

ANÁLISE MECANÍSTICA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL RESTAURADO A PARTIR DO MR OBTIDO EM DIFERENTES SOFTWARES DE RETROANÁLISE COM DADOS DE VIGA BENKELMAN

Daniel Koscrevic Pandolfo
Bacharel em Engenharia Civil.
E-mail: <daniel_pandolfo@yahoo.com.br>.

Jose Antônio Santana Echeverria
Mestre em Engenharia Civil - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes,
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
E-mail: <jose.echeverria@unijui.edu.br>.

Luciano Pivoto Specht
Postdoc. em Engenharias - Universidade Federal de Santa Maria, UFSM/RS.
E-mail: <luspecht@ufsm.br>.

RESUMO

Atualmente é possível dimensionar uma estrutura rodoviária ou um reforço de pavimento através de métodos mecanísticos, podendo se utilizar os métodos empíricos como o do CBR (*Califórnia Bearing Ratio*) para um pré-dimensionamento. Neste enfoque a estrutura é tratada como qualquer outra em engenharia, como por exemplo, a de concreto armado, onde as tensões e deformações são analisadas e limitadas variando-se dimensões e características dos materiais. Para tratar do reforço de pavimentos, é necessário o prévio conhecimento de algumas características dos materiais existentes na estrutura, como sua rigidez através do módulo de resiliência, o qual pode ser obtido mediante processo de retroanálise das bacias de deflexão. Neste trabalho foi desenvolvido um estudo que buscou retroanalisar dez bacias de deflexão medidas com Viga Benkelman junto à Rodovia BR 472/RS a partir de dois diferentes softwares de retroanálise, e utilizar estes valores em uma análise mecanística propondo diferentes espessuras de reforço em CA (concreto asfáltico). Para cada conjunto de valores de módulo de resiliência obtido foram propostas 6 diferentes espessuras de reforço com MR de 6645 MPa, sendo elas: 4, 7, 10, 13, 16 e 19 cm. Estas estruturas foram analisadas com o software de cálculo de tensões, deformações e deslocamentos AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), a fim de obter a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento e de compressão no topo do subleito. Os valores de deformação foram utilizados nos modelos de desempenho à fadiga de Pinto (1991), Franco (2007) e *Federal Highway Administration* dos EUA (FHWA), e nos modelos de desempenho de afundamento da trilha de roda do Asphalt Institute dos EUA e *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* da França (LCPC), a fim de estimar o número de solicitações que a estrutura será capaz de suportar sem que ocorra trinca-mento por fadiga ou deformações maiores que 12,5mm, determinando assim a estimativa de vida útil para cada espessura e conjunto de módulos retroanalizados que foram comparados entre si obtendo a variação de resultados. Complementarmente realizou-se o cálculo da espessura necessária de reforço para a estimativa de vida útil média de fadiga a partir do método PRO 11/79.

Palavras-chave: Desempenho de pavimentos. Reforço de pavimentos. Análise mecanística. Módulo de Resiliência.

1 INTRODUÇÃO

Conforme Balbo (2007), a manutenção periódica de pavimentos é geralmente realizada através de reforço que é o nome dado à nova camada de rolamento aplicada sobre a superfície de um pavimento existente, quando este necessita de serviços de restauração ou reabilitação, sua designação popular é o recapeamento.

Segundo Motta (1991) e Franco (2007), os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos tradicionais têm uma forte dose de empirismo e muitos trabalhos científicos vêm sendo produzidos buscando reduzir ou até mesmo eliminar a parcela de empirismo, porém, apesar dos esforços, ainda não foi possível desenvolver no país um método de dimensionamento adequado, que permita padronizá-lo pelos órgãos regulamentadores nacionais, como o DNIT ou DERs, de modo a generalizar seu uso no Brasil.

A determinação das espessuras de reforço através de métodos mecanicistas depende da inserção de dados referentes aos materiais existentes no local da execução do reforço e uma dessas características é o módulo de resiliência, que pode ser obtido através de retroanálise das bacias de deflexão, cujo principal objetivo é sua determinação (MEDINA; MOTTA, 2005). A retroanálise pode ser realizada através de softwares ou métodos simplificados que se baseiam em expressões matemáticas e nomogramas.

O módulo de resiliência de cada camada é, portanto, fundamental para determinação da espessura necessária de reforço, porém, as análises iterativas são realizadas através de softwares que diminuem os erros dos cálculos manuais e aceleram o processo, mas não existe apenas um software baseado em um método de cálculo, existem sim, dezenas de programas computacionais baseados em diferentes metodologias, o que pode acarretar variação dos valores modulares de cada camada do pavimento, se comparadas entre si.

Utilizando, portanto um método mecanicista, que consiste em uma análise particular em termos de tensão e deformação nos diferentes pontos da estrutura, encontra-se o problema da variação dos valores modulares e quanto esta variação pode alterar em termos de dimensionamento.

2 METODOLOGIA

A seguir apresenta-se a metodologia que foi utilizada desde a coleta dos dados de campo com Viga Benkelman e prospecção através de poços de sondagem até as avaliações dos resultados que estimam a vida útil do pavimento restaurado com diferentes espessuras de CA e comparação destas espessuras caso fossem determinadas pelo método PRO 11/79.

2.1 LOCAL DO ENSAIO

O local da coleta de dados de campo foi a Rodovia BR 472/RS, km 145+940 a 146+040 e está representado na Figura 1. Neste local foram realizados dez levantamentos deflectométricos com Viga Benkelman, sendo cinco para cada um dos dois poços de sondagem abertos intermediários às medições.

Figura 1 – Locação das medições em campo



O levantamento foi realizado na Trilha de Roda Externa (TRE) da pista do lado esquerdo, iniciando-se na estaca 146+040 até a estaca 145+940.

2.2 DETERMINAÇÃO DAS BACIAS DE DEFLEXÃO

Com a utilização do equipamento Viga Benkelman (VB) se realizou o ensaio para determinação da linha de influência, ou seja, a bacia de deflexão do pavimento de acordo com a Norma DNIT 133/2010 – ME.

2.3 ABERTURA DOS POÇOS DE SONDAGEM

A fim de facilitar e acelerar os serviços, os locais dos poços de inspeção foram abertos primeiramente com a ajuda de fresadora que removeu a camada de revestimento em CA facilitando o trabalho manual que abriu o restante do pavimento até o subleito. Estes poços de inspeção serviram para a determinação do tipo e espessura dos materiais de cada camada, como pode ser visto na Figura 2.

Complementar à determinação das espessuras e tipos de materiais se realizou coleta dos materiais de cada camada que foram então ensaiados em laboratório para determinação da umidade presente em cada camada da estrutura.

2.4 RETROANÁLISE

O processo de retroanálise depende da inserção de dados referentes aos materiais constituintes de cada camada do pavimento bem como das deflexões medidas em campo. Para tanto uma importante questão precisou ser observada, pois os softwares utilizados neste estudo possuem entrada de dados deflectométricos obtidos por equipamento FWD ao invés da VB que foi utilizada.

Figura 2 – Abertura poços de sondagem e medida das espessuras



A fim de utilizar os softwares de maneira adequada, foi realizada a conversão de resultados obtidos por VB, baseando-se no estudo desenvolvido por Theisen *et al.* (2009), o qual descreve o método para emprego de softwares de retroanálise de bacias obtidas via FWD em pavimentos submetidos ao eixo padrão a partir do princípio da sobreposição de efeitos.

O método completo encontra-se descrito na bibliografia citada e resumidamente considera a aplicação de carga a partir de apenas uma das rodas do semi-eixo padrão, sendo assim, a carga aplicada, ao invés de 4100 kg, é 2050 kg, e as deflexões medidas em campo são divididas por 2. Além disso, as distâncias que anteriormente eram 0,00; 12,5; 25,0 etc. passam por tratamento a partir da equação (01).

$$X_i = \sqrt{(x_i)^2 + (0,5d_y)^2} \quad (01)$$

Com auxílio dos programas de retroanálise BackSispav (Franco, 2007) e Evercalc (Departamento de Transportes de Washington, EUA), foram determinados os módulos de resiliência das camadas do pavimento.

2.5 DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

Determinou-se através de análise estatística o valor adequado para representar a variável MR obtido pelo processo de retroanálise. Obteve-se assim para cada conjunto de MR calculado por cada software um valor médio para MR do revestimento, base e subleito, além do valor médio da espessura de cada camada.

Foram propostas seis espessuras de reforço para cada um dos conjuntos representativos, sendo: 4, 7, 10, 13, 16 e 19 cm. O MR utilizado na camada de reforço foi 6645 MPa, que é o valor obtido no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM para produção do CA que vinha sendo utilizado nas restaurações da BR 472/RS. O pavimento com os módulos determinados e com as espessuras de reforço em questão passou por análise mecânica através do programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC (Franco, 2007), para que fossem obtidos os valores de deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t), e deformação específica de compressão no topo do subleito (ϵ_c).

2.6 DETERMINAÇÃO DA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL

Entende-se que os modelos mais apropriados para utilização dentro do estudo que se desenvolve são os desenvolvidos por Pinto (1991) eq. (02) e Franco (2007), eq. (03), pois são resultados de estudos brasileiros, com materiais, clima e métodos de ensaio utilizados no Brasil. Estes modelos trazem como variável nas equações o módulo de resiliência, que é também o objeto de estudo deste trabalho. O modelo da *Federal Highway Administration* dos EUA (FHWA), eq. (04) também foi utilizado, este não necessita do MR, assim seus resultados puderam ser analisados complementarmente aos obtidos pelos modelos já citados.

$$Nf = fcl \cdot 9,07 \cdot 10^{-9} \left(\frac{1}{\varepsilon t} \right)^{2,65} \left(\frac{1}{MR} \right)^{-0,033} \quad (02)$$

$$Nf = fcl \cdot 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon t} \right)^{2,821} \cdot \left(\frac{1}{MR} \right)^{0,74} \quad (03)$$

$$Nf = 1,092 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon t} \right)^{3,512} \quad (04)$$

Conforme Pinto (1991) o modelo 02 deve ser calibrado por um fator campo-laboratório (*fcl*) que o autor sugere estar entre 10^2 e 10^4 para levar o pavimento a cerca de 20% de área trincada à temperatura de 54°C. Franco (2007) cita que diversos órgãos e institutos de pesquisa vêm utilizando o coeficiente *fcl* igual a 10^4 como fator campo-laboratório e sugere o mesmo para o modelo 03.

Os métodos que foram utilizados para prever o número de solicitações de um eixo padrão que cause 12,5mm de afundamento são o do *Asphalt Institute* dos EUA, eq. (05) e do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* da França (LCPC), eq. (06) que consideram apenas a deformação plástica no topo do subleito como causa do ATR.

$$Natr = 1,365 \cdot 10^{-9} (\varepsilon v)^{-4,477} \quad (05)$$

$$Natr = 2,227 \cdot 10^{-9} (\varepsilon v)^{-4,505} \quad (06)$$

2.7 ESPESSURA DE REFORÇO PELO MÉTODO PRO 11/79

Após determinação das estimativas de vida útil pelos diferentes modelos a partir dos parâmetros de rigidez calculados pelos softwares realizou-se tratamento estatístico dos valores de deflexão máxima (D_0) e determinação da deflexão característica para aplicação do método PRO 11/79, sendo:

$$Dc = D + \sigma \quad (07)$$

Onde:

Dc = Deflexão característica;

D = Média aritmética;

σ = Desvio Padrão.

Com o valor da deflexão característica obteve-se a deflexão de projeto:

$$Dp = Dc \cdot Fs \quad (08)$$

Onde:

Dp = Deflexão de projeto;

Dc = Deflexão característica;

Fs : Fator de segurança.

A partir daí determinou-se a deflexão admissível em função do número N, sendo que o valor utilizado foi a média da estimativa de vida útil para fadiga obtida pelos 3 diferentes modelos utilizados.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \cdot \log N \quad (09)$$

Onde:

= Deflexão admissível;

= Número de solicitações do eixo padrão durante a vida de projeto.

O dimensionamento do reforço em concreto betuminoso pelo método PRO 11/79 foi calculado pela equação 10, sendo então o seu resultado comparado com a espessura utilizada na análise mecânica.

$$H_{cb} = 40 \log \frac{D_p}{D_{adm}} \quad (10)$$

Onde:

H_{cb}= Espessura da camada de CBUQ

= Deflexão admissível;

= Deflexão de projeto.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir apresenta-se a análise e discussão dos resultados obtidos a partir coleta dos dados de campo com Viga Benkelman e prospecção através de poços de sondagem até as avaliações dos resultados que estimam a vida útil do pavimento restaurado com diferentes espessuras de CA e comparação destas espessuras caso fossem determinadas pelo método PRO 11/79.

3.1 MATERIAL, ESPESSURAS E UMIDADE

A partir da abertura dos poços de sondagem determinou-se o material presente em cada camada do pavimento bem como a espessura e umidade de cada camada, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Tipo de material e espessuras das camadas

Estaca		Revestimento	Base	Subleito
	Material	CA	BGS	SL
145+900	Espessura (cm)	11,5	30	∞
	Umidade	-	6,73%	-
	Material	CA	BGS	SL
146+000	Espessura (cm)	10,5	30	∞
	Umidade	-	7,78%	25,21%

Legenda: CA: Concreto asfáltico; BGS: Brita graduada simples; SL: Solo local

Cabe ressaltar que para cada poço de sondagem foram medidas 5 bacias de deflexão, sendo assim, as espessuras das camadas observadas na estaca 145+900 e 146+000, são as mesmas utilizadas para as bacias que foram medidas a sua volta e sobre a mesma.

3.2 MEDIDAS DE DEFLEXÕES

Conforme discutido anteriormente as medidas obtidas no ensaio com Viga Benkelman precisaram passar por tratamento para que fossem utilizados em softwares de retroanálise que utilizam valores deflectométricos obtidos via FWD, assim a Tabela 2 apresenta os valores corrigidos de carga, raio, deflexões e distâncias do centro do carregamento que foram utilizadas nos softwares de retroanálise. A temperatura medida em campo não passou por correção, sendo utilizada a temperatura real do pavimento e do ar.

Tabela 2 – Deflexões e distâncias corrigidas para utilização nos softwares

Estaca	Carga (kg)	Raio (cm)	Deflexões (0,01 mm)								
			D ₁₅	D _{19,5}	D _{29,2}	D _{42,7}	D _{61,8}	D _{91,2}	D _{120,9}	D _{150,7}	D _{180,6}
145+860	2050	9,72	28,33	27,36	23,45	19,54	14,66	10,75	7,82	5,86	4,89
145+880	2050	9,72	23,45	21,49	18,56	14,66	10,75	7,82	5,86	3,91	2,93
145+900	2050	9,72	29,31	28,33	25,40	21,49	17,59	12,70	9,77	7,82	5,86
145+920	2050	9,72	23,45	22,47	19,54	15,63	11,72	7,82	5,86	4,89	3,91
145+940	2050	9,72	25,40	24,43	20,52	16,61	12,70	7,82	5,86	4,89	3,91
145+960	2050	9,72	28,33	27,36	23,45	19,54	15,63	10,75	7,82	5,86	4,89
145+980	2050	9,72	23,45	21,49	18,56	13,68	10,75	6,84	4,89	3,91	2,93
146+000	2050	9,72	28,33	26,38	22,47	18,56	13,68	9,77	6,84	5,86	4,89
146+020	2050	9,72	27,36	25,40	22,47	18,56	13,68	8,79	6,84	5,86	4,89
146+040	2050	9,72	25,40	23,45	19,54	16,61	11,72	8,79	5,86	4,89	3,91
Média			26,3	24,8	21,4	17,5	13,3	9,2	6,7	5,4	4,3
Mediana			26,4	24,9	21,5	17,6	13,2	8,8	6,4	5,4	4,4
Desvio Padrão			2,3	2,5	2,4	2,5	2,2	1,8	1,4	1,2	0,9
CV			8,8%	10,2%	11,1%	14,0%	16,7%	19,6%	21,0%	21,4%	22,0%

3.3 MÓDULOS DE RESILIÊNCIA

Os valores de módulo de resiliência obtidos para cada um dos softwares estão representados nas tabelas a seguir e apresentam complementarmente aos resultados a análise estatística.

Tabela 3 – Módulos de Resiliência – BackSispav

Estaca	Revestimento		Base		Subleito	
	MR (MPa)	Esp. (cm)	MR (MPa)	Esp.(cm)	MR (MPa)	RMSE(%)
145+860	4556	11,5	155	30,0	60	3,59
145+880	4167	11,5	175	30,0	85	8,96
145+900	6111	11,5	145	30,0	53	3,36
145+920	5000	11,5	185	30,0	75	4,79
145+940	4167	11,5	153	30,0	75	4,71
145+960	5722	10,5	160	30,0	60	3,63
145+980	4556	10,5	175	30,0	90	6,59
146+000	4278	10,5	175	30,0	65	2,96
146+020	5722	10,5	148	30,0	68	4,01
146+040	5333	10,5	175	30,0	75	4,26
Média	4961	11,0	165	30,0	71	4,7

Estaca	Revestimento		Base		Subleito	
	MR (MPa)	Esp. (cm)	MR (MPa)	Esp.(cm)	MR (MPa)	RMSE(%)
Mediana	4778	-	168	-	72	-
Desvio Padrão	720,8	-	14,0	-	11,6	-
CV	14,5%	-	8,5%	-	16,5%	-

Legenda: RMSE: erro médio quadrático entre os valores calculados e medidos da bacia

Tabela 4 – Módulos de Resiliência – Evercalc

Estaca	Revestimento		Base		Subleito	
	MR (MPa)	Esp. (cm)	MR (MPa)	Esp. (cm)	MR (MPa)	RMSE(%)
145+860	4161	11,5	150	30,0	62	2,40
145+880	4379	11,5	150	30,0	90	7,48
145+900	5500	11,5	168	30,0	51	2,71
145+920	5113	11,5	156	30,0	79	2,02
145+940	5088	11,5	117	30,0	79	2,68
145+960	5252	10,5	160	30,0	61	3,32
145+980	4844	10,5	150	30,0	95	4,20
146+000	4137	10,5	175	30,0	64	16,09
146+020	5120	10,5	157	30,0	67	4,09
146+040	6370	10,5	144	30,0	77	3,06
Média	4996	11,0	153	30,0	73	4,80
Mediana	5100	-	153	-	72	-
Desvio Padrão	673,6	-	15,6	-	13,8	-
CV	13,5%	-	10,2%	-	19,1%	-

Legenda: RMSE: erro médio quadrático entre os valores calculados e medidos da bacia

A retroanálise realizada pelos softwares apresentou resultados coerentes, isto é, valores de MR considerados padrões para o tipo de material empregado, bem como resultados muito semelhantes entre si, apresentando variação máxima entre resultados dos softwares de 14,1% e 18,9% para revestimento e base respectivamente, da estaca 145+940 e 4,0% para o subleito da estaca 145+880.

Conforme Balbo (2007), valores de MR para base de BGS entre 100 e 250 MPa são corriqueiros, segundo o mesmo autor o MR do subleito composto de material argiloso varia muito dependendo do lugar, porém valores entre 50 e 130 MPa foram encontrados em diversos estudos realizados na UNIQU, entre eles Silva (2012). Quanto ao material de revestimento, o laboratório de materiais de construção civil (LMCC) da UFSM realizou ensaios de módulo de resiliência de 6 amostras de CA que estava sendo utilizado nos serviços de restauração da BR 472 e que foram enviadas pela Carpenedo & Cia LTDA encontrando valor médio do MR de 5134 MPa. O RMSE obtido pode ser considerado satisfatório, apresentando em todos os casos do BackSispav erro menor que 10%. O RMSE obtido pelo Evercalc apresenta-se também menor que 10%, com exceção da estaca 146+000, onde o erro é de 16,1%.

A análise estatística dos resultados demonstra que o grupo de resultados é homogêneo em torno da média, e que seu valor representa a variável. Ainda pode-se dizer que as variáveis apresentam ótimo/bom padrão com CV de 8,5 a 19,1%. Os valores de MR e espessuras que devem ser usados para representar os valores obtidos por cada software é, portanto a média, sendo assim:

Tabela 5 – Valores utilizados na análise mecânica

BackSispav			Evercalc		
Camada	Espessura (cm)	MR (MPa)	Camada	Espessura (cm)	MR (MPa)
Revestimento	11	4961	Revestimento	11	4996
Base	30	165	Base	30	153
Subleito	∞	71	Subleito	∞	73

3.4 ANÁLISE MACANÍSTICA

Com os resultados obtidos pelo processo de retroanálise das bacias de deflexão realizou-se a análise macanística no software AEMC, visando determinar a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento antigo (ϵ_t), bem como a de compressão no topo do subleito (ϵ_c) a partir da aplicação de carga do eixo padrão ESRD (eixo simples roda dupla) de 8200 kgf na estrutura com as espessuras e módulos conforme a Tabela 5. Foram propostas seis espessuras de reforço para cada um dos conjuntos representativos, sendo: 4, 7, 10, 13, 16 e 19 cm. O MR utilizado na camada de reforço foi 6645 MPa.

Tabela 6 – Deformações calculadas com MR obtidos pelo BackSispav e Evercalc

MR BackSispav			MR Evercalc		
Estrutura	ϵ_t ()	ϵ_c ()	Estrutura	ϵ_t ()	ϵ_c ()
Sem reforço	223	-499	Sem reforço	228	-494
Reforço 4cm	160	-344	Reforço 4cm	162	-339
Reforço 7cm	128	-273	Reforço 7cm	129	-269
Reforço 10cm	105	-222	Reforço 10cm	105	-218
Reforço 13cm	086	-184	Reforço 13cm	087	-181
Reforço 16cm	072	-155	Reforço 16cm	073	-152
Reforço 19cm	061	-131	Reforço 19cm	062	-129

3.5 ESTIMATIVAS DE VIDA ÚTIL

As estimativas de vida útil se basearam nos valores apresentados na Tabela 6, sendo a deformação de tração na base do revestimento (ϵ_t) utilizada para as previsões da vida útil para fadiga e a deformação de compressão no topo do subleito (ϵ_c) para a de deformação permanente.

3.5.1 VIDA ÚTIL DE FADIGA

A partir dos 3 modelos de desempenho apresentados anteriormente determinou-se a estimativa de vida útil para fadiga, os valores obtidos estão representados nas tabelas a seguir. Deve-se ressaltar que os modelos de Franco (2007) e Pinto (1991) utilizam N_{USACE} , enquanto que o modelo FHWA apresenta N_{AASHTO} , o que tornou necessária a conversão de N_{AASHTO} para N_{USACE} através da equação 11 permitindo assim a apresentação e análise de estimativas representativas de uma mesma metodologia.

A fim de facilitar o entendimento passa-se a chamar o modelo de Franco (2007) de modelo 1 (M1), o modelo de Pinto (1991) de modelo 2 (M2) e o modelo do FHWA de modelo 3 (M3).

$$N_{USACE} = 3 \cdot N_{AASHTO} \quad (11)$$

Tabela 7 – Estimativas de vida útil para fadiga modelo Franco (2007)

N _{USACE} - Modelo Franco (2007) – M1					
Estrutura	Backsispav	Evercalc	Média	Desvio Padrão	CV
Sem reforço	7,02E+05	6,56E+05	6,79E+05	3,25E+04	4,79%
Reforço 4cm	1,79E+06	1,72E+06	1,76E+06	5,00E+04	2,85%
Reforço 7cm	3,36E+06	3,27E+06	3,32E+06	6,37E+04	1,92%
Reforço 10cm	5,88E+06	5,85E+06	5,86E+06	2,16E+04	0,37%
Reforço 13cm	1,03E+07	9,94E+06	1,01E+07	2,71E+05	2,67%
Reforço 16cm	1,70E+07	1,63E+07	1,67E+07	5,20E+05	3,12%
Reforço 19cm	2,72E+07	2,58E+07	2,65E+07	9,58E+05	3,61%

Tabela 8 – Estimativas de vida útil para fadiga modelo Pinto (1991)

N _{USACE} - Modelo Pinto (1991) – M2					
Estrutura	Backsispav	Evercalc	Média	Desvio Padrão	CV
Sem reforço	5,71E+05	5,38E+05	5,55E+05	2,29E+04	4,14%
Reforço 4cm	1,38E+06	1,33E+06	1,35E+06	3,13E+04	2,31%
Reforço 7cm	2,49E+06	2,44E+06	2,46E+06	3,55E+04	1,44%
Reforço 10cm	4,20E+06	4,20E+06	4,20E+06	6,89E+02	0,02%
Reforço 13cm	7,13E+06	6,92E+06	7,02E+06	1,51E+05	2,15%
Reforço 16cm	1,14E+07	1,10E+07	1,12E+07	2,88E+05	2,57%
Reforço 19cm	1,77E+07	1,70E+07	1,73E+07	5,26E+05	3,03%

Tabela 9 – Estimativa de vida útil para fadiga modelo FHWA

N _{USACE} - Modelo FHWA – M3					
Estrutura	Backsispav	Evercalc	Média	Desvio Padrão	CV
Sem reforço	2,19E+07	2,02E+07	2,11E+07	1,16E+06	5,50%
Reforço 4cm	7,02E+07	6,72E+07	6,87E+07	2,12E+06	3,08%
Reforço 7cm	1,54E+08	1,50E+08	1,52E+08	2,93E+06	1,93%
Reforço 10cm	3,08E+08	3,08E+08	3,08E+08	0,00	0,00%
Reforço 13cm	6,21E+08	5,97E+08	6,09E+08	1,75E+07	2,87%
Reforço 16cm	1,16E+09	1,10E+09	1,13E+09	3,88E+07	3,42%
Reforço 19cm	2,08E+09	1,96E+09	2,02E+09	8,15E+07	4,04%

A análise dos resultados demonstra que os valores estimados para vida útil de fadiga são em todos os casos maiores com a configuração estrutural calculada pelo Backsispav, isto se deve ao fato de que a análise macanística com valores de MR obtidos por este software, apresenta deformações de tração na base do revestimento inferiores aos calculados a partir dos parâmetros gerados pelo Evercalc.

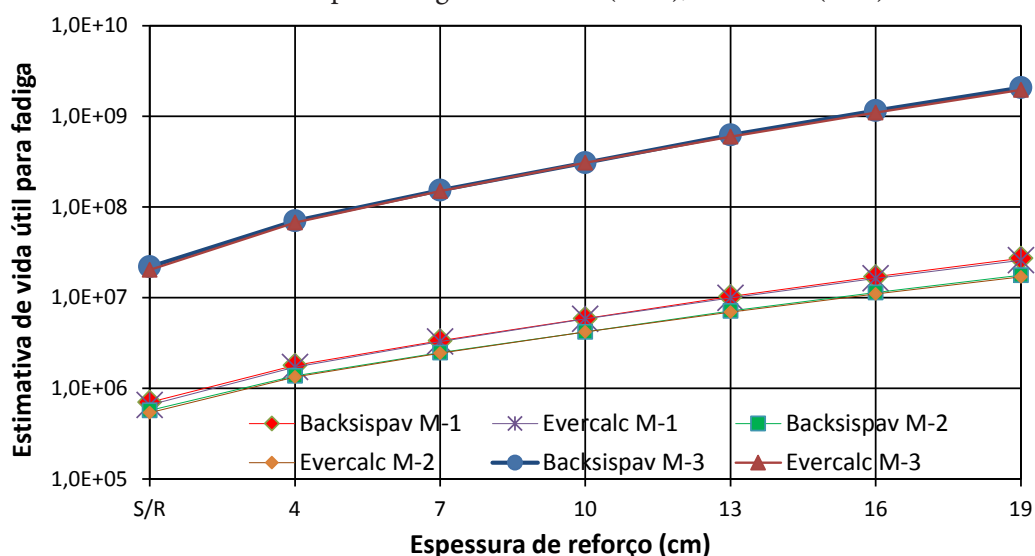
Embora o software Evercalc tenha gerado MR médio do revestimento superior ao calculado pelo BackSispav, o MR médio da base foi inferior, permitindo assim que maiores deformações de tração fossem obtidas.

Os coeficientes de variação encontrados podem ser considerados baixos, não ultrapassando 5,5% no pior caso (estrutura sem reforço). Assim, pode-se afirmar que para estimativa da vida útil de fadiga ambos os softwares de retroanálise utilizados neste estudo são eficazes e apresentam resultados coerentes, validando a utilização de qualquer um deles para determinação do MR através de retroanálise de uma estrutura rodoviária e posterior estimativa de vida útil para fadiga.

Pode-se verificar certa igualdade de resultados de estimativa da vida útil de fadiga entre os dois modelos brasileiros, e principalmente a igualdade de resultados obtidos a partir dos parâmetros calculados pelos dois softwares de retroanálise para o mesmo modelo, Figura 3. Esta semelhança também

pode ser observada nos valores estimados pelo modelo da FHWA-M3, porém este modelo apresentou grande diferença se comparada com o modelo M1-Franco (2007) e M2-Pinto (1992), uma vez que estimou número de solicitações na casa de 10^9 enquanto que os demais não passaram de $2,7 \cdot 10^7$.

Figura 3 – Estimativa de vida útil para fadiga M1-Franco (2007), M2-Pinto (1991) e M3-FHWA



3.5.2 VIDA ÚTIL DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A partir dos 2 modelos de desempenho apresentados anteriormente determinou-se a estimativa de vida útil para deformação permanente, os valores obtidos estão representados nas tabelas a seguir.

Tabela 10 – Estimativas de vida útil para deformação permanente modelo IA

Modelo Instituto do Asfalto					
Estrutura	Backsispav	Evercalc	Média	Desvio Padrão	CV
Sem reforço	8,27E+05	8,66E+05	8,47E+05	2,70E+04	3,19%
Reforço 4cm	4,37E+06	4,67E+06	4,52E+06	2,10E+05	4,63%
Reforço 7cm	1,23E+07	1,32E+07	1,27E+07	5,95E+05	4,67%
Reforço 10cm	3,11E+07	3,37E+07	3,24E+07	1,86E+06	5,75%
Reforço 13cm	7,20E+07	7,75E+07	7,48E+07	3,89E+06	5,20%
Reforço 16cm	1,55E+08	1,69E+08	1,62E+08	1,00E+07	6,18%
Reforço 19cm	3,30E+08	3,53E+08	3,41E+08	1,66E+07	4,87%

Tabela 11 – Estimativas de vida útil para deformação permanente modelo LCPC

Modelo LCPC					
Estrutura	Backsispav	Evercalc	Média	Desvio Padrão	CV
Sem reforço	1,67E+06	1,75E+06	1,71E+06	5,48E+04	3,21%
Reforço 4cm	8,92E+06	9,53E+06	9,23E+06	4,30E+05	4,66%
Reforço 7cm	2,53E+07	2,70E+07	2,62E+07	1,23E+06	4,70%
Reforço 10cm	6,42E+07	6,97E+07	6,70E+07	3,87E+06	5,79%
Reforço 13cm	1,50E+08	1,61E+08	1,56E+08	8,13E+06	5,23%
Reforço 16cm	3,24E+08	3,54E+08	3,39E+08	2,11E+07	6,22%
Reforço 19cm	6,91E+08	7,40E+08	7,16E+08	3,51E+07	4,90%

A análise dos resultados demonstra que os valores estimados para deformação permanente são em todos os casos, ao contrário do que ocorre para vida de fadiga, maiores com a configuração estrutural calculada pelo Evercalc, isto se deve ao fato de que a análise mecânica com valores de MR obtidos por este, apresenta deformações de compressão no topo do subleito inferiores aos calculados a partir dos parâmetros gerados pelo Backsispav.

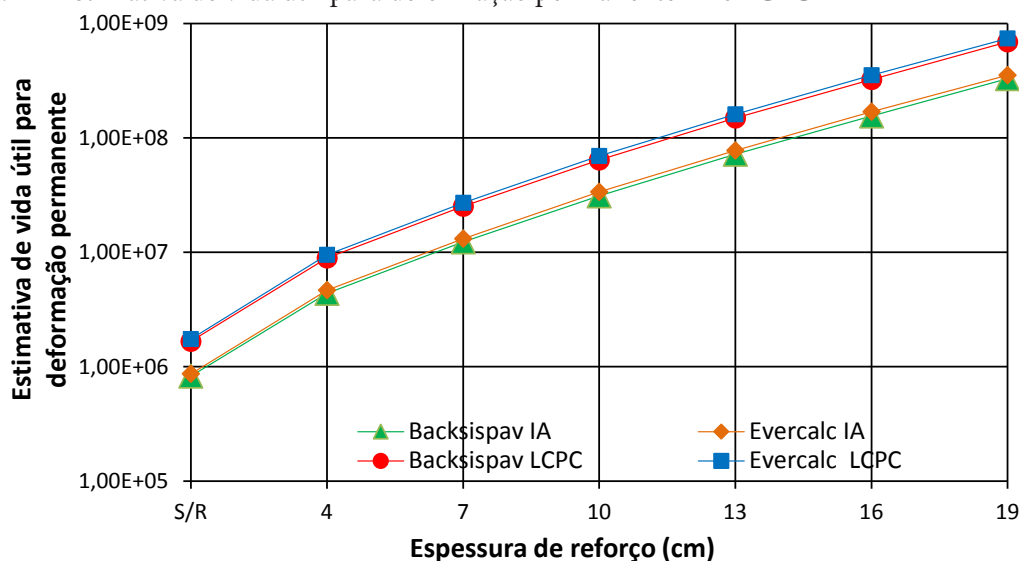
Os resultados de estimativa de vida útil aqui se invertem, isto é, a vida útil estimada para fadiga foi maior a partir dos parâmetros calculados pelo BackSispav, já a estimativa de vida útil para deformação permanente é maior a partir dos parâmetros gerados pelo software Evercalc. Pode-se atribuir isso ao fato de que o software BackSispav gerou MR médio da base superior ao calculado pelo Evercalc, o que contribuiu para obtenção de menor deformação de tração na base do revestimento, porém o MR médio do revestimento calculado pelo Evercalc foi maior, o que por sua vez contribuiu para obtenção de menor deformação de compressão no topo do subleito.

A análise demonstra certa igualdade de resultados entre as estimativas de vida útil obtidas a partir dos parâmetros de rigidez calculados pelos softwares, não ultrapassando 6,2% no pior caso (16 cm de revestimento).

Embora a variação de resultados de estimativa de vida útil para deformação permanente entre os modelos do IA e LCPC seja elevada, ficando em torno de 50% em todos os casos, Figura 4, a estimativa obtida para os parâmetros calculados pelos softwares de retroanálise é praticamente a mesma, o que valida a utilização de ambos os softwares em uma análise mecânica.

Pode-se afirmar assim, que no dimensionamento mecânico de uma camada de reforço, a determinação do MR das camadas da estrutura pode ser obtida por ambos os softwares. Tratando dos modelos de desempenho, assim como no caso dos modelos à fadiga é importante que se tome cuidado, pois a escolha de determinado modelo pode diminuir pela metade, ou dobrar a vida útil estimada da estrutura se tratando de deformação permanente.

Figura 4 – Estimativa de vida útil para deformação permanente IA e LCPC



3.6 ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO PRO 11/79

Através do cálculo da média e do desvio padrão, estabeleceu-se o intervalo de aceitação para os valores individuais de deflexão medidos em campo. Neste estudo nenhum valor foi eliminado, pois encontraram-se dentro dos limites. Assim, para continuidade dos cálculos utilizou-se a média da deflexão máxima D_0 que foi então utilizada para determinação da deflexão característica e deflexão de projeto conforme a Tabela 13.

O cálculo de D_{adm} é realizado em função do N, conforme Eq (09), o qual refere-se ao número médio de solicitações do eixo padrão estimado pelos modelos de fadiga que a estrutura suportará para

cada espessura de reforço sem que ocorram trincas no revestimento. Para sua determinação utilizou-se a média dos valores de estimativa de vida útil para fadiga encontrada nos três diferentes modelos de previsão utilizados, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Média da estimativa de vida útil para fadiga para utilização no PRO 11/79

Estrutura	Franco (2007)	Pinto (1991)	FHWA	N Médio
Sem reforço	6,8E+05	5,5E+05	2,1E+07	7,4E+06
Reforço 4cm	1,7E+06	1,4E+06	6,9E+07	2,4E+07
Reforço 7cm	3,0E+06	2,5E+06	1,5E+08	5,2E+07
Reforço 10cm	5,3E+06	4,2E+06	3,1E+08	1,1E+08
Reforço 13cm	9,0E+06	7,1E+06	6,1E+08	2,1E+08
Reforço 16cm	1,5E+07	1,1E+07	1,1E+09	3,9E+08
Reforço 19cm	2,3E+07	1,7E+07	2,0E+09	6,9E+08

A partir deste N médio calculado para cada espessura de reforço obteve-se D_{adm} , o qual foi utilizado conforme Eq. (10) do método PRO 11/79 para determinar a espessura necessária de reforço em concreto betuminoso para que não surjam trincas no revestimento.

Tabela 13 – Espessura necessária de reforço método PRO 11/79

D_0	σ	Dc	FS	Dp
52,6	4,6	57,2	1	57,2
Reforço (cm) (mecanístico)	N médio (mecanístico)	D_{adm}	Reforço (cm) (PRO 11/79)	
Sem reforço	7,4E+06	63,2	0,0	
Reforço 4cm	2,4E+07	51,4	1,8	
Reforço 7cm	5,2E+07	44,8	4,2	
Reforço 10cm	1,1E+08	39,6	6,4	
Reforço 13cm	2,1E+08	35,1	8,5	
Reforço 16cm	3,9E+08	31,5	10,4	
Reforço 19cm	6,9E+08	28,5	12,1	

Legenda: D_0 : Deflexão média medida no centro da aplicação de carga; σ : Desvio padrão; FS: Fator de segurança; Dp: Deflexão de projeto.

A análise dos resultados permite afirmar que a determinação da espessura necessária de reforço pelo método PRO 11/79 foi neste estudo, cerca de 1,5 vezes menor que o mecanístico, sendo que, por exemplo, a aplicação de 7,0cm de reforço em CA resistiria segundo o método mecanístico a N de $5,2 \cdot 10^7$ sem o surgimento de trincas no revestimento, porém, para esta mesma vida útil apenas 4,2cm de revestimento seriam suficientes conforme o método PRO 11/79.

A partir da deflexão máxima média medida em campo estimou-se a partir da Eq. (09) do método PRO 11/79 o N que a estrutura sem reforço será capaz de suportar sem o surgimento de trincas por fadiga. O valor obtido foi $1,3 \cdot 10^7$, valor 1,7 vezes maior do que a média da vida útil para fadiga da estrutura sem reforço obtida pelos modelos de desempenho ($7,4 \cdot 10^6$).

Pode-se afirmar a partir daí que o dimensionamento de uma camada de reforço pelo método PRO 11/79 é mais econômico, gerando espessura necessária de reforço sempre inferior ao necessário segundo métodos mecanísticos para uma mesma vida útil. Há de se ter em mente, porém, que o método PRO 11/79 é semi-empírico, significando que seu resultado é baseado em observações e simulações anteriores, assim a espessura indicada por este método embora confiável pode não ser satisfatória para aplicação em campo no caso específico deste estudo.

A análise mecânica considera parâmetros de rigidez, espessuras e coeficientes característicos de cada material, tratando cada caso isoladamente, o que não ocorre na parcela de empirismo presente no método PRO 11/79 que generaliza as características da estrutura.

Há de se ressaltar, porém, a facilidade de aplicação do método PRO 11/79, que não exige uma maior investigação do pavimento através de abertura de poços de sondagem, uma vez que o tipo de material, quantidade de camadas e espessuras não são utilizadas na determinação da espessura de reforço. O delineamento da linha de influência também não é necessário, uma vez que apenas D_0 e D_{25} são utilizados. Devido a estas facilidades tem grande aceitação no meio rodoviário e normalmente substitui a análise mecânica da estrutura.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste estudo foi analisar comparativamente como a variação dos módulos de resiliência encontrados em diferentes softwares de retroanálise alteram a estimativa de vida útil de um pavimento flexível em termos de afundamento da trilha de roda e vida de fadiga para diferentes espessuras de reforço, assim diversas conclusões puderam ser obtidas.

As sondagens realizadas no trecho entre as estacas 145+860 a 146+040 da rodovia federal BR 472/RS permitiram a determinação do tipo de material, espessuras médias das camadas e sua umidade, sendo: revestimento em CA (concreto asfáltico) de 10,5 a 11,5cm, base de BGS (brita graduada simples) de 30 cm e subleito composto de solo típico da região. A umidade apresentou valor médio de 7,3% para a camada de base e 25,2% para o subleito.

A medida das deflexões com Viga Benkelman comprovou que o trecho estudado apresenta-se homogêneo, uma vez que as medidas de deflexão apresentaram pouca variação e a deflexão máxima média de mm possui CV menor que 10%. O raio médio calculado de 352m comprova a boa qualidade estrutural do pavimento.

A retroanálise das bacias de deflexão deste trecho apresentaram MR do revestimento de CA calculado pelo BackSispav de 4961 MPa, base de BGS de 165 MPa e subleito de SL de 71 MPa, os valores calculados pelo Evercalc foram de 4996 MPa, 153 MPa e 73 MPa, respectivamente para as mesmas camadas. O valor médio entre os dois softwares é de 4979 MPa para o revestimento, 159 MPa para a base e 62 MPa para o subleito.

A retroanálise realizada por ambos os softwares foi satisfatória, pois além da obtenção de MR compatíveis com o tipo de material presente na estrutura, apresentaram pouca variação se comparados entre si. Assim pode-se dizer que os softwares de retroanálise estudados convergem para um mesmo resultado dos MR das camadas do pavimento, validando a utilização de ambos. Cabe ressaltar, porém, a maior facilidade operacional proporcionada pelo software BackSispav que além de rodar em versões mais recentes do Windows apresenta interface de fácil manuseio e maior iteratividade com o projetista.

Os valores estimados de vida útil para fadiga e deformação permanente são altamente sensíveis à alteração do MR das camadas de revestimento e base, sendo que uma pequena variação destes valores pode alterar significativamente a estimativa de vida útil da estrutura. Neste estudo a variação observada para vida de fadiga a partir dos parâmetros gerados pelos softwares foi de no máximo 5,5%, (estrutura sem reforço), sendo que o MR cerca de 8% maior da base calculado pelo BackSispav proporcionou menor deformação de tração na base do revestimento, o que por sua vez gerou maior estimativa de vida de fadiga.

Os modelos brasileiros de desempenho à fadiga apresentaram resultados parecidos, com CV médio de 15%, sendo que o modelo M1-Franco (2007) apresenta em todos os casos simulados estimativas de vida útil maiores que o modelo M2-Pinto (1991). O modelo FHWA apresentou resultados cerca de 65 vezes maiores que os demais.

Tratando da deformação permanente, o maior CV observado entre as estimativas foi de 6,2% na estrutura com 16 cm de reforço. O MR 0,7% maior do revestimento calculado pelo Evercalc proporcionou obtenção de menor deformação de compressão no topo do subleito, o que contribuiu para geração de

maior estimativa de vida útil para deformação permanente se comparada com a estimada a partir dos parâmetros calculados pelo BackSispav.

Os modelos de desempenho à deformação permanente apresentam variação média de seus resultados em torno de 50%, sendo que as estimativas da vida útil geradas pelo modelo LCPC são sempre maiores.

O cálculo da espessura necessária de reforço pelo método mecânico é mais conservador que pelo método PRO 11/79, isto é, gera espessuras maiores de reforço para uma mesma vida útil. No estudo desenvolvido constatou-se pelo método PRO 11/79 que o trecho compreendido entre as estacas 145+860 a 146+040 da rodovia federal BR 472/RS resistiria sem aplicação de reforço a um N de $1,3 \cdot 10^7$, enquanto que pelo método mecânico já seria necessário a aplicação de reforço para obtenção desta mesma vida útil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBO, J. T. Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projetos e Restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER – ME 024/94. *Pavimento – determinação das deflexões pela Viga Benkelman*. DNER, 1994, 6p.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER - PRO 011/79. *Avaliação Estrutural de Pavimentos flexíveis – Procedimento B*. DNER, 1979, 16p

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 133/2010- ME. Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman – Método de ensaio. DNIT, 2010, 8 p.

FRANCO, F. A. C. de P. (2007) *Método De Dimensionamento Mecânico-Empírico De Pavimentos Asfálticos – Sispav*. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.

MOTTA, L. M. G. Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de carga repetida. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 366p.

PINTO, S. (1991) *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. 489f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE Rio de Janeiro/RJ.

SILVA, C. F. S. C. *Reutilização do resíduo oriundo dos serviços de restauração asfáltica como material alternativo em camadas de pavimentos flexíveis*. 2012. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do SUL – UNIJUI/RS, 2012.

THEISEN, K. M. et al. *Método de retroanálise de bacias obtidas por carregamento de eixo padrão através do uso de softwares adaptados para FWD*. In: Congresso de pesquisa e ensino em transportes, XXIII, 2009, Vitória.

Mechanistic analysis of a flexible pavement restored from of the MR obtained in different backcalculation softwares with beam benkelman data

ABSTRACT

Currently it is possible to design a road structure or pavement reinforcement through mechanistic methods, using empirical methods as the CBR for a preliminary design. In this new approach the structure is treated as any other in engineering, for example, reinforced concrete, where stresses and strains are analyzed and limited varying the thickness and material characteristics. To treat of the pavement reinforcement, is required prior knowledge of some characteristics of the existing materials in the structure, like as resilient modulus that can be obtained by the process back-calculation deflection bowls. This paper develops a study that seeks back-calculate ten deflection bowls measured with Benkelman Beam in the highway BR 472/RS from two diferents backcalculation softwares, and use these values in a mechanistic analysis proposing different thickness in asphalt concrete reinforcement. For each set of resilient modulus values obtained by back-calculation has been proposed six different thicknesses with MR 6645 MPa that were: 4 7, 10, 13, 16 and 19 cm. These structures has been analyzed with the software AEMC (Multiple Layers of Elastic Analysis) in order to obtain specific tensile strain at the bottom asphalt concrete and the compressive strain at the top of the subgrade. The strain values has been used in performance models to fatigue Pinto (1991), Franco (2007) and Federal Highway Administration dos EUA (FHWA), and in the performance models to rutting failure of the Asphalt Institute (USA) and *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* da França (LCPC) in order to estimate the number of cycles for a standard axle 8,2t that the structure will be able to withstand without occur cracks or deformations greater than 12.5 mm, thereby determining the estimated useful life for each thickness and set of resilient modulus back-calculation that will compared with each other to getting the result variation. Complementarily it were performed the calculate the thickness necessary to reinforcement to estimate of average useful life starting of PRO 11/79 method.

Keywords: Pavement performance. Pavement reinforcement. Mechanistic analysis. Resilient modulus.