

Influência do excesso de carga no desempenho de estradas com revestimento primário

Overload influence on unsealed gravel road performance

Tiago Jungblut Kniphoff(1), João Rodrigo Guerreiro Mattos(2)

1 Universidade do Vale do Taquari (Univates), Lajeado, RS, Brasil.

E-mail: kinimp3@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6291-7699>

2 Universidade do Vale do Taquari (Univates), Lajeado, RS, Brasil.

E-mail: joao.mattos@univates.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7705-4600>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 9, n. 2, p. 36-53, julho-dezembro, 2022 - ISSN 2358-6508

[Recebido: julho 20, 2020; Aceito: julho 24, 2023]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2022.v9i2.4228>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

As estradas com revestimento primário são fundamentais no escoamento da produção rural e no acesso das comunidades rurais aos centros urbanos, possibilitando assim uma vida de melhor qualidade econômica e social para essa parcela da população. Um dos maiores problemas encontrados nesse tipo de estradas é o afundamento das trilhas de rodas, que são agravados pelo excesso de carga por eixo. No Brasil, trafegar com excesso de carga é uma prática frequente em virtude da inexistência de controle de peso na maioria das estradas do país. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do aumento da carga por eixo na tensão vertical no topo do subleito e na redução da vida útil através do fator de equivalência de cargas (FEC) em duas estradas vicinais localizadas em um assentamento no município de São Gabriel-RS. Essas avaliações foram realizadas através da análise das tensões verticais no topo do subleito e do FEC, com utilização de métodos matemáticos e do *software* SisPav, com a ferramenta AEMC. As análises foram realizadas para os carregamentos de 8,2 tf (padrão), 10 tf e 12 tf e concluiu-se que o aumento do carregamento no eixo gera acréscimo nas tensões verticais no topo do subleito e automaticamente ocasiona diminuição do número N e aumento do FEC, fazendo com que as projeções da vida útil das estradas estudadas tivessem uma redução de aproximadamente 60% para o carregamento de 10 tf e de 80% para o carregamento de 12 tf.

Palavras chave: Estradas vicinais. Excesso de carga. Desempenho de pavimentos.

Abstract

The unsealed gravel roads are fundamental to flow the rural production and to provide the rural population access to urban centers, allowing a better economic and social life quality for this portion of the population. One of the main problems found in this type of road is the rutting, which are caused by the axle overload. In Brazil, traffic with overload is a common practice due to the lack of weight control on the majority of brazilian roads. Therefore, this research aims to evaluate the effect of load increase per axle on vertical stress on top of the subgrade and on the reduction of lifespan through the load equivalency factor (LEF) on two unpaved roads located in a settlement in the city of São Gabriel, RS. Those evaluations were made through the analysis of the vertical stresses on top of the subgrade and the through the LEF, using mathematics methods and SisPav software, with the AEMC tool. The analysis were always made for loads of 8,2 tf (standard), 10 tf and 12 tf and the study concluded that increased loading on the axle generates an increase in the vertical stresses on top of the subgrade, and automatically occasions decrease on the N number and increase of LEF, making the projections of lifespan of the analysed roads have a reduction of approximately 60% for 10 tf load and of 80% for 12 tf load).

Keywords: Unsealaved gravel roads. Overload. Pavement performance.

1 Introdução

As estradas vicinais constituem o principal meio de ligação entre pessoas, bens e produtos das zonas rurais e os centros urbanos, tendo grande importância na vida social e econômica de comunidades rurais. Essas estradas são responsáveis pelo escoamento de grande parte da produção agrícola das regiões rurais para os centros urbanos. Conforme a Fundação Dom Cabral (FDC, 2017), a malha viária brasileira é utilizada para escoar 75% da produção do país. Entretanto, Braga e Guimarães (2014) citam que o transporte dessa produção através das vicinais acaba gerando prejuízo para os produtores e para a economia em geral, pois as estradas apresentam muitos problemas estruturais gerando perda de produção, atraso nas entregas, além de gastos desnecessários com manutenção dos veículos de transporte. Segundo Casarotto *et al.* (2014), frequentemente o estado precário das rodovias brasileiras é apontado como um dos culpados pelo alto custo do transporte no país, fazendo com que a produção brasileira perca competitividade no mercado internacional ou gere uma diminuição nas margens de lucro dos agentes produtores ou exportadores.

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), o Brasil possui uma malha rodoviária de 1.720.700,00 quilômetros. As estradas com revestimento primário representam 78,50% deste total, resultando em 1.349.939,00 quilômetros. Mesmo com essa extensa malha de vias, não se percebe uma preocupação pelos problemas estruturais dessas estradas.

A seleção do material a ser utilizado e o dimensionamento das espessuras das camadas do pavimento são essenciais para um bom desempenho das estradas vicinais. Portanto, elaborar um projeto adequado dessas vias resulta no aumento da sua vida útil, diminuição dos problemas enfrentados pelos usuários e, conseqüentemente, redução dos custos com a sua manutenção. Embora, atualmente, não exista um método consolidado para o dimensionamento do pavimento das estradas com revestimento primário, existem algumas propostas que consideram conceitos da teoria da elasticidade aplicada à mecânica dos pavimentos e em conjunto com a mecânica dos solos, como Bertuzzo (2015) e Nervis (2018).

Um dos fatores que comprometem a segurança, o conforto e, principalmente, a estrutura da via é o excesso de carga. De acordo com DNIT (2006), o Brasil apresenta um cenário desfavorável em relação ao excesso de carga. Esta prática é adotada com frequência, devido às vantagens econômicas da relação custo/unidade de medida transportada e a inexistência de controle de peso na maioria absoluta das estradas brasileiras. DNIT (2006) relata ainda que o excesso de peso por eixo tem como consequência a redução na vida útil do pavimento.

Segundo Albano (2005), se por um lado o excesso de carga por eixo aumenta a produtividade e os lucros da indústria de transporte, por outro lado, produz um efeito indesejável, qual seja o de deteriorar aceleradamente a camada de revestimento e a

estrutura dos pavimentos da rede viária. O autor ainda cita que ultrapassar os limites legais de carga por eixo constitui uma ação criminosa que obriga o Governo a aplicar grandes recursos para a manutenção e restauração viária.

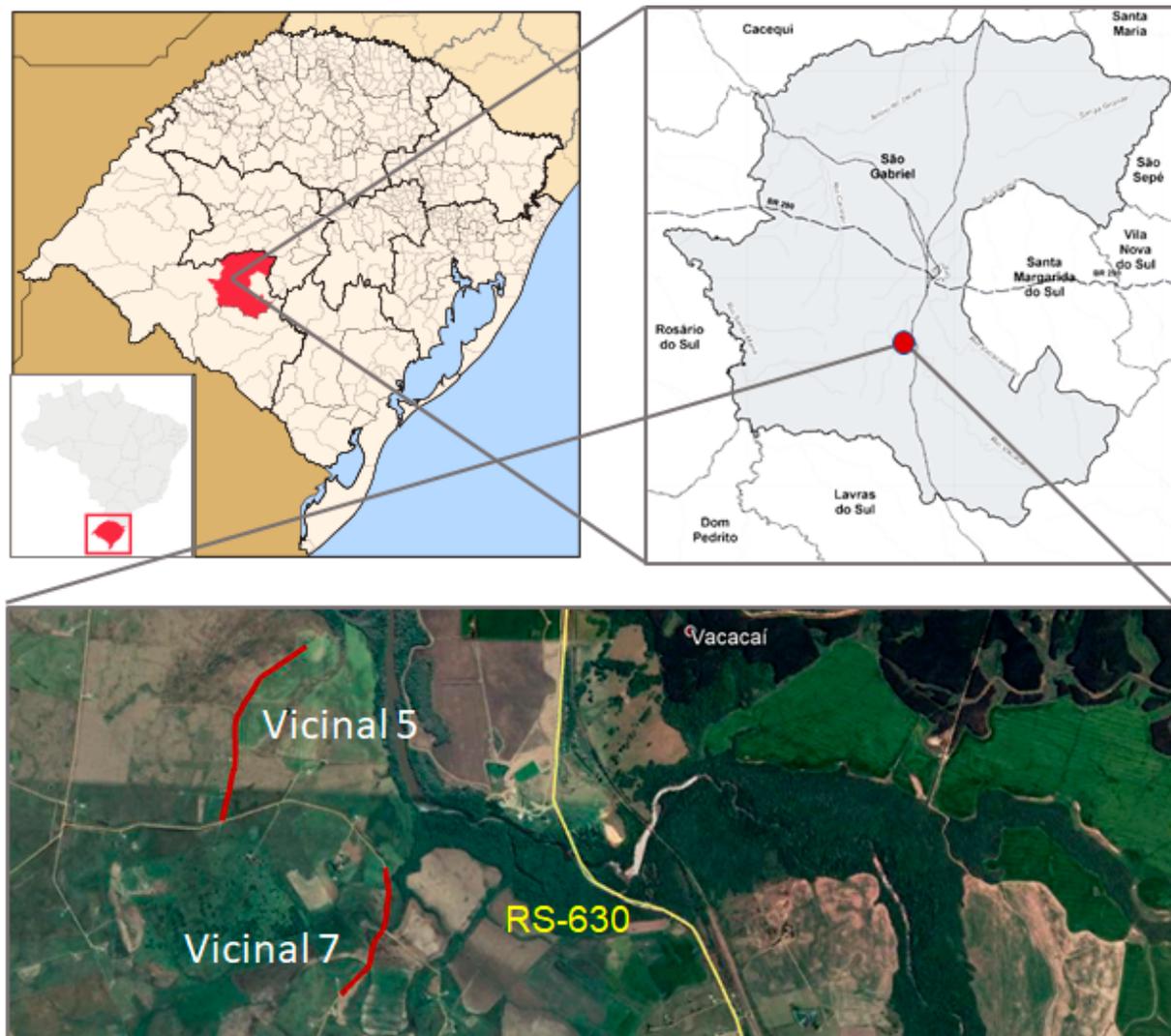
Considerando todos os aspectos sobre as estradas com revestimento primário brasileiras, procurou-se neste estudo analisar a influência do excesso de carga no desempenho de pavimentos estudados num assentamento pertencente ao Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), denominado Conquista do Caiboaté, na cidade de São Gabriel-RS. Para tanto, levou-se em consideração as deflexões medidas com viga Benkelman dos pavimentos para determinar os valores de módulo de resiliência dos materiais em campo e, a partir de simulações computacionais, verificou-se o efeito do aumento da carga por eixo na tensão vertical no topo do subleito, que é a solicitação responsável pelas deformações permanentes (afundamentos nas trilhas de roda), um dos principais problemas encontrados nas estradas com revestimento primário. Também foi verificada a influência deste aumento da carga na redução da vida útil dessas estradas através do fator de equivalência de cargas.

2 Procedimentos Metodológicos

2.1 Descrição do objeto de estudo

Como objeto de estudo deste artigo, foram utilizadas duas estradas com revestimento primário executadas no Projeto de Assentamento (PA) Conquista do Caiboaté licitado no ano de 2009 pelo INCRA. O PA está localizado no município de São Gabriel, Estado do Rio Grande do Sul - Brasil. Na Figura 1, apresenta-se um mapa com a localização do PA e da situação dos trechos das vicinais estudadas.

Figura 1 – Mapa de localização e situação



Fonte: Dos autores, com base no Google Earth.

O projeto executivo das vias analisadas consistia na aplicação de uma camada de revestimento de 15 centímetros de solo argiloso, executada sobre um subleito de solo arenoso. O material utilizado na camada de revestimento foi extraído de uma jazida localizada dentro da área do PA.

Amostras de solo do subleito e do revestimento do PA Conquista do Caiboaté foram caracterizadas através de ensaios em laboratório por Nervis *et al.* (2013). O material do subleito é composto basicamente por silte bem graduado, já o material do revestimento primário é um solo argiloso bem graduado, conforme as granulometrias apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Granulometria do material do subleito e do revestimento primário

Classificação	Subleito	Revestimento
Pedregulho (>2mm)	2%	21%
Areia Grossa (2mm a 0,6mm)	9%	3%
Areia Média (0,6mm a 0,2mm)	17%	5%
Areia Fina (0,2mm a 0,06mm)	25%	9%
Silte (0,06mm a 0,002mm)	31%	27%
Argila (<0,002mm)	16%	35%

Fonte: Nervis *et al.*, 2013.

Além da granulometria, os autores mencionados anteriormente também realizaram o ensaio de compactação com a energia normal e determinaram o Índice de Suporte Califórnia (ISC). Os resultados obtidos para os valores de peso específico aparente seco máximo (γ_d), de umidade ótima (w) e do ISC podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios para subleito e revestimento primário

Parâmetro	Subleito	Revestimento
Peso específico aparente seco máximo (γ_d)	18,93 kN/m ³	16,43 kN/m ³
Umidade ótima (w)	12,38%	20,85%
Índice Suporte Califórnia (ISC)	19,0%	14,0%

Fonte: Nervis *et al.*, 2013.

O resultado de apenas 14% de ISC demonstra que o material possui uma capacidade de suporte abaixo do que seria esperado para ser empregado como revestimento, pois São Paulo (2006) indica que o material dessa camada deve possuir ISC igual ou superior a 20%. Destaca-se também que o material do revestimento primário apresentou menor valor de ISC que o subleito natural, o que deve ter ocorrido pela necessidade do revestimento apresentar características funcionais, como baixa erosão e maior aderência, por exemplo.

2.2 Deflexão característica do pavimento

A qualidade das estradas vicinais deste projeto de assentamento foi verificada estudada por Kniphoff (2012) através de ensaios de viga Benkelman, utilizando a norma DNER-ME 024/94 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Na ocasião, o autor acompanhou a medição das deflexões na camada de revestimento das duas estradas estudadas.

Os trechos das vicinais 5 e 7, assim denominadas no projeto do INCRA, possuíam extensão de 1.000 e 700 metros, respectivamente. O trecho da vicinal 5 era compreendido entre as estacas de terraplenagem 0+000 e 1+000, e o trecho padrão da vicinal 7 era compreendido entre as estacas 2+900 e 3+600. Para a realização dos

ensaios de viga Benkelman, cada um destes trechos foi estaqueado de 20 em 20 metros, sendo que o ensaio foi executado alternando os lados (esquerdo e direito) das vicinais.

Para as análises das deflexões, foi utilizado o procedimento preconizado pela norma DNER-PRO 011/79. A partir das deflexões medidas, a norma citada descreve o método para se calcular a deflexão característica correspondente. Primeiramente, calcula-se a média aritmética (D) e o desvio padrão (σ) da amostra. Após calculado o desvio padrão, o intervalo de aceitação é definido como $D \pm z \cdot \sigma$, onde z é estimado em função do número de pontos coletados (n), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de z em função de n

N	Z
3	1,0
4	1,5
5-6	2,0
7-19	2,5
≥ 20	3,0

Fonte: DNER, 1979.

Posteriormente, procede-se a eliminação dos valores situados fora do intervalo anteriormente definido e determinam-se os novos valores de D e σ com os valores remanescentes. A partir disso, também são fixados os novos limites do intervalo de aceitação para a nova situação. Esse procedimento deve ser repetido até que todos os valores restantes se enquadrem no intervalo de aceitação determinado. Por fim, determinam-se então os valores de D e σ para os dados remanescentes, com os quais se calcula o valor da deflexão característica (D_c), como sendo a soma $D + \sigma$.

2.3 Módulos de Resiliência das Camadas do Pavimento

A determinação dos módulos de resiliência dos materiais foi realizada com o auxílio do *software* SisPav, empregando a ferramenta AEMC. A retroanálise realizada neste estudo foi através de tentativas com variações dos valores dos módulos de resiliência das camadas de subleito e de revestimento até que se obtivesse uma deflexão na simulação numérica igual à deflexão característica obtida no levantamento defletométrico de campo com a viga Benkelman. Para tanto, optou-se por fixar os valores de coeficiente de Poisson dos materiais, com base em valores definidos pela experiência dos autores. Segundo Motta (1991), este procedimento é válido, pois, quando comparados, os resultados das deflexões medidas em campo através do ensaio de Viga Benkelman e os valores obtidos em simulações numéricas são muito próximos.

Para essa determinação dos módulos de resiliência foi considerado a utilização do eixo padrão brasileiro, que consiste num eixo simples de rodado duplo, com carga de 8,2 tf (toneladas força), com pneus calibrados com 560 kPa de pressão. Na simulação

computacional, com a ferramenta AEMC, utilizou-se que a distância entre rodas era de 0,30 m e com ponto analisado sempre entre as rodas para representar o levantamento realizado com a viga Benkelman.

2.4 Deformações permanentes

Segundo Lopes (2012), as deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga. De acordo com Mattos (2014), uma das origens dessas deformações é a ruptura do subleito, pois quando a tensão vertical de compressão que chega ao topo do subleito é maior que a resistência do material que compõe o subleito, podem ocorrer rupturas desse material de subleito. Mattos (2014) cita ainda que as deformações permanentes são caracterizadas, principalmente, pelos afundamentos nas trilhas de rodas (ATR), ocasionados pela ação repetida de passagem das cargas de roda dos pneus e ao fluxo canalizado dos veículos pesados.

Esse defeito ocasiona uma perda de capacidade de drenagem da estrada, ficando o pavimento exposto aos problemas ocasionados pela água. O acúmulo de água nas trilhas de roda prejudica a drenagem da estrada e pode gerar agravamento dos problemas de erosão e panelas. As deformações também ocasionam sensações de desconforto, devido ao fato que os afundamentos de trilha de rodas geram aumento da irregularidade da via.

2.5 Desempenho das Estradas com Revestimentos Primários

Para verificar o desempenho do pavimento das estradas estudadas, foi utilizado como critério a tensão vertical no topo do subleito, pois, conforme citado anteriormente, as deformações permanentes (trilhas de roda) podem ter origem na ruptura do subleito. Franco (2007) cita ainda que a deformação permanente das camadas preparadas do pavimento é insignificante quando comparada à deformação do subleito.

Uma das principais funções das camadas que constituem um pavimento é receber as solicitações oriundas do tráfego e promover a propagação das tensões aplicadas na superfície, de tal maneira que o subleito receba uma porção bem reduzida dessa tensão superficial. Segundo Heukelom e Klomp (1962) *apud* Silva *et al.* (2011), é possível calcular a tensão vertical admissível no subleito através da Equação 1.

$$\sigma_{V,adm} = \frac{0,006 \times MR}{1 + 0,7 \times \log N} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$\sigma_{V,adm}$: Tensão vertical admissível;

MR: Módulo de Resiliência do subleito;

N: número de aplicações de carga.

Nota-se, na Equação 1, que a tensão admissível é influenciada pelo módulo de resiliência e pelo número N (passadas do eixo padrão de 8,2 tf). Nas vicinais estudadas, foi utilizado um eixo simples com rodado duplo com cargas de 8,2 tf, 10,0 tf e 12,0 tf para as simulações.

2.6 Software SisPav

Com o objetivo de avaliar o efeito na tensão vertical devido às cargas, utilizou-se o *software* SisPav (Sistema para Análise e Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Flexíveis). Desenvolvido por Franco (2007) na COPPE/UFRJ, o *software* utiliza a teoria da elasticidade, por meio da ferramenta AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), cuja base foi a rotina JULEA desenvolvida por Uzan (1978).

A ferramenta AEMC, de acordo com Franco (2007), é específica para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, com rotinas pra entradas de dados e apresentação de resultados. No desenvolvimento deste estudo, foram analisados pontos localizados abaixo de uma das rodas e pontos entre as duas rodas, posicionados na superfície do revestimento primário e na profundidade do topo do subleito.

2.7 Equivalência entre cargas

O setor rodoviário apresenta uma grande variação das configurações de eixos no tráfego, e com isso, de acordo com Szlachta (2015), torna-se necessário a existência de um fator que permita a conversão de diversas solicitações de diferentes eixos em um número equivalente de solicitação padrão. Devido a este motivo, criou-se o fator de equivalência de carga, conhecido como FEC.

Segundo Balbo (2007), o conceito de equivalência entre cargas surgiu da simples observação de que os efeitos destrutivos ocasionados ao longo do tempo em estruturas de pavimento idênticas, por veículos diferentes, são desiguais, emergindo então um critério comparativo entre veículos.

De acordo com Szlachta (2015), um dos fatores de equivalência de cargas conhecido e utilizado foi desenvolvido pela US Army Corps of Engineers (USACE). O método da USACE avalia o afundamento plástico no subleito, através dos efeitos dos carregamentos a uma profundidade aproximada de 0,33 metros, que estão associados ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de rodas. A Tabela 4 demonstra o FEC segundo a USACE.

Tabela 4 – Fator de equivalência de carga pelo método USACE

Tipos de Eixo	Faixa de cargas (t)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0-8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0-11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0-18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Fonte: DNIT, 2006.

Onde:

P: peso bruto total sobre o eixo.

De acordo com Yoder e Witczak (1975) *apud* Balbo (2007), os fatores de equivalência de cargas (FEC) definem o estrago provocado pela passagem de um veículo qualquer, para um tipo de pavimento específico, em relação ao estrago causado pela passagem de um veículo definido como padrão para o mesmo tipo de pavimento considerado. Szlachta (2015) cita ainda que esta deterioração é entendida como o número de solicitações necessárias para causar a falha na estrutura.

O fator de equivalência de cargas pode ser definido numericamente, segundo Balbo (2007), pela relação entre o número de repetições de carga do veículo padrão e de um veículo qualquer que levem ao mesmo e exatamente idêntico estado de ruína uma determinada seção de pavimento. Portanto, tem-se a seguinte expressão matemática, demonstrada na Equação 2.

$$FEC = \frac{Np}{Ni} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

FEC: Fator de Equivalência de Cargas;

Np: Número de solicitações de um eixo padrão para ocasionar falha na estrutura;

Ni: Número de solicitações de um eixo qualquer para ocasionar falha na estrutura.

Balbo (2007) relata ainda que os métodos de dimensionamento que empregam o conceito de FEC consideram todos os efeitos resultantes da repetição de cargas de eixos diferentes, transformando-os em repetições do eixo-padrão equivalente. Sendo assim, por meio desses fatores de equivalência de cargas, todo o tráfego será convertido para um número *N* de repetições equivalentes ao eixo-padrão.

Para o cálculo do fator de equivalência de cargas proposto neste estudo, primeiramente foi calculado o número *N* para cada um dos três carregamentos

analisados. O cálculo do número N foi realizado através da fórmula de Heukelom e Klomp (1962), inserindo as tensões verticais no topo do subleito obtidas pela simulação como sendo os valores da tensão vertical admissível (σ_{Vadm}) e deixando o N como variável a ser descoberta pela Equação 1. Após, usou-se os valores dos números N calculados com as tensões relativas as cargas de 10 tf e 12 tf como sendo os números de solicitações de um eixo qualquer para ocasionar falha na estrutura, assim, foi possível determinar, através da Equação 2, o fator de equivalência de cargas nas estradas com revestimento primário do PA Conquista do Caiboaté.

3 Resultados e Discussão

3.1 Medidas das deflexões

Após a realização das medições das deflexões nas vicinais e empregando a metodologia exposta, calculou-se a média aritmética, o desvio padrão das amostras e as deflexões características de cada estrada vicinal do estudo. Como informado anteriormente, foram realizadas medições de deflexão na camada de revestimento, cujos resultados já analisados são apresentados na Tabela 5. Os dados originais das medidas das deflexões em cada estaca de cada trecho estudado estão contidos no estudo de Kniphoff (2012).

Tabela 5 – Resultados dos cálculos referentes as deflexões nas vicinais

Estrada	Média (D) (0,01 mm)	Desvio padrão (σ) (0,01 mm)	Deflexão característica (Dc) (0,01 mm)
Vicinal 5	46,48	44,02	90,70
Vicinal 7	70,94	17,39	88,34

Fonte: Kniphoff, 2012.

Nota-se que a deflexão característica da estrada vicinal 5 é praticamente a mesma da vicinal 7. Isso se deve ao criterioso controle tecnológico aplicado na construção dessas estradas.

3.2 Determinação dos módulos de resiliência

Os resultados da retroanálise permitiram a definição das propriedades resilientes das camadas que compõem os pavimentos analisados. Os valores de coeficiente de Poisson e Módulo de Resiliência (MR) podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores dos módulos de resiliência para os pavimentos

Estrada	Camada	Coefficiente de Poisson	Módulo de resiliência (mpa)
Vicinal 5	Revestimento	0,40	224,00
	Subleito	0,45	74,00
Vicinal 7	Revestimento	0,40	269,00
	Subleito	0,45	74,00

Fonte: Autores.

3.3 Estimativa da tensão vertical no topo do subleito

A estimativa da tensão vertical no topo do subleito foi obtida através de simulações numéricas, na ferramenta AEMC, das cargas por eixo aplicadas neste estudo. A Tabela 7 mostra os resultados das tensões estimadas.

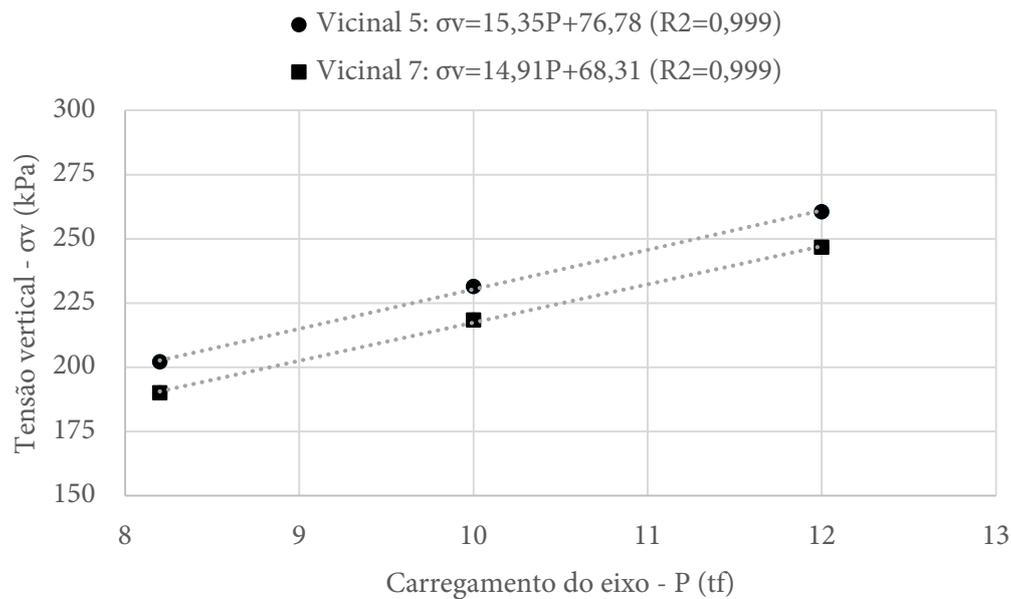
Tabela 7 – Resultados das tensões verticais estimadas no topo do subleito

Estrada	Carregamento (Tf)	Tensão vertical no topo do subleito (kPa)
Vicinal 5	8,2	202,1
	10,0	231,4
	12,0	260,5
Vicinal 7	8,2	190,0
	10,0	218,4
	12,0	246,7

Fonte: Autores.

Salienta-se que, em todos os casos analisados, a maior tensão vertical no topo do subleito foi encontrada embaixo da projeção de uma das rodas do eixo carregado. Para visualização da influência da carga do eixo (P) na tensão vertical (σ_v) no subleito, plotaram-se os dados obtidos para a tensão vertical no topo do subleito em função da carga por eixo, cujos resultados podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 – Tensão vertical no topo do subleito em função do carregamento



Fonte: Dos autores.

Observa-se, pelos dados da Figura 2, que o crescimento na tensão vertical no topo do subleito é linearmente crescente com o aumento da carga do eixo. Conforme o modelo matemático ajustado para cada vicinal, percebe-se que ambos apresentam um coeficiente de determinação (R^2) quase igual a 1, o que faz com que os modelos propostos tenham excelente representatividade para os dados analisados.

3.4 Cálculo do fator de equivalência de cargas

A Tabela 8 demonstra os valores utilizados e os resultados dos cálculos do fator de equivalência de cargas (FEC), empregando as Equações 1 e 2, conforme descrito anteriormente. De posse dos valores do FEC encontrado para cada carregamento, foi possível determinar o percentual de redução da vida útil devido ao aumento da carga por eixo, os valores também são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos cálculos do FEC para as estradas estudadas

Estrada	Carregamento (tf)	Número N	FEC	Redução da vida útil (%)
Vicinal 5	8,2	51,27	1,00	0,00
	10	20,54	2,50	59,95
	12	10,15	5,05	80,21
Vicinal 7	8,2	81,24	1,00	0,00
	10	29,90	2,72	63,20
	12	13,88	5,85	82,91

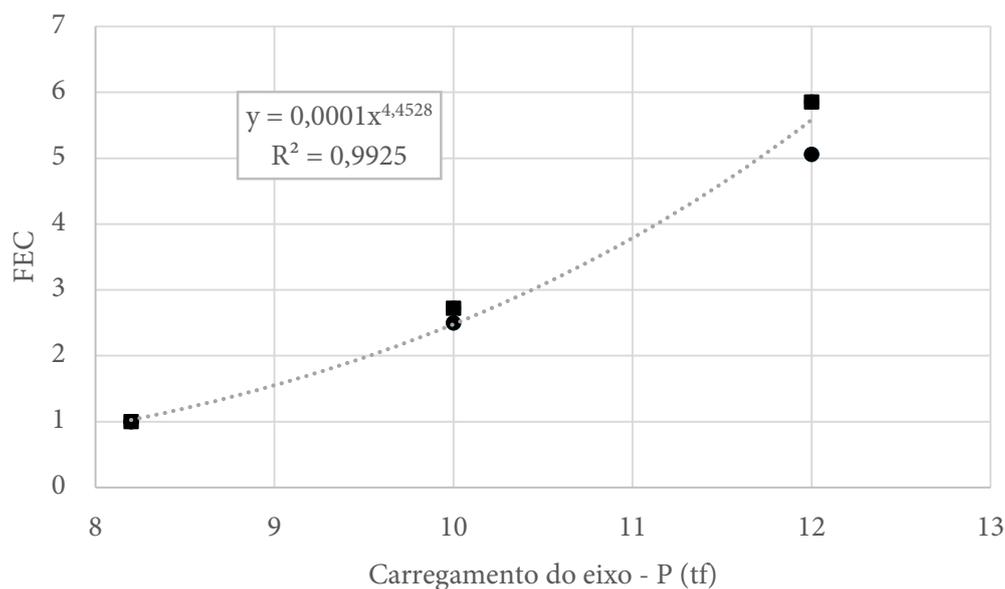
Fonte: Autores.

Como se pode observar na Tabela 8, o aumento do FEC gera uma redução no número N. E, como era de se esperar, o aumento do FEC ocasiona uma redução da vida útil da estrutura da estrada.

Nota-se que um FEC entre 2,50 e 3,00 gerou uma redução de vida útil de, aproximadamente, 60%. Já um FEC entre 5,00 e 6,00 ocasionou uma redução em torno de 80% da vida útil da estrada. Esses resultados mostram como o excesso de carga é extremamente danoso para as estradas em geral.

A partir dos dados apresentados na Tabela 8, foi possível ajustar um modelo matemático para cálculo do FEC em função da carga por eixo. Na Figura 3, é possível visualizar graficamente os dados do FEC obtidos neste estudo com as diferentes cargas por eixo simuladas empregando conceitos de mecânica dos pavimentos.

Figura 3 – Fatores equivalentes de cargas em relação aos carregamentos simulados



Fonte: Autores.

Conforme apresentado na Figura 3, o modelo proposto apresentou elevado valor de R^2 , o que valida matematicamente o modelo para ser empregado dentro das limitações dos dados estudados, ou seja, para estradas vicinais semelhantes as deste estudo e para variações de carga por eixo entre 8,2 tf e 12 tf. Na Equação 3, apresenta-se o modelo do FEC encontrado neste estudo.

$$FEC = 10^{-4} x P^{4,4528} \text{ Eq. 3}$$

Onde:

FEC: fator de equivalência de carga;

P: peso bruto total sobre o eixo.

Através do modelo apresentado na Equação 3, pode-se notar que, em comparação com o modelo do USACE (Tabela 6), o efeito do aumento da carga é mais danoso ao avaliar a deformação ou ruptura no subleito para estradas com revestimentos primários, lembrando ainda que este modelo do USACE é para materiais dos Estados Unidos, que, em grande parte, apresentam comportamentos diferentes do que os encontrados em países tropicais como o Brasil. Tal fato ajuda a explicar o porquê da malha viária brasileira formada por esse tipo de pavimentos apresentar condições tão precárias na maior parte dos casos.

4 Considerações finais

Este estudo permitiu observar que o aumento do carregamento em um eixo simples de rodado duplo em relação ao carregamento padrão de 8,2 tf tende a ocasionar muitos problemas para a estrutura de uma estrada. Observou-se que, em decorrência desse acréscimo de carregamento, ocorre um aumento linear da tensão vertical no topo do subleito, na qual a maior tensão foi encontrada embaixo da projeção de uma das rodas do eixo carregado. Nas duas vicinais estudadas, o aumento do carregamento de 8,2 tf para 10 tf gerou um acréscimo de aproximadamente 15% na tensão vertical no topo do subleito. Já o aumento do carregamento de 10 tf para 12 tf gerou aproximadamente 12,5% de tensão vertical a mais no topo do subleito.

Devido as tensões verticais no topo do subleito terem aumentado linearmente conforme o acréscimo de carregamento no eixo, verificaram-se elevadas reduções da vida útil do pavimento para os carregamentos estudados. Isso mostra que, conforme o aumento da tensão vertical no topo do subleito, o número N (quantidade de passagens do eixo padrão por um determinado ponto) tende a diminuir. Em virtude dessa diminuição do número N , muitas vezes a quantidade de passagens do eixo padrão logo chega ao seu limite, iniciando, assim, uma das formas de degradação da estrada.

Esta diminuição do número N também gera problemas em relação ao fator de equivalência de cargas (FEC), visto que o cálculo deste FEC é baseado na divisão do número N de um carregamento padrão (8,2 tf) pelo número N de um carregamento qualquer (neste caso, representado pelos carregamentos de 10 e 12 tf). Então um aumento do carregamento, diminui o número N e, conseqüentemente, um aumento do FEC através da divisão de um número N maior (referente ao carregamento padrão de 8,2 tf) por um número N menor.

Conforme a diminuição do número N e, conseqüentemente, o aumento do FEC, foi possível analisar a previsão de redução de vida útil das estradas estudadas. Nesta análise, verificou-se que um aumento de aproximadamente 2 tf no carregamento do eixo simples de rodado duplo em uma estrada não pavimentada com características semelhantes às das estradas estudadas neste artigo, gera uma

redução em torno de 60% da vida útil desta estrada. Também pode-se verificar que o aumento de aproximadamente 4 tf no carregamento do eixo gerará uma redução de, aproximadamente, 80% da vida útil desta estrada.

Pode-se concluir também que os aumentos dos carregamentos dos eixos de rodas, somado aos efeitos que esses ocasionam, geram as deformações permanentes, como, por exemplo, os afundamentos de trilhas de rodas (ATR). Essas deformações têm grande contribuição na redução da vida útil de uma estrada. Além disso, elas colocam a segurança dos usuários em risco, devido ao acúmulo de água nas trilhas de roda.

Todos os fatores e números citados anteriormente ajudam a explicar a situação precária da malha viária brasileira, principalmente, no que se refere às estradas não pavimentadas executadas com revestimento primário. Devido ao fato dessas estradas praticamente não possuírem fiscalização de tráfego e utilização de balanças, os veículos de transporte que trafegam nestas vicinais abusam da carga sobre eixos, acelerando o processo de deterioração e redução de vida útil das estradas. Isso acaba afetando diretamente o escoamento da produção das localidades ao redor destas estradas, sem contar o problema social que isso causa, devido as comunidades muitas vezes ficarem sem transporte público, sem acesso às cidades grandes e com dificuldades de locomoção para as escolas e centros de saúde.

Referências

- ALBANO, J. F. *Efeitos dos Excessos de Carga sobre a durabilidade dos pavimentos*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- BALBO, J. T. *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*, São Paulo: Oficina de Textos, 2007.558 p.
- BERTUZZO, R. F. *Proposta de método para dimensionamento de pavimentos com revestimento primário*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2015.
- BRAGA, F. L. N.; GUIMARÃES, G. R. Avaliação de rodovias não pavimentadas: uma ferramenta para o gerenciamento de malhas viárias. *Revista Pensar Engenharia*, v. 2, n.1, 2014.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. *Manual de Estudos de Tráfego*, Rio de Janeiro, 2006. 384 p. (IPR. Publ., 723).
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Determinação das Deflexões no Pavimento pela Viga Benkelman*. Método de Ensaio DNER-ME 024/94, Rio de Janeiro, 1994.
- BRASIL. DNER-PRO 011/79. *Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis*. (Procedimento B), Rio de Janeiro, 1979.
- CASAROTTO, E. L. et al. *Análise situacional das rodovias federais no Mato Grosso Do Sul*. Comunicação & Mercado – UNIGRAN, Dourados, 2014.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE: CNT: Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial, Brasília, 2018. Disponível em <http://cms.pesquisarodovias.cnt.org.br//Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20de%20Rodovias%202018%20-%20web%20-%20alta.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2018.
- FRANCO, F. A. C. D. P. *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos* - SISPAV. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- FUNDAÇÃO DOM CABRAL: FDC: Custos Logísticos no Brasil 2017, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.fdc.org.br/conhecimento-site/nucleos-de-pesquisa-site/Materiais/pesquisa-custos-logisticos2017.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2018.
- KNIPHOF, T. J. *Aspectos relacionados ao controle tecnológico durante a execução de estradas vicinais*. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul – Unisc, Santa Cruz do Sul, 2012.
- LOPES; F. M. *Pavimentos Flexíveis com Revestimento Asfáltico – Avaliação Estrutural a Partir dos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação*. Dissertação de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes, Campinas, 2012.
- MATTOS, J. R. G. *Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande*

do Sul. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MOTTA, L. M. G. *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. Tese de doutorado – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

NERVIS, L. O. Proposta de metodologia simplificada para o dimensionamento de pavimentos com revestimento primário. *Revista Transportes*, v. 26, n. 1, 2018. p. 108-129.

NERVIS, L. O. et al. Controle Tecnológico de Compactação de Camada de Revestimento Primário de Vias não Pavimentadas com o Emprego de Viga Benkelman. *VII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul*, Santa Maria, 2013.

SÃO PAULO. Secretaria dos Transportes. *Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - DER/SP. ET-DE-POO/013 Revestimento Primário*. São Paulo, 2006.

SILVA, T. O. et al. Influência do tráfego de veículos comerciais em rodovias vicinais não pavimentadas: estudo de caso aplicado à VCS 346. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 539-545, 2011.

SZLACHTA, D. *Determinação do fator de equivalência de carga do eixo especial*. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, UFSM, Santa Maria, 2015.