

IAG324-03-2013
ESTUDO DA TENSÃO DE TRAÇÃO NA BASE DE REVESTIMENTOS DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SOB A ÓTICA DA TEORIA DA
ELASTICIDADE
ESTUDIO DE LA TENSION DE TRACCION EN LA BASE DE
REVESTIMIENTOS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DESDE EL PUNTO
DE VISTA DE LA TEORIA DE ELASTICIDAD

Klaus Machado Theisen
Universidade Federal de Pelotas
Pelotas, Brasil
theisenkm@yahoo.com.br

Andressa da Silva Afonso
Universidade Federal de Pelotas
Pelotas, Brasil
andressaafonso@ymail.com

Resumo

Os pavimentos flexíveis contribuem significativamente no caráter logístico de recursos humanos e materiais de um país, criando a necessidade do desenvolvimento de estudos para previsão, de maneira racional, das patologias que ocorrerão no pavimento em sua vida útil, sendo uma delas o trincamento por fadiga. A modelagem do comportamento dos pavimentos não é simples, visto o comportamento complexo de seus materiais. Diante disso, a teoria das camadas elásticas é aceita e empregada na modelagem de pavimentos flexíveis como simplificação razoável a tal comportamento. Assim, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de estruturas sob a ótica da teoria das camadas elásticas, através da tensão de tração na base do revestimento (TTBR), variável intimamente ligada ao trincamento por fadiga. Foram realizadas análises mecânicas com o programa EVERSTRESS 5.0®, onde foram fixadas três estruturas (revestimento, base e sub-leito), sendo uma delas flexível, outra rígida e uma terceira intermediária, onde nessas estruturas se obteve a TTBR variando-se o módulo de resiliência do revestimento e a espessura do mesmo. Nos resultados, observou-se na relação espessura do revestimento com a TTBR um formato característico, no qual se notou uma espessura que gera um pico de tensão e outra que gera mudança de sinal de tensões, caracterizando uma mudança de condição do revestimento de tensão controlada para deformação controlada, comportamento ajustado por um produto de funções potencial e logarítmica ($R^2 > 0,98$). Notou-se também que a espessura de pico decresce em função do módulo do revestimento e da rigidez do conjunto base, e sub-leito, apresentando tendências semelhantes em função deste. O mesmo tipo de comportamento foi notado para espessura que muda o sinal da TTBR. Os parâmetros da função potencial (constante A e expoente b), observou-se decréscimo de b com o módulo do revestimento, o que representa maior sensibilidade das tensões a revestimentos mais rígidos.

Resumen

Los pavimentos flexibles contribuyen de manera significativa en el carácter logístico de los recursos humanos y materiales de un país. Tal fato crea la necesidad de realizar más estudios para predecir racionalmente las patologías que se producen en el pavimento en su vida útil, uno de los cuales es agrietamiento por fatiga. Modelar el comportamiento de los pavimentos no es simple, debido al complejo comportamiento de sus materiales. Por lo tanto, la teoría de las capas elásticas es aceptada y utilizada en el modelado de los pavimentos flexibles como una simplificación razonable a tal comportamiento. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento de las estructuras desde la perspectiva de la teoría de las capas elásticas, a través de la tensión de tracción en la base del recubrimiento (TTBR), variables estrechamente vinculado a lo agrietamiento por fatiga. Análisis mecanicista se realizaron con lo programa EVERSTRESS 5.0 ®, que se fija tres estructuras (recubrimiento, base e sub-leito), uno de los cuales una estructura es flexible, otra rígida y otro intermedio, donde de estas estructuras se obtienen la TTBR mediante la variación de el módulo de lo modulo de elasticidad y la espesura de lo recobrimiento.del recubrimiento. En los resultados observados en relación con el espesor del recubrimiento TTBR una forma característica en la que un espesor observó que genera un pico de voltaje y genera otra señal de cambio de voltaje que caracteriza un cambio de estado del revestimiento controlado por voltaje para el comportamiento de deformación controlada, ajustada por un potencial de productos y funciones logarítmicas ($R^2 > 0.98$). También se observó que el espesor máximo disminuye como una función del módulo de recubrimiento y la rigidez de la base de montaje, sub-base y la sub-cama, con tendencias similares como una función de la misma. El mismo comportamiento se observó para el espesor que cambia el signo de TTBR. Los parámetros de la función de potencial (constante A y el exponente b), hubo una disminución de b con el módulo de recubrimiento, que es más sensible a las tensiones que enfrentan más rígido.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os pavimentos flexíveis são agentes importantes para a logística de recursos humanos e materiais. Se em condições satisfatórias, os pavimentos facilitam, tornam mais econômicas e reduzem o tempo das atividades do transporte de pessoas e produtos. Tal fato ressalta a necessidade de bons projetos, execuções e gerência de pavimentos (Theisen, 2011). Tais condições satisfatórias, referindo-se especialmente ao projeto de pavimentos, passam por modelos racionais de descrição do comportamento dos pavimentos. Entretanto esta tarefa não é trivial. Segundo Medina e Motta (2005), a dificuldade para tal procedimento é devida desde ao comportamento complexo dos materiais de pavimentação até á determinação do carregamento atuante nesta estrutura, que são cargas transientes de efeito destrutivo variável.

Frente tais dificuldades, a modelagem mecanicista de pavimentos flexíveis mais empregada atualmente é baseada na teoria das camadas elásticas. O comportamento dos materiais de pavimentação, embora não se comportem como perfeitamente elásticos, pode ser suposto como elástico e linear em algumas situações, suficiente para que se possa prever a ocorrência de fenômenos de degradação como fadiga de materiais cimentados e afundamentos de trilhas de roda de forma mais racional que métodos puramente empíricos.

Segundo Theisen (2011), existem vantagens do uso da Teoria da Elasticidade na modelagem de pavimentos flexíveis com relação a teorias que se aproximem mais do comportamento real dos materiais de pavimentação, especialmente das misturas asfálticas, conhecidas pelo seu comportamento viscoelástico. Tais vantagens são listadas abaixo:

- A Teoria da Elasticidade é muito conhecida no meio técnico-profissional;

- Os parâmetros constitutivos são constantes, portanto mais fáceis de serem comparados e entendidos;
- Simulações numéricas empregando a Teoria da Elasticidade demandam tempo computacional menor, pois possibilitam o uso do princípio da sobreposição de efeitos e a não necessidade do uso de cargas móveis (dinâmicas);
- Os ensaios de laboratório para determinação de parâmetros constitutivos lineares-elásticos são mais conhecidos, mais rápidos e mais baratos.

Entretanto, o uso da Teoria da Elasticidade no dimensionamento de pavimentos flexíveis traz uma desvantagem com relação aos métodos ditos empíricos: o dimensionamento da estrutura passa a ser iterativo, ou seja, as espessuras das camadas não são diretamente obtidas em função de uma dada metodologia de dimensionamento. Espessuras devem ser arbitradas de forma a verificar se estas geram tensões, deformações e deflexões na estrutura do pavimento de forma a satisfazer critérios de projeto. O comportamento complexo de uma estrutura de pavimento, no qual todas as variáveis de resposta estrutural dependem das características de todas as camadas da estrutura, é uma das causas da iteratividade do método. Não existe uma solução analítica em função das equações da Teoria da Elasticidade para uma estrutura de pavimento, notavelmente tridimensional em função das dimensões da estrutura, configuração da carga de eixo e condições de contorno. A solução é dada a partir da solução das equações da Teoria da Elasticidade por métodos numéricos, porém estas se restringem a uma determinada estrutura com valores de propriedades constitutivas e espessuras definidas, além de que a solução é fornecida apenas para pontos específicos da estrutura, não permitindo ao projetista enxergar o comportamento do pavimento como um todo. Assim, justifica-se a necessidade de ferramentas analíticas que auxilie o projetista a visualizar o comportamento do pavimento, facilitando o seu entendimento sobre a estrutura e facilitando o processo de dimensionamento da mesma.

Posto isto, o presente trabalho tem o objetivo de obter modelos analíticos para a tensão de tração na base do revestimento (TTBR) em função dos parâmetros utilizados na modelagem da estrutura para análise mecânica. Em outras palavras, a TTBR em função de módulo de resiliência e espessura da camada de revestimento e características da estrutura de suporte (módulos, espessuras e deflexões), obter um modelo que facilite os projetistas a conhecer clara e explicitamente as variáveis que mais têm influência na tensão de tração na base do revestimento, de modo a tomar decisões de projeto.

ANÁLISE MECANÍSTICA DE PAVIMENTOS

Sob a ação das cargas do tráfego, além da deflexão do pavimento, surgem tensões e deformações em cada uma das camadas que compõem a estrutura, cuja magnitude e sinal variam espacialmente. Dentro do campo tridimensional de tensões e deformações criado, existem tensões comumente buscadas de forma a comparar com valores admissíveis de projeto, relacionadas às patologias dos pavimentos como trincamento por fadiga e afundamentos de trilhas de rodas. A Figura 1 ilustra mostra algumas das tensões que aparecem sob a ação das cargas empregadas em projetos. Na Figura, observa-se que existe uma tensão σ_{hi} , de tração, localizada na base do revestimento (por isso denominada de tensão de tração na base do revestimento), resultante do efeito de flexão do revestimento sob a ação de carga. Tal efeito de flexão provoca no pavimento uma distribuição de tensões horizontais semelhante a uma viga, de tal modo que surja no topo do revestimento uma tensão de compressão σ_{hs} , havendo um ponto ao longo da espessura do revestimento onde a tensão horizontal é nula, caracterizando uma linha neutra, também como

visto na Figura 1. Juntamente com as tensões no revestimento, outra tensão utilizada como parâmetro de projeto é a tensão de compressão no topo do sub-leito, na Figura 1 vista como σ_{v-sb} . Tal tensão está relacionada ao quão eficiente é a estrutura do pavimento de dissipar as tensões verticais vindas do contato dos pneus dos veículos com a superfície do pavimento. Quanto menor for esta tensão, mais eficiente é o pavimento neste quesito, o que é de crucial importância para evitar afundamento de trilhas de roda em função do excesso de tensões no revestimento.

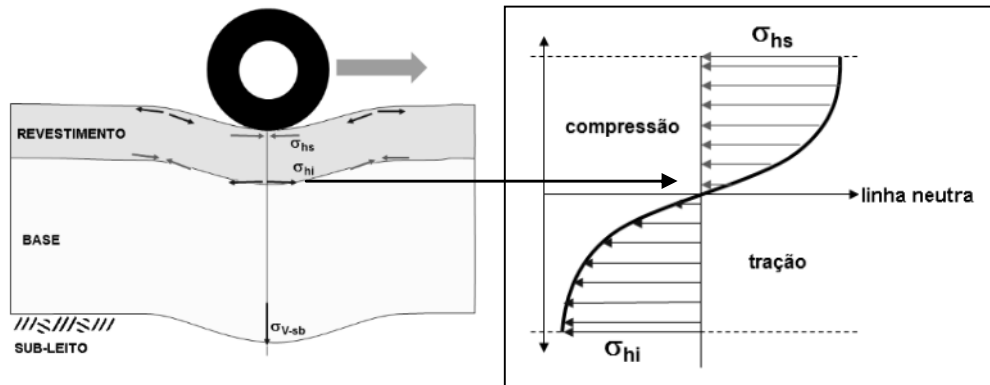


Figura 1: Tensões em um pavimento sob ação de carga de tráfego.

Empregando-se a Teoria da Elasticidade no cálculo das tensões, existem duas hipóteses que regem as equações empregadas para a análise. A primeira delas assume que os materiais de análise são considerados como elásticos, lineares, homogêneos e isotrópicos, em que:

- **Materiais elásticos lineares:** Nestes materiais, as tensões (deformações) são função das deformações (tensões), havendo uma correspondência biunívoca entre estas, isto é, para cada deformação existe apenas uma tensão correspondente e vice-versa. Se a relação entre tais variáveis é proporcional a uma constante, existe a linearidade;
- **Materiais homogêneos:** Materiais que possuem as mesmas propriedades físicas em qualquer ponto de seu domínio e que sejam contínuos, ou seja, livres de defeitos internos, como trincas, poros e assim por diante;
- **Materiais isotrópicos:** Materiais cujas propriedades físicas não variam conforme a orientação no espaço. Tal variação acontece, por exemplo, em função de orientação de fibras, geotexteis, lamelaridade de agregados, entre outros.

A outra hipótese simplificadora está no nível de deformações admitido para validade da teoria. Os níveis de deformação são suficientemente pequenos de maneira a que produtos de gradientes de deslocamentos em qualquer direção do espaço sejam insignificantes. Na teoria das camadas elásticas, todos os materiais são considerados conforme as premissas da Teoria da Elasticidade. O pavimento é considerado como um empilhamento de camadas de espessura uniforme e largura infinita, suportado por um meio semi-infinito como mostrado por Boussinesq (1885). As propriedades constitutivas consideradas para os materiais são o módulo de elasticidade da camada número i (E_i) e o coeficiente de Poisson da mesma camada (ν_i), conforme visto na Figura 2. Em função da geometria complexa e tridimensional criada pela situação vista na Figura 2, o problema de se obter tensões, deformações e deslocamentos na estrutura de pavimentos é descrito por um sistema de equações diferenciais parciais, no qual requerem métodos numéricos de solução, contidos em softwares específicos para este tipo de análise. No caso de análise mecanística, muitos destes softwares são obtidos gratuitamente pelas Universidades ou Departamentos de Transportes que o desenvolveram, bastando-se apenas baixar

o aplicativo executável do programa da internet. O programa escolhido para análises foi o EVERSTRESS 5.0®, desenvolvido pelo *Washington State Department of Transportation* (WSDOT, 2005). O programa EVERSTRESS 5.0® é um programa capaz de determinar tensões, deformações e deflexões em um sistema de camadas elásticas semi-infinito carregado por cargas circulares uniformemente distribuídas na superfície do pavimento. O programa pode analisar uma estrutura de pavimento contendo até 5 camadas, 20 cargas e 50 pontos de avaliação. O programa EVERSTRESS 5.0® também considera a dependência dos materiais com relação ao estado de tensões. A janela de entrada de dados do programa é mostrada na Figura 3:

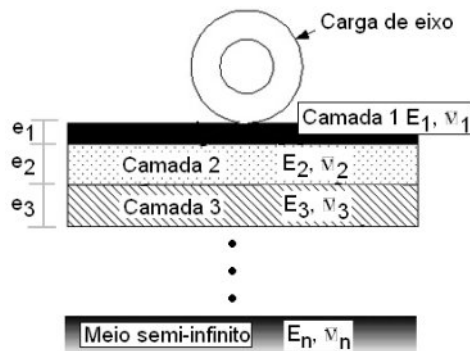


Figura 2: Modelo de pavimento segundo a teoria das camadas elásticas



Figura 3: O programa EVERSTRESS 5.0®

METODOLOGIA DE ANÁLISE

Foram executadas análise empregando o programa EVERSTRESS 5.0®, onde considerou-se os seguintes dados de entrada:

- Número de camadas do pavimento: três camadas (revestimento, base e sub-leito);
- Coeficiente de Poisson: as camadas foram simuladas com valores típicos de coeficiente de Poisson. Para o revestimento, base e sub-leito os valores considerados foram 0,3; 0,35 e 0,45; respectivamente;
- Espessura da base: 20 cm;
- A carga considerada atuando no pavimento foi a carga de eixo padrão: um eixo simples de rodas duplas, cuja carga é de 8,2 toneladas, distribuída igualmente entre as rodas (2050 kg por roda). No programa, simulou-se a atuação de um semi-eixo, cuja pressão de contato com a superfície do pavimento é de 560 kPa. A distância entre os centros geométricos das áreas carregadas é de 30cm;

- Foram considerados dois pontos de avaliação: um deles exatamente abaixo de uma das rodas, coincidente com o centro geométrico da área carregada; outro no ponto médio que liga os centros geométrico das duas cargas consideradas no semi-eixo, ou seja, entre as duas rodas. A profundidade a partir da superfície do pavimento coincidiu com a espessura do revestimento, ou seja, o ponto localizado na base do mesmo.

Os dados acima foram fixos para as análises. Os dados variáveis foram os seguintes:

- Espessura do revestimento: de 2 a 20 cm, de 2 em 2 cm;
- Módulo de resiliência do revestimento: 1000 MPa (simulando um revestimento com alto grau de degradação), 5000 MPa (valor típico de um concreto asfáltico usinado a quente comum) e 10000 MPa (simulando um revestimento rígido);
- Módulo de resiliência da base: 50 MPa (simulando uma estrutura flexível de assentamento do revestimento), 200 MPa (simulando uma estrutura intermediária de assentamento do revestimento) e 400 MPa (simulando uma estrutura rígida de assentamento do revestimento);
- Módulo de resiliência do revestimento: 50 MPa, 100 MPa, 200 MPa e 400 MPa, simulando diferentes condições de plataformas de terraplenagem.

Dos resultados, surgiram quatro TTBR's: duas embaixo da roda, na direção longitudinal e perpendicular ao sentido de tráfego; e duas entre as duas rodas, longitudinal e perpendicular ao sentido de tráfego. Entre estas, a adotada para o banco de dados seguiram o seguinte critério:

- Se as quatro tensões resultaram positivas, ou seja, de tração segundo a convenção do programa empregado, a adotada foi a de maior magnitude;
- Se as quatro tensões resultaram negativas, ou seja, de compressão segundo a convenção do programa empregado, a adotada foi a de maior magnitude;
- Se as tensões resultaram com diferentes sinais (tração e compressão), descartaram-se as tensões de compressão e adotou-se a tensão de tração de maior magnitude.

As análises geraram um total de 360 TTBR's, considerando 10 espessuras de revestimento x 3 módulos de revestimento x 3 módulos de base x 4 módulos de sub-leito. Tais dados foram analisados mediante gráficos cartesianos e ajuste de modelos conforme curva resultante dos gráficos, gerando os resultados expostos na sequência.

RESULTADOS OBTIDOS

Em um primeiro momento, a TTBR foi traçada em função da espessura do revestimento, de modo a se observar o comportamento da variável em questão no presente trabalho. O que foi observado, para as estruturas de base flexível, intermediária e rígida, é o comportamento típico ilustrado pela Figura 4. Na figura, observa-se que a TTBR possui um pico característico de valor, onde para espessuras maiores correspondentes ao do pico existe queda do valor de tensão, enquanto que para espessuras menores existe aumento do valor de tensão. Este pico de tensão é maior quanto maior for o módulo de resiliência do revestimento, e a espessura correspondente decresce em função do aumento do mesmo módulo. É observado também que existe uma espessura na qual existe a transição do comportamento de TTBR para compressão na base do revestimento. A espessura que delimita esta troca de sinal de tensões é maior quanto menor for o módulo de resiliência do revestimento. Comparando-se os resultados entre as estruturas de base

(flexível, intermediária e rígida), notou-se que tanto as espessuras de pico quanto de mudança de sinal de tensões crescem quanto mais flexível for a base.

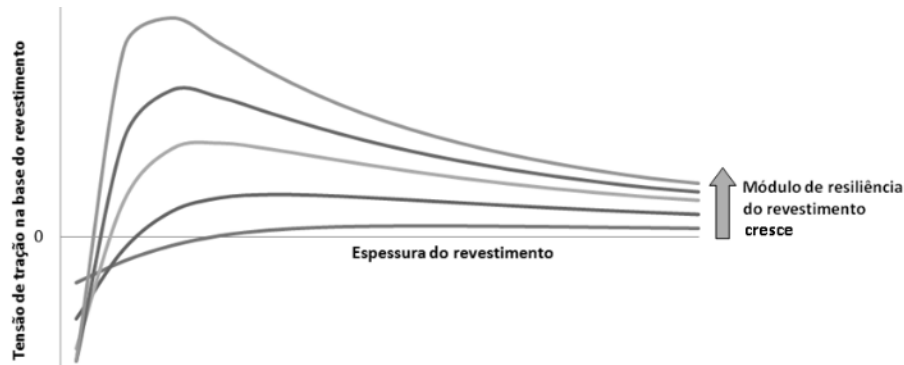


Figura 4: Comportamento típico da tensão de tração na base do revestimento em função da espessura do revestimento

Em função da forma típica observada na Figura 4, procurou-se obter um modelo que representasse o comportamento visto. O modelo encontrado para tal foi um produto de funções logarítmica e potencial, no qual a TTBR pode ser expressa em função da espessura do revestimento (h_1) conforme a equação 1:

$$TTBR = A(h_1)^b \ln(h_1/h_{dc}) \quad (1)$$

Na equação 1, A e b são constantes e h_{dc} é a espessura de deformação controlada, ou seja, a espessura onde existe troca de sinal da TTBR. Quando a TTBR tem valor positivo, significa que a tarefa de dissipação de tensões transferidas pelo tráfego é de responsabilidade do revestimento. Quando a TTBR é negativa, significa que a tarefa de dissipação de tensões é passada à base, sendo que as deformações que ocorrem na camada de revestimento são regidas pelo comportamento da base, por isso o comportamento de deformação controlada.

As constantes vistas na equação 1 dependem da estrutura de pavimento abaixo do revestimento. Para representar tal dependência, foram obtidas as constantes vistas na equação 1 para as situações simuladas, cujos resultados são vistos na Tabela 1. Em função dos resultados, determinou-se também o valor da máxima TTBR e a espessura correspondente, na Tabela 1 expresso como h_{max} e $TTBR_{Max}$. Os valores são expressos em função do módulo de resiliência do revestimento (E_1), módulo de resiliência da base (E_2) e módulo de resiliência do sub-leito (E_3).

Representação em função da bacia deflectométrica da estrutura de apoio do revestimento

Estudar com maiores detalhes a TTBR, analisando a influência de todos os módulos e espessuras consideradas no projeto é uma tarefa complexa. Uma série de simulações seria requerida para fazer tal estudo. Além disto, o conhecimento de tais valores pelos projetistas, principalmente dos módulos das camadas, não é garantia de uma previsão confiável, pois módulos constantes geralmente são obtidos de processos de retro-análise, com este “escondendo” nos seus resultados a influência das espessuras e módulos das camadas acima.

Para facilitar o estudo em questão, optou-se por representar a estrutura abaixo do revestimento pela bacia deflectométrica resultante da ação de uma carga de eixo padrão

diretamente nesta estrutura. Independente do número de camadas, módulos e espessuras da estrutura abaixo do revestimento, a bacia deflectométrica pode ser representada por três parâmetros (k , n e $D(0)$), conforme a equação 2 proposta por Albernaz (1997), onde $D(0)$ é a deflexão obtida no centro geométrico do carregamento, x é a distância considerada a partir do centro do carregamento, k e n são constantes e r é o raio da área de contato pneu-pavimento.

Tabela 1: Constantes A , b , h_{dc} , h_{max} e $TTBR_{max}$ para as situações simuladas:

E1(MPa)	E2(MPa)	E3(MPa)	a*	b*	hdc(cm)	hmax(cm)	TTBRmax(kPa)	E1(MPa)	E2(MPa)	E3(MPa)	a*	b*	hdc(cm)	hmax(cm)	TTBRmax(kPa)
1000	50	50	13250.3	-1.34	1.66	3.52	1846.2	1000	50	200	13808.2	-1.41	1.63	3.32	1813.1
1000	200	50	6792.8	-1.20	3.44	7.93	475.8	1000	200	200	7655.7	-1.32	3.19	6.80	462.9
1000	400	50	4201.6	-1.14	5.59	13.50	192.9	1000	400	200	5423.1	-1.32	4.98	10.63	183.0
5000	50	50	41002.3	-1.58	1.28	2.41	6408.7	5000	50	200	38022.9	-1.62	1.25	2.32	5982.9
5000	200	50	16535.7	-1.30	1.67	3.60	2397.4	5000	200	200	16159.5	-1.38	1.60	3.31	2243.1
5000	400	50	23588.7	-1.42	2.92	5.91	1343.0	5000	400	200	13226.9	-1.33	2.28	4.84	1219.7
10000	50	50	58291.0	-1.66	1.16	2.11	10074.3	10000	50	200	50122.4	-1.68	1.10	2.00	9328.5
10000	200	50	30180.8	-1.44	1.49	2.97	4333.1	10000	200	200	27164.7	-1.49	1.43	2.80	3901.7
10000	400	50	16984.5	-1.27	1.71	3.78	2491.9	10000	400	200	16216.2	-1.34	1.63	3.44	2309.8
1000	50	100	13502.7	-1.38	1.64	3.40	1822.4	1000	50	400	14068.1	-1.43	1.63	3.28	1811.1
1000	200	100	7162.1	-1.26	3.29	7.29	466.9	1000	200	400	8181.3	-1.37	3.12	6.48	462.8
1000	400	100	4799.7	-1.23	5.26	11.87	186.4	1000	400	400	6202.9	-1.40	4.77	9.75	183.1
5000	50	100	38774.6	-1.60	1.26	2.35	6137.3	5000	50	400	38036.9	-1.64	1.25	2.30	5904.2
5000	200	100	16216.2	-1.34	1.63	3.44	2309.8	5000	200	400	16371.1	-1.42	1.59	3.21	2203.9
5000	400	100	13144.9	-1.28	2.35	5.11	1257.9	5000	400	400	13503.1	-1.38	2.23	4.62	1192.0
10000	50	100	52705.4	-1.67	1.12	2.04	9602.8	10000	50	400	49324.9	-1.69	1.09	1.98	9180.4
10000	200	100	28348.8	-1.47	1.46	2.88	4092.1	10000	200	400	26721.7	-1.52	1.42	2.74	3777.3
10000	400	100	16535.7	-1.30	1.67	3.60	2397.4	10000	400	400	16159.5	-1.38	1.60	3.31	2243.1

*valores obtidos para TTBR em kPa e h_i em cm.

$$D(x) = \frac{D(0)}{1 + k(x/r)^n} \quad (2)$$

Os parâmetros k e n , quando tentem a 0 a ∞ (infinito) no caso de k e $-\infty$ e ∞ no caso de n , representam as seguintes condições extremas:

- Quando $k = 0$ e/ou $n = -\infty$, trata-se de uma condição de camada de revestimento rígida, no qual as tensões são uniformemente distribuídas na camada seguinte e as deflexões tem valor constante $\delta(0)$;
- Quando $k = \infty$ e/ou $n = \infty$, trata-se de uma condição de camada de revestimento sem rigidez, onde as tensões são concentradas nas camadas inferiores e a bacia de deflexões possui raio de curvatura tendendo a 0.

Em outras palavras, k e n estão associados às condições do pavimento, mais especificamente às camadas próximas ao revestimento. Assim, os parâmetros k , n e $D(0)$ da equação 2 fornecem boa noção da estrutura abaixo do revestimento com apenas três parâmetros, com a vantagem de ser muito mais fácil de ser obtido para projetos do que os módulos e espessuras das camadas em questão. Em função dos 4 módulos de sub-leito e 3 módulos de base estudados desta pesquisa, foram obtidos 12 valores de $D(0)$, k e n , vistos na Tabela 2, através do ajuste dos dados resultados obtidos no EVERSTRESS 5.0® segundo a equação 2.

Tabela 2: Constantes $D(0)$, k e n para as situações simuladas:

E2(MPa)	E3(MPa)	D(0)(micron)	k	n	E2(MPa)	E3(MPa)	D(0)(micron)	k	n
50	50	1644.7	0.368	1.33	50	200	729.8	1.180	1.09
200	50	1161.6	0.148	1.54	200	200	411.2	0.368	1.33
400	50	984.5	0.097	1.61	400	200	341.9	0.229	1.44
50	100	1046.8	0.631	1.21	50	400	565.8	2.481	0.98
200	100	683.7	0.229	1.44	200	400	261.7	0.631	1.21
400	100	580.8	0.148	1.54	400	400	205.6	0.368	1.33

Modelo genérico para obtenção da tensão de tração na base do revestimento

Uma vez aplicadas as equação 1 e 2, é possível obter modelos genéricos, ou seja, válidos para qualquer ou uma grande gama de estruturas, para estimar a TTBR. Tais modelos dependem apenas de 4 variáveis, representadas por $D(0)$, k , n e E_1 , que aliados a equação 1, também considerarão a espessura do revestimento. Para obter os referidos modelos, as constantes A , b e h_{dc} vistas na Tabela 1 foram ajustadas em função de $D(0)$, k , n e E_1 . O modelo empregado para tal é expresso pela equação 3, onde C , α_1 , α_2 , α_3 e α_4 são constantes de ajuste que dependerão de qual parâmetro é empregado no modelo (A , b ou h_{dc}). As referidas constantes são vistas na Tabela 3:

$$A, b, h_{dc} = C[D(0)]^{\alpha_1} (k)^{\alpha_2} (n)^{\alpha_3} (E_1)^{\alpha_4} \quad (3)$$

Tabela 3: Constantes C , α_1 , α_2 , α_3 e α_4 para as situações simuladas:

E_2 (MPa)	Parâmetro	C	α_1	α_2	α_3	α_4	R^2
50	A*	2337.11	-0.621	2.053	15.463	0.597	0.9899
200	A*	100.38	0.107	-0.066	-1.134	0.562	0.9905
400	A*	7327993.74	-2.126	-4.962	-16.192	0.54	0.8463
50	b*	-1.53	-0.142	0.312	2.355	0.085	0.9899
200	b*	-1.28	-0.061	-0.023	-0.141	0.057	0.9384
400	b*	23.88	-0.6	-1.164	-3.531	0.022	0.8516
50	h_{dc} (cm)	8.19	-0.141	0.547	4.097	-0.166	0.9993
200	h_{dc} (cm)	25.13	0.089	-0.02	-0.406	-0.366	0.9922
400	h_{dc} (cm)	2871.68	-0.582	-1.61	-5.398	-0.488	0.9974
Qualquer	A*	21.47	0.464	-0.307	-4.461	0.566	0.9678
	b*	0.85	0.037	-0.049	-0.833	0.055	0.9122
	h_{dc} (cm)	201.9	-0.273	-0.837	-3.379	-0.34	0.9566

*valores obtidos para TTBR em kPa e h_1 em cm.

Pelos valores vistos na Tabela 3, é possível notar que o modelo proposto pela equação 3 se adequou à situação onde existe uma estrutura flexível abaixo do revestimento, onde foram observados os maiores R^2 . Para módulos baixos de base, notou-se que a forma da bacia de deflexões da estrutura abaixo do revestimento, representada pelos coeficientes k e n são as variáveis de maior influência, pois os valores relativos de α foram notavelmente maiores com relação às outras variáveis. A deflexão máxima da estrutura abaixo apresentou influência mais forte para bases rígida, porém o modelo proposto não teve ajuste razoável. A variável que melhor se ajustou ao modelo da equação 3 foi a espessura de deformação controlada, onde também se observa que as variáveis que mais têm influência no caso de base flexível são k e n , relacionados com a forma da bacia de deflexões da estrutura abaixo do revestimento, e para base rígida é notada uma maior influência das deflexão máxima da estrutura abaixo do revestimento.

Em geral, notou-se que existe uma grande influência da forma da bacia na TTBR para bases flexíveis, ratificada pelos maiores valores de R^2 para as variáveis estudadas. Quanto maiores k e n , maiores são A e b (em módulo), provocando tensões maiores e mais sensíveis à variação de espessura; além de maiores valores de h_{dc} , o que é deletério, pois transfere a responsabilidade estrutural do pavimento à base. Para bases rígidas, a deflexão máxima da estrutura abaixo do revestimento tem mais influência, o que validaria métodos de previsão de vida de fadiga que consideram apenas deflexões máximas. Uma vez que o sub-leito é a camada mais relacionada a magnitude das deflexões em uma bacia, os resultados aqui obtidos dão o indicio que métodos que levam em conta deflexões máximas devem ser aplicados apenas em condições de base rígida, onde a TTBR tem forte influência do desempenho do sub-leito.

CONCLUSÕES E DISCUSSÕES FINAIS

A partir dos resultados da presente pesquisa, foi concluído que:

- A tensão de tração na base do revestimento não decai simplesmente em função da espessura do revestimento. Existe uma espessura relacionada a um pico característico de tensões, bem como uma espessura que troca o sinal da mesma. Quanto maior o módulo de resiliência do revestimento, menores são as espessuras em questão;
- O modelo mais adequado para expressão da tensão de tração na base do revestimento foi um modelo potencial-logarítmico, conforme mostrado na equação 1;
- A redução das variáveis para modelagem das constantes vistas na equação 1 através da bacia de deflexões da estrutura abaixo do revestimento se mostrou adequado para bases flexíveis, onde as constantes k e n da equação 2 foram as constantes mais influentes entre todas. Para bases rígidas, notou-se maior influência de deflexões máximas, porém os modelos não tiveram ajustes tão bons;
- O fato de apenas estruturas de bases rígidas possuírem dependência mais notável com relação às deflexões máximas mostra indícios de que metodologias de previsão de vida de fadiga baseadas em deflexões seriam mais adequadas para estruturas cujo comportamento é mais dependente do subleito, camada que apresenta maior influência nos valores da bacia de deflexões, não na forma.

Enfim, o presente estudo mostra que a estimativa da TTBR pode ser obtida em função de informações mais acessíveis de se obter em campo, caso da bacia de deflexões. O comportamento dos pavimentos flexíveis, complexo por ser um sistema de múltiplas camadas elásticas, não é trivial. Uma vez apresentadas alternativas para o entendimento do seu comportamento, mais facilmente os projetistas poderão interpretar problemas de mecânica dos pavimentos. Entretanto, modelos mais elaborados devem ser aplicados a uma base maior de dados para que se possa estudar com mais profundidade as tensões dentro de uma estrutura de pavimento, mas estudos como o presente são importantes para direcionar futuras pesquisas, focando a análise nas variáveis mais relevantes aos fenômenos mecânicos.

REFERÊNCIAS

ALBERNAZ, C.A.V. (1997) Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

BOUSSINESQ, J. (1885) Applications des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques. In Gauthier-Villars, Paris.

MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. (2005) Mecânica dos Pavimentos, 2ª Edição.

THEISEN, K.M. (2011). Estudo de parâmetros constitutivos extraídos de dados experimentais no comportamento de misturas asfálticas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (2005) *EVERSERIES*© *USER'S GUIDE. Pavement Analysis Computer Software and Case Studies*. Environmental and Engineering Programs Materials Laboratory - Pavements Division, Washington, DC.