

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS COM REVESTIMENTO EM CAMADA SINGULAR E EM CAMADAS INTEGRADAS**

**Glicério Trichês<sup>1</sup>**  
**Lídia C. da Luz<sup>2</sup>**  
**Aline S. Santos<sup>2</sup>**  
**João V. S. de Melo<sup>1</sup>**  
**Matheus F. Marcon<sup>2</sup>**  
**Gabriela C. Carlesso<sup>2</sup>**  
**Liseane P. Thives<sup>1</sup>**

1 - Universidade Federal de Santa Catarina

2 - PPGEC/UFSC

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta os resultados do desempenho funcional de três segmentos que estão sendo monitorados em Santa Catarina. Estes segmentos fazem parte da Rede Temática de Tecnologia do Asfalto da Petrobras e têm como objetivo a geração de parâmetros de caracterização e comportamento dos materiais e de desempenho de estruturas de pavimentos em campo com vistas ao desenvolvimento do novo método brasileiro para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Os segmentos estão inseridos na BR 101 (rodovia de tráfego pesado), na cidade de Araranguá. As estruturas dos três segmentos foram executadas com os mesmos materiais, diferenciando-se apenas na constituição da camada de revestimento. Em dois segmentos, o revestimento foi executado com um único tipo mistura asfáltica convencional (CAP 50/70), diferenciando apenas na sua espessura (camada singular). No terceiro segmento, foi empregado dois tipos de misturas asfálticas sendo que na camada inferior empregou-se uma mistura com asfalto-borracha e na camada superior, a mesma mistura convencional dos outros dois segmentos (camadas integradas). O monitoramento sistemático dos segmentos mostram que o segmento em que o revestimento foi executado em camadas integradas apresenta um desempenho funcional significativamente superior aos outros dois segmentos em que o revestimento foi executado em camada singular.

## **ABSTRACT**

The present research has the purpose to perform a functional comparative performance analysis of three road segments inserted in the duplication construction of BR-101 highway, in the city of Araranguá/SC, also determining its estimated lifespan. The road segments have similar structures that are only differentiated by the surface layer. In two of them, the surface was completely executed by conventional asphalt mixture (single layer). In the third road segment, the surface layer was executed by two types of asphalt mixture (integrated layers). In this segment, the bottom layer was executed by asphalt rubber mixture (aiming to resist the bottom-up cracking) and the top layer was executed by conventional asphalt mixture (in order to avoid the rutting). The systematic monitoring carried out over three years, examined the evolution of the functional conditions since the opening of these three road segments. As a result, the road segment with the integrated layer surface is exhibiting performance and estimated lifespan significantly superior compared to the single layer surface segments.

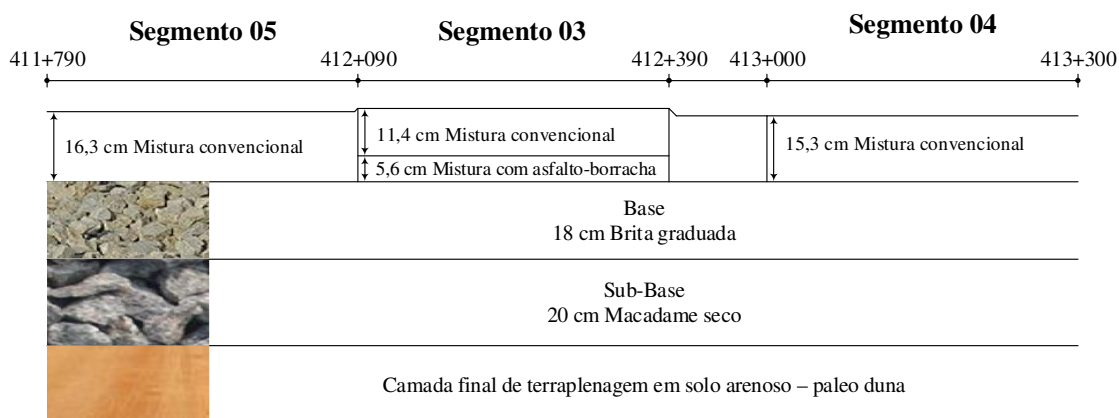
## **1. INTRODUÇÃO**

Em regiões tropicais os principais defeitos observados em pavimentos flexíveis são os trincamentos e os afundamentos de trilha de roda. Os trincamentos geralmente ocorrem em virtude da perda de resistência do material causada pela ação repetida dos esforços de tração por flexão (fenômeno de fadiga). Os afundamentos de trilha de roda, por sua vez, consistem no acúmulo de pequenas deformações não recuperáveis (deformação permanente) decorrentes da manifestação da parcela visco plástica da mistura asfáltica quando esta é submetida à aplicação de carregamento repetido das cargas dos veículos (Khalid, 2000; Fontes, 2009; Bastos, 2010).

Uma vez que a deformação permanente é geralmente causada pela elevada tensão causada pelos pneus na superfície da camada de revestimento e que um dos principais modelos de trincamento por fadiga ocorre normalmente devido aos elevados níveis de deformação de tração na parte inferior dessa camada, uma forma de lidar com esses dois fenômenos no dimensionamento da espessura do revestimento seria a execução de revestimentos em múltiplas camadas. Assim, na camada superior se adotaria uma mistura resistente à deformação permanente e na camada inferior, uma mistura resistente ao fenômeno de fadiga (bottom-up cracking) (Hajj et al., 2011).

Este tipo de construção, denominada de o rich-bottom design, consiste em uma composição de revestimento em múltiplas camadas e já vem sendo utilizado em países com Estados Unidos, Canadá e Austrália. Nesse tipo de construção, utiliza-se, na camada superior, uma mistura asfáltica em seu teor ótimo de ligante e na camada inferior, uma mistura com teor de ligante 0,5% maior do que o teor ótimo. Estudos como os de Carpenter e Shen (2006), Maher e Uzarowski (2010) e Hajj et al. (2011) mostraram que, em geral, ocorre um aumento da vida de serviço dos revestimentos asfálticos ao se adotar o rich-bottom design.

Este trabalho apresenta os resultados do monitoramento funcional sistemático de três segmentos executados em rodovia duplicada com elevado volume de tráfego sendo que em dois segmentos, o revestimento foi executado com um único tipo de mistura asfáltica e o terceiro, com dois tipos de misturas asfálticas. A Figura 1 mostra, esquematicamente, a seção da estrutura do pavimento dos três segmentos. Nos segmentos 04 e 05, o revestimento foi projetado dentro conceito de camada singular e executado com uma mistura convencional com CAP 50/70, projetada para apresentar uma elevada resistência à deformação permanente. No segmento 03, o revestimento foi projetado dentro do conceito de camadas integradas em que a camada inferior foi executada com uma mistura asfalto-borracha, a qual foi projetada para apresentar uma elevada resistência à fadiga.



**Figura 1:** Seção transversal da estrutura dos três segmentos.

Os segmentos experimentais estão localizados no município de Araranguá (sul do estado de Santa Catarina), na rodovia BR-101/SC, que é uma importante rodovia federal que cruza o Brasil no sentido Norte-Sul. O dimensionamento do pavimento foi realizado segundo a metodologia TECNAPAV/94 (método que contempla a consideração da resiliência no projeto de pavimentos). O tráfego previsto no período de projeto era de  $N_{8,2tf}$  de  $1,13 \times 10^8$  (USACE), para ano de abertura em 2003, e CBR de projeto de 11,0%. Isto resultou na espessura de revestimento de 15,0cm em mistura convencional. O Segmento 04 representa

estrutura contrata pelo DNIT. Os segmentos 03 e 05 foram executados para efeitos da realização da pesquisa. O contorno de Araranguá onde se inserem os segmentos somente foi aberto ao tráfego em março de 2018 enquanto que o restante do trecho, a rodovia foi aberta ao tráfego em 2012.

## 2. MATERIAIS E MÉTODO

### 2.1. Composição granulométrica dos agregados

Os agregados minerais empregados são de origem basáltica. A curva granulométrica da mistura é composta por 43% de brita 3/4" (19,1 mm), 18,5% de brita 3/8" (9,1 mm), 37% de pó de pedra (4,75 mm) e 1,5% de filer (cal hidratada, tipo CH-1 dolomítica), obedeceu aos critérios da metodologia SUPERPAVE para um tamanho nominal máximo de agregado de 19 mm. A Tabela 1 apresenta a porcentagem passante de agregado nas peneiras de controle.

**Table 1:** Composição granulométrica: porcentagem passante em cada peneira.

Peneira - Série ASTM	% Passante	Peneira - Série ASTM	% Passante
3/4"	100	n° 16	17,4
1/2"	78,5	n° 30	13,0
3/8"	65,5	n° 40	11,5
1/4"	51,7	n° 50	10,5
n° 4	42,3	n° 80	9,2
n° 8	26,8	n° 100	8,6
n° 10	23,6	n° 200	7,1

A composição granulométrica da mistura asfáltica convencional foi definida pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo de Mello (CENPES/Petrobras) visando a se obter uma mistura com elevada resistência à deformação permanente. Para a mistura executada com asfalto-borracha, adotou-se a mesma granulometria.

### 2.2. Ligantes asfálticos

A Tabela 2 apresenta os resultados da caracterização dos ligantes utilizados.

**Tabela 2:** Caracterização dos ligantes asfálticos.

Propriedade	Unidade	Norma	Resultado	
			Convencional	Asfalto-borracha*
PG			58-22	76-22
Penetração	0,1 mm	ASTM D 5	59	50
Ponto de amolecimento	°C	ASTM D 36	49	60
Viscosidade Brookfield				
135°C (spindle 21, 20 rpm)	cP		380	-
150°C (spindle 21, 50 rpm)	cP	ASTM D 4402	189	-
175°C (spindle 21, 100 rpm)	cP		71	-
17 °C (spindle 3, 20 rpm)	cP	ASTM D 6114	-	1520
Ponto de fulgor	°C	ASTM D 92	326	240

\* Incorporação de 15% de borracha moída de pneu através do processo Via Úmida.

### 2.3. Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem da mistura asfáltica convencional foi realizada segundo a metodologia SUPERPAVE. Considerou-se, nessa dosagem, o tamanho nominal máximo de agregado de 19 mm e alto volume de tráfego (aplicação de 125 giros). Quanto à mistura asfáltica com asfalto-

borracha, a dosagem foi realizada conforme a metodologia Marshall, pois não se tinha ainda os equipamentos em operação no laboratório de pavimentação da UFSC e não havia tempo hábil para que a dosagem fosse realizada pelo CENPES. Os parâmetros volumétricos obtidos na dosagem dessas misturas são apresentados na Tabela 3.

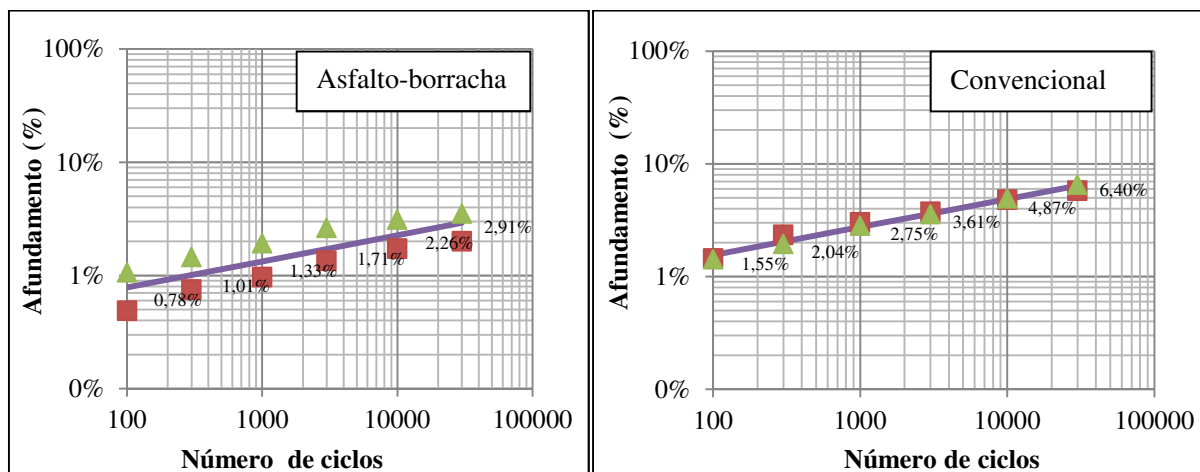
**Tabela 3:** Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas.

Características	Unidade	Resultado	
		Convencional	Asfalto-borracha
Gmm	g/cm <sup>3</sup>	2,705	2,662
Teor de ligante	%	4,15	5,40
V <sub>v</sub>	%	4,00	3,80
VAM	%	13,20	17,60
RBV	%	69,70	78,00

## 2.4. Caracterização do comportamento mecânico e reológico das misturas

### 2.4.1 Deformação permanente

Para os ensaios de deformação permanente, utilizou-se o equipamento francês *Orniéreur*, onde as placas de mistura asfáltica foram submetidas a um carregamento em ciclos longitudinal (30000 ciclos) na temperatura de 60°C, de acordo com as recomendações da norma francesa AFNOR NF P 98-253-1. Ao término do ensaio, o afundamento na trilha de roda da mistura convencional correspondeu ao total acumulado de 6,40% em relação à altura da placa. Na mistura modificada com borracha moída de pneu, o acúmulo foi de 2,91%. Destaca-se que os resultados para a mistura convencional encontram-se acima do limite de 5% estabelecido pela especificação francesa (LCPC, 2007) para tráfego pesado. A Figura 2 mostra os resultados obtidos.



**Figura 2:** Resultado dos ensaios de deformação permanente.

### 2.4.2 Caracterização reológica

A caracterização reológica das misturas convencional e modificada com borracha moída de pneu ocorreu a partir dos ensaios de módulo complexo no aparato de teste quatro pontos. Os ensaios foram realizados sob a aplicação de carregamento sinusoidal e amplitude de deformação de 50  $\mu\epsilon$ , em diversas frequências de carregamento e temperaturas, conforme as recomendações da norma EN 12697-26. A partir dos resultados desses ensaios e com auxílio do software Viscanalyse, determinou-se os parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh

de cada mistura, como mostra a Tabela 4. Estes resultados foram utilizados na análise tensão-deformação das estruturas para a estimativa da vida útil empregando-se o software vicourote.

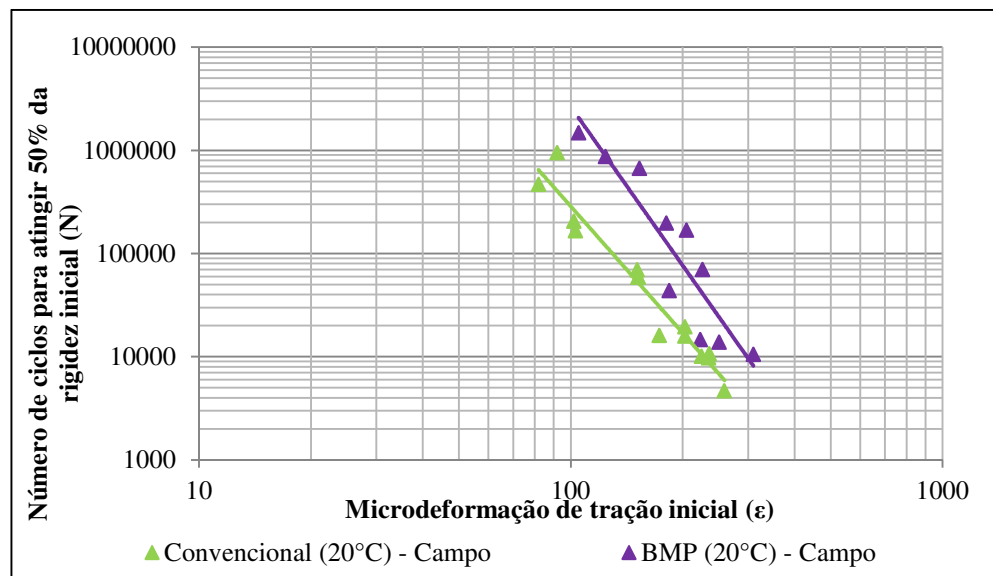
**Tabela 4:** Parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh para as misturas empregadas.

Parâmetros	CAP 50-70	Asfalto-borracha
$E_{\infty}$ (MPa)	29238,2	24682,2
$\nu$	0,30	0,27
$E_0$ (MPa)	76,5434	101,5770
$k$	0,24856	0,23117
$h$	0,68540	0,58851
$\delta$	2,70810	2,59828
A0	5,89107	6,00496
A1	-0,436450	-0,499450
A2	0,002040	0,003470

### 2.4.3 Resistência à fadiga

O ensaio de resistência à fadiga foi conduzido no aparato de teste quatro pontos sob flexão alternada e deformação controlada, sendo adotado como critério de ruptura a redução do módulo complexo inicial em 50%. A temperatura de ensaio adotada foi de 20°C e a frequência de carregamento de 10 Hz, visando simular um carregamento na velocidade ao redor de 72 km/h em campo. Nesse ensaio foram obedecidas as recomendações da norma EN 12697-24.

Na Figura 3 são apresentadas as curvas de fadiga de cada mistura asfáltica empregada.



**Figura 3:** Curvas de fadiga das misturas empregadas.

Os modelos de fadiga são mostrados nas Equações 1 e 2, respectivamente, para a mistura convencional e modificada por borracha moída de pneu.

$$N = 4,074 \times 10^{13} \epsilon_t^{-4,076} \quad (1)$$

$$N = 4,490 \times 10^{16} \epsilon_t^{-5,114} \quad (2)$$

em que : - N: é o número de repetições do carregamento até atingir 50% da rigidez inicial do concreto asfáltico;

- $\epsilon_t$ : é a deformação específica de tração.

## 2.5. Avaliação do desempenho funcional

### 2.5.1 Tráfego atuante nos segmentos

As condições funcionais foram avaliadas em cinco momentos:

- Março de 2014, antes da abertura ao tráfego;
- Março de 2015, 12 meses após a abertura ao tráfego ( $N_{USACE} = 9,07 \times 10^6$  e  $N_{AASHTO} = 2,70 \times 10^6$ );
- Maio de 2016, 26 meses após a abertura ao tráfego ( $N_{USACE} = 1,78 \times 10^7$  e  $N_{AASHTO} = 5,29 \times 10^6$ );
- Julho de 2017, 40 meses após a abertura ao tráfego ( $N_{USACE} = 2,65 \times 10^7$  e  $N_{AASHTO} = 7,85 \times 10^6$ );
- Dezembro de 2017, 45 meses após a abertura ao tráfego ( $N_{USACE} = 2,98 \times 10^7$  e  $N_{AASHTO} = 8,80 \times 10^6$ ).

O número  $N_{8,2tf}$  apresentado para cada levantamento, foi calculado a partir de dados obtidos em contagens de tráfego feitas pelo DNIT (PNCT, 2017) e dos dados da pesquisa Pesagem em Movimento (Brasil, 2017).

### 2.5.2 Levantamento da área trincada

Para o levantamento da porcentagem de área trincada, inicialmente todas as trincas foram identificadas e demarcadas como ilustrado na Figura 4. Posteriormente, mediu-se a área de abrangência de cada trinca, conforme mostra a Figura 4. Para o caso de trincas isoladas, a área foi calculada considerando-se o seu comprimento e uma largura de abrangência de 20,0 cm. O levantamento ocorreu na faixa direita dos segmentos (faixa mais solicitada pelo tráfego).



**Figura 4:** Levantamento da área trincada (Julho de 2017).

### 2.5.3 Irregularidade e trilha de roda

O levantamento da irregularidade longitudinal foi realizado em 2014, 2016 e 2017 com o Perfilômetro a Laser (ASTM E 950/E 950 M). Nesse levantamento determinou-se o International Roughness Index (IRI) da faixa direita de cada segmento. Segundo a Federal Highway Administration (FHWA), pavimentos com IRI superior a 170 polegadas/milha (2,69 m/km) são considerados como tendo qualidade ruim (FHWA, 2010).

Os afundamentos de trilha de roda foram medidos em 2014, 2016 e 2017 utilizando-se também o Perfilômetro a Laser.

## 2.6. Estimativa de vida útil

A estimativa de vida útil dos segmentos foi realizada utilizando-se os modelos de fadiga mostrados nas equações 1 e 2. A deformação específica de tração foi determinada com o software Viscoroute a partir dos parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh (Tabela 4) e dos parâmetros elásticos das camadas granulares e subleito (Tabela 5). Além disso, adotou-se como carregamento o semieixo padrão de 8,2 tf, com distância entre rodas de 31,0 cm, carga por roda de 2050 kgf e pressão de enchimento dos pneus de 5,6 kgf/cm<sup>2</sup>.

**Tabela 5:** Parâmetros elásticos das camadas granulares e subleito (Mello, 2014).

Parâmetro	Camadas		
	Base	Sub-base	Subleito
E (MPa)	260	210	180
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,35	0,35	0,35

Nos segmentos com revestimento em camada singular, a deformação específica de tração foi calculada na face inferior da camada de revestimento. Já no Segmento 03, com revestimento em camadas integradas, a deformação foi calculada na face inferior da camada em asfalto-borracha e também face inferior da camada em mistura convencional.

## 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

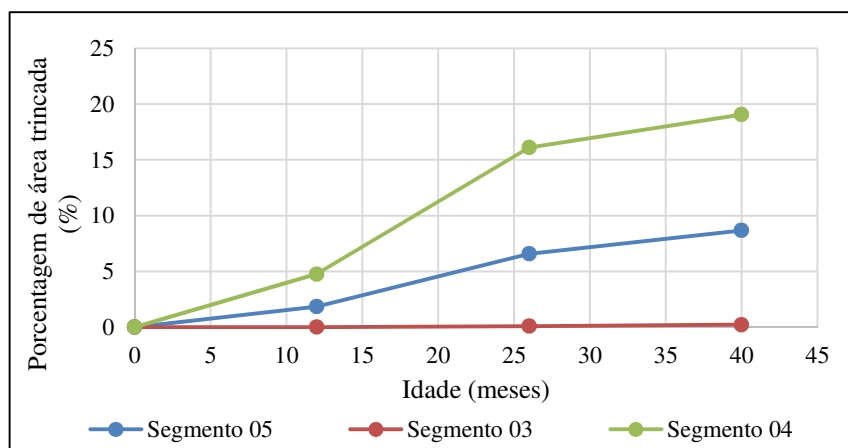
### 3.1. Evolução temporal da área trincada

A evolução da porcentagem de área trincada nos Segmentos 03, 04 e 05, desde a abertura ao tráfego, é mostrada na Tabela 6 e ilustrada na Figura 5. Na tabela, a coluna relativa à “superfície”, indica que a porcentagem da área trincada foi calculada em relação à toda a área da superfície do segmento (3,5m x 300,0m) e a coluna “trilha”, indica que a porcentagem foi calculada em relação à área correspondente as duas trilhas de rodagem (1,2m x 300,0m x2).

Os resultados mostram que após 40 meses de abertura ao tráfego, os Segmentos 05 (revestimento com 16,3cm de espessura) e 04 (revestimento com 15,3cm de espessura), ambos com camada singular, já apresentam uma elevada porcentagem de área trincada e que no caso do Segmento 04, a porcentagem de área trincada já estaria atingindo o limite indicativo da necessidade de intervenção. Mostram, também, que no Segmento 03 (revestimento com espessura total de 17,0cm, em camadas integradas) se tem neste período apenas 0,2% da área afetadas por trincamento, indicando, até então, um excelente desempenho da estrutura. Os resultados indicam o potencial de aplicação do conceito de camadas integradas no projeto das camadas de revestimentos espessos.

**Tabela 6:** Idade, tráfego acumulado e porcentagem de área trincada na trilha de roda.

Tempo (meses)	N <sub>USACE</sub> 0,0	% de área trincada					
		Segmento 05		Segmento 03		Segmento 04	
0	0,0	Superfície	Trilha	Superfície	Trilha	Superfície	Trilha
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	9,07x10 <sup>6</sup>	1,9	2,8	0,0	0,0	4,9	7,1
26	1,78x10 <sup>7</sup>	6,8	9,9	0,0	0,1	16,7	24,2
40	2,65x10 <sup>7</sup>	9,0	13,1	0,2	0,3	19,7	28,6



**Figura 5:** Evolução da porcentagem de área trincada ao longo do tempo.

A partir das Figuras 6a, 6b e 6c, tem-se uma visão geral dos três segmentos quanto aos trincamentos por fadiga, em julho de 2017 (40° mês de abertura ao tráfego).



**Figura 6:** Condições dos segmentos quanto ao trincamento em julho de 2017 (40° mês).

### 3.2. Estimativa de vida útil

A Tabela 7 apresenta a estimativa de vida para cada segmento, em termos de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf ( $N_{8,2tf}$ ) empregando-se o software viscouroute e os modelos de fadigas mostrados nas equações 1 e 2. Na tabela apresenta-se, também, o tráfego atuante correspondente ao aparecimento de 1% e 10% da área trincada, estimados a partir dos gráficos da Figura 5.

**Tabela 7:** Estimativa da vida útil e porcentagem de área trincada.

Segmento	Profundidade (cm)	Mistura	$N_{8,2tf}$ (estimados pelos modelos)	1% da área trincada	10% da área trincada
05	16,3	CAP 50-70	$5,9 \times 10^6$	$4,5 \times 10^6$	$3,0 \times 10^7$
03	11,4	CAP 50-70	$5,2 \times 10^7$	*	*
	17,0	BMP	$4,3 \times 10^7$	*	*
04	15,3	CAP 50-70	$3,9 \times 10^6$	$2,3 \times 10^6$	$1,4 \times 10^7$

Os resultados apresentados na Tabela 7 mostram que, ao se comparar as estimativas de vida útil estimadas pelos modelos de laboratório com o tráfego atuante em que se alcançou 1% e



10% da área trincada, há uma melhor aproximação quando se considera 1% da área trincada. Mostram, também, a excelente aproximação entre a estimativa da vida útil e o aparecimento do trincamento no pavimento contratado e executado, já no primeiro ano de abertura ao tráfego (Segmento 04), sendo que o pavimento contratado deveria suportar um tráfego de  $1,13 \times 10^8$  no período de projeto de 10 anos.

Desta forma, a partir dos resultados do monitoramento até o momento, é possível afirmar que a estimativa útil do revestimento a partir da caracterização reológica da mistura, utilização do modelo de Huet-Sayegh no software Viscouroute e empregando-se o modelo de fadiga obtido no equipamento 4 pontos, estaria representando o dimensionamento da camada de revestimento para uma condição de porcentagem e área trincada entre 1 e 2%, para condição de camada singular.

Para o Segmento 03, não é possível, até o momento, se fazer a estimativa do tráfego atuante para se alcançar 1% da área trincada, tendo-se em conta o baixo valor de porcentagem área trincada medido neste segmento (não é possível modelar os resultados).

### 3.3. Forma de como se dá o início do trincamento

Frequentemente, quando se depara com o trincamento precoce do revestimento, vem a balia a dúvida se o trincamento iniciou-se de cima para baixo ou de baixo para cima. No experimento de Araranguá, Nascimento (2014) previa o aparecimento de trincas de cima para baixo simultaneamente, porém em maior intensidade, de baixo para cima, nos três segmentos.

Da observação sistemática do desempenho dos segmentos, há uma forte tendência em se concluir que as trincas por fadiga iniciaram-se de baixo para cima. Nos segmentos 04 e 05, por apresentarem na camada de revestimento uma mistura asfáltica pouco resistente à fadiga, o trincamento iniciado na fibra inferior do revestimento se propagou ao longo da espessura dessa camada e afloraram na superfície do pavimento. Isto é corroborado pela foto ilustrada na Figura 7, a qual foi obtida em março de 2015, quando da extração de corpos de prova para avaliar a formação prematura de trincas nestes segmentos.



**Figura 7:** Evidência de que as trincas iniciam de baixo para cima.

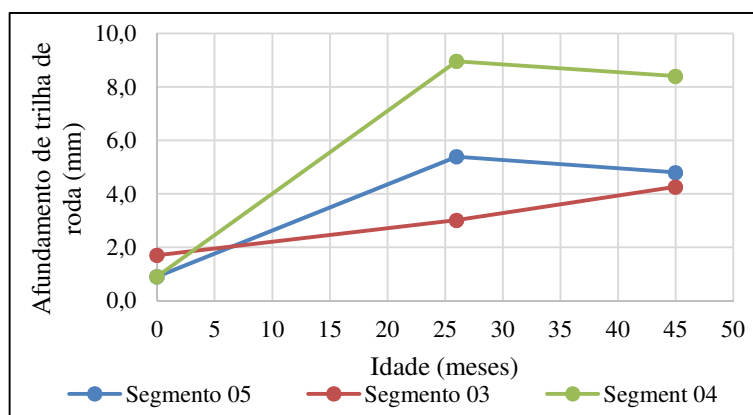
No Segmento 03, onde a camada inferior do revestimento foi executada com uma mistura asfalto-borracha, observa-se que a porcentagem de área trincada é muito baixa (menos de 1% da área total da superfície do segmento) após 40 meses de atuação do tráfego. Tal constatação confirma que o trincamento se inicia na parte inferior do revestimento, propagando-se para a

parte superior da camada. Caso o trincamento se iniciasse de cima para baixo, este padrão de trincamento deveria também ser observado neste segmento, uma vez que a camada superior também é em mistura convencional. Há que se considerar ainda que pelo fato da mistura asfalto-borracha apresentar uma menor rigidez em relação à mistura convencional, a deflexão da estrutura do Segmento 03 é ligeiramente superior às deflexões dos outros dois segmentos, o que poderia induzir tensões ainda maiores na parte superior do revestimento.

### 3.4. Evolução temporal do afundamento de trilha de roda

A Figura 8 mostra a evolução dos afundamentos de trilha de roda ao longo do tempo. Observa-se na figura que o valor dos afundamentos de trilha de roda aumentaram nos três segmentos. No entanto, esse aumento é mais significativo nos segmentos com revestimento em camada singular (Segmentos 04 e 05).

Os afundamentos de trilha de roda podem ter ocorrido, inicialmente, devido aos efeitos de pós-compactação provocados pela ação do tráfego. Posteriormente, com o surgimento das trincas na superfície do revestimento ocorreu a infiltração de água para as camadas inferiores, originando o bombeamento de finos e deformações plásticas nas camadas de base, sub-base e subleito. Essas deformações proporcionam o aumento da profundidade dos afundamentos de trilha de roda. Nota-se que no Segmento 03, o qual apresenta uma baixa porcentagem de área trincada, os afundamentos são menores que nos Segmentos 04 e 05 (já com elevada porcentagem de área trincada).



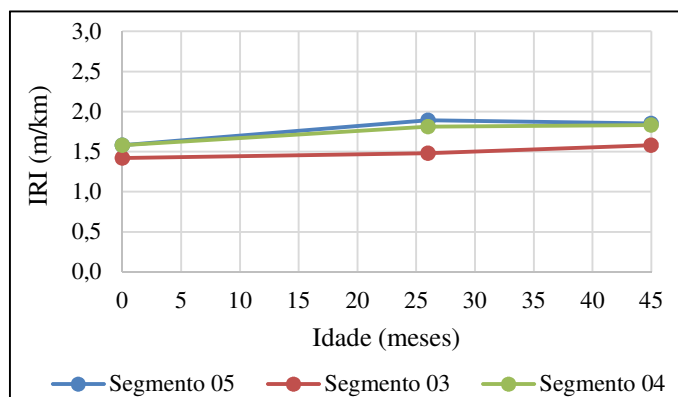
**Figura 8:** Evolução do afundamento de trilha de roda ao longo do tempo.

Isso mostra que os afundamentos de trilha de roda não estão associados a problemas com a mistura asfáltica, indicando que a previsão do desempenho quanto à deformação permanente realizada a partir dos ensaios de laboratório se confirma no campo.

### 3.5. Evolução temporal da Irregularidade

Na Figura 9 apresenta-se a evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo. Como pode ser visto nessa figura, nos três segmentos os valores do IRI não sofreram aumento significativo. A presença de trincas no revestimento pode ser um dos fatores que tenha contribuído para o aumento do IRI nos segmentos 04 e 05, pois com a penetração de água pelas trincas ocorrem deformações plásticas nas camadas inferiores do pavimento causando acréscimos na irregularidade longitudinal.

Todavia, ressalta-se que desde a abertura ao tráfego até o 45° mês (quinto levantamento) o IRI ficou abaixo de 2,69 m/km (limite da FHWA), o que indica um comportamento muito bom dos segmentos quanto ao IRI, mesmo para o Segmento 04.



**Figura 9:** Evolução do IRI ao longo do tempo.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados do monitoramento até o momento, é possível afirmar que a estimativa útil do revestimento a partir da caracterização reológica da mistura, utilização do modelo de Huet-Sayegh no software viscourote e empregando-se o modelo de fadiga obtido no equipamento 4 pontos, estaria representando o dimensionamento da camada de revestimento para uma condição de porcentagem e área trincada entre 1 e 2%, para condição de camada singular.

É possível, também, comprovar o grande potencial de aplicação do conceito de camadas integradas no projeto das camadas de revestimentos espessos projetando-se camadas de mistura mais resistente à fadiga onde os níveis de deformação são maiores, não se necessitando que toda a espessura do revestimento seja executada em mistura com ligante modificado.

É possível se afirmar, também, que nestes segmentos o trincamento inicia-se de baixo para cima e, provavelmente, este deve ser o principal mecanismo de formação e propagação de trincas em revestimentos espessos em regiões de clima subtropical.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Rede Temática de Tecnologia em Asfalto/PETROBRAS, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela disponibilização de bolsa tipo demanda social para o primeiro, quinto e sexto coautores. Agradecem também a NeoVias SA pelo apoio dado nos levantamentos de campo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. AASHTO M 323: *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Test standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing.* Washington, D. C., 2013.
- \_\_\_\_\_. AASHTO R 35: *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Test standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing.* Washington, D. C., 2013.
- AFNOR – Association Française de Normalisation. AFNOR NF P 98-250-2 – *Essais Relatifs Aux Chaussées, Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques.* AFNOR, 1991.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM D 6114: *Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder.* USA, 2002.

- \_\_\_\_\_. ASTM E 950/E 950M: *Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*. USA, 2009.
- \_\_\_\_\_. ASTM D 5: *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. USA, 2013.
- \_\_\_\_\_. ASTM D 4402: *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. USA, 2013.
- \_\_\_\_\_. ASTM D 36: *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. USA, 2014.
- \_\_\_\_\_. ASTM E 1703/E 1703M: *Standard Test Method for Measuring Rut-Depth of Pavement Surfaces Using a Straightedge*. USA, 2015.
- \_\_\_\_\_. ASTM D 92: *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. USA, 2016.
- Bastos, G. A. Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas para pavimentos flexíveis. Dissertação (Mestrado). *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, 2010.
- BRASIL – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Pesagem em Movimento e Análise do Pavimento*. Florianópolis: UFSC; Brasília: BRASIL, 2017. Termo de Cooperação Técnica n. 497. 2012. (Produto Operação e Avaliação de Sistemas da Estação Integrada).
- Carpenter, S. H.; Shea, S. Fatigue characteristics of rich bottom bases (RBB) for structural design of perpetual pavements. In: *Proceedings of International Conference on Perpetual Pavements*. Ohio University, Columbus, 2006.
- EN – European Standard. EN 12697-24 – *Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 24: Resistance to Fatigue*. CEN, Brussels, 2004.
- \_\_\_\_\_. EN 12697-26 – *Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 26: Stiffness*. CEN, Brussels, 2004.
- FHWA – Federal Highway Administration. *Status of the nation's highways, bridges, and transit: Conditions and performance*. Relatório publicado pelo U.S Department of Transport, Washington, 2010.
- Fontes, L. P. T. L. Otimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos. *Tese (Doutorado)*. Universidade do Minho/ Universidade Federal de Santa Catarina, 2009
- Hajj, E. Y. et al. Impact of rich-bottom design in asphalt pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 4, n. 6, p. 313-323, 2011
- Khalid, H. A. Comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials. In: *Materiais and Structures/Matériaux et Constructions*, v. 33, n. 231, p. 457-465. 2000
- LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. *Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud. Groupe de travail RST 221 Formulation des enrobés à chaud. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*. France, 2007.
- MELO, J. V. S. Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos. *Tese (Doutorado)*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. *PhD thesis*. North Carolina State University, 2015.
- PNCT – Plano Nacional de Contagem de Tráfego. Dados de Tráfego. Disponível em: <<http://servicos.Brasil.gov.br/dadospnct>>. Acesso em: 30 jun. 2017.