

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO COPOLÍMERO ETILENO ACETATO DE VINILA (EVA) DESCARTADO PELA INDÚSTRIA CALÇADISTA EM MISTURAS ASFÁLTICAS (PROCESSO SECO)

Jesner Sereni Ildefonso
José Leomar Fernandes Jr.
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados da pesquisa de misturas asfálticas modificadas, pelo processo seco, com o copolímero etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista. O EVA melhora algumas propriedades mecânicas das misturas asfálticas e, normalmente, é utilizada sua forma industrializada, pelo processo úmido. Nesta pesquisa utilizou-se: processo seco, por demandar menos energia e permitir o uso de mais resíduo; método Bailey para compor a curva granulométrica; simulação de dois tempos de envelhecimento de curto prazo. Os corpos-de-prova, moldados no compactador Marshall, foram submetidos aos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, “creep” estático e dinâmico, fadiga e desgaste. Os resultados mostraram que o EVA descartado pela indústria calçadista pode melhorar a resistência à fadiga e ao desgaste, apesar de tornar as misturas asfálticas mais susceptíveis à deformação permanente. O envelhecimento de curto prazo se mostrou importante, pois aumentou a resistência das misturas à fadiga e deformação permanente.

ABSTRACT

This paper presents results of the investigation of modified hot-mix asphalt, through the dry process, by the copolymer ethylene vinyl acetate (EVA) discarded by the footwear industry. The EVA improve some HMA mechanical properties and, normally, it is used an industrialized product and the wet process. In this research were used: dry process due to it demands less energy and it allow more residues; the Bailey Method to compose the aggregate gradation; study of two short-term aging. Marshall specimens were submitted to the indirect tensile test (Brazilian test), resilient modulus, static and dynamic creep, fatigue and loss due to abrasion. Test results showed that EVA discarded by the footwear industry can improve the resistance to the fatigue and waste, although make the HMA more susceptible to the permanent deformation. The short-term aging it was shown important, because improve the resistance of the HMA to the fatigue and permanent deformation.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os principais defeitos que afetam o desempenho de um pavimento, dois requerem atenção especial, devido à magnitude que ocorrem e, principalmente, porque são problemas estruturais: o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, que normalmente ocorre nos primeiros anos de vida do pavimento, devido à consolidação e tensões cisalhantes, e a fadiga da capa asfáltica, que geralmente ocorre em pavimentos mais envelhecidos (Roberts *et al.*, 1991).

Muitas pesquisas são direcionadas à melhoria do desempenho de pavimentos asfálticos, considerando não somente materiais convencionais (cimento asfáltico, agregado e filer mineral), mas também modificadores, os quais são incorporados na mistura pelo processo seco – em substituição à parte do agregado – ou pelo processo úmido – agindo como aditivo do ligante. A maioria das pesquisas tem direcionado seus esforços em modificar as misturas asfálticas pelo processo úmido, sendo borracha reciclada de pneus (BRP), estireno-butadieno-estireno (SBS), borracha-estireno-butadieno (SBR) e etileno acetato de vinila (EVA) os mais usados.

O EVA, objeto deste estudo, é um composto microporoso formado por resina de poli-etileno acetato de vinila, agente de expansão, agente reticulante e outros componentes poliméricos, como

borracha (MANO, 1998). O EVA é usado largamente pela indústria calçadista por ser um material leve e macio, com alta resistência ao desgaste, além de ser relativamente barato. Dados da Associação Brasileira de Empresas de Componentes para Couros, Calçados e Artefatos mostraram que no ano de 2001 o consumo mundial de calçados foi de mais de 6 pares por habitante por ano e que o EVA corresponde a aproximadamente 9% dos materiais de calçados. Infelizmente, por volta de 15% do EVA é descartado pela indústria calçadista, o que causa sérios problemas ambientais devido à sua disposição inadequada. A Figura 1 apresenta a produção brasileira de calçados de 2002 a 2005.

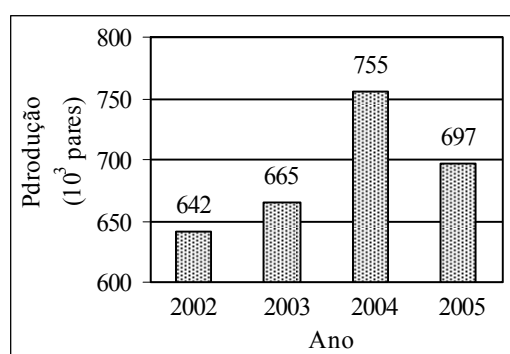


Figura 1: Produção brasileira de calçados em milhares de pares por ano.

Embora seja um material atóxico e seja classificado pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004) como resíduo sólido não perigoso, o EVA não é biodegradável e não há reutilização dos resíduos provindos da indústria calçadista. O seu descarte deve ser feito de acordo com regulamentações federais, estaduais ou locais, que recomendam que sejam aterrados ou incinerados, neste último caso com o risco de liberação de gases tóxicos, como CO₂, CO, fumaça, hidrocarbonetos e possibilidade de traços de acroleína.

Os principais objetivos deste trabalho foram: (i) estudar o efeito da porcentagem de resíduos a ser utilizada, em volume, em substituição ao agregado; (ii) quantificar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com EVA e comparar com misturas asfálticas “convencionais”; (iii) analisar a influência do tempo de envelhecimento de curto prazo (“tempo de digestão”).

2. MATERIAIS

2.1. Agregados

As características dos agregados de origem basáltica, provenientes da pedra Bandeirantes, localizada na cidade de São Carlos, são apresentadas na Tabela 1. A Figura 2 apresenta a graduação dos agregados utilizados para composição da curva granulométrica da pesquisa.

Tabela 1: Características dos agregados.

Característica		Pedra 1 (19,0 mm)	Pedrisco (9,5 mm)	Pó (4,75 mm)
Massa específica real; aparente	(g/cm ³)	2,865; 2,825	2,835; 2,809	2,896; 2,869
Massa específica solta; compactada	(g/cm ³)	1,306; –	1,380; 1,492	–; 1,914
Absorção	(%)	1,84	1,94	0,86
Abrasão “Los Angeles”	(%)	24,18		

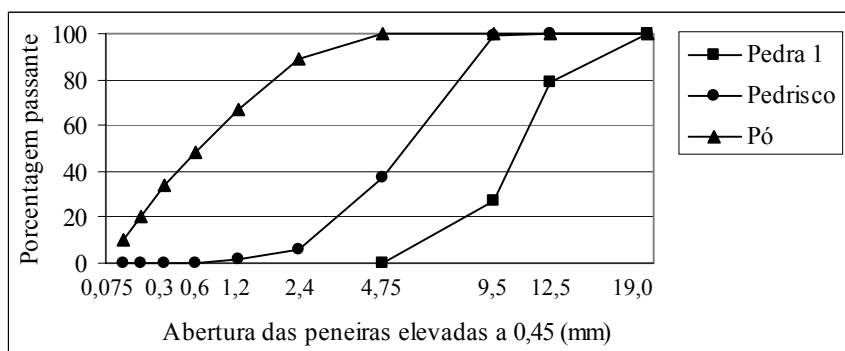


Figura 2: Graduação dos agregados.

2.2. Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi um cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70 da refinaria Henrique Lage e suas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da caracterização do CAP 50/70.

Característica	Resultado
Penetração: 25°C, 5s, 100g (0,1 mm)	57
Ponto de amolecimento (°C)	48,6
Ponto de fulgor (°C)	252
Índice de susceptibilidade térmica	-1,25
Viscosidade absoluta a 60°C (Poise)	2065
Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C (s)	162
Viscosidade Saybolt-Furol a 150°C (s)	73,2
Viscosidade Saybolt-Furol a 177°C (s)	28
Ductilidade a 25°C (cm)	110
Perda de massa – RTFOT (%)	0,105
Relação de penetração – RTFOT	0,5

2.3. Resíduo

O resíduo usado foi o copolímero EVA resultante da produção de palmilhas (Figura 3). Suas características são apresentadas na Tabela 3.



Figura 3: Resíduo gerado pela produção de palmilhas.

Tabela 3: Características do resíduo.

Característica	Resultado
Estado físico	Sólido
Ponto de amolecimento (°C)	50 – 90
Ponto de auto-ignição (°C)	340
Massa específica (g/cm ³)	0,927
Solubilidade	Insolúvel

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS

3.1. Graduação do resíduo

A primeira parte do programa experimental foi determinar a porcentagem de EVA a ser ensaiada e a sua graduação (4,75mm a 9,5mm, Figura 4).



Figura 4: Graduação do resíduo.

3.2. Curva granulométrica

Por meio do processo seco, as partículas de EVA substituíram as partículas de agregado do mesmo intervalo na graduação, em volume. A curva granulométrica composta para a pesquisa (Figura 5) foi determinada com o uso do método Bailey, o qual considera as massas específicas real, aparente, solta e compactada dos agregados (Vavrik, 2002; Cunha, 2004).

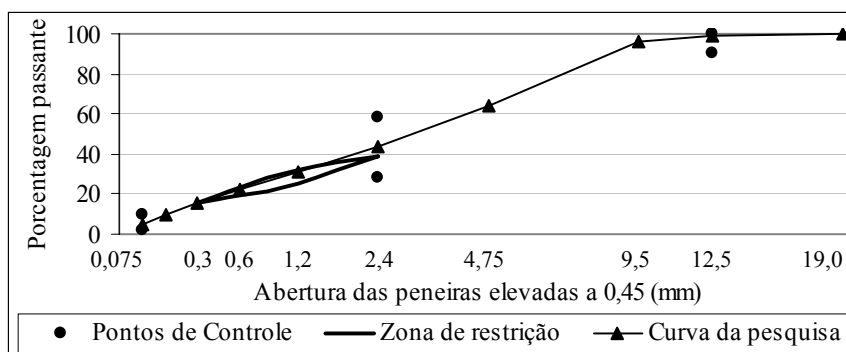


Figura 5: Curva granulométrica.

3.3. Método Marshall

A determinação do teor de asfalto de projeto foi feita de acordo com o método Marshall (ABNT, 1993). A Tabela 4 apresenta os intervalos de viscosidade recomendáveis para mistura e compactação e a temperatura que o CAP da pesquisa necessitou alcançar para se enquadrar neles.

Tabela 4: Intervalos recomendados para mistura e compactação.

Característica	Viscosidade Saybolt-Furol (sSF)	Temperatura (°C)
Mistura	125 – 155	149
Compactação	75 – 95	137

A Tabela 5 apresenta os resultados da dosagem Marshall realizado com 6 diferentes teores de CAP e 3 réplicas cada. O critério para determinação do teor de projeto de CAP foi o volume de vazios (Vv) em 4%, embora os seguintes parâmetros também foram verificados: densidade aparente (D), densidade máxima teórica (DMT), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), estabilidade (E) e fluência (F).

Tabela 5: Parâmetros da dosagem Marshall.

CAP (%)	Agregado (%)	D	DMT	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (N)	F (mm)
4,5	95,5	2,428	2,647	8,26	19,10	56,74	11636	2,62
5,0	95,0	2,445	2,624	6,84	18,97	63,92	12604	2,79
5,5	94,5	2,476	2,603	4,86	18,37	73,52	13861	2,87
6,0	94,0	2,490	2,581	3,53	18,35	80,77	14402	3,12
6,5	93,5	2,492	2,560	2,64	18,71	85,88	13139	3,39
7,0	93,0	2,486	2,539	2,06	19,33	89,34	12074	3,63

3.4. Resistência à tração por compressão diametral estática (RT)

O ensaio de RT foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 138/94 (DNER, 1994). Os resultados médios das RT (3 corpos-de-prova – CP) são apresentados na Figura 7 e na Tabela 6, que também apresenta os respectivos desvios-padrão (DP).

Tabela 6: Resultados do ensaio de RT.

Env. (h)	0				2				4			
EVA (%)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
RT (MPa)	1,234	1,036	0,946	0,825	1,260	1,211	1,103	1,050	1,289	1,268	1,240	1,119
DP (%)	0,09	4,50	0,65	6,56	0,51	1,44	2,09	2,18	4,30	4,65	1,23	3,56

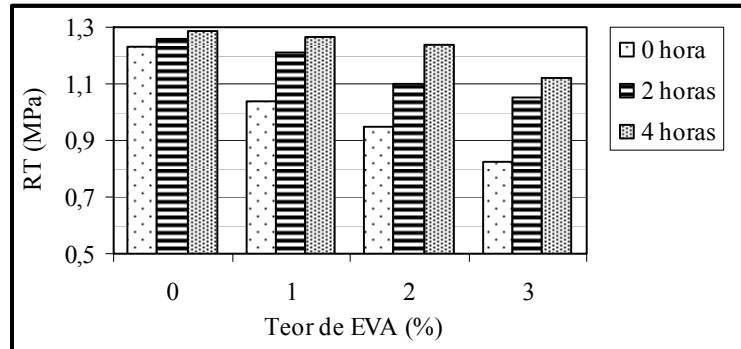


Figura 7: Resultados dos ensaios de RT.

A análise da variância e o teste F de Snedecor, considerando um nível de significância (α) de 0,5%, possibilitaram obter a Equação 1 ($R^2 = 0,94$) por regressão, a qual expressa a RT em função do teor de EVA (E) em porcentagem e do tempo de envelhecimento (T) em horas.

$$RT(MPa) = 1,089 - 0,087 \times P_l(T) + 0,137 \times P_l(E) - 0,016 \times P_q(E) \quad (1)$$

Em que: $P_l(T) = (T - 2)$ $P_l(E) = \left(\frac{E - 2}{2} \right)$ $P_q(E) = 3 \times \left[\left(\frac{E - 2}{2} \right)^2 - \frac{2}{3} \right]$

3.5. Módulo de resiliência por compressão diametral (MR)

O ensaio de MR foi realizado a 25°C, por tração indireta. Os resultados são apresentados na Tabela 7 e na Figura 8.

Tabela 7: Resultados do ensaio de MR.

Env. (h)	0				2				4			
EVA (%)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
MR (MPa)	7363	5660	5057	3191	7534	6014	6831	4413	7493	8036	5990	4426
DP (%)	2,80	3,76	2,98	4,04	2,68	1,71	1,79	1,90	3,58	4,84	2,56	4,12

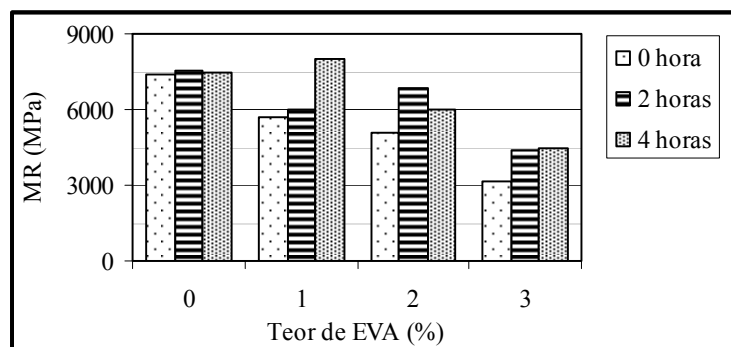


Figura 8: Resultados dos ensaios de MR.

O MR pode ser expresso pela Equação 2, com $R^2 = 0,99$.

$$R_M = 5513 - 1238 \times P_l(T) - 223 \times P_q(T) + 757 \times P_l(E) - 120 \times P_q(E) - 285 \times P_l(T) \times P_l(E) - 240 \times P_l(T) \times P_q(E) + 145 \times P_q(T) \times P_l(E) + 158 \times P_q(T) \times P_q(E) \quad (2)$$

Em que: $P_q(T) = 3 \times \left[(T - 2)^2 - \frac{2}{3} \right]$

3.6. Vida de fadiga

Para os ensaios de fadiga foram consideradas tensões de 10%, 20%, 30% e 40% da RT da mistura de controle de mesmo tempo de envelhecimento. O critério de parada foi a ruptura ou deslocamento acumulado de 6 mm do CP. Os resultados são apresentados nas Figuras 9 a 11.

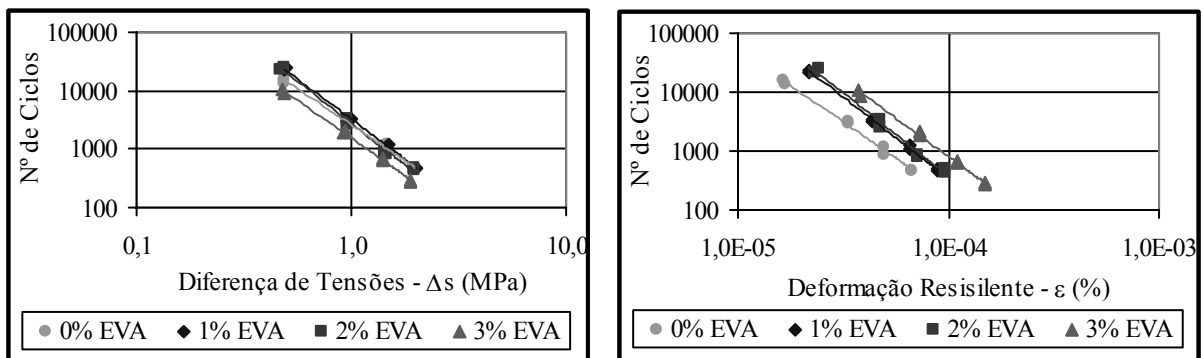


Figura 9: Ensaios de fadiga – 0 hora de envelhecimento.

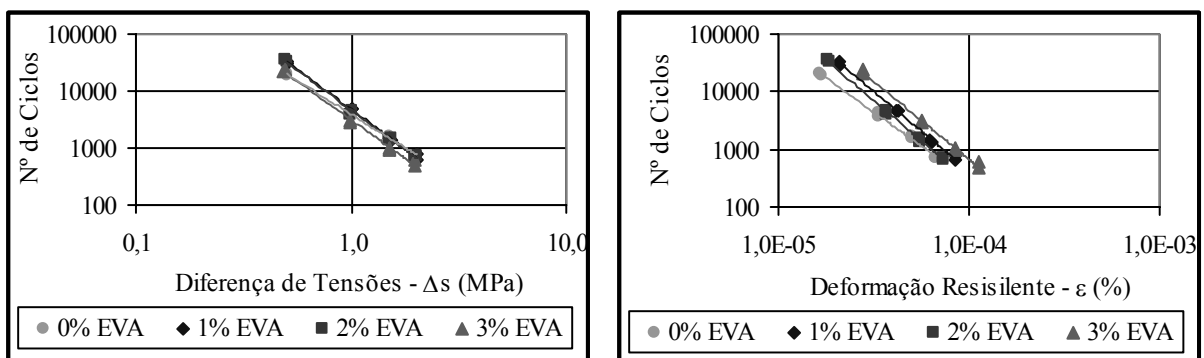


Figura 10: Ensaios de fadiga – 2 horas de envelhecimento.

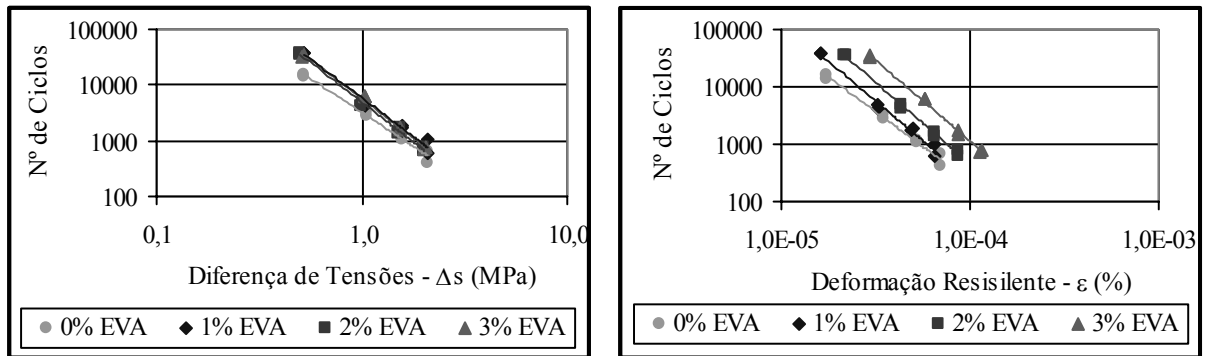


Figura 11: Ensaios de fadiga – 4 horas de envelhecimento.

Os modelos de fadiga foram determinados utilizando-se as diferenças de tensões ($\Delta\sigma$, dada pela diferença entre as tensões de tração e compressão) e as deformações resilientes (ε), com as curvas exponenciais expressas nas Equações 3 e 4. A Tabela 8 apresenta as constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 , que são parâmetros de caracterização dos materiais.

$$N_T = k_1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad (3)$$

$$N_S = k_3 \times \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{k_2} \quad (4)$$

Tabela 8: Valores das constantes das curvas de regressão dos ensaios de fadiga.

Env. (h)	0				2				4			
EVA (%)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
k_1	2627	3262	2761	1531	3940	4812	4654	3131	3221	5907	5422	5637
k_2	2,475	2,746	2,846	2,581	2,349	2,780	2,791	2,703	2,422	2,771	2,848	2,810
$k_3 (10^{-7})$	0,229	0,036	0,015	0,386	1,190	0,032	0,019	0,104	0,465	0,019	0,018	0,065
R^2	0,991	0,998	0,992	0,995	0,997	0,997	0,996	0,995	0,988	0,985	0,996	0,995

O programa computacional Elsym5 foi utilizado para comparar mecanisticamente os resultados dos ensaios de fadiga, com um pavimento hipotético com as características descritas na Tabela 9.

Tabela 9: Características do pavimento hipotético.

Estrutura	Camada	Espessura (cm)	Coefficiente de Poisson	Módulo de resiliência (kgf)
1	Capa	15	0,35	Variável
	Base	25	0,40	3000
	Sub-base	30	0,40	2000
	Subleito	Semi-infinito	0,45	500
2	Capa	10	0,35	Variável
	Base	15	0,40	2000
	Sub-base	20	0,40	1500
	Subleito	Semi-infinito	0,45	500

Os resultados das análises mecânicas da estrutura 1 e da estrutura 2 são apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10: Análise mecânica da vida de fadiga da estrutura 1.

Env. (h)	0				2				4			
EVA (%)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
$\Delta\sigma$	1,11	1,00	0,95	0,77	1,12	1,02	1,07	0,89	1,11	1,14	1,01	0,89
Nº ciclos	2045	3258	3230	3032	3041	4573	3820	4272	2482	4061	4673	7758

Tabela 11: Análise mecânica da vida de fadiga da estrutura 2.

Env. (h)	0				2				4			
EVA (%)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
$\Delta\sigma$	1,20	1,79	1,70	1,38	2,02	1,84	1,94	1,60	2,01	2,07	1,83	1,60
Nº ciclos	473	660	606	671	757	888	735	876	592	785	875	1495

3.7. Desgaste por abrasão (ensaio Cantabro)

Neste ensaio, os CP foram colocados individualmente no equipamento de abrasão “Los Angeles”, sem as esferas. Foram dadas 300 revoluções a 33 rpm e a perda de massa por abrasão (desgaste) foi dada pela diferença entre a massa inicial e final do CP. Os resultados são apresentados na Tabela 12 e na Figura 12.

Tabela 12: Resultados dos ensaios Cantabro.

Env. (h)	0				2				4			
EVA (%)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
Desgaste (%)	4,2	3,1	2,1	1,4	4,3	3,3	2,4	1,9	4,4	3,8	2,7	2,4
DP (%)	0,41	0,48	0,35	0,38	0,14	0,37	0,16	0,06	0,32	0,23	0,27	0,12

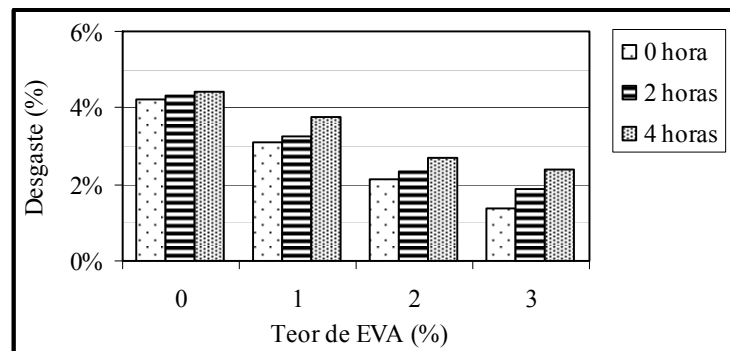


Figura 12: Resultados dos ensaios Cantabro.

Os valores de desgaste das misturas podem ser expressos pela Equação 5, com nível de significância de 1,0% e $R^2 = 0,85$.

$$\text{Desgaste (\%)} = 2,55 - 0,74 \times P_i(T) - 0,38 \times P_i(E) \quad (5)$$

3.8. “Creep” Estático

Os ensaios consistiram na aplicação de uma carga estática de 4 kgf/cm², valor este recomendado por Little *et al.* (1993). Os CP foram acondicionados a 40 °C com 1 hora de aplicação de carga e 15 minutos de recuperação. A Tabela 13 apresenta os resultados médios da deformação total (DT), deformação elástica (DE), deformação permanente (DP), recuperação (R), módulo de fluência aos 3600 s (MF₃₆₀₀) e aos 4500 s (MF₄₅₀₀) e a inclinação da curva (I).

Tabela 13: Resultados dos ensaios de “creep” estático.

Env. (h)	EVA (%)	DT _{CE} (%)	DE (%)	DP (%)	R (%)	MF ₃₆₀₀ (MPa)	MF ₄₅₀₀ (MPa)	I
0	0	0,209	0,176	0,034	84,9	194	1975	0,0395
	1	0,489	0,421	0,069	85,8	86	657	0,0430
	2	0,801	0,706	0,095	88,2	49	536	0,0598
	3	1,171	1,029	0,142	86,7	35	303	0,0787
2	0	0,224	0,186	0,038	82,6	186	1156	0,0340
	1	0,448	0,381	0,067	84,6	103	690	0,0382
	2	0,765	0,671	0,095	87,4	60	484	0,0454
	3	1,052	0,903	0,149	86,1	41	281	0,0606
4	0	0,248	0,200	0,048	80,8	163	983	0,0338
	1	0,343	0,287	0,057	83,6	117	848	0,0368
	2	0,671	0,577	0,095	85,5	63	436	0,0424
	3	0,947	0,796	0,151	84,3	42	281	0,0535

De acordo com Little *et al.* (1993), as misturas de controle são resistentes a tráfegos de muito alta intensidade ($N > 10^6$). Todas as misturas com 1% de EVA e as misturas com 2% de EVA envelhecidas 2 e 4 horas são resistentes a tráfegos de alta intensidade ($5 \times 10^5 \leq N \leq 10^6$). As misturas com 2% de EVA sem envelhecimento e as misturas com 3% de EVA são resistentes a tráfegos de baixa intensidade ($N < 10^5$). As Equações 6 a 11 expressam os resultados dos ensaios, seguidas dos respectivos nível de significância e coeficiente de determinação.

$$DT_{CE} (\%) = 0,739 + 0,309 \times P_l(T) - 0,089 \times P_l(E); \alpha = 5,0\% \text{ e } R^2 = 0,76 \quad (6)$$

$$DE (\%) = 0,635 + 0,264 \times P_l(T) - 0,091 \times P_l(E); \alpha = 2,5\% \text{ e } R^2 = 0,76 \quad (7)$$

$$DP (\%) = 0,102 + 0,042 \times P_l(T); \alpha = 1,0\% \text{ e } R^2 = 0,76 \quad (8)$$

$$MF_{3600} (MPa) = 66,3 - 31,3 \times P_l(T) + 4,5 \times P_q(T) + 8,6 \times P_l(E); \alpha = 5,0\% \text{ e } R^2 = 0,84 \quad (9)$$

$$MF_{4500} (MPa) = 506,5 - 214,6 \times P_l(T); \alpha = 1,0\% \text{ e } R^2 = 0,70 \quad (10)$$

$$I = 0,0510 - 0,0125 \times P_l(T) - 0,0081 \times P_l(E) - 0,0047 \times P_l(T) \times P_l(E); \alpha = 2,5\% \text{ e } R^2 = 0,82 \quad (11)$$

3.9. “Creep” dinâmico

Os ensaios foram semelhantes aos de “creep” estático, com exceção que a carga aplicada nos CP foi dinâmica, com 0,1 s de carregamento e 0,9 s de recuperação, em cada um dos 300 ciclos do acondicionamento e dos 5000 ciclos do ensaio. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados dos ensaios de “creep” dinâmico.

Env. (h)	EVA (%)	DT _{CD} (%)	MF _{CD} (MPa)	I _{CD}
0	0	0,719	59,72	0,3870
	1	1,494	27,34	0,4858
	2	2,026	20,61	0,4920
	3	2,266	17,97	0,5566
2	0	1,136	38,48	0,5073
	1	1,212	34,76	0,4593
	2	1,761	27,19	0,4657
	3	2,120	19,30	0,5192
4	0	0,966	45,85	0,5142
	1	1,176	35,45	0,4220
	2	1,470	31,52	0,4321
	3	1,863	25,15	0,5037

A deformação total das misturas aumentou com o aumento do teor de EVA, para os mesmos tempos de envelhecimento, com as misturas modificadas apresentando menor deformação total para maiores tempos de envelhecimento. Na condição 0 hora de envelhecimento e 3% de teor de EVA, romperam-se 2 dos três corpos-de-prova ensaiados, por deformação excessiva.

Os valores dos módulos de fluências das misturas foram menores quanto maior o teor de EVA nas misturas, para envelhecimentos semelhantes. A mistura de controle apresentou maior valor de módulo de fluência na condição 0 hora de envelhecimento, enquanto as misturas modificadas apresentaram maior valor com 4 horas de envelhecimento. As inclinações das curvas aumentaram conforme o aumento do tempo de envelhecimento para as misturas de controle e diminuíram para as misturas modificadas. O envelhecimento aumentou a resistência à deformação total e o módulo de fluência e diminui a inclinação da curva, nas misturas modificadas.

As Equações 12 a 14 expressam os resultados dos ensaios, seguidos dos respectivos nível de significância e coeficiente de determinação.

$$DT_{CD}(\%) = 1,767 + 0,481 \times P_l(T) - 0,145 \times P_l(E); \alpha = 5,0\% \text{ e } R^2 = 0,71 \quad (12)$$

$$MF_{CD} = 25,81 - 7,02 \times P_l(T) - 3,36 \times P_l(E); \alpha = 2,5\% \text{ e } R^2 = 0,71 \quad (13)$$

$$I_{CD} = 0,4814 + 0,0354 \times P_l(T) + 0,0097 \times P_q(T) - 0,0228 \times P_l(E); \alpha = 2,5\% \text{ e } R^2 = 0,75 \quad (14)$$

4. CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que o EVA, na forma de resíduo da indústria calçadista, pode ser usado em misturas asfálticas, embora estudos adicionais sejam necessários para produção em escala.

O aumento do teor de EVA resultou em queda na RT das misturas, ainda assim todos os valores são aceitáveis com relação à norma. O tempo de envelhecimento resultou em ganho de RT, sendo mais pronunciado quanto maior o teor de EVA.

Os valores de MR foram encontrados nas misturas modificadas, com exceção da mistura com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento, indicando diminuição de flexibilidade.

A análise da vida de fadiga confirma a tendência de melhora com a incorporação de EVA; pois, exceto para as misturas com 1% de EVA e envelhecidas por 2 horas, o aumento do teor de EVA melhorou a resistência à fadiga, principalmente ao se considerar o envelhecimento de curto prazo, embora tenha resultado em maiores deformações resilientes.

As misturas com maiores teores de EVA apresentaram maiores deformações total e permanente; os valores dos módulos de fluência antes e depois da recuperação decresceram com o aumento do teor de EVA, indicando aumento da susceptibilidade das misturas modificadas à deformação permanente.

As misturas modificadas foram menos susceptíveis ao desgaste por abrasão que as misturas de controle, para todos os tempos de envelhecimento estudados.

Para pesquisas futuras, sugere-se o estudo de outras granulometrias de resíduo, os efeitos da absorção de ligante por parte do resíduo e as conseqüências do envelhecimento de longo prazo. Sugere-se, também, que sejam estudadas a adesão do ligante ao resíduo e a possível interação entre eles, ou seja, se o resíduo passa a trabalhar, em parte, pelo processo úmido. Finalmente, sugerem-se os ensaios de sensibilidade das misturas modificadas à umidade e o ensaio de “trilha de rodas” (simulador de tráfego LCPC), pois os ensaios de fluência por compressão uniaxial apresentam resultados muito dispersos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio à pesquisa, à Ipiranga Asfaltos S/A. pelo ligante doado e à pedreira Bandeirantes, pela doação dos agregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1993). *Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall*. NBR 12891/93. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1993.
- ABNT (2004). *Resíduos Sólidos*. NBR 10004/04. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSINTECAL (1999). *Associação Brasileira de Empresas de Componentes para Couros, Calçados e Artefatos*. Site da internet: www.assintecal.org.br.
- CUNHA, M.B. (2004). *Avaliação do Método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 105p. São Carlos, 2004.
- DNER (1994). Método de ensaio DNER-ME 138/94. *Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.
- LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W.; YOUSSEF, H. (1993). *Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential*. Transportation Research Record, n.1417, p.49-57.
- MANO, E.B. (1998). *Introdução a polímeros*. Ed. Edgard Blücher Ltda. 111p. São Paulo, 1988.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. (1991). *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. 1ª ed. Napa Education Foundation. Lenham, Maryland, 1991.
- VAVRIK, W.R.; HUBER, G.A.; PINE, W.J.; CARPENTER, SH.; BAYLEY, R. (2002). *Bailey method for gradation selection in HMA mixture design*. Transportation Research Record, Circular nº E-C044. 2002.

Jesner Sereni Ildefonso (eng_jesner@yahoo.com.br)

José Leomar Fernandes Jr. (leomar@sc.usp.br)

Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – CEP 13566-590 – São Carlos, SP, Brasil