

## **Dimensionamento de pavimentos semirrígidos: identificação de fatores influentes na deflexão máxima**

*Composite pavement design: identification of factors influencing maximum deflection*

*Diseño de pavimento semiflexible: identificación de factores que influyen en la deflexión máxima*

**Gustavo Henrique Veronese Vieira**

Mestre em Engenharia Civil, UDESC, Brasil.  
gustavo\_veronese@hotmail.com

**Hedelvan Emerson Fardin**

Mestre em Engenharia Civil, UDESC, Brasil.  
hedelvan@gmail.com



## RESUMO

As deflexões máximas decorrentes de carregamentos impostos pelo tráfego são um dos principais fatores que caracterizam estruturalmente um pavimento, através delas é possível prever danos e estimar a vida de projeto de um pavimento. Por possuírem uma camada cimentada de alta rigidez, os pavimentos semirrígidos permitem que as estruturas de pavimentos sofram menores deflexões. Este estudo objetiva investigar os parâmetros de dimensionamento que mais influenciam as deflexões máximas teóricas de pavimentos semirrígidos. O dimensionamento da seção foi feito através do *software* MeDiNa para um tráfego pesado e um horizonte de projeto de 10 anos. Visando garantir resultados representativos, um planejamento fatorial completo, aleatorizado e replicado  $3^3$  foi desenhado. Os fatores e respectivos níveis adotados no planejamento foram o material de revestimento, variando entre concreto asfáltico de três classes de fadiga, o material de base, variando entre três misturas de concreto compactado com rolo, com diferentes consumos de cimento, e a condição de aderência, variando entre camadas totalmente aderidas, parcialmente aderidas e não aderidas. Posteriormente o *software* AEMC foi utilizado para o cálculo das deflexões máximas sofridas em decorrência de um carregamento padrão rodoviário. Constatou-se que tanto os materiais de revestimento e base quanto a condição de aderência entre camadas têm grande importância no dimensionamento de pavimentos semirrígidos. Revestimentos de materiais mais rígidos reduzem a espessura total da estrutura e a aderência total entre as camadas gera menores deflexões máximas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dimensionamento de pavimento. Pavimento semirrígido. Deflexão máxima.

## ABSTRACT

*The maximum deflections resulting from loads imposed by traffic are one of the main factors that structurally characterize a pavement, through which it is possible to predict damage and estimate the design life of a pavement. Because they have a highly rigid cemented layer, composite pavement allows structures to undergo less deflection. This paper aims to investigate the design parameters that most influence the theoretical maximum deflections of composite pavements. The section was designed using the MeDiNa software for heavy traffic and a 10-year project horizon. In order to guarantee representative results, a complete, randomized and replicated  $3^3$  factorial planning was designed. The factors and respective levels adopted in the planning were the surface material, varying between asphalt concrete of three fatigue classes, the base material, varying between three mixtures of roller compacted concrete with different cement consumption, and the condition of adhesion, varying between layers fully adhered, partially adhered and not adhered. Subsequently, the AEMC software was used to calculate the maximum deflections suffered as a result of standard loading. It was found that both the surface and base materials and the condition of adhesion between layers are of great importance in the design of composite pavement. More rigid surface reduces the total thickness of the structure and the total adhesion between the layers generates lower maximum deflections.*

**KEYWORDS:** Pavement design. Composite pavement. Maximum deflection.

## RESUMEN

*Las deflexiones máximas resultantes de las cargas impuestas por el tráfico son uno de los principales factores que caracterizan estructuralmente un pavimento, a través del cual es posible predecir daños y estimar la vida útil de ello. Debido a que tienen una capa cementada altamente rígida, los pavimentos semiflexibles permiten que las estructuras del pavimento sufran menos deflexiones. Este estudio tiene como objetivo investigar los parámetros de diseño que más influyen en las deflexiones máximas teóricas de los pavimentos semiflexibles. Las secciones fueron diseñadas en el software MeDiNa para tráfico pesado y un horizonte de proyecto de 10 años. Para garantizar resultados representativos, se hizo un diseño factorial de  $3^3$  completo, aleatorizado y replicado. Los factores y niveles respectivos adoptados en la planificación fueron el material de recubrimiento, que varía entre el concreto asfáltico de tres clases de fatiga, el material de la base, que varía entre tres mezclas de concreto compactado con rodillo con diferentes consumos de cemento, y la condición de adhesión, que varía entre capas totalmente adheridas, parcialmente*

*adheridas y no adheridas. Posteriormente, se usó el software AEMC para calcular las deflexiones máximas sufridas como resultado de la carga estándar en la carretera. Se descubrió que tanto el revestimiento como los materiales de la base y la condición de adhesión entre capas son de gran importancia en el diseño de pavimentos semiflexibles. Los recubrimientos de material más duro reducen el grosor total de la estructura y la adhesión total entre las capas genera menos deflexiones máximas.*

**PALABRAS CLAVE:** *Diseño de pavimento. Pavimento semiflexible. Deflexión máxima.*

## 1 INTRODUÇÃO

Por ser muito explorado no Brasil, o modal rodoviário apresenta grande flexibilidade e mobilidade, representando 61% da matriz de transportes de cargas e 95% da movimentação de passageiros. Em 2019, a Confederação Nacional de Transportes (CNT) realizou a análise qualitativa de 108.863 km da malha das rodovias pavimentadas do Brasil e mostrou que 59% do total (64.198 km) tiveram seu estado geral classificado como regular, ruim ou péssimo (CNT, 2019). Balbo e Dornelas (2015) ressaltaram que o Brasil enfrenta uma crise rodoviária prenunciada desde a década de 1980, a qual é influenciada por dois fatores: escassez de vias pavimentadas e qualidade da pavimentação.

Garbin e Fernandes Jr. (2017) apontam alguns fatores que podem gerar maus estados de conservação das rodovias, como pressão de enchimento dos pneus, tipo de rodagem, tipo de pneu e distribuição da pressão de contato entre o pneu e pavimento. Além disso, o autor destaca que o excesso de carga por eixo dos veículos é o principal motivo para a acentuada deterioração dos pavimentos, comprometendo o conforto e a segurança do tráfego e aumentando o custo operacional dos automóveis. É necessário que hajam estudos de controle tecnológico que analisem quais são as principais causas dos defeitos e irregularidades em rodovias pavimentadas, avaliando o comportamento estrutural das camadas dos pavimentos e observando se as premissas de projeto são atendidas (PREUSSLER, 2007).

Analisando estruturalmente um pavimento através de uma abordagem macanística, tensões, deformações e deslocamentos decorrentes de carregamentos podem ser estimados. Isso é possível pela caracterização dos materiais que formam as camadas do pavimento, seus parâmetros elásticos e da composição do tráfego atuante (BUENO, 2016). Um dos principais fatores que caracteriza estruturalmente um pavimento são as deformações verticais resultantes da aplicação de cargas, também chamadas de deflexões. As medidas das deflexões expressam a capacidade das camadas dos pavimentos em resistir aos efeitos do carregamento imposto pelo tráfego de veículos e cargas (BALBO, 2007). Além disso, ao se estimar as bacias de deflexões de um pavimento, pode-se estimar por correlação, os danos permanentes na estrutura, afinal as maiores deformações observadas podem ser correlacionadas com os maiores valores de deflexão da seção de pavimento (LEIVA-VILACORTA; VARGAS-NORDCBECK; AGUIAR-MOYA, 2017).

O dimensionamento e a construção de pavimentos exige a análise das características dos materiais e das condições de projeto para que se garanta um produto final adequado,

visando o não surgimento de defeitos em curto prazo (PREUSSLER, 2007). Dentre os principais parâmetros a serem estudados estão as deflexões, que são capazes de demonstrar as respostas de fadiga e fissuração de pavimentos submetidos a carregamentos (BALBO, 2007). O que define a magnitude das deflexões na etapa de dimensionamento de um novo pavimento são as rigidezes das camadas que o compõem. Os materiais cimentados utilizados em bases e sub-bases devem apresentar resistência à tração na flexão pertinentes e os solos de subleitos necessitam de rigoroso controle de qualidade, pois são deformáveis e responsáveis por grande parcela dos deslocamentos verticais (YODER; WITCZAK, 1975).

Neste segmento, com intuito de aumentar a rigidez da seção do pavimento flexível, pode-se utilizar uma base cimentada, constituindo um perfil de pavimento semirrígido, como aponta o DNIT (2006). Dentre os possíveis materiais cimentados para base de pavimentos, é de uso comum brasileiro, a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), o solo-cimento, o solo-cal e o Concreto Compactado Com Rolo (CCR) (BERNUCCI *et al.*, 2008). Portanto, ao se optar por uma base cimentada na estrutura do pavimento, o efeito aglomerante do material constituinte da camada propicia maior rigidez à seção e otimiza a capacidade de suporte do mesmo, possibilitando que não apenas a camada do revestimento resista aos esforços de tração decorrentes do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2008; RITH; KIM, LEE, 2018).

O Método Nacional de Dimensionamento de pavimentos (MeDiNa) é atualmente o *software* que está sendo implementado por projetistas brasileiros para o dimensionamento de novas estruturas de pavimentos e recuperação de estruturas antigas. O programa se baseia na Teoria de Sistema de Camadas Elásticas (TSCE) e faz uso de dados de tráfego e características físicas e mecânicas dos materiais empregados para calcular as espessuras das camadas do pavimento. O *software* ainda traz em seu pacote o BackMedina para a retroanálise de pavimentos, permitindo a inferência de módulos de resiliência de pavimentos existentes, e o AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) para o cálculo de tensões e das deflexões teóricas que as estruturas sofrem em decorrência de carregamentos (FRANCO, 2018).

Bernucci *et al.* (2008) afirmam que defeitos estruturais surgem em pavimentos devido à repetição de cargas. Após um número suficiente de repetições, podem aparecer trincas, fraturas e afundamentos nos revestimentos. Segundo Kakuda (2010), as trincas se iniciam predominantemente nas fibras inferiores do revestimento, propagando-se até a superfície, assim torna-se relevante a análise mecânica das camadas subjacentes.

O objetivo principal deste estudo foi identificar parâmetros de dimensionamento que mais influenciam nas respostas estruturais de pavimentos, sobretudo as deflexões máximas teóricas ocorridas no topo do subleito, responsáveis por parte dos trincamentos superficiais, quando de magnitude elevada.

## 2 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo deste estudo, adotou-se uma metodologia empírico-mecanicista, por meio do método de dimensionamento brasileiro, em fase de implantação, MeDiNa v.



1.1.3.0 (DNIT, 2019) para dimensionar seções de pavimentos semirrígidos. Em seguida, foi utilizado o *software* AEMC v.2.4.1 (FRANCO, 2019) para calcular as tensões e deformações em estruturas de pavimentos. Portanto, as seguintes considerações foram adotadas no dimensionamento: o tipo de via condizia a um Sistema Arterial Principal, promovendo ao dimensionamento, um nível de confiabilidade de 95%, próprio do tipo de via e com critérios de parada no MeDiNa, iguais a 30% da Área Trincada Estimada (ATE) do pavimento no fim do período de projeto e 10 mm de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) (FRANCO; MOTTA, 2018).

O horizonte de projeto das seções de pavimento foi considerado igual a 10 anos. Foi adotado um nível de tráfego pesado, com número de veículos do primeiro ano igual a  $2 \cdot 10^7$ , de acordo com a Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP, 2004) e Balbo (2007). A taxa de crescimento do tráfego foi adotada igual a 3,0%, de acordo com o DNIT (2006), para quando se desconhece as variáveis socioeconômicas que influenciam a composição do tráfego.

Os materiais utilizados para os dimensionamentos das seções de pavimentos são aqueles disponíveis no banco de dados do MeDiNa (DNIT, 2019). Para o revestimento, foram consideradas as misturas asfálticas de classe de fadiga 1, 2 e 3 (FRITZEN *et al.*, 2019). Para a base, foram consideradas as misturas de CCR com consumos de cimento iguais a 120, 200 e 280 kg/m<sup>3</sup>, produzidas por Trichês (1993). E para o subleito, foi considerado um solo siltoso NS' (NOGAMI; VILLIBOR, 1981). As propriedades desses materiais estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Materiais empregados nos dimensionamentos

Material	Revestimento			Base			Subleito	
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	CCR 120	CCR 200	CCR 280	Solo siltoso NS'	
Módulo resiliente (MPa)	5764	6743	8000	18000	26700	29500	189	
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3	0,3	0,25	0,25	0,25	0,45	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,4	2,4	2,4	2,263	2,3	2,32	1,8	
Resistência à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	-	-	-	1,55	2,90	4,10	-	
Coeficientes do modelo de fadiga	k1	5,496·10 <sup>-11</sup>	1,11·10 <sup>-13</sup>	1·10 <sup>-12</sup>	14,911	14,310	14,704	-
	k2	-3,253	-3,98	-3,75	-15,07	-13,52	-13,72	-
Coeficientes do modelo de deformação permanente	k1	-	-	-	-	-	-	0,244
	k2	-	-	-	-	-	-	0,419
	k3	-	-	-	-	-	-	1,309
	k4	-	-	-	-	-	-	0,069

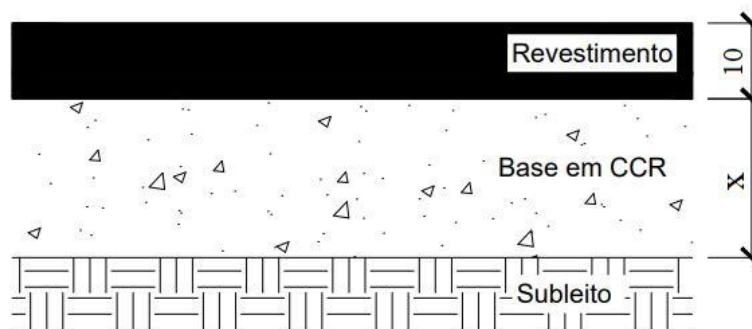
Fonte: Adaptado de DNIT, 2019.

As seções de pavimentos semirrígidos foram compostas por duas camadas sobre o subleito, variando os tipos de materiais empregados nas camadas de revestimento e base. A exclusão da camada da subbase é justificada pela capacidade de suporte da seção do pavimento semirrígido. Portanto, as seções eram similares aos estudos de Lijun e Xinwu (2012) e Rith, Kim e Lee (2018), esboçada na Figura 1.

Todavia, para garantir uma boa representatividade dos resultados tanto em relação aos dimensionamentos como às respostas estruturais das seções, foi desenhado um planejamento fatorial completo e aleatorizado, com três níveis e três fatores (3<sup>3</sup>), como recomenda Dean *et al.*, (2017) e Montgomery e Runger (2018), utilizando o *software* Statistica Academic v. 13.3 (TIBCO, 2020). Os fatores e respectivos níveis adotados nesse planejamento, foram: o material do revestimento, variando entre os concretos asfálticos de classes 1, 2 e 3, com respectivos Módulos Resilientes (MR) de 5764 MPa, 6743 MPa e 8000 MPa (FRITZEN *et al.*, 2019); o material da base, variando entre as misturas de CCR com consumos de cimento iguais a 120, 200 e 280 kg/m<sup>3</sup>, que também podem ser diferenciados

entre si em referência aos valores do módulo de elasticidade (E) respectivos de 18000 MPa, 26700 MPa e 29500 MPa (TRICHÊS, 1993); e a condição de aderência entre as camadas do pavimento, variando entre totalmente aderido, parcialmente aderido e sem aderência.

Figura 1 – modelo de seção de pavimento dimensionada.



Fonte: Autores, 2020.

Em relação à condição de aderência entre as camadas, ela foi considerada diretamente no *software* AEMC (FRANCO, 2019), como uma variável qualitativa (BUSSAB; MORETTIN, 2010; DEAN *et al.*, 2017; MONTGOMERY; RUNGER, 2018), ou seja, quando não se percebia aderência entre as camadas, considerava-se o valor igual a menos um (- 1), quando havia aderência entre todas as camadas, o valor considerado era igual a um (1), e quando havia aderência apenas entre o revestimento e a base, o valor considerado era igual a zero (0). Cabe ressaltar ainda que, no momento de fazer o dimensionamento no MeDiNa (DNIT, 2019), a condição de aderência entre quaisquer camadas é desconsiderada pelo método (FRANCO; MOTTA, 2018) e, essa variável podia ser considerada apenas quando se estimava a deflexão máxima da seção do pavimento no AEMC (FRANCO, 2019).

Assim, o dimensionamento da seção de pavimento no MeDiNa (DNIT, 2019) condizia com o cálculo da altura da base, tendo em vista que a altura do revestimento era mantida igual a 10 cm entre todas as seções, com o intuito de atender às recomendações da PMSP (2004) e Balbo (2007) que indicam a seção mínima do revestimento asfáltico igual a 10 cm para tráfegos pesados de veículos. Depois de calculado a altura da base e, conseqüentemente, a altura da seção total do pavimento, era calculada a deflexão máxima teórica da seção do pavimento no AEMC (FRANCO, 2019) ante o efeito de carga do eixo-padrão rodoviário de 8,2 ton e pressão dos pneus igual a 0,56 MPa.

### 3 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados de deflexões máximas das seções de pavimentos. Esses resultados apresentaram uma média de  $11,17 \cdot 10^{-2}$  mm, com desvio-padrão de  $1,93 \cdot 10^{-2}$  mm e valor mínimo observado igual a  $8,05 \cdot 10^{-2}$  mm e valor máximo de  $15,06 \cdot 10^{-2}$  mm, sendo a

mediana igual a  $11,23 \cdot 10^{-2}$  mm.

Tabela 1 – Seções de pavimentos do planejamento fatorial  $3^3$  e resultados de deflexão máxima

Seção	Réplica	MR do revestimento	E do CCR (MPa)	Aderência	Deflexão ( $10^{-2}$ mm)	Seção	Réplica	MR do revestimento	E do CCR (MPa)	Aderência	Deflexão ( $10^{-2}$ mm)
28	2	5764	18000	-1	9,65	44	2	6743	29500	0	11,77
22	1	8000	26700	-1	15,00	43	2	6743	29500	-1	14,65
2	1	5764	18000	0	8,32	19	1	8000	18000	-1	12,47
53	2	8000	29500	0	11,49	38	2	6743	18000	0	9,96
49	2	8000	26700	-1	15,00	51	2	8000	26700	1	11,41
46	2	8000	18000	-1	12,47	15	1	6743	26700	1	11,69
45	2	6743	29500	1	11,50	8	1	5764	29500	0	9,58
13	1	6743	26700	-1	15,06	26	1	8000	29500	0	11,49
21	1	8000	18000	1	9,66	5	1	5764	26700	0	9,39
12	1	6743	18000	1	9,69	24	1	8000	26700	1	11,41
29	2	5764	18000	0	8,32	14	1	6743	26700	0	11,97
6	1	5764	26700	1	9,17	39	2	6743	18000	1	9,69
27	1	8000	29500	1	11,23	4	1	5764	26700	-1	10,91
33	2	5764	26700	1	9,17	40	2	6743	26700	-1	15,06
36	2	5764	29500	1	9,37	41	2	6743	26700	0	11,97
11	1	6743	18000	0	9,96	18	1	6743	29500	1	11,50
37	2	6743	18000	-1	12,21	9	1	5764	29500	1	9,37
32	2	5764	26700	0	9,39	42	2	6743	26700	1	11,69
17	1	6743	29500	0	11,77	7	1	5764	29500	-1	11,13
25	1	8000	29500	-1	14,59	52	2	8000	29500	-1	14,59
20	1	8000	18000	0	9,93	47	2	8000	18000	0	9,93
30	2	5764	18000	1	8,05	1	1	5764	18000	-1	9,65
50	2	8000	26700	0	11,68	48	2	8000	18000	1	9,66
31	2	5764	26700	-1	11,05	34	2	5764	29500	-1	11,13



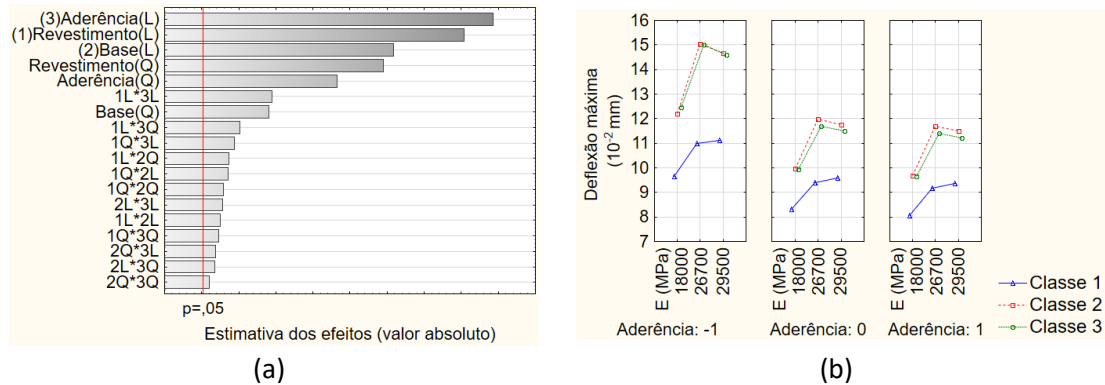
23	1	8000	26700	0	11,68	16	1	6743	29500	-1	14,65
54	2	8000	29500	1	11,23	3	1	5764	18000	1	8,09
35	2	5764	29500	0	9,58	10	1	6743	18000	-1	12,21

Fonte: Autores, 2020.

Os efeitos das variáveis preditoras do planejamento fatorial (classe de revestimento, tipo do CCR da base e a condição de aderência entre as camadas das seções) sobre os resultados das deflexões máximas das seções de pavimentos foram analisados através do diagrama de Pareto, presente na Figura 2 (a). Portanto, observa-se que os termos lineares (classe do revestimento asfáltico, tipo de CCR empregado na base e a condição de aderência entre as camadas) são as variáveis mais significativas para o modelo, todavia não se pode excluir a parcela de significância dos termos quadráticos e das interações, pois os valores absolutos observados estão acima do nível de significância adotado de 5% ( $p \geq 0,05$ ).

A Figura 2 (b) apresenta o gráfico de efeitos principais. A partir dele, destaca-se que o revestimento classe 1 de fadiga tende a apresentar um aumento no valor da deflexão máxima conforme se aumenta o tipo de CCR na camada de base, contrariamente, os revestimentos de classe 2 e 3 tendem a apresentar uma redução no valor da deflexão máxima quando se utiliza um CCR com consumo de cimento igual a  $280 \text{ kg/m}^3$  e módulo de elasticidade  $E = 29500 \text{ MPa}$ , em detrimento de um CCR com consumo de cimento igual a  $200 \text{ kg/m}^3$  e  $E = 26700 \text{ MPa}$ . Todavia, ao se observar a Figura 2 (b), pode-se considerar erroneamente que o revestimento de classe 1 é superior, em questão de qualidade, aos demais tipos de revestimentos para otimizar a capacidade de suporte do pavimento. Mas deve ser recordado que em comparação às outras misturas de concreto asfáltico, neste caso a seção de pavimento com o revestimento classe 1 é mais robusta para compensar a diferença de valores de módulos resilientes que há entre os materiais. Além disso, na ajuda do MeDiNa (DNIT, 2019) há uma ressalva em relação ao fator de fadiga das misturas asfálticas que aponta a obtenção de resultados melhores quando se empregam misturas com maiores classes de fadiga quando não há uma base estabilizada. Isso evidencia que em seções de pavimentos semirrígidos, a base tende a apresentar um valor de MR maior que o material de revestimento e, portanto, resistir aos esforços de tração, aliviando a necessidade de o revestimento asfáltico resisti-los sozinho.

Figura 2 -Diagrama de Pareto (a); gráfico de efeitos principais na deflexão máxima do pavimento (b).



Notas: Fator 1 – Classe de fadiga do revestimento; Fator 2 – Módulo de Elasticidade (E) do material da base; Fator 3 - Aderência entre as camadas; L é o termo linear: 1L (A), 2L (B) e 3L (C); Q é o termo quadrático: 1Q (A<sup>2</sup>), 2Q (B<sup>2</sup>) e 3Q (C<sup>2</sup>).

Fonte: Autores, 2020.

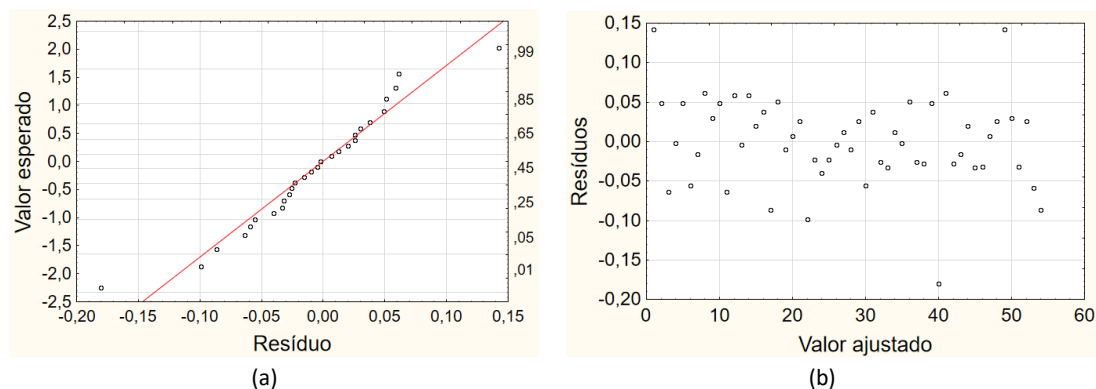
O modelo ajustado (Equação 1) apresentou uma proporção de variabilidade da deflexão máxima explicada pelas variáveis estudadas de 99,92%, referente ao coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9992$ ). O valor de  $R^2$  ajustado foi de 0,9986, reforçando a ideia de que o modelo foi bem ajustado, pois os valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado estão bastante próximos (MONTGOMERY; RUNGER, 2018; PCZIECZEK *et al.*, 2019). Além disso, o modelo também apresentou um baixo valor de média quadrática ( $MS = 0,0003926$ ).

A Figura 3 (a) apresenta a normalidade dos resíduos do modelo. Percebe-se que eles estão distribuídos de forma aproximada a uma linha reta, indicando a normalidade da distribuição e a adequação do modelo. A Figura 3 (b) confirma a hipótese de que o ajuste é adequado, haja vista que a aleatoriedade dos resíduos do modelo é próxima a uma nuvem de pontos, sem representar uma espécie de afunilamento deles, o que indicaria erro de ajuste (MORETTIN; BUSSAB, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2018; PCZIECZEK *et al.*, 2019).

$$Y = 335,876 - 0,095 * A + 6,56 * 10^{-6} * A^2 - 0,032 * B + 6,31 * 10^{-7} * B^2 + 16,364 * C - 15,3 * C^2 + 9,15 * 10^{-6} * A * B - 1,82 * 10^{-10} * A * B^2 - 6,29 * 10^{-10} * A^2 * B + 1,25 * 10^{-14} * A^2 * B^2 - 0,0038 * A * C + 0,0035 * A * C^2 + 2,53 * 10^{-7} * A^2 * C - 2,3 * 10^{-7} * A^2 * C^2 - 0,0003 * B * C + 0,003 * B * C^2 + 5,67 * 10^{-9} * B^2 * C - 5,44 * 10^{-9} * B^2 * C^2$$

NOTA: Y é a variável resposta, deflexão máxima, em 10<sup>-2</sup>mm; A é o módulo resiliente do revestimento de acordo com a classe de fadiga, em MPa; B é o módulo de elasticidade do CCR da base, em MPa; C é a condição de aderência entre as camadas do pavimento, variando entre -1, 0 e 1.

Figura 3 – Normalidade dos resíduos (a); aleatoriedade dos resíduos (b)



Fonte: Autores, 2020.

A Tabela 3 apresenta a Análise de Variância (ANOVA) calculada para o projeto fatorial. Para o teste de hipóteses, foi adotado um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, o qual considerou a hipótese nula ( $H_0$ ) como havendo igualdade entre as médias da variável resposta. Quanto à hipótese alternativa ( $H_1$ ), ela foi considerada como havendo pelo menos uma média diferente das demais. Conseqüentemente, se p-valor fosse menor que o nível de significância, a hipótese nula seria rejeitada, caso de fatores do modelo.

Ademais, a partir dos resultados obtidos para estatística F dos fatores (Tabela 3), evidenciou-se quais eram os fatores que mais influenciavam na predição da deflexão máxima da seção de pavimento, ou seja: as variáveis ou interações com maiores resultados observados nesse teste, indicaram maior importância para o modelo, caso das variáveis “classe de fadiga do revestimento”, “módulo de elasticidade do material da base” e “aderência entre as camadas”.

Tabela 1 - ANOVA do modelo ajustado

Fator	Soma dos quadrados	gl	Média dos quadrados	F	p
(1) Revestimento L+Q	68,1766	2	34,08828	34,08828	0,000000
(2) Base L+Q	37,9030	2	18,95150	48272,69	0,000000
(3) Aderência L+Q	73,7000	2	36,84998	93863,16	0,000000
(1)*(2)	2,0828	4	0,52071	1326,34	0,000000
(1)*(3)	5,3116	4	1,32791	3382,42	0,000000
(2)*(3)	0,8375	4	0,20938	533,32	0,000000
Falta de ajuste	0,1529	8	0,01912	48,69	0,000000
Erro Puro	0,0106	27	0,00039		
Total	197,3539	53			

Notas: gl representa os graus de liberdade; F é a estatística F; p é o valor-p; L é o termo linear; Q é o termo quadrático.  
Fonte: Autores, 2020.

A Figura 4 apresenta as superfícies de respostas e de contornos para o planejamento fatorial. Há uma tendência entre os gráficos de superfície que não se modifica quando se altera a condição de aderência entre as camadas do pavimento: sem aderência (-1), com aderência

parcial entre a base e o revestimento (0) e com aderência entre todas as camadas (1). Tal percepção é dada pelo formato do gráfico das superfícies de respostas (Figura 4 (a), (c), (e)) e pelos formatos circulares plotados nas superfícies de contorno (Figura 4 (b), (d), (f)), que indica a perfeita interação entre as variáveis preditoras do modelo (material da base e classe de fadiga do revestimento). Similares respostas nos gráficos de contorno foram observadas por Adamu *et al.* (2018) ao analisar a resistência à derrapagem em pavimentos de CCR com borracha triturada e nanossílica.

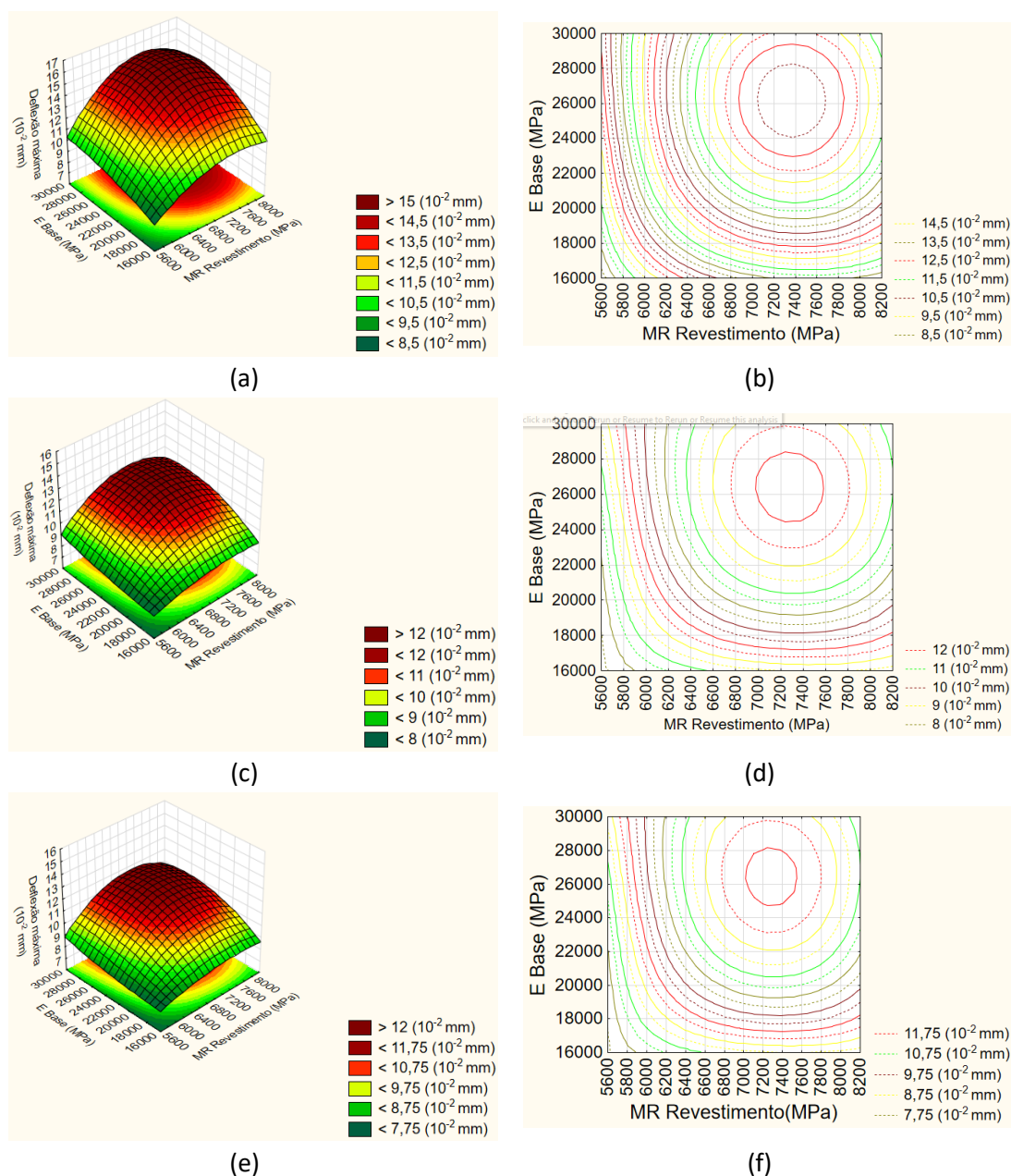
No contexto dos gráficos da Figura 4 (a) e (b), pode-se observar que as menores médias de deflexões máximas serão obtidas em seções de pavimentos com menores valores de módulo de elasticidade do material da base e de módulo resiliente do revestimento. Isso ocorre porque a espessura da base de CCR fica próxima a 30 cm, em média. Todavia, para espessuras mais delgadas, foi observado um aumento no valor predito da deflexão máxima. Essa tendência pode ser observada nas outras condições de aderência entre as camadas, corroborando a hipótese levantada ante aos efeitos das variáveis preditores sobre a variável resposta (Figura 2 (b)).

Outrossim, comparando-se todas as superfícies de respostas da Figura 4, pode-se concluir que as seções de pavimento sem aderência entre as camadas tendem a apresentar maiores valores de deflexão máxima. Além disso, quando se faz a comparação apenas entre os resultados das seções de pavimento com aderência entre as camadas de base e revestimento (Figura 4 (c) e (d)) com os resultados das seções de pavimento com aderência entre todas as camadas (Figura 4 (e) e (f)), evidencia-se que há pouca influência desse fator (aderência) na predição da deflexão máxima das seções.

Depreende-se também que a aderência entre as camadas do pavimento é de suma importância para aumentar a rigidez da seção e, conseqüentemente, promover o ganho de resistência. Em concordância a Santos *et al.* (2019), a condição de perfeita aderência entre as camadas resulta em melhores respostas estruturais e previsão de melhor desempenho das seções de pavimento.



**Figura 4 - Superfícies de respostas e contornos do planejamento fatorial: superfície de resposta para condição sem aderência (a); superfície de contorno para a condição sem aderência (b); superfície de resposta para a condição de aderência parcial (c); superfície de contorno para a condição de aderência parcial (d); superfície de resposta para a condição de aderência (e); superfície de contorno para a condição de aderência (f).**



Fonte: Autores, 2020.

Levando-se em consideração que os valores de deflexões máximas da Figura 4 (d) e Figura 4 (f) pouco diferem entre si, pode ser considerado que a aplicação de uma pintura de ligação entre as camadas do pavimento, especialmente entre a base e o revestimento asfáltico, no

caso de um pavimento semirrígido, seja um artifício técnico necessário para aprimorar a capacidade de suporte do pavimento. Essa necessidade de promover a aderência entre as camadas do pavimento semirrígido foi levantada por Costa *et al.* (2014) ao observar que o contato direto da mistura asfáltica com a base de BGTC fez com que a seção de pavimento sofresse danos prematuros, sendo que as trincas observadas no topo do revestimento eram decorrentes do trincamento iniciado na base cimentada.

Há de se ressaltar ainda que as condições de aderência entre as camadas diferem bastante entre a teoria e a prática, ou seja, as condições analisadas nesse estudo devem ser conferidas na prática da engenharia, pois na construção do pavimento ou no pavimento em serviço elas podem ser distoantes daquelas consideradas no projeto, como também destacaram Costa *et al.* (2014), Costa *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2019).

#### 4 CONCLUSÃO

Este estudo se propôs a identificar, através de um planejamento fatorial e metodologia de superfície de resposta, os fatores que mais influenciam as respostas estruturais de seções de pavimentos semirrígidos, considerando os resultados teóricos de deflexão máxima das seções. Nesta perspectiva, pode-se afirmar que o objetivo foi alcançado e a partir disso, as seguintes conclusões podem ser delineadas:

- As classes de fadiga do revestimento, propostas por Fritzen *et al.* (2019) têm grande importância sobre o comportamento estrutural do pavimento, assim como o material da base cimentada e a condição de aderência entre as camadas;
- Classes de revestimento mais baixas, com menores valores de MR, resultam em seções mais robustas no dimensionamento através do MeDiNa, pois os materiais apresentam menores valores de MR;
- Seções de pavimentos dimensionadas com aderência entre todas as camadas apresentam melhores respostas estruturais que seções cujo contato é direto entre as camadas;
- As seções semirrígidas dimensionadas no MeDiNa apresentaram maior valor de deflexão máxima ( $14,5 \cdot 10^{-2}$  mm) quando não havia aderência entre as camadas e menor valor de deflexão máxima ( $11,75 \cdot 10^{-2}$  mm) quando se considerava aderência entre as camadas, não havendo grande diferença da condição de aderência parcial (apenas entre o revestimento e a base). Sendo que nesta condição, o maior valor de deflexão máxima foi de  $12 \cdot 10^{-2}$  mm;
- É importante promover a aderência, especialmente entre o revestimento asfáltico e a base cimentada, no caso de pavimentos semirrígidos, para aprimorar as respostas estruturais da seção e, conseqüentemente, sua capacidade de suporte;
- Não se pode distanciar as observações de campo e de laboratório. Ou seja, é necessário que as condições de campo e laboratório sejam iguais em referência à

aderência entre as camadas. Logo, de nada adianta prever a condição de aderência para otimizar a seção do pavimento se em campo, os materiais ficarem sujeitos a condições adversas de aderências.

## REFERÊNCIAS

ADAMU, Musa; MOHAMMED, Bashar S.; SHAFIQ, Nasir; LIEW, Mohd Shahir. Skid resistance of nano silica modified roller compacted rubberconcrete for pavement applications: Experimental methods and response surface methodology. **Cogent Engineering**. [S.l.]. Mar., 2018. v. 5. n. 1. p. 1-14. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1452664>>. Acesso em: 05 ago. 2020.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALBO, José Tadeu; DORNELAS, Ricardo Cruvinel. Custos de reciclagem de pavimentos de concreto e seu potencial econômico na realidade brasileira. **Revista Transportes**. 2015. v. 23. n. 2, p. 75-84. Disponível em: <<https://doi.org/10.14295/transportes.v23i2.846>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BUENO, Lucas Dotto. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. 2016. 471 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

BUSSAB, Wilton de O.; MORETTIN, Pedro A. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2019: Relatório gerencial**. Brasília: CNT, 2019. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/relatorio-gerencial>>. Acesso em 22 jul. 2020.

COSTA, Gessyca Menezes; ALBUQUERQUE, Fernando Silva; MENDONÇA, Aírton Teles de. ALBUQUERQUE, Tatiana Máximo Almeida. Efeito de diferenças de características mecânicas de materiais para pavimentos obtidos em laboratório e campo. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, 28., 2014. Curitiba. **Anais...**, Curitiba: XXVIII ANPET 2014.

COSTA, Gessyca Menezes; MENDONÇA, Aírton Teles; ALBUQUERQUE, Fernando Silva; ALBUQUERQUE, Tatiana Máximo Almeida. Características Mecânicas de Materiais para Pavimentos: Estudo de Caso Laboratório x Campo. **Scientia Plena**. [S.l.]. nov., 2015. v. 11, n. 11, p. 1-12. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14808/sci.plena.2015.113311>>. Acesso em 04 ago. 2020.

DEAN, Angela; VOSS, Daniel; DRAGULJIC, Danel. **Design and analysis of Experiments**. 2. ed. Gewerbestrasse, Suíça: Springer, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **MeDiNa: Método de Dimensionamento Nacional**. Versão 1.1.0, abr. 2018. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/solicitacao-de-download-do-medina>> Acesso em: 22 jul. 2020.

FRANCO, Felipe Augusto Cinque de Proença. **AEMC: Análise Elástica de Múltiplas Camadas**. Versão 2.4.1, jan. 2019. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/solicitacao-de-download-do-medina>>. Acesso em: 22 jul. 2020.





FRANCO, Felipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Guia para utilização de Método Mecânico-Empírico – Apresentação de programas desenvolvidos**. Rio de Janeiro: UFRJ; DNIT, 2018. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manual-de-utilizacao-medina.pdf/view>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

FRITZEN, Marcos Antonio; FRANCO, Felipe Augusto Cinque de Proença; NASCIMENTO, Luis Alberto Hermann; MOTTA, Laura Maria Goretti da; UBALDO, Mariluce Oliveira. Classificação de misturas asfálticas quanto ao desempenho à fadiga. In: Congresso Rodoviário Português, 9., 2019. Lisboa. **Anais...**, Lisboa: CRP, 2019. Disponível em: <[http://www.crp.pt/docs/A54S222-9CRP\\_Artigo\\_33.pdf](http://www.crp.pt/docs/A54S222-9CRP_Artigo_33.pdf)>. Acesso em: 05 ago. 2020.

GARBIN, Patrícia Teodorovski; FERNANDES JR, José Leomar. Uso do programa Truksim para quantificação do efeito das cargas dinâmicas de veículos rodoviários sobre pavimentos. **Revista Pavimentação**. Rio de Janeiro, ed. 42, p. 59-72, mar. 2017. Disponível em: <[https://issuu.com/revistapavimentacao/docs/revista\\_pavimenta\\_o\\_ed\\_42](https://issuu.com/revistapavimentacao/docs/revista_pavimenta_o_ed_42)>. Acesso em: 28 jul. 2020.

KAKUDA, Francis Massashi. **Desenvolvimento e utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico**. 2010. 290 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

LEIVA-VILACORTA, Fabricio; VARGAS-NORDCBECK; Adriana; AGUIAR-MOYA, José P. Permanent deformation and deflection relationship from pavement condition assessment. **International Journal of Pavement Research and Technology**. [S.l.]. Jul., 2017. v. 10, n. 4, p. 352-359. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.005>>. Acesso em: 03 ago. 2020.

LIJUN, Suo; XINWU, Wang. Analysis of Load Stress for Asphalt Pavement of Lean Concrete Base. **Physics Procedia**. [S.l.]. 2012. v. 24. part. A, p. 404-411. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.059>>. Acesso em: 05 ago. 2020.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. Uma nova classificação de solos para finalidades geotécnicas. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro. **Anais...**, 1981. P. 30-42.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

PCZIECZEK, A.; EFFTING, C.; GOMES, I. R.; SCHACKOW, A.; HENNING, E. Statistical analysis of mechanical properties of mortars with fly ash and waste tire rubber. **IBRACON Structures and Materials Journal**. [S.l.]. Ago., 2019. v. 12. n. 4. p. 790-811. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000400005>>. Acesso em: 05 ago. 2020.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP. **IP – 05/2004**: Dimensionamento de pavimentos flexíveis: tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva para ônibus. São Paulo: PMSP, 2004.

PREUSSLER, Leonardo Appel. **Contribuição ao estudo de deformabilidade de camadas de pavimentos**. 2007. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

RITH, Makara; KIM, Young Kyu; LEE, Seung Woo. Behavior of RCC-base composite pavement for heavy duty area. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. Jun., 2018. v. 175. p. 144-151. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.194>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

SANTOS, Anthony Gomes dos; ASSIS, Rosuel Krum Matias de; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. **Revista Transportes**. [S.l.]. ago., 2019. v. 27, n. 2, p. 89-101. Disponível em: <[10.14295/transportes.v27i2.1597](https://doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1597)>. Acesso em: 04 ago. 2020.

TIBCO, Software Inc. **Statistica**: Ultimate Academic Bundle. Version 13.3. 2020. Disponível em: <<https://onthehub.com/statistica/>>.



TRICHÊS, Glicério. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: Estudo do comportamento à fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento.** 1993. 378 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1993.

YODER, Eldon Joseph; WITCZAK, Matthew W. **Principles of pavement design.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.