

Otimização do Custo de um Pavimento Flexível com a Utilização da Ferramenta Excel Solver

Optimization of the Cost of a Flexible Pavement with Use of the Excel Solver tool

Douglas Wendel Consoli Ozelame^{*a}; Moacir Kripka^a

^aUniversidade de Passo Fundo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. RS, Brasil.

*E-mail: douglasozelame@gmail.com

Resumo

O intenso processo de urbanização das últimas décadas levou à necessidade de implantação de infraestruturas, entre elas a infraestrutura viária. No Brasil a malha viária é responsável pela maior parte do transporte de cargas e pessoas. Em função dos custos envolvidos em uma obra de pavimentação, o objetivo principal deste trabalho foi a otimização do custo de um pavimento flexível, considerando o tipo de estrutura, as espessuras das camadas e o valor dos materiais empregados. Para tanto, as estruturas foram dimensionadas a partir do Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981) e com a utilização da ferramenta Solver do Microsoft Excel. Para a realização das análises manteve-se fixo o Número N, as Distâncias Médias de Transporte e os custos envolvidos no processo, já os valores de CBR de subleito e reforço de subleito foram variados. Na maioria dos casos estudados a estrutura constituída por revestimento, base e reforço de subleito mostrou-se mais econômica que as demais. Além disso, a utilização da ferramenta Excel Solver implicou em um menor custo total de pavimento apenas quando o CBR do reforço de subleito é menor que 12%, nas demais situações não houve diferença entre o método do DNER e o dimensionamento feito pelo Solver.

Palavras-chave: Otimização. Custo. Pavimentos flexíveis.

Abstract

The intense urbanization process of the last decades has led to the need to implement infrastructure, including road infrastructure. In Brazil, the road network is responsible for most of the transportation of cargo and people. Because of the costs involved in a paving work, the main objective of this paper was to optimize the cost of a flexible pavement, considering the type of structure, the thickness of the layers and the value of the materials used. For that, the structures were dimensioned using the Flexible Pavement Design Method (DNER, 1981) and using the Microsoft Excel Solver tool. In order to carry out the analyzes, the Number N, the Average Transport Distances and the costs involved in the process remained fixed, since the CBR values of subgrade and subgrade reinforcement were varied. In most of the cases studied, the structure consisting of surface course, base course and subgrade reinforcement proved to be more economical than the others. In addition, the use of the Excel Solver tool resulted in a lower total pavement cost only when the CBR of the subgrade reinforcement is less than 12%, in the other situations there was no difference between the DNER method and the design made by Solver.

Keywords: Optimization. Cost. Flexible Pavements.

1 Introdução

No século passado, houve intenso processo de urbanização, o que levou a necessidade de implantação de infraestruturas, entre elas a infraestrutura viária (MOHOD; KADAM, 2016). No Brasil, a malha rodoviária é responsável pela maior parte do transporte de passageiros e cargas (RIBAS, 2014). Isso fica evidenciado pelos estudos da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2019) que apontam que 95% dos passageiros e 61% das cargas se deslocam por rodovias. Além disso, a infraestrutura viária contribui para o crescimento social e econômico de uma região (CAVALET *et al.*, 2019; SUMANTH *et al.*, 2020).

O dimensionamento do pavimento é uma das etapas fundamentais em um projeto viário, pois nele são determinadas as espessuras das camadas que irão receber e transmitir os esforços provenientes do tráfego (SENÇO, 2007). Entre os tipos de pavimento existentes se destacam os rígidos e os

flexíveis, o primeiro é constituído por materiais a base de cimento Portland, onde as deformações são mais baixas do que no segundo. Já os flexíveis sofrem maiores deformações devido ao fato de ser constituído por materiais ligados ao betume (ULJAREVIĆ; ŠUPIĆ, 2016).

Existem vários métodos para dimensionamento de pavimentos flexíveis, sendo o mais utilizado no Brasil o do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER, 1981), atual Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (SENÇO, 2007; CAVALET *et al.*, 2019), por isso foi escolhido como método para as análises deste estudo.

Ressaltando que o custo do pavimento é proporcionalmente afetado pelo dimensionamento das camadas e os gastos com uma obra de pavimentação podem ser elevados (FERREIRA, 2002), o objetivo principal deste trabalho é a otimização do custo de um pavimento flexível, considerando o tipo de estrutura, as espessuras das camadas e o valor dos materiais empregados. Além disto, este estudo busca comparar se há

diferença nos custos utilizando o dimensionamento feito pelo Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981) e o dimensionamento feito através da ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel*.

O método do DNER utiliza como base resultados de ensaios de Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio - CBR*) e devido às espessuras das camadas serem dependentes dos valores de CBR (JAIN *et al.*, 2013), optou-se por fazer uma avaliação dos custos do pavimento variando-se os valores de CBR de reforço e de subleito.

2 Desenvolvimento

2.1 Revisão da literatura

O pavimento flexível é definido como aquele em que as deformações, até um determinado limite, não levam ao rompimento (KERN, 2017). Consiste em uma estrutura em camadas, onde cada uma tem características próprias de acordo com o tráfego (RAHIM *et al.*, 2016).

Uma das funções do pavimento é fornecer uma superfície resistente ao desgaste causado por agentes nocivos, além de transmitir as cargas do tráfego para o solo (SUMANTH *et al.*, 2020). De modo geral, o pavimento flexível é projetado de forma que a carga transmitida ao subleito não exceda sua capacidade (JAIN *et al.*, 2013).

O subleito é definido como a fundação do pavimento e tem a função de absorver os esforços verticais, geralmente apresenta uma superfície irregular que deve passar por uma regularização, com o intuito de conformá-la longitudinal e transversalmente (SENÇO, 2007). O subleito deve apresentar um CBR maior ou igual a 2%, caso o CBR for inferior é recomendado pelo DNER (1981) que seja substituído o material de subleito, na espessura de 1,00 metro, por um material de CBR superior (DNIT, 2006).

O reforço de subleito tem a função de resistir e distribuir os esforços verticais, possui características superiores às da regularização do subleito e inferiores às da sub-base, da qual o reforço funciona como complemento (SENÇO, 2007). É uma camada constituída por solo proveniente de jazidas ou empréstimos (DER-SP, 2005).

A sub-base é a camada complementar à base, constituída por materiais similares a mesma, e é utilizada quando por circunstâncias técnicas ou econômicas não é aconselhável construir a base sobre o subleito ou reforço (SENÇO, 2007; SUMANTH *et al.*, 2020). O material da sub-base deve possuir características superiores às do reforço de subleito e inferiores às da base (SENÇO, 2007; MANJUNATHA, 2014). Já a base tem a função de resistir e distribuir esforços verticais oriundos do tráfego (SENÇO, 2007). A mesma pode ser constituída por brita graduada, brita graduada tratada com cimento, misturas de solo e agregados, entre outros (BALBO, 2007).

O revestimento é a camada mais nobre do pavimento e sua função é melhorar a superfície, garantindo durabilidade, conforto e segurança aos usuários, além disto, esta camada

recebe as ações diretas do tráfego (SENÇO, 2007; BALBO, 2007). Outra função importante do revestimento é a impermeabilização das camadas subjacentes (ADLINGE; GUPTA, 2013).

O Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981) utiliza informações de composição da frota de veículos, período de duração de projeto, taxa de crescimento da região e resultados de ensaios de CBR do subleito e do material utilizado para reforço do subleito.

Os dados de composição de frota de veículos e taxa de crescimento da região são utilizados para o cálculo do Número N, que representa o número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto determinado. O CBR tem por objetivo conhecer a capacidade de suporte do solo e é determinado por meio de ensaio. O Número N e o CBR se relacionam de acordo com a Equação 1, onde H_t é a espessura total do pavimento e o CBR utilizado é o do subleito.

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

Ainda com a aplicação da Equação 1, é possível calcular a espessura do pavimento acima do reforço de subleito, no caso substitui-se H_t por H_n e o CBR utilizado é o do reforço do subleito. Calcula-se pela mesma equação o valor de H_s , espessura do pavimento acima da sub-base, utilizando o CBR deste material.

O revestimento é a primeira camada a ser determinada. O tipo de revestimento e a espessura mínima a ser adotada no projeto varia de acordo como o Número N, os valores são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Espessuras mínimas da camada de revestimento

N	Revestimento	Espessura Mínima
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos	-
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos	5,0 cm
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso	7,5 cm
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso	10,0 cm
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso	12,5 cm

Fonte: DNER (1981).

Para a determinação das espessuras das demais camadas são aplicadas as inequações 2 a 4, em que as variáveis R , B , h_s e h_n designam, respectivamente, as espessuras de revestimento, base, sub-base e reforço de subleito. Para cada material deve ser atribuído um coeficiente de equivalências estrutural (k), que são apresentados na Tabela 2.

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B \geq H_s \quad (2)$$

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B + h_s \cdot k_s \geq H_n \quad (3)$$

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B + h_s \cdot k_s + h_n \cdot k_n \geq H_t \quad (4)$$

Quadro 2 - Coeficientes de equivalência estrutural

Componentes dos Pavimentos	k
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base granular	1,00
Sub-base granular	0,77~1,00
Reforço de subleito	0,71~1,00

Fonte: DNER (1981).

A espessura total mínima para camadas granulares é de 15cm (DNER, 1981), entretanto, Senço (2007) comenta que a espessura mínima de base e camadas inferiores deve ser de no mínimo 10cm. Neste trabalho utilizou-se a espessura recomendada pelo DNER.

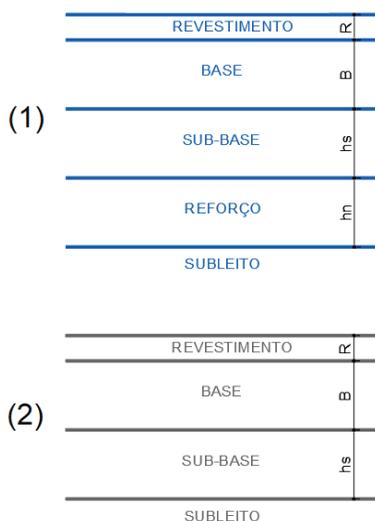
2.2 Metodologia

A metodologia consiste em avaliar três tipos de estruturas de pavimento flexível: a primeira estrutura constituída por revestimento betuminoso, base e sub-base granulares e reforço de subleito; a segunda da mesma forma, porém sem a camada de reforço de subleito e a terceira utilizando reforço e não utilizando sub-base. Foram utilizados como coeficiente estrutural para sub-base e reforço de subleito, 0,77 e 0,71, respectivamente, (Quadro 2). A Figura 1 mostra os tipos de estruturas.

O Número N utilizado em todas as análises foi de 5×10^6 , as DMT para revestimento, base e sub-base foram fixadas em 20km. O custo de transporte de reforço de subleito está incluso no valor da Tabela 3 e se refere a uma distância média entre 9 e 10km. Foram variados os valores de CBR do reforço de subleito entre 7% e 30%, ao passo de 1%, os quais foram combinados com valores de CBR de subleito de 2%, 7%, 12% e 17%.

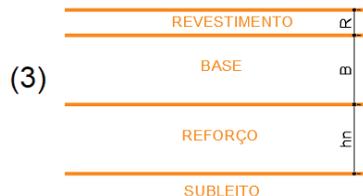
Para a determinação dos volumes de material considerando as espessuras foi considerado, apenas para fins de comparação, um valor de 7 metros de largura e 1.000 metros de comprimento de pista.

Figura 1 - Tipos de estruturas analisadas



Continua....

...continuação.



Fonte: Os autores.

Quadro 3 - Custos de material e transporte

Material	Custo de material (R\$/m³)	Custo de transporte (R\$/m³.km)
Revestimento	1092,81	0,67
Base granular	85,70	0,65
Sub-base granular	79,62	0,65
Reforço de subleito ⁽¹⁾	29,73	

⁽¹⁾ Preço referente ao DAER-RS, tabela de Maio/2019, incluindo transporte + correção de IGP-M para Abril de 2020.

Fonte: SINAPI (2020).

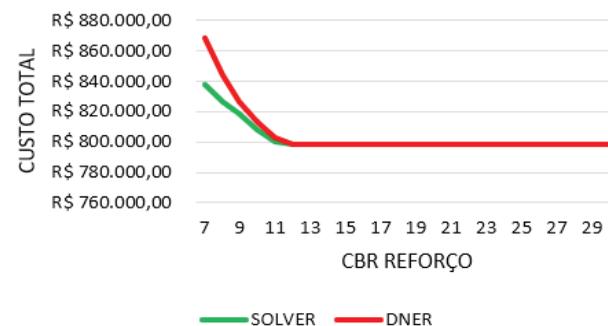
Os cálculos de custos totais foram feitos de duas formas: a partir do dimensionamento feito pelo método do DNER (1981) e com o dimensionamento executado pela ferramenta *Solver* (Microsoft Excel), utilizando o método *GRG Não Linear*. Os parâmetros definidos para a utilização desta ferramenta foram:

- espessura de revestimento, base, sub-base e reforço de subleito: variáveis e números inteiros não-negativos;
- espessuras de base, sub-base e reforço de subleito: maiores ou iguais a 15,0cm;
- espessura do revestimento: maior ou igual a 5,0cm;
- satisfação das espessuras mínimas (Ht, Hs e Hn) calculadas por meio da Equação 1.

2.3 Resultados e Discussão

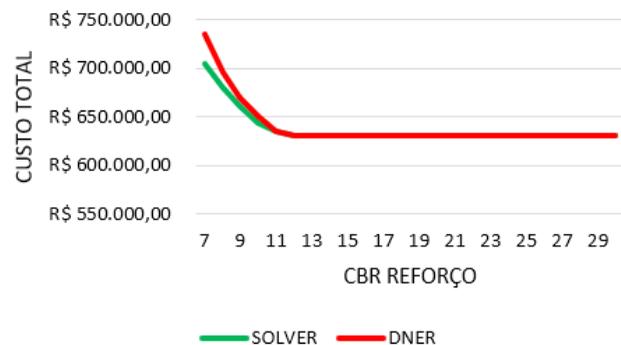
A estrutura 1, composta por quatro camadas, apresentou um padrão para todos os valores de CBR de subleito estudados. Os gráficos das Figura 2, 3, 4 e 5 mostram que para valores de CBR de reforço mais baixos o *Solver* resultou em um custo menor, porém para valores maiores que 12% não houve diferença entre os métodos.

Figura 2 - Comparação de custo entre os métodos para Estrutura 1: CBR de subleito de 2%



Fonte: Os autores.

Figura 3 - Comparação de custo entre os métodos para Estrutura 1: CBR de subleito de 7%



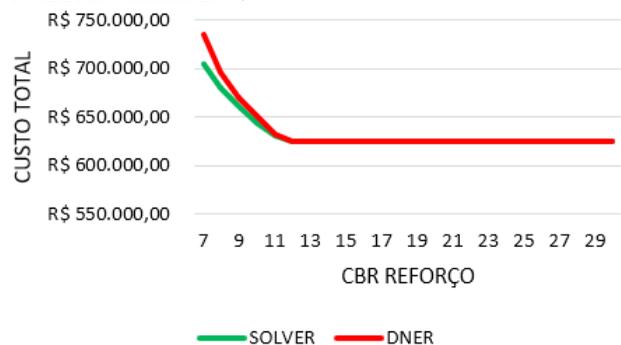
Fonte: Os autores.

Figura 4 - Comparação de custo entre os métodos para Estrutura 1: CBR de subleito de 12%



Fonte: Os autores.

Figura 5 - Comparação de custo entre os métodos para Estrutura 1: CBR de subleito de 17%



Fonte: Os autores.

Os resultados referentes à estrutura 2 (sem reforço de subleito) são apresentados na Tabela 4. Pode ser observado que para um subleito com CBR de 2% e 7% houve redução do custo utilizando-se o *Solver*, sendo esta diferença mais significativa quando o CBR é menor. Para os valores de CBR de subleito de 12% e 17% não houve diferença.

Quadro 4 - Diferença de custos para a estrutura sem reforço de subleito

CBR Subleito	Método DNER (R\$)	<i>Solver</i> (R\$)	Diferença
2%	1.192.292,50	1.092.416,50	8,38%
7%	719.004,30	698.603,50	2,84%
12%	608.786,50	608.786,50	0,00%
17%	608.786,50	608.786,50	0,00%

Fonte: Os autores.

Ao analisar a diferença entre o custo total do dimensionamento feito pelo método do DNER e pelo *Solver*, percebeu-se que, na estrutura 3 (sem sub-base), independentemente do valor de CBR de reforço e de subleito não houve diferença entre os métodos.

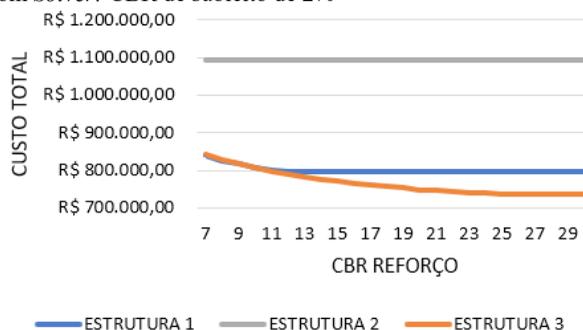
Na comparação de custos das soluções otimizadas, observa-se que para um cenário com o CBR de reforço de 2% a estrutura 2 implica em um custo mais elevado se comparada às demais, já as estruturas 1 e 3 resultam em custos aproximadamente iguais para CBR de reforço até 11%, porém, a partir disto a estrutura 3 se mostra mais econômica.

Já na situação com CBR de subleito de 7%, a estrutura 2 também implica em custo mais elevado que as demais, exceto para CBR de reforço de 7%. Comparando-se as estruturas 1 e 3 pode ser observado que para valores de CBR de reforço entre 7% e 10% os custos se equivalem, a partir deste ponto a estrutura 3 é mais econômica.

Para os cenários com CBR de subleito de 12% e 17%, a estrutura 2 se mostrou mais econômica para CBR de reforço até 12%, a partir deste ponto, a estrutura 2 é mais econômica que a estrutura 1, porém mais cara que a estrutura 3. Para CBR de reforço de 11% ou menos, as estruturas 1 e 3 se equivalem em termos de custos.

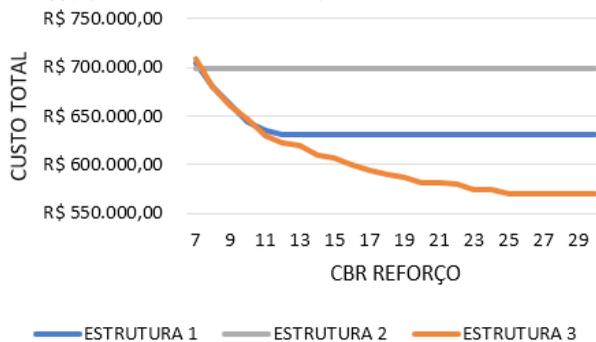
Nas Figuras 6, 7, 8 e 9 são mostrados os resultados para a comparação de custos entre cada estrutura e os diferentes valores de CBR de subleito. Nota-se que em todas situações ao chegar em um determinado CBR de reforço, o custo se mantém o mesmo, provavelmente devido ao fato de as espessuras mínimas terem sido atingidas.

Figura 6 - Comparação de custos entre as estruturas otimizadas com *Solver*: CBR de subleito de 2%



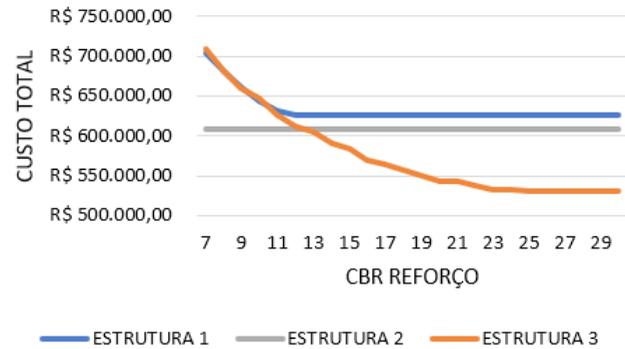
Fonte: Os autores.

Figura 7 - Comparação de custos entre as estruturas otimizadas com *Solver*: CBR de subleito de 7%



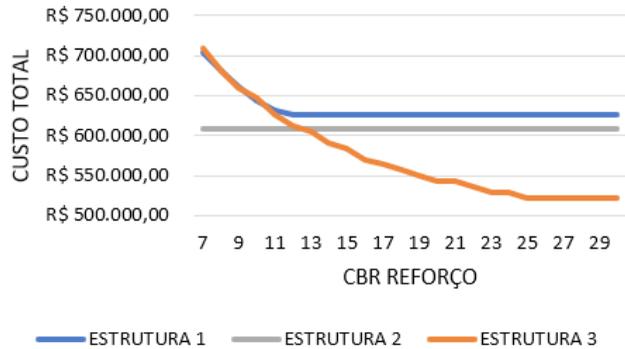
Fonte: Os autores.

Figura 8: Comparação de custos entre as estruturas otimizadas com *Solver*: CBR de subleito de 12%



Fonte: Os autores.

Figura 9 - Comparação de custos entre as estruturas otimizadas com *Solver*: CBR de subleito de 17%



Fonte: Os autores.

3 Conclusão

Visto que um dos objetivos foi verificar se há diferença de custos dimensionando um pavimento por meio do método do DNER e do *Solver*, conclui-se que:

- quando a estrutura é composta por revestimento, base e reforço de subleito, não há diferença entre os métodos;
- quando a estrutura é composta por revestimento, base, sub-base e reforço de subleito, há uma vantagem na utilização do *Solver* para valores de CBR de reforço inferiores a 12%;
- quando a estrutura é composta por revestimento, base e sub-base, a aplicação do *Solver* só é vantajosa quando o CBR do subleito é relativamente baixo (cenários com 2% e 7%).

Comparando-se os três tipos de estrutura analisados, considerando seu custo otimizado (com a utilização do *Solver*), pode se concluir que:

- a estrutura composta por revestimento, base e sub-base é a mais cara quando o CBR do subleito é mais baixo (2% e 7%), porém para CBR de subleito de 12% e 17% e CBR de reforço menor que 12% ela é a mais econômica;
- a estrutura composta por revestimento, base e reforço de subleito é a mais econômica para valores de CBR de reforço maiores que 12%, independentemente do valor do CBR do subleito;
- a estrutura composta por revestimento, base, sub-base e reforço de subleito é tão econômica quanto à estrutura sem sub-base para valores de CBR de reforço menores que 12% e é a mais cara quando o CBR do subleito é mais alto (12% e 17%).

Vale ressaltar que a disponibilidade de reforço do subleito deve ser verificada, caso não haja este material

nas proximidades, o custo de transporte do mesmo advindo de longas distâncias se tornaria maior. Outro ponto a ser observado é que em situações que possuam CBR de subleito muito baixo as espessuras de reforço necessárias são mais elevadas, portanto deve se verificar se há volume suficiente para tal utilização.

Devido ao fato de ser utilizada apenas a técnica *GRG Não Linear* para fazer a avaliação dos custos, sugere-se que outros métodos de otimização sejam aplicados. Além disso, a avaliação de cenários variando o Número N e/ou as distâncias médias de transporte também são recomendadas.

Referências

- ADLINGE, S.S.; GUPTA, A.K. Pavement deterioration and its causes. *IOSR J.Mech. Civil Engineering*. p.9-13, 2013.
- BALBO, J.T. *Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- CAVALET, V.N. et al. *Análise comparativa do custo-benefício entre pavimentos flexíveis em concreto asfáltico e pavimentos rígidos em concreto de cimento portland aplicado em rodovia de alto tráfego*. In: ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. Balneário Camboriú, 2019.
- CNT - Confederação Nacional dos Transportes. *Pesquisa CNT de rodovias*. Brasília: CNT, 2019.
- SÃO PAULO - Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo. *Especificação Técnica: reforço de subleito*. ET-DE-P00/002. São Paulo, 2005. Disponível em: ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-002_A.pdf. Acesso em: jun. 2020.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*. Rio de Janeiro, 1981. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/667_metodo_de_projeto_de_pavimentos_flexiveis.pdf. Acesso em: jun. 2020.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em: jun. 2020.
- FERREIRA, J.G.H.M. *Elaboração da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.
- JAIN, S.; JOSHI, Y.P.; GOLYIA, S.S. Design of rigid and flexible pavements by various methods & their cost analysis of each method. *J. Eng. Res. Appl.*. v.3, n.5, p.19-123, 2013.
- KERN, C. *Análise de desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul: a avaliação de um pavimento submetido à oscilação do lençol freático*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.
- MANJUNATHA, H. Laboratory studies on granular sub base. *Int. J. Eng. Res. Technol.*, v.3, n.3/4, p.2535-2538, 2014.
- MOHOD, M.V.; KADAM, K.N.A Comparative Study on Rigid and Flexible Pavement: A Review. In: *IOSR J. Mech. Civil Eng.*, v.12, n.3, p.84-88, 2016.
- RAHIM, A.M.B.A. et al. Modeling Operating Speed with Regard to Pavement Roughness Index (IRI) at Two-Lane Highway. In: *InCIEC 2015*. 2016. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0155-0_81.
- RIBAS, J. *Parâmetros elásticos típicos de materiais de*

pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

SENÇO, W. *Manual de técnicas de pavimentação.* São Paulo: PINI, 2007.

SUMANTH, J.V.S.; NIRMALA, G.; KUMAR, P.P. Flexible

pavement design and its cost elevation. *J. Eng. Scie.*, v.11, n.4, p.608-613. 2020.

ULJAREVIĆ, M.; ŠUPIĆ, S. Comparative analysis of flexible and rigid pavement design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE CONTEMPORARY ACHIEVEMENTS IN CIVIL ENGINEERING. Subotica, Serbia. p. 591-601, 2016.