



NETLOG 2021

International Conference on Network
Enterprises & Logistics Management

Aplicação Econômica da Rodagem Tripla em Veículos de Carga: Estudo de Caso

Boulos Filho, P.; Nääs, I. A.

Universidade Paulista – UNIP

*pa.boulos@hotmail.com

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de caso para o desenvolvimento da análise comparativa que avalia um trajeto de transporte de soja sob um aspecto diferenciado. Foi simulada a adição de um pneu extra ao eixo duplo padrão preconizado pelas normas brasileiras e foi feito um estudo comparativo relacionando carga e custo do frete em um trecho pré-identificado de uma rodovia passando pelo estado do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, indo da cidade de Lucas do Rio Verde até a estação ferroviária de Rondonópolis, rota entre o produtor e a ferrovia que direciona a carga ao porto. Através dos resultados foi possível entender que este tipo de eixo com rodagem tripla se torna interessante no aspecto financeiro do custo do transporte permitindo, em um mesmo frete, uma quantidade de carga maior gerando o mesmo dano ao pavimento, sem prejudicar a vida útil do pavimento, inicialmente projetado para durar dez anos.

Palavras-chave: Desenvolvimento, Econômica, Transporte, Eixo, Tripla.

Abstract

This work presents a case study to develop a comparative analysis that evaluates a soy transportation route under a different aspect. An extra tire was simulated to be added to the standard double axle recommended by Brazilian norms, and a comparative study was made relating load and cost freight on a pre-identified stretch of highway through the state of Mato Grosso, and Mato Grosso do Sul, from the city of Lucas do Rio Verde to the Rondonópolis train station, the route between the producer and the railroad that directs the cargo to the port. Through the results, it was possible to understand that this type of axle with triple wheels becomes interesting in the financial aspect of the cost of transport, allowing, in the same freight, a greater amount of load generating the same damage to the pavement, without affecting the pavement's useful life, which was initially designed to last ten years.

Keywords: Development, Economic, Transport, Axle, Triple.

1. Introdução

As demandas do cenário econômico mundial exigem cada vez mais otimização dos custos e adequação técnica para atingir melhores resultados, buscando superávit na relação custo/lucro da balança comercial. Neste contexto, apareceu a necessidade de reinvenção de mecanismos já considerados consagrados no mercado e estudos para adaptações mais favoráveis as novas demandas. No mercado de veículos comerciais pode ser encontrada uma estrutura que vem sendo utilizada para transporte de carga há anos e, fazendo uma análise rápida, verificou-se a possibilidade de um novo estudo de distribuição de carga no pavimento através da pressão exercida pelos pneus, que, por

extensão, beneficiaria a quantidade de carga a ser transportada por um mesmo caminhão em um mesmo frete gerando o mesmo dano no pavimento da estrutura usual utilizada na norma atual de carga de balança.

A norma vigente utiliza um eixo padrão de rodagem dupla com 8,2 t e um software preconizado que trabalha com a teoria dos elementos finitos para verificar as reações das cargas de tração e compressão, conforme os devidos materiais aplicados, nas camadas da estrutura do pavimento.

O objetivo do presente estudo, visando uma melhor otimização do frete e distribuição da carga sobre o pavimento, foi realizar uma simulado da adição de mais um pneu no eixo padrão adotando uma simulação de carga e utilizando a teoria dos elementos finitos e equações de fadiga preconizadas pelo DER/SP e DNIT, para prever os resultados no topo do pavimento, em sua vida útil e possibilidades de incremento de carga.

2. Referencial Teórico

2.1. Teoria dos Elementos Finitos e Validação da Investigação Através da sua Utilização

Nos padrões aceitos para projetos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT e DNER, suas representantes estaduais conforme o Manual de Pavimentação – IPR – 719 (2006) ou a IP-DE-P00/001 – Projetos de Pavimentação do DER/SP, estabelece que o eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN e a pressão de contato pneu/pavimento de 0,56 MPa. Estes valores são obtidos baseados na metodologia americana da AASHTO (1993).

As estruturas de um projeto de pavimento foram validadas através de software computacional *Software Elsym5 – Elastic System* e os valores do número N (tráfego da rodovia) serão validados por equações de fadiga aceitas pelo DER/SP e DNIT (2006). Segundo LIN et al. (2016), o módulo dinâmico foi reconhecido como uma propriedade objetiva e sensível do material para projetar e avaliação de sistemas de pavimento. Para medir com precisão o módulo elástico *in situ* (Eq. 1) para avaliação da qualidade não destrutiva de pavimentos de asfalto, medições de campo da densidade (q) via eletromagnética medidor e velocidade de onda de cisalhamento (V_s) via teste de onda de superfície foram examinados por quatro projetos que abrangem uma variedade de misturas e cargas de tráfego.

$$E = 2 (1 + m) qV_s^2 \quad (1)$$

Onde E = Modulo elástico, e m =módulo de Poisson

Para LI et al. (2017) o modelo Elementos Finitos captura com sucesso as características do modelo constitutivo para cada camada de pavimento e a interação entre diferentes camadas e condições de limites. Com o devido desenvolvimento de modelos de Elementos Finitos, novas pesquisas serão realizadas para retro análise de módulos de camada usando a combinação de banco de dados a partir da análise de FE direta e técnicas de inteligência artificial. KIM et al. (2018) defendem que o efeito de diferentes configurações de tensões normais de contato sobre o desempenho de sulcos de sobreposições de concreto asfáltico camadas de BGS macias e rígidas no modelo de Elementos Finitos, baseado em uma estrutura real do pavimento gerado, e a camada de

concreto asfáltico foi simulada como um sistema de material viscoelástico e viscoplástico. As seguintes inferências podem ser extraídas dessas simulações.

- Profundidade de sulco na camada de concreto asfáltico sob normal realista tensões de contato é cerca de 1,5 vezes maior que a profundidade do sulco sob estresse normal uniformemente distribuído.
- A distribuição do estresse normal deve depender da localização transversal com seu máximo na direção transversal centro da área de contato, a fim de garantir a profundidade máxima de sulco no centro da área de contato.
- A magnitude da profundidade da rotina na camada de concreto asfáltico é geralmente inversamente proporcional à rigidez do Camada de BGS.
- A tensão viscoplástica está localizada na parte inferior da camada de concreto asfáltico quando a camada BGS não está compactada. A localização região se move para o meio do concreto asfáltico quando a camada BGS estiver rígida. Essas simulações revelaram que o desempenho na estrutura de pavimentos de concreto asfáltico depende fortemente das propriedades de camada BGS, bem como a configuração do contato de estresse. O desempenho da camada de concreto asfáltico é alterado pela variação das propriedades do BGS e da camada de subleito.

2.2. O Agronegócio e o Transporte

O modal rodoviário é o principal meio de transporte de cargas no Brasil. Ao longo das décadas de 1990 e 2000, esse modal representou mais de 60% do total de cargas transportadas no país (IPEA, 2020). Excluindo o transporte de ferro que ocorre por ferrovia, as rodovias respondem por mais de 70% da carga geral. Na década de 50, o modal rodoviário respondia por 38% do transporte de cargas nacionais (BNDES, 2020).

SILVA & D'AGOSTO (2013) um sistema de transporte eficiente minimiza custos e aumenta a competitividade da soja brasileira no mercado Global. Existe uma necessidade de formulação de planos estratégicos de conhecimento das demandas e investimentos para este sistema. Para SANTOS E PEREIRA (2019) o segmento de soja como *commodities* agrícolas se destaca sendo de fundamental importância para setores industriais, de alimentação, e geração de energia. Foi verificado que os fluxos de exportação de soja concentram-se nos modais rodoviário, ferroviário e hidroviário que se interligam aos recintos alfandegários portuários.

ASSIS et al (2019), citam os obstáculos existentes no processo de escoamento do agronegócio, exemplificando os custos como o transporte como sendo o agente redutor da competitividade nas exportações. Já WARNER (2015) cita que a hegemonia do Brasil como maior exportador de soja do mundo está ameaçada devido ao custo e a escassez de planos sustentáveis de transporte. O transporte de carga brasileiro é feito em grande parte por caminhões e os pneus têm uma vida útil (N) que varia entre

3. Metodologia

Uma verificação comparativa foi realizada através de uma visão custo/capacidade de carga, onde foi feita uma simulação de valores de frete de uma viagem de um veículo de carga. Para este estudo foram levados em consideração os seguintes fatores:

- Trajeto (km)
- Valor do frete (R\$)
- Valor nominal da carga transportada (t)

- Valor de carga de balança oficial para o veículo (t)
- Valor de carga calculado neste projeto (t)

Conforme os valores encontrados com o uso de uma terceira roda formando um eixo triplo, o estudo verificou que, para atingir um mesmo número de solicitações do eixo padrão permitido, existe uma equivalência de 42% em relação ao número N (que se relaciona à vida útil do pneu) e 15% em relação à capacidade de sobrecarga aplicada à carga de projeto para dez anos. Sendo assim, propõe-se uma simulação de uma viagem de um caminhão com uma carga de soja que viaja de Lucas do Rio Verde no Estado do Mato Grosso até o porto de Rondonópolis, também no estado Mato Grosso (Figura 1), onde fica o terminal ferroviário que liga o estado ao Porto de Santos no estado de São Paulo.

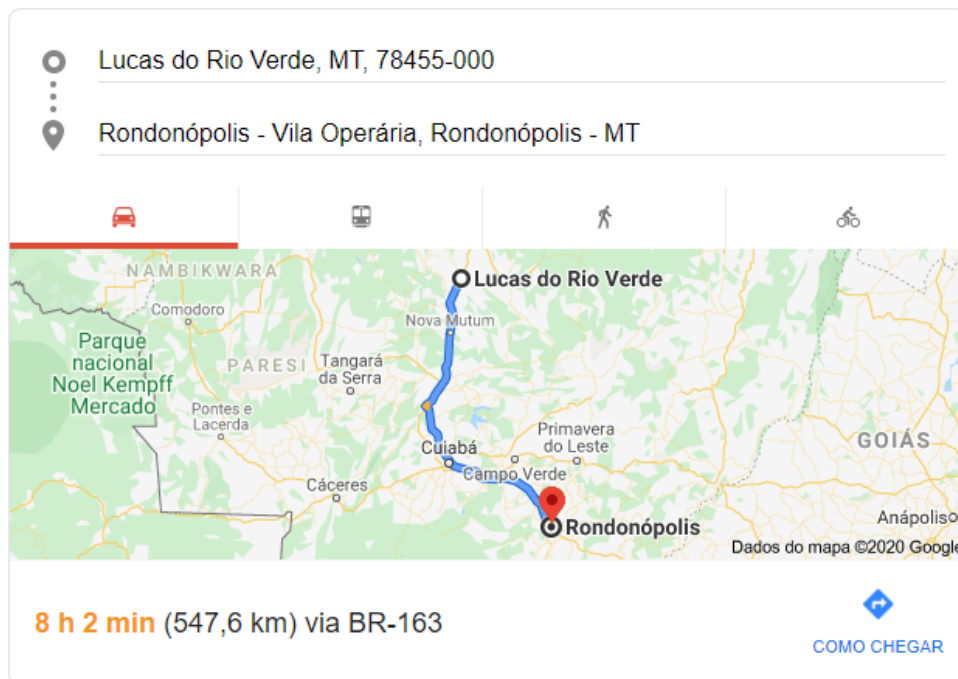


Figura 1. Trajeto proposto para a simulação de carga com eixo duplo e eixo triplo (GOOGLE MAPS, 2020)

Foram considerados o custo de frete por tonelada e a distância (Figura 2).

De: Lucas do Rio Verde/MT	Adicionada há: 5 horas
Fretes / Listagem	
De: Lucas do Rio Verde/MT	Adicionada há: 1 dia
Para: Rondonópolis/MT	Distância: 670 km
Produto: Soja	Preço: 105,00
De: Lucas do Rio Verde/MT	Adicionada há: 1 dia
Para: Rondonópolis/MT	Distância: 670 km
Produto: Soja	Preço: 90,00

Figura 2. Preço do frete por tonelada (FRETEBRAS, 2020).

Para a simulação, foram efetuados os cálculos de inserção de uma terceira roda ao eixo padrão de rotação dupla. Utilizou-se, para tanto, a teoria dos elementos finitos.

4. Resultados e Discussão

Segundo o estudo no item número N, na comparação entre os valores de sobrecarga no eixo com rodagem tripla obteve-se o mesmo valor de $7,55 \times 10^7$ apresentado no eixo de rodagem dupla com uma sobrecarga de 15% apresentados no gráfico a seguir cujos dados foram coletados das Tabelas 1 e 2. Pode-se adicionar uma tolerância de 7,5% prevista na lei, o que geraria 16,12%. Aplicando o valor médio de preço de frete R\$97,50 por tonelada apresentada na Figura 2, tem-se duas situações distintas a serem analisadas: (1) no primeiro caso, o dono da carga possui seu próprio transporte, fato que resultaria no incremento de 16,12% de carga líquida ao caminhão em um mesmo frete.

(2) No segundo caso, o frete sendo terceirizado, o agente transportador poderia crescer, ao mesmo frete, a quantidade de 16,12% a mais em tonelada e receberia este valor a mais no pagamento. Ressalta-se que o dono da carga também seria favorecido pois teria mais soja em peso por cada viagem.

Nas Tabelas 1 e 2 encontram-se os resultados obtidos comparando-se os resultados de número N e sobrecarga adicionada de 5 em 5 % para o eixo padrão e o eixo de tripla rodagem.

No estudo do eixo triplo (Tabela 1), foi verificada a existência de um incremento de 42,22% no número N e 15% de acréscimo de sobrecarga para o mesmo dano potencialmente gerado no pavimento.

Tabela 1 - Resultados (Eixo Padrão)

Sobrecarga (%)	Peso Total Eixo (kgf)	Peso Total Roda (kgf)	Deflexão (x10 ⁻² mm)	Deflexão N _{adm}	Var. 10-year Life Extension (% Ref. ESRD 8,2tf)	Dano (1/10 ano var.)	sh (x10 ⁻⁴ cm/cm)	sh N _{adm}	Varição Vida Útil Def. Horiz (Ref. ESRD 8,2tf).	Dano (1/10 var. vida útil)	εv (x10 ⁻⁴ cm/cm)	εv N _{adm}	Varição Vida Útil Def. Horiz (Ref. ESRD 8,2tf)	Dano (1/10 var. vida útil)
0	8.200	2.050,00	42	7,55E+07	1	1	2,137	8,47E+06	1	1	2,898	4,27E+07	1	1
5	8.610	2.152,50	44	5,80E+07	0,77	1,3	2,224	7,36E+06	0,87	1,15	3,039	3,41E+07	0,8	1,25
10	9.020	2.255,00	46	4,50E+07	0,6	1,68	2,309	6,45E+06	0,76	1,31	3,18	2,75E+07	0,64	1,56
15	9.430	2.357,50	48	3,54E+07	0,47	2,14	2,393	5,69E+06	0,67	1,49	3,321	2,23E+07	0,52	1,91
20	9.840	2.460,00	51	2,51E+07	0,33	3,01	2,474	5,07E+06	0,6	1,67	3,461	1,83E+07	0,43	2,33
25	10.250	2.562,50	53	2,01E+07	0,27	3,75	2,554	4,53E+06	0,53	1,87	3,6	1,52E+07	0,36	2,81
30	10.660	2.665,00	55	1,63E+07	0,22	4,63	2,632	4,08E+06	0,48	2,08	3,74	1,27E+07	0,3	3,37
35	11.070	2.767,50	57	1,33E+07	0,18	5,67	2,708	3,69E+06	0,44	2,3	3,879	1,07E+07	0,25	4,01
40	11.480	2.870,00	59	1,10E+07	0,14	6,9	2,782	3,35E+06	0,4	2,53	4,018	9,01E+06	0,21	4,74
45	11.890	2.972,50	61	9,06E+06	0,12	8,34	2,854	3,07E+06	0,36	2,76	4,156	7,67E+06	0,18	5,57
50	12.300	3.075,00	63	7,54E+06	0,1	10,01	2,924	2,82E+06	0,33	3,01	4,294	6,57E+06	0,15	6,5

Tabela 2 - Resultados (Eixo Rodagem Tripla)

Sobrecarga (%)	Peso Total Eixo (kgf)	Peso Total Roda (kgf)	Deflexão ($\times 10^{-2}$ mm)	Deflexão N_{adm}	Var. 10-year Life Extension (% Ref. ESRD 8,2tf)	Dano (1/10 ano var.)	ϵh ($\times 10^{-4}$ cm/cm)	$\epsilon h N_{adm}$	Varição Útil Def. Horiz (Ref. ESRD 8,2tf).	Dano (1/10 var. vida útil)	ϵv ($\times 10^{-4}$ cm/cm)	$\epsilon v N_{adm}$	Varição Útil Def. Horiz (Ref. ESRD 8,2tf)	Dano (1/10 var. vida útil)
0	8.200	1.366,67	36	1,81E+08	2,4	0,42	1,708	1,86E+07	2,2	0,46	2,124	1,88E+08	4,39	0,23
5	8.610	1.435,00	38	1,33E+08	1,77	0,57	1,76	1,67E+07	1,98	0,51	2,228	1,49E+08	3,5	0,29
10	9.020	1.503,33	40	9,97E+07	1,32	0,76	1,811	1,52E+07	1,79	0,56	2,332	1,20E+08	2,81	0,36
15	9.430	1.571,67	42	7,55E+07	1	1	1,861	1,38E+07	1,63	0,62	2,436	9,77E+07	2,29	0,44
20	9.840	1.640,00	43	6,61E+07	0,87	1,14	1,909	1,26E+07	1,49	0,67	2,54	8,01E+07	1,87	0,53
25	10.250	1.708,33	45	5,10E+07	0,68	1,48	1,956	1,16E+07	1,36	0,73	2,644	6,61E+07	1,55	0,65
30	10.660	1.776,67	47	3,99E+07	0,53	1,89	2,001	1,07E+07	1,26	0,79	2,748	5,50E+07	1,29	0,78
35	11.070	1.845,00	48	3,54E+07	0,47	2,14	2,046	9,87E+06	1,17	0,86	2,852	4,61E+07	1,08	0,93
40	11.480	1.913,33	50	2,80E+07	0,37	2,69	2,089	9,17E+06	1,08	0,92	2,956	3,89E+07	0,91	1,1
45	11.890	1.981,67	52	2,24E+07	0,3	3,37	2,131	8,56E+06	1,01	0,99	3,06	3,30E+07	0,77	1,3
50	12.300	2.050,00	54	1,81E+07	0,24	4,17	2,172	8,00E+06	0,94	1,06	3,164	2,81E+07	0,66	1,52

A Figura 3 indica a comparação de danos à vida útil (número N) em relação à sobrecarga para pneus duplos de eixo único e pneus triplo de eixo único devido à carga padrão no eixo. Verifica-se que, se utilizado com a rodagem tripla se consegue maior vida útil de pneus, utilizando a carga padrão no eixo. Enquanto a Figura 4 ilustra a comparação de danos à vida útil (número N) para a sobrecarga para pneus duplos de eixo único e pneus triplo de eixo único utilizando a carga legal no eixo (norma do eixo brasileiro). Em ambos os casos de cargas simuladas, os gráficos mostram a vantagem do uso de pneus triplos em eixo único, uma vez que a curva representando este cenário está acima daquela de eixo único com pneus duplos.

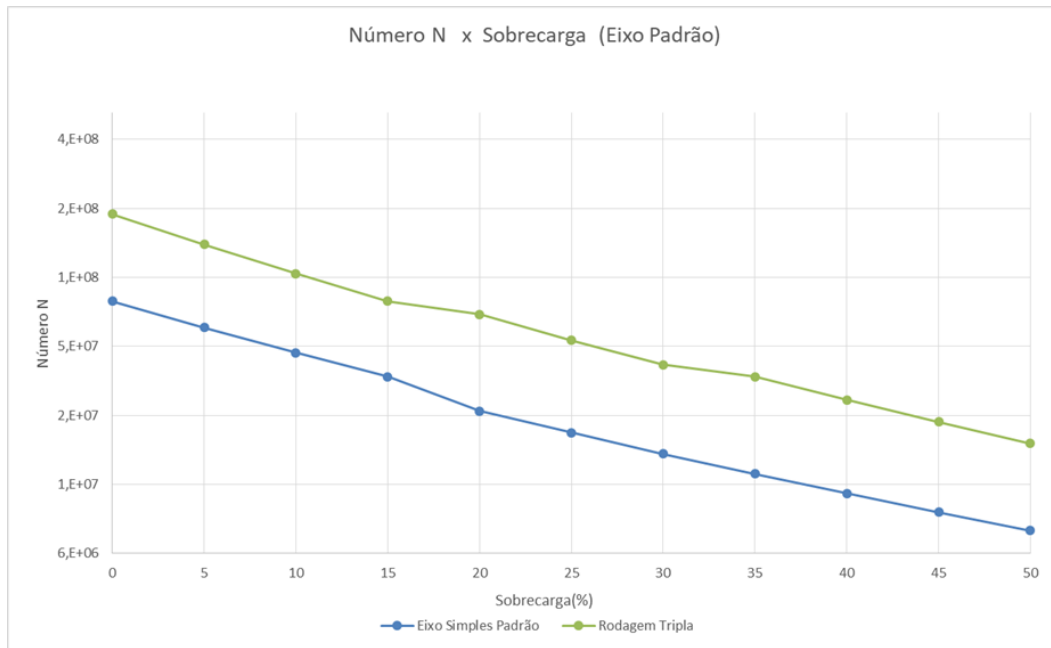


Figura 3. Comparação de danos à vida útil (número N) vs. sobrecarga para pneus duplos de eixo único e pneus triplo de eixo único devido à carga padrão no eixo

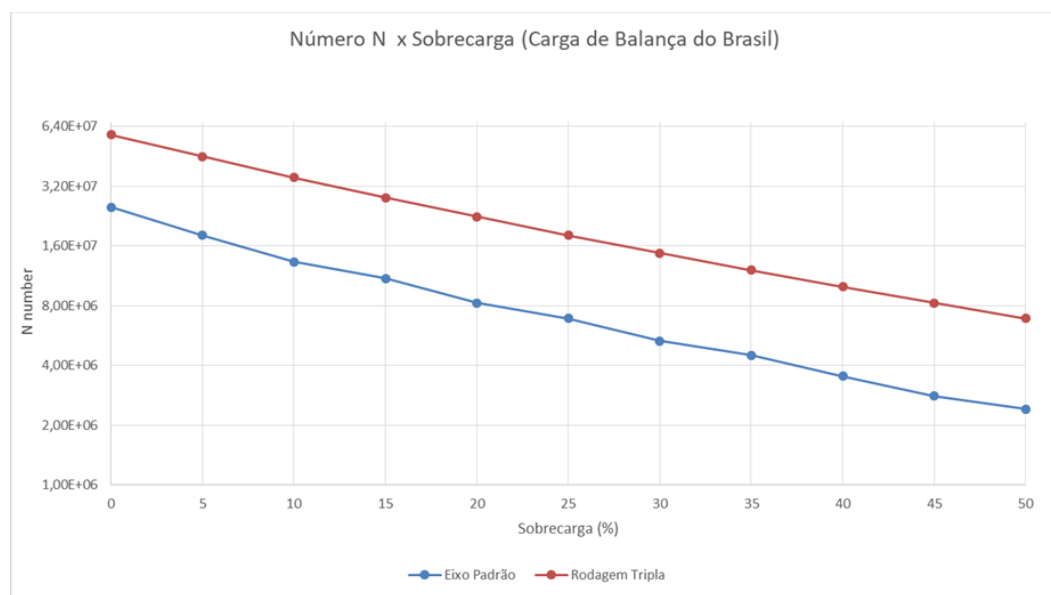


Figura 4. Comparação de danos à vida útil (número N) vs. sobrecarga para pneus duplos de eixo único e triplo de eixo único devido à carga legal no eixo brasileiro

Estes resultados indicam que é possível reduzir o impacto nos pavimentos e o custo relativo de transporte, considerando a utilização de pneu triplo de eixo único. Torres et al. (2017) citam que o valor de transporte da soja depende muito do custo do frete e agregados comprometendo a margem de lucro. Machado et al. (2019) analisaram os custos de frete da soja e valor praticado dificultando a lucro na chegada aos portos para distribuição.

5. Considerações finais

Este estudo de caso, usando a simulação, examinou a estratégia de viabilidade de custos baseando-se na adição de uma terceira roda ao eixo padrão de rodagem dupla preconizado pelo Departamento de Estradas de Rodagem – DER/SP e Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Foi proposta a distribuição de carga no pavimento adicionando-se um pneu extra ao eixo de rodagem dupla de caminhão o transformando em rodagem tripla que foi comprovado através da teoria dos elementos finitos. Conforme a revisão bibliográfica apresentada, a preocupação com o transporte de *commodities* para a exportação no Brasil, como a soja, exige cada vez mais estudos de viabilidade econômica estratégicos para manter a competitividade e a eficácia da produção.

Nesta rota de 547,6 km via BR-163, mas considerada 670 km entre as cidades de Lucas do Rio Verde a Rondonópolis, de onde partem os trens para o porto, o caminhão de soja poderá transportar a quantidade de 16,125 % a mais de carga, aumentando assim tanto a quantidade de carga por frete, bem como o valor transportado, beneficiando o contratante e ou o transportador. Considerando uma análise de sustentabilidade, pode-se inferir que haverá menor desgaste de pavimentos.

Referências Bibliográficas

AASHTO. (1993). Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, USA. 1993.

ASSIS, C.P.; COSTA, L.D.V.; HIRASSAKA, S.A. (2019). Infraestrutura logística brasileira de transporte e o impacto na escoação de grãos exportados pelo Brasil, Revista Caribeña de Ciencias Sociales, em línea, 2019.

BNDES. (2020). Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atualizacao/Infraestrutura/Logistica/index.html>. Acesso em agosto de 2020.

CNT. (2020). Confederação Nacional dos Transportes. <<http://www.cnt.org.br/Paginas/Boletins.aspx>>. Acesso em agosto de 2020.

DER. (2006). Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Instrução de Projeto de Pavimentação, IP-DE-P00-001_A, 2006.

DNER (1998). Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. 1998. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, 1998.

DNER. (1979). Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis. DNER-PRO11/79. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, Rio de Janeiro, 1979.

DNER. (1996). Manual de pavimentação. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, Rio de Janeiro, 1996.

DNIT, (2006). Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Pavimentação, 3. ed. Rio de Janeiro, 2006

FRETEBRAS. (2020) <<https://www.fretebras.com.br/fretes/carga-de-lucas-do-rio-verde-mt-para-rondonopolis-mt/#link>>. Acesso em agosto de 2020.

IPEA. (2020) Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_alphacontent&view=alphacontent&Itemid=357&search=transporte+rodoviario>. Acesso em agosto de 2020.

KIM, S.; DARAB, M. K.; LITTLE, D.N.; AL-RUB, R.K.A. (2018). Effect of the Realistic Tire contact Pressure on the Rutting Performance of Asphaltic Concrete Pavements; *KSCE Journal of Civil Engineering*, v.22(6), p.2138-2146, 2018.

LI, M.; WANG, H.; XU, G.; XIE, P. (2017). Finite element modeling and parametric analysis of viscoelastic and nonlinear pavement responses under dynamic FWD loading; *Construction and Building Materials*, v.141, p.23–35, 2017.

LIN, S; ASHLOCK, J. C.; WILLIAMS, R. C. (2016). Nondestructive quality assessment of asphalt pavements based on dynamic modulus; *Construction and Building Materials*, v. 112, p.836–847, 2016.

MACHADO, R.S.; IZAIAS, S.J.; PALLAORO, D.S.; PERREIRA, P.S.X.; MUNIZ, M.M. (2019). Logística da BR163 nas exportações de soja da Cooperlucas (MT); *Revista FATEC Zona Sul*, v.5(4), p.1-12, 2019.

SILVA, M.A.V.; D'AGOSTO, M.A. (2013). A model to estimate the origin–destination matrix for soybean exportation in Brazil; *Journal of Transport Geography*, v. 26, p. 97-107, 2013.

TORRES, O.; FAGUNDES, M.B.B.; FIGUEIREDO, A.M.R.; TREDEZINI, C.A. (2017). O Impacto da Implantação do Custo do Pedágio na BR-163 em Relação ao Transporte de Soja do Estado de Mato Grosso; *revista de Economia e Sociologia Rural*, v.55(3), p.533-550, 2017.