreto Asfáltico (CA), executado na pista experimental circular do IPR na cidade do Rio de Janeiro. As autoras instrumentalizaram a interface entre o WT e o CA para determinação de tensões e deformações de tração nessa região. Paralelamente, estimaram estes mesmos esforços utilizando os programas ELSYM5 (FHWA, 1978), DIPLOMAT (Khazanovich et al., 1995), ILSL2, (Ioannides e Michall, 1984) e KENSLABS (Huang Yang, 1993), onde o ELSYM5 considera o atrito entre camadas como aderido, enquanto os demais softwares oferecem ao usuário as duas condições de aderência. A comparação entre os resultados da instrumentação e da estimativa numérica demonstraram que a consideração da condição aderida levou a uma maior precisão na estimativa dos esforços medidos, com destaque para os softwares ELSYM5 e DIPLOMAT.

Nesta linha, o software de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) desenvolvido por Franco et al. (2020), que é uma das sub-rotinas para análises tensão-deformação no MeDiNa, permite a definição pelo usuário da condição de aderência entre camadas e embora não tenha sido ainda formalmente lançado, vários estudos vêm buscando avaliar sua aplicabilidade com diferentes objetivos. Lima et al. (2020) avaliaram o comportamento mecânico de dezoito solos finos lateríticos, de três regiões do Brasil, a partir de ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. Os autores simularam o comportamento dos diferentes materiais em relação a deformação permanente com auxílio do AEMC. Nestas análises as camadas foram consideradas como não aderidas. Os resultados demonstraram que a capacidade estrutural apresentada por todos os solos avaliados, em termos de deformação permanente, os credenciou para serem utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis para tráfego considerado pelo DNIT (2006) como leve ( $N = 1 \times 10^6$ ) e como pesado ( $N = 1 \times 10^7$ ).

Machado et al. (2020) utilizaram o MeDiNa para projetar o reforço em concreto asfáltico do anel rodoviário da Universidade Federal de Juiz de Fora, visando recuperar suas propriedades funcionais. Este pavimento foi avaliado funcionalmente, por Levantamento

Visual Contínuo Computadorizado, e estruturalmente, por levantamento de deflexões (FWD) e afundamento de trilha de roda. Com os dados coletados da avaliação estrutural os autores, realizaram a segmentação homogênea do trecho e retroanalísaram as bacias deflectométricas obtidas, visando a aquisição dos parâmetros necessários ao cálculo. Com o projeto finalizado, os autores concluíram que a melhor solução foi o recapeamento em toda a extensão do anel rodoviário analisado, com a utilização da massa asfáltica na espessura única de 5,0 cm, junto com a aplicação da camada de antirreflexão de trincas em alguns segmentos.

Nesse contexto, o presente estudo busca avaliar o efeito da sobrecarga do tráfego na estimativa de vida útil do projeto de restauração do pavimento asfáltico da BR-116/BA, considerando na análise tensão-deformação diferentes condições de aderência entre as camadas do pavimento.

## 2. METODOLOGIA

O presente estudo consistiu em realizar um estudo de caso do projeto de restauração do pavimento da pista existente da BR-116/BA, km 387,41 ao km 427,75, que faz parte das obras de duplicação da rodovia.

Inicialmente foram escolhidos três Segmentos Homogêneos (SHs) para realização das análises. Em seguida, com os dados de tráfego do projeto, foi possível calcular o Número N de cada SH, considerando as cargas nominais dos eixos e também considerando sobrecargas de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% nos mesmos.

De posse dos valores das deflexões dos respectivos SHs, calculou-se as bacias deflectométricas médias e máximas (média + desvio padrão) de cada SH, as quais foram retroanalísadas, de modo a possibilitar a obtenção de Módulos de Resiliências das camadas (MRs) e possibilitar o dimensionamento da camada de reforço em Concreto Asfáltico (CA), através de uma análise tensão-deformação, com auxílio do software AEMC. Para isso, levou-se em consideração duas condições de aderência para as camadas do pavimento: i) não aderida (aderência entre a camada de reforço e o revestimento antigo e não aderida entre as demais camadas), conforme adotado no MeDiNa; e ii) aderida (todas as camadas aderidas).

Todas as análises realizadas serviram para avaliação da vida útil de cada SH em diferentes condições de sobrecarga dos eixos dos veículos que compõem a frota definida pelo estudo de tráfego realizado (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%). Na Tabela 1 são apresentadas as informações relativas aos SHs 4, 32 e 45 utilizados nas análises, que foram escolhidos por apresentarem as maiores deflexões em todo o trecho avaliado. Suas características funcionais estão presentes na Tabela 2.

**Tabela 1:** Segmentos Homogêneos

SH	Estaca Inicial	Estaca Final	Km Inicial	Km Final	Extensão (m)
4	90	117	389,21	389,75	540
32	834	874	404,09	404,89	800
45	1208	1232	411,57	412,05	480

**Tabela 2:** Características Funcionais dos SHs

SH	IGG	F (mm)	FC-2 (%)	FC-3 (%)	IRI (m/km)
4	148	6	13	20	3,7
32	108	7	19	33	3,3
45	95	5	14	21	3,3

## 2.1 Cálculo do Número N

O carregamento proporcionado pelo tráfego foi convertido em número N, ano a ano, para o período de 10 anos, utilizando-se as equações propostas pela USACE e AASHTO, em solicitações do eixo padrão rodoviário, baseando-se no estudo de tráfego realizado para o projeto de duplicação e restauração da rodovia BR-116/BA e nos registros do Posto de Pesagem de Veículos (PPV) do DNIT, localizado no km 417 da mesma rodovia, mês a mês, entre outubro de 2018 e março de 2020. Este controle de pesagem demonstrou que em média 20% dos eixos fiscalizados apresentaram sobrecarga de alguma ordem durante o período avaliado. Dessa forma, no cálculo do número N foram consideradas, em 100% dos eixos, além de suas cargas nominais, sobrecargas de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% nos eixos, em relação as respectivas cargas nominais.

O estudo de tráfego do projeto foi realizado no ano de 2019 e forneceu os dados de contagem e classificação de tráfego, realizado durante 7 dias da semana, 24 h/dia, em três postos de coleta na BR-116/BA, divididos nos Trechos 1, 2 e 3, resultando na determinação dos respectivos Volumes Médios Diários (VMD) dos veículos comerciais. Para o presente trabalho, foram considerados os dados dos Trechos 01 e 02 pois, como é possível observar na Tabela 3, o SH 04 pertence ao Trecho 01 e os SHs 32 e 45 ao Trecho 02.

**Tabela 3:** Volumes Médios Diários dos veículos comerciais - Trechos 01 e 02

Trecho	Estaca Inicial	Estaca Final	Km Inicial	Km Final	VMD
01	0	785	387,41	403,11	2712
02	785	1350	403,11	414,41	3845

Cabe destacar que para o cálculo do número N o Fator de Distribuição Direcional do Tráfego para rodovias (FD) igual a 0,5, por se tratar de pista simples com duas faixas de tráfego.

Por fim, considerando uma taxa de crescimento para veículos comerciais de 3,4%, foi possível obter o número N, ano a ano e acumulado, em um período de projeto de 10 anos, para a condição dos veículos comerciais trafegando carregados e dentro dos limites de carga máxima tolerada e para a condição dos veículos comerciais com sobrecargas nos eixos de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

## 2.2 Levantamento Deflectométrico

A avaliação das características estruturais da BR-116/BA foi realizada com emprego do Falling Weight Deflectometer (FWD), a cada 20 metros de pista, em ambos os lados, considerando uma carga de, aproximadamente, 4100 kgf.

Com os resultados do levantamento deflectométrico foram calculadas as bacias deflectométricas médias e máximas (média + desvio padrão) para cada SH avaliado, as quais foram utilizadas para a determinação dos módulos de resiliências das camadas do pavimento por retroanálise. As deflexões medidas e os respectivos raios de curvatura médios calculados, para cada SH, estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4:** Bacias deflectométricas ( $\mu\text{m}$ )

SH	Deflexões	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	Raio (m)
4	Médias	241	182	146	100	71	51	39	347
	Máximas	362	277	221	152	107	77	57	
32	Médias	265	194	151	100	68	48	36	315
	Máximas	386	293	232	160	113	82	61	
45	Médias	160	111	85	57	40	30	24	483
	Máximas	308	210	156	99	67	49	39	

### 2.3 Retroanálise - Software BackMeDiNa

De posse das bacias deflectométricas médias e máximas procedeu-se as retroanálises, nas condições não aderida e aderida, para os três segmentos homogêneos do presente estudo, utilizando-se o software BackMeDiNa, ferramenta que compõe o novo método MeDiNa, de forma a determinar-se os módulos de resiliência das camadas constituintes do pavimento existente em cada SH. Observou-se em campo que os três SHs possuem a mesma estrutura de camadas do pavimento, com espessuras semelhantes, a qual é demonstrada na Figura 3.

As espessuras das camadas constituintes do pavimento existente, bem como os coeficientes de Poisson adotados na retroanálise, estão apresentados na Tabela 5.



**Figura 3:** Espessuras das camadas do pavimento da BR-116/BA

**Tabela 5:** Dados das camadas do pavimento para a retroanálise

Camada	Espessura (cm)	Coefficiente de Poisson
Revestimento	10	0,30
Base	20	0,35
Subbase	20	0,40
Reforço do Subleito	17,5	0,45
Subleito	Infinito	0,45

### 2.4 Análise tensão-deformação – Software AEMC

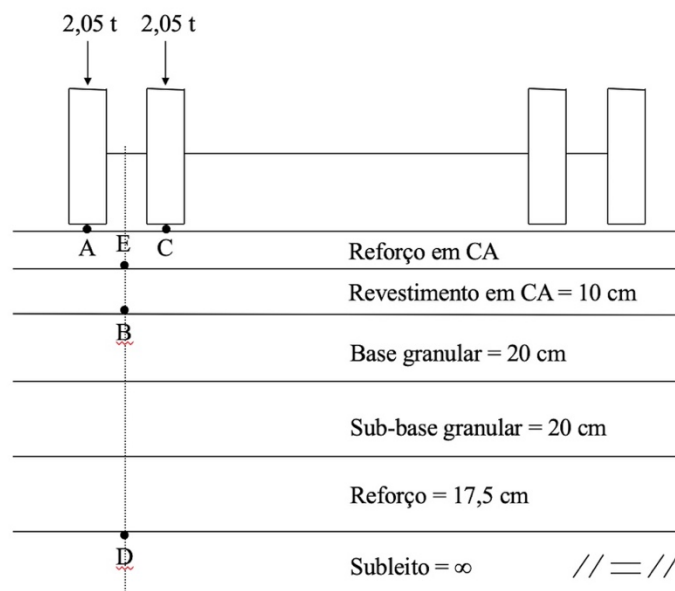
Finalizado o processo de retroanálise com a determinação dos respectivos módulos de resiliência das camadas, foi possível realizar a análise tensão-deformação do pavimento utilizando o software AEMC e definir, para a condição de tráfego sem sobrecarga e os diferentes tipos de atrito entre camadas, as espessuras de reforço necessárias para os três SHs. As espessuras de reforço inicialmente testadas no AEMC foram as obtidas a partir do dimensionamento empírico realizado anteriormente, utilizando-se a norma PRO 11 (DNER, 1979), onde considera-se a deflexão característica, que é a soma da média dos valores de  $D_0$  contidos num intervalo de aceitação, somada ao desvio padrão das medidas.

Cabe reiterar que esse estudo foi realizado para duas condições de aderência entre as camadas do pavimento: i) não aderida, com apenas o reforço em CA aderido ao revestimento asfáltico antigo; ii) aderida, com todas as camadas do pavimento aderidas. Dessa forma, foram inseridos no software o módulo de resiliência do CA do reforço, estimado em 3500 MPa com base nos resultados de ensaios de laboratório executados com o concreto asfáltico que está



sendo utilizado na obra, os valores das espessuras de cada camada do pavimento existente, e os coeficientes de Poisson (Tabela 5), além dos módulos de resiliência dessas respectivas camadas determinados na retroanálise.

Conforme sugerido por Segundo et al. (2016), na análise aplicou-se uma pressão de pneu de 5,6 kgf/cm<sup>2</sup> em um raio de atuação de 10,8 cm (representando a carga de uma roda do eixo padrão de 80 kN ou 8,2 t), para obter os valores de: (i) deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento ( $\epsilon_{tr}$ ); (ii) deformação vertical no topo do subleito ( $\epsilon_v$ ); (iii) deformação horizontal de tração na fibra inferior do reforço ( $\epsilon_{tref}$ ). Todas as análises foram realizadas entre as duas rodas do semieixo padrão, ou seja, nos pontos vistos como mais críticos, B, D e E da Figura 4, respectivamente. Na análise em que não houve necessidade de reforço para o respectivo SH a análise no ponto E foi suprimida.



**Figura 4: Pontos de Análise**

Conforme metodologia adotada por Segundo et al. (2016), após realizada a análise estrutural, calculou-se o número equivalente de operações de eixo simples de rodas duplas de 8,2 t acumulado, considerando um período de projeto para o qual o perfil é capaz de suportar ( $N_{adm}$ ). Foram utilizadas as Equações 1 e 2 (DER-SP, 2006) e os valores de k e n, conforme Tabela 6. Vale salientar que, das equações apresentadas na Tabela 6, a Equação 1 faz referência aos fatores de equivalência de carga (FEC) da AASHTO, para a determinação do tráfego ou N de projeto ( $N_{projeto}$ ), e a Equação 2 faz referência aos FEC da USACE.

**Tabela 6:** Equações e parâmetros utilizados para o cálculo do número N

Local de análise	Equação	k	n	Fonte
Fibra inferior do revestimento existente e reforço Eq. 1	$N_{iref} e N_{ir} = kx \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n$	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512	FHWA (1976) <i>apud</i> DER-SP (2006)
Topo do subleito Eq. 2	$N_{sub} = kx \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^n$	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762	Dormon e Metcalf (1965) <i>apud</i> DER-SP (2006)

Fonte: Adaptado de Segundo et al. (2016).

## 2.5 Análise da Vida Útil do Pavimento nas diferentes condições de Sobrecarga

Por fim, foi avaliada a influência da sobrecarga dos eixos no número N de projeto da via e, conseqüentemente, sobre a vida útil do pavimento dimensionado através da análise tensão-deformação. Essa abordagem permitiu visualizar graficamente o decaimento da vida útil prevista do pavimento, em função dos percentuais de sobrecarga avaliados, adotando metodologia similar a Pinto e Preussler (2002) e Vallejo e Bernucci (2019).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Cálculo do Número N

Os valores do número N de projeto ( $N_{projeto}$ ) calculados para os diferentes percentuais de sobrecarga adotados para os eixos da frota, estão discriminados na Tabela 7.

**Tabela 7:** Valores de  $N_{projeto}$  para diferentes sobrecargas dos eixos

Sobrecarga (%)	Trecho 01		Trecho 02	
	$N_{USACE}$	$N_{AASHTO}$	$N_{USACE}$	$N_{AASHTO}$
0	$8,22 \times 10^7$	$2,17 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	$2,98 \times 10^7$
10	$1,39 \times 10^8$	$3,24 \times 10^7$	$1,84 \times 10^8$	$4,45 \times 10^7$
20	$2,26 \times 10^8$	$4,67 \times 10^7$	$2,99 \times 10^8$	$6,42 \times 10^7$
30	$3,53 \times 10^8$	$6,54 \times 10^7$	$4,68 \times 10^8$	$9,00 \times 10^7$
40	$5,33 \times 10^8$	$8,94 \times 10^7$	$7,07 \times 10^8$	$1,23 \times 10^8$
50	$7,83 \times 10^8$	$1,20 \times 10^8$	$1,04 \times 10^9$	$1,65 \times 10^8$

Os resultados da Tabela 7 indicam que as tolerâncias permitidas pela resolução CONTRAN 526 (CONTRAN, 2015), conhecida como lei da balança, de 10% no eixo e 5% no Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Total Combinado (PBTC), promovem expressivo aumento (não linear) no número N para o horizonte de projeto de 10 anos.

### 3.2 Retroanálise - Software BackMeDiNa

Através da retroanálise realizada com o software BackMeDiNa foram obtidos os módulos de resiliência (Mpa) para as camadas Revestimento (R), Base (B), Sub-base (SB), Reforço (REF) e Subleito (SL), considerando as bacias deflectométricas médias e máximas calculadas para cada SH (4, 32 e 45), nas duas condições de aderência. Os valores de MR obtidos e os respectivos erros de cada retroanálise estão apresentados nas Tabelas 8 e 9.

**Tabela 8:** Módulos de Resiliência na condição não aderida (Mpa) – SHs 4, 32 e 45

SH	Bacia	R	B	SB	REF	SL	Erro (%)
4	Média	10153	154	27089	1583	263	1,3
	Máxima	6673	106	13424	2207	178	2,1
32	Média	6964	183	9350	4696	284	2,6
	Máxima	5454	126	6563	3277	169	2,4
45	Média	8391	435	13375	6684	452	5,0
	Máxima	4498	178	9350	4696	274	4,0

**Tabela 9:** Módulos de Resiliência na condição aderida (Mpa) – SHs 4, 32 e 45

SH	Bacia	R	B	SB	REF	SL	Erro (%)
4	Média	9943	132	2129	1249	230	1,7
	Máxima	6651	86	3979	257	159	2,1
32	Média	7834	121	3777	597	251	2,0
	Máxima	5958	90	1087	547	146	2,1
45	Média	11171	227	5362	2477	382	1,5
	Máxima	5372	111	3356	1297	236	1,4

Nos resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9 cabe destacar os valores de MR das camadas de sub-base e reforço (sobretudo a SB), em comparação à camada de base, principalmente na condição não aderida, indicando tratar-se de um pavimento semirrígido invertido. Esta configuração estrutural explica, em parte, as baixas deflexões medidas nos três SHs pelo FWD e seus elevados raios de curvatura calculados (Tabela 3). Prova disso é que na avaliação preliminar dos referidos pavimentos com base na PRO 11 (DNER, 1979), os pavimentos desses SHs foram estruturalmente enquadrados na hipótese I, ou seja, de boa qualidade (SHs 4 e 45) e hipótese II, de qualidade regular (SH 32). Além disso, ao comparar-se os MRs obtidos nas duas condições de aderência, percebe-se que os valores da sub-base não aderida são bem superiores aos da aderida. Importante ressaltar que os pequenos valores dos erros em cada retroanálise, apresentados nas Tabelas 8 e 9, foram alcançados no programa na primeira tentativa.

### 3.3 Análise tensão-deformação – Software AEMC

As espessuras de reforço, dimensionadas com a aplicação da PRO 11 e que serviram de estimativa inicial para análise no AEMC, além das respostas elásticas obtidas com a análise tensão-deformação, nos pontos de interesse destacados na Figura 4, para as duas condições de atrito entre camadas consideradas, estão sumarizadas na Tabela 10.

Com as espessuras de reforço e respostas elásticas da Tabela 9 foi possível estimar, utilizando-se as Equações 1 e 2 (Tabela 6), o número N admissível ( $N_{adm}$ :  $N_{iref}$ ,  $N_{ir}$  e  $N_{sub}$ ), para os diferentes SHs e pontos de análise previamente estabelecidos (Figura 4), bem como para as duas condições de atrito entre as camadas do pavimento, e compará-los com os respectivos números N de projeto ( $N_{projeto}$ :  $N_{AASHTO}$  ou  $N_{USACE}$ ). Os resultados estão demonstrados nas Tabelas 11 e 12. É possível notar que as espessuras dos reforços atenderam ao critério de ruptura estabelecido ( $N_{adm} \geq N_{projeto}$ ) e são iguais para as duas condições de aderência, exceto em duas situações: bacias máximas dos SHs 32 e 45, onde a condição não aderida demandou reforços com espessuras superiores aos da condição aderida.

**Tabela 10:** Espessuras de reforço e respostas elásticas nos pontos de análise em cada SH

SH	Bacia	Reforço em CA (cm)		Resposta Elástica	AEMC		
		PRO 11	AEMC		Respostas elásticas (m/m)		
			Não aderida		Aderida	Não aderida	Aderida
4	Média	0,0	0,0	0,0	$\epsilon_{ref}$	-	-
					$\epsilon_{tr}$	$1,34 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-4}$
					$\epsilon_{v}$	$1,00 \times 10^{-5}$	$6,96 \times 10^{-5}$
	Máxima		3,0	3,0	$\epsilon_{ref}$	0,00	0,00
					$\epsilon_{tr}$	$1,61 \times 10^{-4}$	$1,55 \times 10^{-4}$
					$\epsilon_{v}$	$1,58 \times 10^{-5}$	$8,90 \times 10^{-5}$
32	Média	3,0	3,0	3,0	$\epsilon_{ref}$	0,00	0,00
					$\epsilon_{tr}$	$1,38 \times 10^{-4}$	$1,27 \times 10^{-4}$
					$\epsilon_{v}$	$1,40 \times 10^{-5}$	$6,62 \times 10^{-5}$
	Máxima		5,5	4,5	$\epsilon_{ref}$	0,00	0,00
					$\epsilon_{tr}$	$1,48 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-4}$
					$\epsilon_{v}$	$1,96 \times 10^{-5}$	$1,03 \times 10^{-4}$
45	Média	0,0	0,0	0,0	$\epsilon_{ref}$	-	-
					$\epsilon_{tr}$	$1,17 \times 10^{-4}$	$9,99 \times 10^{-5}$
					$\epsilon_{v}$	$1,04 \times 10^{-5}$	$3,99 \times 10^{-5}$
	Máxima		5,5	4,0	$\epsilon_{ref}$	0,00	0,00
					$\epsilon_{tr}$	$1,49 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-4}$
					$\epsilon_{v}$	$1,38 \times 10^{-5}$	$6,13 \times 10^{-5}$

**Tabela 11:** Espessuras de reforço,  $N_{projeto}$  e  $N_{adm}$  para a condição não aderida

SH	Bacia	Reforço (cm)	$N_{AASHTO}$	$N_{USACE}$	$N_{iref}$	$N_{ir}$	$N_{sub}$
4	Média	0,0	$2,17 \times 10^7$	$8,22 \times 10^7$	-	$4,38 \times 10^7$	$3,87 \times 10^{14}$
	Máxima	3,0	$2,17 \times 10^7$	$8,22 \times 10^7$	$\infty$	$2,30 \times 10^7$	$4,38 \times 10^{13}$
32	Média	3,0	$2,98 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	$\infty$	$3,94 \times 10^7$	$8,02 \times 10^{13}$
	Máxima	5,5	$2,98 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	$\infty$	$3,11 \times 10^7$	$1,60 \times 10^{13}$
45	Média	0,0	$2,98 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	-	$7,09 \times 10^7$	$3,32 \times 10^{14}$
	Máxima	5,5	$2,98 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	$\infty$	$3,00 \times 10^7$	$8,51 \times 10^{13}$

**Tabela 12:** Espessuras de reforço,  $N_{projeto}$  e  $N_{adm}$  para a condição aderida

SH	Bacia	Reforço (cm)	$N_{AASHTO}$	$N_{USACE}$	$N_{iref}$	$N_{ir}$	$N_{sub}$
4	Média	0,0	$2,17 \times 10^7$	$8,22 \times 10^7$	-	$4,85 \times 10^7$	$3,80 \times 10^{10}$
	Máxima	3,0	$2,17 \times 10^7$	$8,22 \times 10^7$	$\infty$	$2,64 \times 10^7$	$1,18 \times 10^{10}$
32	Média	3,0	$2,98 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	$\infty$	$5,34 \times 10^7$	$4,82 \times 10^{10}$
	Máxima	4,5	$2,98 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	$\infty$	$3,18 \times 10^7$	$5,78 \times 10^9$
45	Média	0,0	$2,98 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	-	$1,23 \times 10^8$	$5,36 \times 10^{11}$
	Máxima	4,0	$2,98 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	$\infty$	$3,09 \times 10^7$	$6,96 \times 10^{10}$

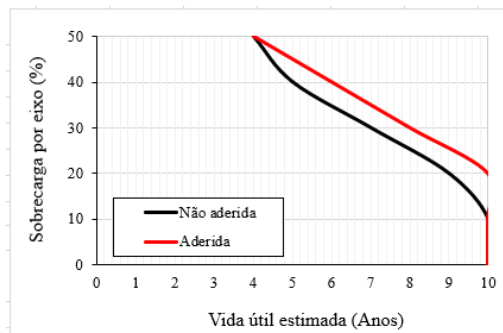
### 3.4 Previsão da Vida Útil do Pavimento nas Diferentes Condições de Sobrecarga

A avaliação do efeito da sobrecarga nos eixos dos veículos sobre a previsão de vida útil do pavimento, para as duas condições de aderências entre as camadas analisadas, está apresentada na Figura 5, evidenciando a diminuição da previsão de vida útil do pavimento dos três SHs à medida que a porcentagem de sobrecarga nos eixos dos veículos vai aumentando.

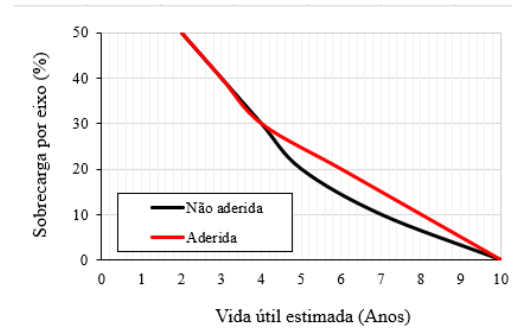
Na Figura 5a, referente ao SH 4 (bacia média), as camadas quando consideradas aderidas obtiveram menor queda da vida útil em função da sobrecarga, mostrando que o pavimento desse SH, nessa condição de aderência, suportaria, sem reduzir a previsão da sua vida útil, sobrecargas de até 20%, enquanto 30% e 40% reduziriam 2 e 4 anos de vida desse pavimento, respectivamente. Quando as camadas desse mesmo SH foram consideradas como

não aderidas, entretanto, o acréscimo de sobrecarga a partir de 10% reduziu a expectativa de vida consideravelmente. Para a Figura 5c, entretanto, referente ao SH 32 (bacia média), a resposta foi menos favorável para a estrutura, pois com 20% de sobrecarga, a previsão de vida útil do pavimento, nas condições não aderida e aderida, diminuiu para 7 e 9 anos, respectivamente. Essa atenuação vai ocorrendo de maneira similar para as duas condições de aderência, reduzindo consideravelmente a vida útil prevista.

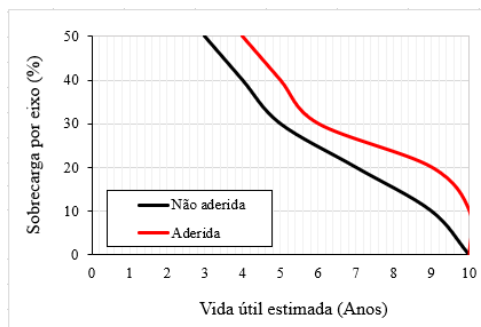
A situação mais promissora de toda análise é representada pela Figura 5e, referente ao SH 45 (bacia média), onde na condição aderida o pavimento suportaria, sem reduzir sua vida útil, sobrecargas de até 40%, enquanto 50% reduziria apenas dois anos de vida do pavimento, e na condição não aderida, a redução também não aconteceria para as porcentagens de 10% e 20%, iniciando-se a partir desse percentual (20%) sendo que, quando comparado as outras análises, a redução ocorre de forma menos acentuada.



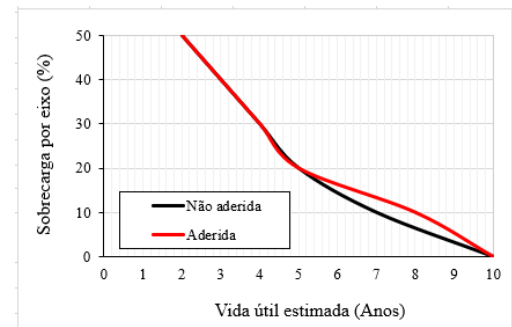
(a) SH 4: Bacia deflectométrica média



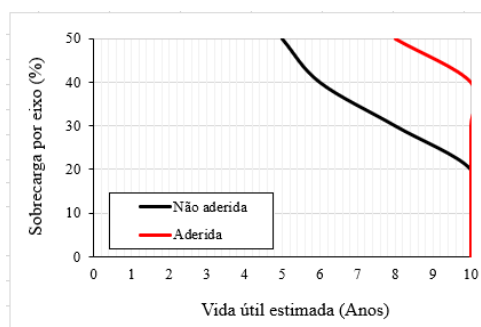
(b) SH 4: Bacia deflectométrica máxima



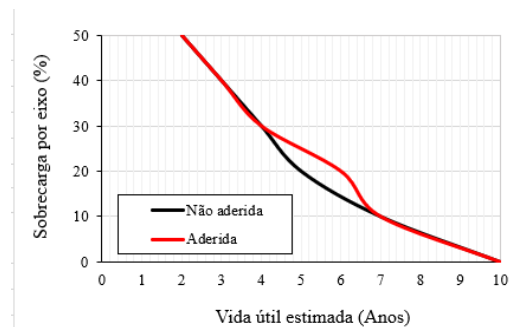
(c) SH 32: Bacia deflectométrica média



(d) SH 32: Bacia deflectométrica máxima



(e) SH 45: Bacia deflectométrica média



(f) SH 45: Bacia deflectométrica máxima

**Figura 5:** Influência da sobrecarga dos eixos e condição de aderência entre camadas na estimativa de vida útil do pavimento

Para as bacias máximas dos SHs 4, 32 e 45 (Figuras 5b, 5d e 5f, respectivamente) os resultados apresentaram comportamento similares. Nesses casos, a redução na previsão de vida útil também vai ocorrendo de forma acentuada para as duas condições de aderência, que coincidem seus valores a partir da sobrecarga de aproximadamente 30%, correspondente a 4 anos, chegando a uma diminuição drástica para 2 anos na sobrecarga de 50%.

Por fim, em relação a análise geral da previsão de vida útil do pavimento nas diferentes condições de sobrecarga, cabe destacar que a situação mais promissora, para as duas condições de aderência analisadas, foi representada pelo SH 32 (Figura 5e), para a bacia deflectométrica média, na qual ocorreram as menores alterações na previsão da vida útil inicialmente estabelecida. As situações mais desfavoráveis, contudo, ficaram representadas pelo SH 4 (Figuras 5b), SH 32 (Figura 5d) e SH 45 (Figura 5f), referentes as bacias deflectométricas máximas, que mostraram uma redução robusta na previsão de vida útil do pavimento.

#### 4. CONCLUSÃO

Através da análise dos dados obtidos nessa pesquisa é possível constatar que a vida útil do pavimento da BR-116/BA é reduzida consideravelmente à medida que se aplica sobrecarga nos eixos dos veículos. Isso caracteriza a realidade dos pavimentos asfálticos no Brasil, onde os limites de carga estabelecidos pela lei da balança (10% de sobrecarga no eixo e 5% no PBT e PBTC) não são respeitados, resultando em pavimentos que se deterioram precocemente em relação aos períodos para os quais foram projetados, causando muitos transtornos e desconfortos aos usuários da via, e muitas vezes até acidentes.

Pode-se inferir ainda que, em relação ao atrito entre as camadas, a condição não aderida (aderida entre a camada de reforço e o revestimento antigo e não aderida entre as demais camadas) tende a sofrer maior influência da sobrecarga, em comparação com a condição aderida, valendo salientar que ainda não existe consenso sobre qual condição de aderência represente melhor a realidade em campo.

Por fim, cabe destacar que a análise realizada evidenciou que a BR-116/BA, no trecho avaliado, possui uma estrutura de pavimento cujo comportamento mecânico é bastante satisfatório frente ao nível de carregamento já sofrido e ao que virá a solicitá-la nos próximos anos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida da Silva, D. E.; Motta, L. M. G. Instrumentation of the DNER Circular Track. Road Materials and Pavement Design. Vol. 4, n. 3, pp. 331-340. Jan. 2003.
- Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas 2019, <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/inicial>. Acesso em 12/05/2019.
- CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito. Resolução 526, de 29 de abril de 2015.
- DER-SP - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Projeto de Pavimentação. IP- DE-P00/001. São Paulo, 53 p. 2006.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. PRO 11 – Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento B. 1979.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2006. IPR – 719: Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro. 274 p.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Elaboração dos Projetos Básico e Executivo de Engenharia e Execução das Obras de Construção, Duplicação, Implantação de Vias Laterais, Adequação de Capacidade, Restauração com Melhoramentos e Obras de Arte Especiais na Rodovia BR-116/BA, Lote 06*. BA, 2020.
- Federal Highway Administration (FHWA), “User’s guide of the ELSYM5”, FHWA-TS-87- 206, 1978.
- Franco, F. A. C. P., Motta, L. M. G. Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa: Apresentação dos programas, Convênio UFRJ/DNIT, Rio de Janeiro, RJ, 2020.
- Huang Yang H., Pavement analysis and design, New Jersey, USA, Prentice-Hall, 1993.
- Ioannides A. and Michall. Analysis of slabs-on-grade for a variety of loading and support conditions. Thesis presented to University of Illinois, Urbana – Champaign, USA, 1984.

- Khazanovich L. and Ioannides A.M., “Diplomat: Analysis program for bituminous and concrete pavements.” Transportation Research Record 1482, 1995, pp. 52-66.
- Klamt, Rodrigo André; Specht, Luciano Pivoto; Budny, Jaelson; Knierim, Luciéle da Silva. *A influência da sobrecarga nos pavimentos e a importância da fiscalização de pesagem veicular nas rodovias brasileiras*. Revista Ciatic – UPF, SP, v. 9, p. 52-65, 2017.
- Lima, C. D. A., Motta, L. M. G., Aragão, F. T. S., Guimarães, A. C. R. “Mechanical Characterization of Fine Grained Lateritic Soils for Mechanistic Empirical Flexible Pavement Design”. Journal of Testing and Evaluation. Vol. 48, n. 1, pp. 1-14. Jan. 2020.
- Machado, Thiago Fávero de Oliveira; Marques, Geraldo Luciano de Oliveira; Rocha, Marcos Lamha. Flexible pavement overlay design of UFJF ring road based on the new Brazilian mechanistic-empirical pavement design method. REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, 73(4), 445-452, oct. dec. 2020.
- Pinto, S.; Preussler e. (2002). *Pavimentação rodoviária – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Copiarte. RJ, Rio de Janeiro.
- Réus, Thaís Ferrari; Silva Junior, Carlos Alberto Prado da; Fontenele, Heliana Barbosa. *Dano pelo sobrepeso de veículos comerciais ao pavimento flexível*. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 35, n. 1 e 2, p. 55-65, dez. 2014a.
- Réus, Thaís Ferrari; Silva Junior, Carlos Alberto Prado da; Fontenele, Heliana Barbosa. *Análise empírico-mecânica do efeito do excesso de carga veículos comerciais*. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 9, n. 2, p. 57-70, 2014b.
- Segundo, I. G. R.; Branco, V. T. F. C.; Vasconcelos, K. L.; Holanda, A. S. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. Revista Transportes, 24(4): 85-94. 2016.
- Vallejo, Flaviane Melo Lopes; Bernucci, Liedi Légi Bariani. *Análise do efeito do excesso de carga de veículos comerciais nos fatores de equivalência de carga*. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú, p. 1210-1221, 2019.

Vanessa Rebouças Santana (nessareboucas@hotmail.com)

---

Mario S. de S. Almeida (mario.almeida@ufrb.edu.br)

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Rua Rui Barbosa, 710 - Centro - Cruz das Almas, BA, Brasil