

150-03-2013
ESTUDOS PARAMÉTRICOS DE DEFLEXÕES, TENSÕES E
DEFORMAÇÕES PARA ESTRUTURAS DE PAVIMENTO
RESTAURADAS COM BASE CONSTITUÍDA DE MISTURA ASFÁLTICA
DE MÓDULO ELEVADO (EME)
ESTUDIOS PARAMÉTRICOS DE DEFLEXIONES, ESFUERZO Y
DEFORMACIÓN PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO
INCORPORANDO RESTAURADO DE ASFALTO EN BASE MÓDULO DE
MEZCLA DE ALTA (EME)

Assis Rodrigues Abbud Villela¹
assis.villela@uol.com.br

Liedi Legi Bariani Bernucci¹
liedi@usp.br

Carlos Yukio Suzuki^{1, 2}
suzuki@planservi.com.br

José Alberto Quintanilha¹
jose.quintanilha@poli.usp.br

¹ Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes
São Paulo, SP, Brasil

² Planservi Engenharia Ltda
São Paulo, SP, Brasil

Resumen

En la década de 1980, fueron ejecutadas en la Francia las primeras estructuras con mezclas asfálticas de alto módulo (EME - Enrobé à Module Éleve) para la restauración de las vías urbanas y las secciones de carreteras con tráfico intenso de grande intensidad. Com estos experimentos se pretende reducir la capacidad de deformación y los espesores de las capas del pavimento, el aumento de la rigidez y mejorar el comportamiento mecánico como la deformación permanente y resistencia a la fatiga en comparación con otros materiales convencionales. Con el fin de caracterizar el comportamiento estructural del pavimento, mediante estudios deflectométricos, se puede encontrar en la literatura diversos parámetros que caracterizan su forma, como los adoptados en este estudio: rayo de curvatura "R" (DNER, 1979); el parámetro área "S" (AASHTO, 1993); producto entre el rayo y la deflexión máxima " $R \times D_0$ "; y el Índice de Curvatura de la Superficie" SCI "(WSDOT, 1995; KIM *et al*, 2000). A través de los modelos paramétricos, la presente investigación tiene como objetivo definir modelos para calcular las fuerzas internas en la estructura de pavimento hecho de mezcla de asfalto de alto módulo a través de los parámetros que definen la forma de las deflexiones realizadas con el Falling Weight Deflectometer (FWD). Después de definir los modelos paramétricos, fue posible compararlos con los valores de las fuerzas internas retroanalizadas en la sección experimental hecho con la

tecnología de EME. Pou fuerza de la comparación de estos modelos, se pudo establecer fuertes coeficientes de determinación (R^2) que van 0,7132 a 0,9012.

Resumo

A partir dos anos 1980, iniciou-se na França o uso de misturas asfálticas de módulo elevado (EME - Enrobé à Module Élevé) em intervenções de pavimentos para a restauração de vias urbanas e de trechos de rodovias sujeitas a tráfego pesado e intenso. Estas experiências tiveram como principais finalidades reduzir a deformabilidade e as espessuras das camadas do pavimento, elevando sua rigidez e melhorando seu comportamento mecânico quanto à deformação permanente e à vida de fadiga, em comparação com outros materiais convencionais. A fim de caracterizar o comportamento estrutural do pavimento a partir de levantamentos defletoométricos, é possível na literatura internacional encontrar diversos parâmetros que caracterizem o formato da bacia defletoométrica, tais como os adotados nesta pesquisa: Raio de Curvatura “R” (DNER, 1979); Parâmetro Área “S” (AASHTO, 1993); produto entre o Raio e a Deflexão Máxima “R x D0”; e, Índice de Curvatura da Superfície “SCF” (WSDOT, 1995; KIM *et al*, 2000). Com base em modelos paramétricos, esta pesquisa tem por objetivo definir modelos que permitam calcular os esforços solicitantes na estrutura de pavimento restaurada com camada de base constituída de mistura asfáltica de módulo elevado a partir de parâmetros que caracterizem o formato de bacias defletoométricas executadas com o Falling Weight Deflectometer (FWD). Após a definição dos modelos paramétricos, foi possível compará-los com os valores dos esforços solicitantes retroanalisados por meio de levantamentos defletoométricos realizados em trecho experimental executado com a tecnologia de EME. Desta comparação percebeu-se que estes modelos apresentaram fortes coeficientes de determinação (R^2) que variaram de 0,7132 a 0,9012.

INTRODUÇÃO

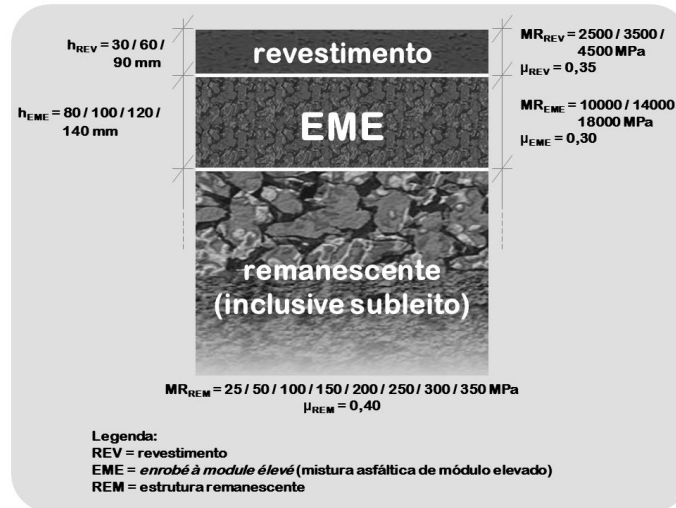
O uso de asfaltos duros em concretos asfálticos é muito difundido na França. Esses concretos asfálticos recebem o nome de misturas asfálticas de módulo elevado (*Enrobé à Module Élevé* – EME) por apresentarem elevada rigidez e também elevada resistência à deformação permanente. Possuem curvas granulométricas contínuas próximas à de máxima densidade, maximizando a resistência ao cisalhamento e minimizando os vazios. O baixo volume de vazios (na ordem de 3 a 6%) e a alta dosagem de ligante (em torno de 6%) proporcionam à camada de EME uma superfície muito lisa, não sendo apropriada sua utilização como camada de rolamento em decorrência de problemas relativos à baixa aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Nessas condições, sobre a camada de EME são empregados em geral revestimentos delgados, por exemplo, *Béton Bitumineux Très Mince* – BBTM (BERNUCCI *et al*, 2007) ou ainda *gap graded*.

De modo geral, para a elaboração do dimensionamento de uma estrutura de pavimento asfáltico deve-se compreender seu comportamento mecânico a partir da ação das cargas do tráfego e dos efeitos do clima com variações de temperatura e de umidade ao longo do tempo. Os estudos paramétricos são ferramentas que possibilitam inferir rapidamente a resposta mecânica da estrutura de pavimento em análise e também prever a influência das variáveis intervenientes nos modelos e seus graus de responsabilidades ante as demais (VILLELA, 2012).

ESTUDO PARAMÉTRICO

A análise e verificação dos comportamentos estrutural e deflectométrico do pavimento partiu do estudo paramétrico conjugado de um fatorial envolvendo simulações de estruturas, assentes a um substrato remanescente (que, portanto, sofreu ações do tráfego ao longo de sua vida de serviço), compostas de camada de base em mistura asfáltica de módulo elevado (EME). O revestimento do pavimento é constituído por uma camada de rolamento de mistura asfáltica, geralmente delgada, com atribuição estritamente funcional. A Figura 1 representa esquematicamente a estrutura tipo proposta com os valores estabelecidos para as características geométrica e mecânica que compuseram o plano fatorial do estudo.

Figura 1. Pavimento tipo com camadas de revestimento e EME como restauração (VILLELA, 2012)



Para a identificação do comportamento estrutural do pavimento frente às diversas simulações de carregamento, foi utilizado o programa computacional de camadas elásticas ELSYM-5 com cargas nas intensidades de 41kN e 65kN para o equipamento “*Falling Weight Deflectometer*” (FWD). Estas simulações encontram-se expressas resumidamente na Tabela 1.

No presente trabalho, procurou-se estabelecer como variáveis as respostas apenas dos valores máximos dos Indicadores Estruturais a seguir relacionados, nos respectivos pontos críticos de interesse: [i] Deflexão máxima (D_0) na superfície do pavimento; [ii] Deformação específica máxima de tração (ϵ_t) na fibra inferior da camada de EME para avaliação da fadiga; [iii] Tensão específica máxima de tração (σ_t) na fibra inferior da camada de EME; e, [iv] Deformação vertical máxima de compressão (ϵ_v) no topo da camada remanescente.

Considerando que o valor da deflexão máxima D_0 , quando analisado isoladamente, pode não ser suficiente para a avaliação estrutural do pavimento, procurou-se utilizar também outros métodos complementares baseados nas características da linha de deformação elástica da estrutura, quando submetida à ação de um carregamento. Assim sendo, consideraram-se além da magnitude das deflexões, os seguintes parâmetros de análise como variáveis dependentes no estudo: [i] Parâmetro Área “S” (AASHTO, 1993); [ii] Raio de Curvatura “R” (DNER, 1994); [iii] produto entre o Raio e a Deflexão Máxima “ $R \times D_0$ ” e [iv] Índice de Curvatura da Superfície “SCI” (KIM *et al.*, 2000).

Para o cálculo do Raio de Curvatura “R”, no Brasil, é adotada a forma parabólica para representar a curvatura da bacia. Tal processo é preconizado pela norma DNER-ME 24/94 (DNER, 1994). A expressão matemática para o cálculo de “R” é apresentada a seguir:

$$R = \frac{x^2}{20(D_0 - D_x)} \quad (1)$$

Na equação 1,

R é o Raio de Curvatura, (m);

x é a distância radial do ponto de aplicação da carga, (mm);

D₀ é a deflexão no ponto de aplicação da carga, (10⁻²mm);

D_x é a deflexão à distância radial correspondente a x (mm) do ponto de aplicação da carga. Adotada uma distância radial a 250mm do ponto de aplicação da carga, (10⁻²mm).

O Parâmetro Área “S” da bacia de deformação foi calculado a partir da expressão apresentada a seguir, segundo as recomendações do Guia da AASHTO (1993).

$$S = 15 \left[1 + 2 \left(\frac{D_{300}}{D_0} \right) + 2 \left(\frac{D_{600}}{D_0} \right) + \left(\frac{D_{900}}{D_0} \right) \right] \quad (2)$$

Na equação 2,

S é o Parâmetro Área, (cm);

D₀, D₃₀₀, D₆₀₀ e D₉₀₀ são as deflexões às distâncias radial correspondente a 0, 300, 600 e 900mm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga, (10⁻²mm).

O Índice de Curvatura da Superfície “SCI” (KIM *et al*, 2000) é representado pela diferença entre os valores de deflexão máxima (D₀) e os valores de deflexão a 300 mm do ponto de aplicação da carga (D₃₀₀). O SCI, portanto, é representa pela equação a seguir:

$$SCI = D_0 - D_{300} \quad (3)$$

Na equação 3,

SCI é o Índice de Curvatura da Superfície, (10⁻² mm);

D₀, D₃₀₀ são as deflexões às distâncias radial correspondente a 0 e 300 mm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga, (10⁻² mm).

Os resultados foram processados sendo obtidas equações de correlação entre os Indicadores Estruturais e os demais Indicadores de Curvatura da bacia de deformação. As Tabelas 2 e 3 apresentam resumidamente os coeficientes dos modelos de regressão e parâmetros estatísticos de análise para os Indicadores Estruturais e para os Indicadores de Curvatura, respectivamente.

As equações empregadas foram funções potenciais conforme o modelo genérico apresentado a seguir, sendo suas respectivas variáveis definidas na Tabela 1.

$$VariávelDependente = k \times (h_{REV}^a \times MR_{REV}^b) \times (h_{EME}^c \times MR_{EME}^d) \times MR_{REM}^e \times Q^f \quad (4)$$

É possível observar, na Tabela 2, que todos os coeficientes correspondentes às variáveis independentes estruturais (espessuras e módulos de resiliência das camadas) sempre apresentam valores negativos. Portanto, como eram esperadas, tais variáveis independentes são inversamente proporcionais aos Indicadores Estruturais estudados (D_0 , ϵ_{tEME} , σ_{tEME} e ϵ_{vREM}).

Tabela 1 - Parâmetros considerados para o plano fatorial de modelagem (VILLELA, 2012)

Simulação de Estrutura												
Estrutura	Cam.	Var. Ind.	Unid	Valor								Quant
Nova	Revestimento	h_{REV}	mm	30		60		90		3		
		MR_{REV}	MPa	2500		3500		4500		3		
		μ_{REV}		0,35								1
	Base (EME)	h_{EME}	mm	80		100		120		140		4
		MR_{EME}	MPa	10000		14000		18000		3		
		μ_{EME}		0,30								1
Remanescente	Existente	h_{REM}	mm	0								1
		MR_{REM}	MPa	25	50	100	150	200	250	300	350	8
		μ_{REM}		0,40								1
Sub-total de simulações											864	
Simulação de Carregamento												
VBK (ESRD)	Simulação I	$Q_1/4$	N	20500								2
		p_1	MPa	0,56								
	Simulação II	$Q_2/4$	N	32500								
		p_2	MPa	0,66								
FWD	Simulação III	$Q_1/2$	N	41000								2
		r	mm	150								
	Simulação IV	$Q_2/2$	N	65000								
		r	mm	150								
Total de simulações											3456	

Legenda:

- REV = revestimento asfáltico
- EME = *Enrobé à Module Élevé* (Mistura Asfáltica de Módulo Elevado)
- REM = estrutura remanescente
- cam = Camada
- var ind = variável independente
- unid = unidade (SI)
- quant = Quantidade
- h_i = espessura correspondente a cada camada: h_{REV} ; h_{EME}
- MR_i = módulo de resiliência correspondente a cada camada: MR_{REV} ; MR_{EME} ; MR_{REM}
- μ_i = coeficiente de Poisson correspondente a cada camada: μ_{REV} ; μ_{EME} ; μ_{REM}
- VBK = viga Benkelman
- ESRD = eixo simples de roda dupla
- FWD = *Falling Weight Deflectometer*
- Q_i = carga correspondente ao eixo-padrão brasileiro (Q_1) e ao eixo-padrão francês (Q_2)
- p_i = pressão de inflação nos pneumáticos referente à normatização brasileira (p_1) e referente à normatização francesa (p_2)
- r = raio da placa do FWD

ESTUDO ESTATÍSTICO

Para obtenção de uma maior confiabilidade nos estudos realizados, os resultados das variáveis foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), cujo objetivo é identificar se os valores das variáveis dependentes diferem significativamente do ponto de vista estatístico entre si.

Deste estudo, a análise de distribuição de Fisher (F) demonstrou para todos os estudos apresentados nas Tabelas 2 e 3 que o efeito dos valores considerados foi significativo. A análise de variância (ANOVA) dos modelos resultou em coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,888; indicando que os modelos ajustaram-se de 88,8% a 99,9% às variáveis dependentes, como pode ser observado resumidamente na Tabela 4.

Tabela 2 - Coeficientes e parâmetros de análises para Indicadores Estruturais do FWD

Parâmetro			D_0		ε_{iEME}		σ_{iEME}		ε_{vREM}	
			Coef.	valor-P	Coef.	valor-P	Coef.	valor-P	Coef.	valor-P
K			0,005	-	1,5E-6	-	3,5E-6	-	1,7E-5	-
Inters			-2,316	0,000	-5,832	0,000	-5,457	0,000	-4,770	0,000
revesti- mento	h_{REV}	a	-0,187	0,000	-0,332	0,000	-0,329	0,000	-0,355	0,000
	MR_{REV}	b	-0,125	0,000	-0,140	0,000	-0,138	0,000	-0,174	0,000
base	h_{EME}	c	-0,629	0,000	-0,945	0,000	-0,932	0,000	-1,113	0,000
	MR_{EME}	d	-0,186	0,000	-0,589	0,000	0,428	0,000	-0,451	0,000
remanes- cente	MR_{REM}	e	-0,530	0,000	-0,107	0,000	-0,132	0,000	-0,225	0,000
carga	Q	f	1,668	0,000	1,614	0,000	1,553	0,000	1,542	0,000
R^2			0,922		0,895		0,905		0,920	
Fischer (F)			3392		2434		2733		3282	

Tabela 3 - Coeficientes e parâmetros de análises para Indicadores de Curvatura do FWD

Parâmetro			S		R		$R \times D_0$		$SCI = D_0 - D_{300}$	
			Coef.	valor-P	Coef.	valor-P	Coef.	valor-P	Coef.	valor-P
K			4,745	-	5,000	-	24,165	-	0,793	-
Inters			0,676	0,000	3,699	0,000	1,383	0,000	-0,100	0,439
revesti- mento	h_{REV}	a	0,069	0,000	0,288	0,000	0,101	0,000	-0,327	0,000
	MR_{REV}	b	0,056	0,000	0,326	0,000	0,201	0,000	-0,306	0,000
base	h_{EME}	c	0,254	0,000	1,247	0,000	0,618	0,000	-1,290	0,000
	MR_{EME}	d	0,085	0,000	0,445	0,000	0,258	0,000	-0,444	0,000
remanes- cente	MR_{REM}	e	-0,129	0,000	0,050	0,000	-0,480	0,000	-0,072	0,000
carga	Q	f	0,041	0,000	-1,517	0,000	0,152	0,000	1,542	0,000
R^2			0,975		0,888		0,955		0,897	
Fischer (F)			11229		2265		6106		2489	

Tabela 4 - Valores dos coeficientes de determinação (R^2) para cada modelo

Parâmetro Simulação	Variável Dependente								Valor	
	D_0	ϵ_{iREV}	ϵ_{iEME}	σ_{iEME}	S	R	$R \times D_0$	SCI	Máximo	Mínimo
VBK	0,999	0,990	0,988	0,992	0,980	0,951	0,967	0,964	0,999	0,951
FWD	0,922	0,895	0,905	0,920	0,975	0,888	0,955	0,897	0,975	0,888

A influência individual de cada variável independente nas variáveis dependentes foi analisada por meio do valor-p.

Os resultados da Tabela 2 indicam que as variáveis independentes (h_{REV} ; MR_{REV} ; h_{EME} ; MR_{EME} ; MR_{REM} e Q) são significativas ao nível de confiança de 99%, porque apresentam valor $p < 0,01$.

A mesma situação se repete para os casos dos Indicadores de Curvatura (Tabela 3), exceto para a simulação com VBK, nos parâmetros área “S” e produto “ $R \times D_0$ ”, onde a variável independente “carga” (Q) apresentou valor $p >> 0,01$. Tal situação denota que a variável independente Q , nestes modelos, não é estatisticamente significativa ao nível de confiança de 99%. Portanto, os modelos de comportamento para estes parâmetros foram novamente estudados e suprimindo-se a variável Q . Estes modelos podem ser encontrados em VILLELA (2012).

A forma mais prática e rápida de obter o resultado estrutural do pavimento se dá por meio de ensaios defletoométricos, ou seja, ensaios não-destrutivos. Por esta razão, todos os estudos paramétricos em função do MR_{REM} , anteriormente apresentados, foram novamente estudados com a adoção da deflexão máxima no topo da camada remanescente (D_{0REM}) de uma estrutura que irá receber um reforço estrutural com camada de base de EME e uma camada asfáltica de rolamento delgada.

A substituição da variável MR_{REM} pela variável D_{0REM} foi também desenvolvida por intermédio do programa computacional ELSYM-5. A Tabela 5 apresenta os valores de D_{0REM} correspondentes aos MR_{REM} adotados no novo plano fatorial, para cada intensidade de carregamento de FWD.

Essas novas equações são também funções potenciais conforme o modelo genérico apresentado a seguir, sendo suas respectivas variáveis definidas na Tabela 1:

$$\text{Variável Dependente} = k \times (h_{REV}^a \times MR_{REV}^b) \times (h_{EME}^c \times MR_{EME}^d) \times D_{0REM}^e \times Q^f \quad (5)$$

Nas Tabelas 6 e 7, são apresentados os modelos em função da D_{0REM} para FWD.

Como as duas variáveis D_{0REM} e MR_{REM} são intrinsecamente relacionadas, os coeficientes de determinação dos modelos em função de D_{0REM} mantiveram-se exatamente iguais aos estudados nos modelos paramétricos em função de MR_{REM} , como pode ser observado nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 5 - Valores de D_{0REM} correspondentes a cada MR_{REM}

MR_{REM} (MPa)	D_{0REM} , para FWD (10^{-2} mm)	
	Simulação III	Simulação IV
	$Q_1 = 82kN$	$Q_2 = 130kN$
250	585	927
500	292	463
1000	146	232
1500	97,4	154

2000	73,1	116
2500	58,5	92,7
3000	48,7	77,2
3500	41,8	66,2

Com intuito de tentar obter modelos paramétricos consistentes que determinassem os Esforços Solicitantes na estrutura em estudo, a partir dos quatro Indicadores de Curvatura e da deflexão máxima D_0 , foram desenvolvidos novos estudos. Essa rotina de estudo dos Esforços Solicitantes resultou em um total de 372 modelos. Todos estes modelos resultantes estão apresentados em VILLELA (2012).

Tabela 6 - Coeficientes e parâmetros de análises para Indicadores Estruturais da FWD										
Parâmetro			D_0		ε_{iEME}		σ_{iEME}		ε_{vREM}	
Coeficiente			Coef	valor-P	Coef	valor-P	Coef	valor-P	Coef	valor-P
k			8,3E-03	-	1,6E-06	-	4,0E-06	-	2,1E-05	-
Inters			-2,079	0,000	-5,784	0,000	-5,398	0,000	-4,669	0,000
revesti- mento	h _{REV}	a	-0,187	0,000	-0,332	0,000	-0,329	0,000	-0,355	0,000
	MR _{REV}	b	-0,125	0,000	-0,140	0,000	-0,138	0,000	-0,174	0,000
base	h _{EME}	c	-0,629	0,000	-0,945	0,000	-0,932	0,000	-1,113	0,000
	MR _{EME}	d	-0,186	0,000	-0,589	0,000	0,428	0,000	-0,451	0,000
remanes- cente	D _{0REM}	e	0,531	0,000	0,108	0,000	0,132	0,000	0,225	0,000
carga	Q	f	1,138	0,000	1,507	0,000	1,421	0,000	1,317	0,000
R ²			0,922		0,895		0,905		0,920	
Fischer (F)			3398		2435		2734		3285	

Tabela 7 - Coeficientes e parâmetros de análises para Indicadores de Curvatura do FWD										
Parâmetro			S		R		R x D ₀		SCI = D ₀ – D ₃₀₀	
			Coef	valor-P	Coef	valor-P	Coef	valor-P	Coef	valor-P
k			5,4E+00	-	4,7E+03	-	39,607	-	4,7E-01	-
Inters			0,734	0,000	3,677	0,000	1,598	0,000	-0,068	0,601
revesti- mento	h _{REV}	a	0,069	0,000	0,288	0,000	0,101	0,000	-0,327	0,000
	MR _{REV}	b	0,056	0,000	0,326	0,000	0,201	0,000	-0,306	0,000
base	h _{EME}	c	0,254	0,000	1,247	0,000	0,618	0,000	-1,290	0,000
	MR _{EME}	d	0,085	0,000	0,445	0,000	0,258	0,000	-0,444	0,000
remanes- cente	D _{0REM}	e	0,129	0,000	-0,050	0,000	0,480	0,000	0,072	0,000
carga	Q	f	-0,088	0,000	-1,466	0,000	-0,328	0,000	1,469	0,000
R ²			0,975		0,888		0,955		0,897	
Fischer (F)			11221		2265		6116		2489	

Tabela 8 - Comparativo dos coeficientes de determinação entre os Indicadores Estruturais							
Modelo	Simulação	Variável Dependente				Valor	
		D_0	ε_{iEME}	σ_{iEME}	ε_{vREM}	Máximo	Mínimo

MR _{REM} (equação 4)	FWD	0,922	0,895	0,905	0,920	0,922	0,895
D _{0REM} (equação 5)		0,922	0,895	0,905	0,920	0,922	0,895

Tabela 9 - Comparativo dos coeficientes de determinação entre os Indicadores de Curvatura

Modelo	Simulação	Variável Dependente				Valor	
		S	R	R x D ₀	SCI	Máximo	Mínimo
MR _{REM} (equação 4)	FWD	0,975	0,888	0,955	0,897	0,975	0,888
D _{0REM} (equação 5)		0,975	0,888	0,955	0,897	0,975	0,888

Para hierarquizar os modelos teóricos que melhor responderam aos Esforços Solicitantes de Campo, primeiramente, cada um dos Indicadores de Curvatura (R, S, R x D₀ e SCI) e D₀ foram submetidos a uma análise estatística de resíduos com estes parâmetros deduzidos por retroanálise. A análise de resíduos foi executada para verificar a suposição de que os erros desempenhem aproximadamente um padrão segundo uma distribuição normal, de maneira aleatória, com valor médio nulo e variância constante caracterizando a hipótese de homocedasticidade.

Dessa hierarquização, pode-se deduzir os modelos que melhor correlacionam com os esforços solicitantes. Estes modelos estão apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Modelos de Correlação entre os Esforços Solicitantes e D₀ e os Indicadores de Curvatura, a partir dos estudos paramétricos em função de MR_{REM}

ES = f(D ₀ ; SCI)	Equação de correlação	R ²	Equação (n°)
Deformação de tração na fibra inferior da camada de EME	$\epsilon_{tEME} = 1,46E-05 \times D_0^{0,1135} \times SCI^{0,853}$	0,9722	(6)
Tensão de tração na fibra inferior da camada de EME	$\sigma_{tEME} = 2,93E-01 \times D_0^{0,226} \times SCI^{0,623}$	0,8245	(7)
Deformação vertical no topo da camada remanescente	$\epsilon_{vREM} = 3,30E-05 \times D_0^{0,313} \times SCI^{0,706}$	0,9925	(8)

Tabela 11 - Modelos de Correlação entre os Esforços Solicitantes e D₀ e os Indicadores de Curvatura, a partir dos estudos paramétricos em função de D_{0REM}

ES = f(D ₀ ; SCI)	Equação de correlação	R ²	Equação (n°)
Deformação de tração na fibra inferior da camada de EME	$\epsilon_{tEME} = 2,42E-05 \times D_0^{0,1135} \times SCI^{0,853}$	0,9722	(9)
Tensão de tração na fibra inferior da camada de EME	$\sigma_{tEME} = 4,25E-01 \times D_0^{0,226} \times SCI^{0,623}$	0,8245	(10)
Deformação vertical no topo da camada remanescente	$\epsilon_{vREM} = 5,02E-05 \times D_0^{0,313} \times SCI^{0,706}$	0,9925	(11)

A partir dos modelos selecionados, percebe-se que a obtenção dos esforços solicitantes de uma estrutura constituída de camada de base em EME pode ser diretamente efetuada por meio dos modelos apresentados em função de parâmetros exclusivamente defletoométricos obtidos com equipamento tipo FWD.

Segundo LOPES *et al* (2010), não utilizar características geométricas da estrutura pode ser necessário, uma vez que em campo sua determinação pode ser de difícil obtenção. De acordo com os autores, modelos como estes podem determinar rapidamente os esforços solicitantes

críticos na estrutura do pavimento somente por meio do levantamento deflectométrico e consequentemente estimar valores de número “N” por meio de modelos de fadiga correlacionando estas deformações e o número de solicitações do eixo padrão.

CONCLUSÕES

Por meio da análise de variância (ANOVA), utilizada para avaliar quais variáveis independentes influenciam na variável dependente, conclui-se que todos os modelos estudados apresentaram fortes correlações apresentando coeficientes de determinação que se ajustaram 88,8% a 99,9% às variáveis dependentes.

A partir dos estudos paramétricos, em função das características geométricas e mecânicas da estrutura de EME, foram desenvolvidos novos modelos a fim de determinar seus Esforços Solicitantes (ES) apenas com levantamentos deflectométricos, por meio da Deflexão Máxima (D_0) e Indicadores de Curvatura. Tais modelos demonstraram-se como uma ferramenta útil para avaliação dos ES, devido aos fortes coeficientes de determinação e da sua rápida aplicação, uma vez que em campo a investigação das características geométricas da estrutura pode ser de difícil obtenção.

A partir dos modelos apresentados neste trabalho é possível, conhecidas as condições estruturais do pavimento existente e do tráfego futuro, definir rapidamente as características geométricas e mecânicas das misturas asfálticas de módulo elevado (EME) a serem empregadas nas camadas sobrejacentes para restauração.

Cabe salientar que os modelos obtidos da análise dos dados paramétricos são teóricos, ou seja, revelam o comportamento estrutural considerando o procedimento de cálculo adotado pelo programa computacional ELSYM-5 que admite o pavimento como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas, semi-infinito sendo que seus materiais assumem comportamentos isotrópicos e homogêneos, com comportamento elástico-linear, obedecendo à lei de Hooke generalizada, de acordo com o princípio da Teoria da Elasticidade, sendo estes modelos validados em trechos experimentais, com estrutura constituída de camada de base com EME, submetidos a tráfego real conforme tese de doutorado desenvolvida por VILLELA (2012), no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Universidade de São Paulo (USP) – Brasil.

REFERÊNCIAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.
- BERNUCCI, L. B.; MOTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. (2007). *Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros*. Petrobras. Abeda. Rio de Janeiro, 501p.
- DNER – Departamento Nacional de Rodagem (1994). *Pavimento. Determinação das deflexões pela viga benkelman*: DNER-ME 024/94.
- KIM, Y.R.; LEE, Y. e RANJITHAN, S. R. (2000). Flexible pavement condition evaluation using deflection basin parameters and dynamic finite element analysis implemented by artificial neural networks. *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Thrid Volume*, ASTM STP 1375, S. D. Tayabji and E. O. Lukanen, Eds, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp 514 – 530.

- LOPES, F. M.; SANTOS, C. R. G.; FORTES, R. M.; FERRI, S. e SUZUKI, C. Y., 2010. Proposta de Metodologia para Avaliação de Pavimentos Asfálticos Utilizando Características da Bacia Deflectométrica. In: CONINFRA - Congresso de Infra-Estrutura de Transportes, São Paulo. 15 p.
- VILLELA, A. R. A. (2012). Estudo de camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego muito pesado. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 206p.