

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO E DA ADIÇÃO DE MODIFICADORES AO LIGANTE NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE SOFRIDA POR MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Jisela Aparecida Santanna-Greco

Glauco Tulio Pessa Fabbri

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

O trabalho trata da influência que a adição de modificadores ao asfalto e os processos de envelhecimento a curto e longo prazos exercem no comportamento de misturas asfálticas densas quanto à deformação permanente. Para a avaliação realizaram-se os ensaios de *creep* estático e dinâmico. Utilizou-se a técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários, através da qual foi montado um experimento que incluiu também as variações do teor de ligante na mistura e da distribuição granulométrica do agregado. Os resultados obtidos mostraram que o ensaio de *creep* estático não foi capaz de distinguir as propriedades de recuperação elástica dos asfaltos modificados, tampouco as mudanças de comportamento decorrentes do envelhecimento. Por outro lado, de acordo com os resultados do ensaio de *creep* dinâmico, a adição de modificadores ao asfalto e o enrijecimento decorrente do envelhecimento tornaram as misturas menos suscetíveis a deformações permanentes.

ABSTRACT

This work deals with the influence of modified binders and short-term and long-term aging procedures in the permanent deformation behavior of asphalt mixes. The analyses were performed based on the results of static and dynamic creep tests. Design and analysis techniques of fractional factorial experiments were used. The binder content and the aggregate gradation factors were also included in the experiment. The results showed that the static creep test is neither capable to distinguish the elastic return property of modified binders, nor the current behavior changes caused by the aging. On the other hand, the dynamic creep test results showed that the addition of modifiers to the binder and the hardening, caused by the aging, made mixes less susceptible to permanent deformations.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho estrutural e a durabilidade de revestimentos asfálticos podem ser melhorados através de escolhas adequadas dos materiais utilizados em sua composição e dos métodos construtivos adotados. São vários os fatores que afetam o desempenho das misturas asfálticas empregadas nos revestimentos, incluindo as características físicas dos materiais que as compõem; a dosagem desses materiais; a duração e as condições de temperatura dos processos de mistura em usina, transporte, espalhamento e compactação da camada asfáltica; o grau de compactação da mistura; e as condições ambientais do local onde o pavimento construído permanecerá em serviço.

Nesse trabalho focalizaram-se as características das misturas relacionadas à estabilidade, ou seja, à resistência que as misturas compactadas oferecem a deformações permanentes excessivas. Dentre os fatores citados foram selecionados para estudo o tipo e o teor do ligante asfáltico, a distribuição granulométrica do agregado e as condições de envelhecimento da mistura a curto e longo prazos.

A influência da variação desses fatores na estabilidade das misturas compactadas foi avaliada através da montagem de um programa experimental, utilizando-se a técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários. Dessa forma foram feitas variações propositalmente nas variáveis de entrada ou fatores influentes, com o objetivo de se identificar as razões da variação das respostas ou variáveis de saída, medidas através dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica. A significância do efeito da variação de cada fator e

dos efeitos de interação entre os fatores na variação dos parâmetros de ensaio foi estimada através do método de análise de variância. Foram montados também modelos estatísticos de comportamento, que facilitaram a visualização dos efeitos da variação dos fatores estudados no comportamento das misturas quanto à deformação permanente.

2. ENVELHECIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Misturas asfálticas, quando expostas às condições ambientais, sofrem modificações em suas propriedades, verificadas pelo enrijecimento e pelo aumento de sua fragilidade. Essas modificações, denominadas envelhecimento, tornam as misturas mais suscetíveis à desagregação e consequentemente aos efeitos da umidade.

O envelhecimento de misturas asfálticas durante sua vida útil ocorre em duas etapas principais. Durante a fase de mistura dos materiais em usina e posterior construção do pavimento ocorre o processo inicial de envelhecimento, denominado envelhecimento a curto prazo, com perda de componentes voláteis e oxidação do asfalto enquanto a mistura está quente. Uma vez construído o pavimento, a mistura asfáltica ficará exposta às condições climáticas do local, sofrendo o que se denomina envelhecimento a longo prazo.

Dentre as causas do envelhecimento de misturas asfálticas destaca-se a oxidação do asfalto pela reação com o oxigênio da atmosfera. Com a oxidação ocorre o aumento da viscosidade devido ao aumento das forças de interação molecular, resultante da introdução de oxigênio, uma vez que este possui natureza polar. Entretanto, embora o aumento da viscosidade esteja relacionado com a quantidade de oxidação ocorrida, de acordo com Petersen (1990) a resposta do asfalto em termos de mudança de viscosidade depende também da capacidade apresentada pela fase solvente do asfalto de manter os componentes polares dispersos durante a oxidação, reduzindo seu efeito no aumento da viscosidade.

Além da oxidação, outras causas de envelhecimento são a ação da luz, principalmente da faixa ultravioleta de radiação, e a perda de componentes oleosos do asfalto por absorção pelo agregado poroso. Button (1996) demonstrou, através da teoria de propagação de ondas de luz, que a radiação ultravioleta quimicamente ativa atinge apenas cerca de dois micrômetros da película asfáltica. Entretanto, a ação da radiação ultravioleta sobre o asfalto provoca a formação de compostos solúveis em água. Dessa forma, o ciclo natural das condições climáticas, com chuvas alternadas por sol, pode ter um efeito erosivo sobre o topo da camada de revestimento asfáltico exposta diretamente à luz solar.

A importância de se realizar testes de envelhecimento com a mistura asfáltica e não apenas com o ligante foi constatada por Sosnovske *et al.* (1993), cujos resultados mostraram que a suscetibilidade das misturas asfálticas ao envelhecimento depende dos tipos de asfalto e agregado utilizados, bem como da adesão entre ambos. Segundo esses autores, quanto maior a adesão entre o asfalto e o agregado utilizados, maior a resistência ao envelhecimento apresentada pela mistura asfáltica.

3. ENVELHECIMENTO DE ASFALTOS MODIFICADOS

Melhorias na qualidade dos materiais utilizados para a construção de revestimentos asfálticos têm sido obtidas com a utilização de misturas asfálticas compostas por ligantes modificados. Bahia *et al.* (1998) procuraram identificar os modificadores mais utilizados como aditivos ao asfalto para fins de pavimentação e concluíram que os polímeros mais utilizados pertencem à

classe dos elastômeros, destacando-se o SBS (estireno butadieno estireno), o SBR (borracha estireno butadieno) e a borracha de pneus descartados moída. Outro polímero também bastante utilizado é o EVA (etileno acetato de vinila), pertencente ao grupo dos plastômeros.

Diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de avaliar o desempenho de misturas compostas por asfaltos modificados. Estudos realizados em pistas experimentais têm demonstrado que, em temperaturas elevadas, misturas com asfaltos modificados mostram-se mais resistentes a deformações permanentes. Segundo Liang e Lee (1996), asfaltos modificados parecem apresentar melhor resistência à deformação permanente do que asfaltos convencionais em virtude da maior resposta elástica apresentada pelos primeiros.

Quanto ao efeito do envelhecimento no comportamento de misturas com asfaltos modificados, têm sido obtidos resultados divergentes. Algumas pesquisas têm constatado que misturas com asfaltos modificados sofrem de forma mais significativa os efeitos do envelhecimento do que misturas com asfaltos convencionais, como por exemplo a pesquisa de Liang e Lee (1996), que tratou do comportamento de misturas com asfalto-borracha.

Leite (1999) mostrou que asfaltos modificados com o copolímero SBS não oferecem boa resistência ao envelhecimento, pois o SBS degrada quando exposto aos efeitos do calor e do ar, em virtude da quebra de ligações insaturadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Morilha Jr e Trichês (2003). Coplantz *et al.* (1993), entretanto, constataram que misturas compostas por asfalto modificado com SBS apresentam maior resistência ao envelhecimento.

Misturas compostas por asfaltos modificados com EVA e com borracha moída de pneus, entretanto, apresentaram aumento da recuperação elástica após serem submetidas a processos de envelhecimento, nos estudos conduzidos por Morilha Jr. e Trichês (2003). No caso de asfaltos modificados com EVA, a explicação encontrada está na não existência de ligações duplas em suas moléculas. No caso de asfaltos modificados com borracha, segundo os autores, o aumento da recuperação elástica provavelmente ocorreu em virtude do aquecimento proporcionar uma maior interação entre as moléculas de borracha e asfalto, o que pode dar continuidade ao processo de fusão, melhorando consequentemente a recuperação elástica.

Verificou-se assim a ausência de consenso quanto à influência da adição de modificadores nos processos de envelhecimento sofridos pelas misturas asfálticas. Dessa forma, embora as propriedades mecânicas de misturas compostas por asfaltos modificados estejam sendo estudadas por inúmeras pesquisas, a mudança de seu comportamento ao longo do tempo, denominada envelhecimento, ainda precisa ser melhor investigada.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Selecionaram-se para estudo um asfalto convencional (CAP 20) e dois asfaltos modificados, todos fornecidos pela Continental Asfaltos. Os asfaltos modificados utilizados foram CAP 20 modificado com 4,5% do polímero SBS e CAP 20 modificado com 20% de borracha reciclada de pneus. O polímero SBS foi escolhido por conferir ao ligante aumento do intervalo de plasticidade e diminuição da suscetibilidade térmica. Quanto à borracha moída de pneus descartados, sua escolha deve-se principalmente ao ganho ambiental proporcionado pela incorporação desse resíduo a revestimentos asfálticos. As características dos ligantes utilizados encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos ligantes testados

Característica	tipo de ligante		
	CAP20	CAP20 com 4,5% do polímero SBS	CAP20 com 20% de borracha
Penetração, 25° C, 5s, 100 g	5,4 mm	4,7 mm	0,1 mm
Ponto de amolecimento	48°C	67,5°C	104°C
Índice de susceptibilidade térmica	-1,534	2,262	0,576
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	189 s	402 s	—
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	30 s	68 s	840 s
Ponto de fulgor	256 °C	278°C	241°C

Cada ligante foi empregado em quatro teores e foram adotadas duas curvas granulométricas, correspondentes aos centros das faixas B e C do DNER (1997). Os teores de ligante empregados em função da faixa granulométrica encontram-se apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Identificação dos teores de ligante em função da faixa granulométrica considerada

níveis da variável teor de ligante	teores de ligante para as respectivas faixas granulométricas	
	centro da faixa B	centro da faixa C
0	4,0%	5,0%
1	4,5%	5,5%
2	5,0%	6,0%
3	5,5%	6,5%

As misturas foram submetidas a processos de envelhecimento a curto e longo prazos. O processo de envelhecimento a curto prazo foi avaliado coletando-se amostras da mistura asfáltica logo após o processo de mistura e após um período de quatro horas de condicionamento da mistura solta em estufa ventilada, a 135°C (AASHTO, 2001).

O envelhecimento a longo prazo das misturas compactadas pelo método Marshall foi avaliado medindo-se suas propriedades logo após a compactação, ou seja, sem envelhecimento; após envelhecimento acelerado por 5 dias, em estufa ventilada, a 85°C; e após quatro meses de exposição dos corpos de prova ao tempo, sendo que semanalmente os mesmos foram invertidos e girados em 90°, para que os efeitos da exposição à radiação solar fossem sofridos em toda a superfície dos corpos de prova. Os métodos de envelhecimento utilizados foram escolhidos por serem os mais viáveis perante as condições de pesquisa disponíveis.

Um resumo das variáveis independentes ou fatores no experimento, incluindo o número de níveis ou situações em que cada fator foi considerado, pode ser encontrado na Tabela 3.

Tabela 3: Variáveis independentes ou fatores do experimento fatorial fracionário

fatores	designação dos fatores	níveis dos fatores
teor de ligante	A (X1 + X2)	4
condição de envelhecimento a longo prazo	B (X3 + X4)	3
tipo de ligante	C (X5 + X6)	3
distribuição granulométrica do agregado	X7	2
condição de envelhecimento a curto prazo	X8	2

O número de condições experimentais para o experimento completo, ou seja, o número de combinações entre os níveis dos fatores selecionados é dado por $4 \times 3 \times 3 \times 2 \times 2 = 144$ condições experimentais. Considerando-se que para cada condição experimental foram realizados 3 ensaios de *creep* estático e 3 ensaios de *creep* dinâmico, o experimento completo

envolveria 432 ensaios de *creep* estático e 432 ensaios de *creep* dinâmico. Para redução do número de ensaios foi empregada a técnica de fracionamento do experimento. Dessa forma, o experimento fatorial fracionário foi montado considerando-se uma fração de $\frac{1}{4}$ do experimento completo, resultando em 36 condições experimentais realmente testadas em laboratório. Com isso foi possível a realização de apenas 108 ensaios de *creep* estático e 108 ensaios de *creep* dinâmico, sem a redução do número de fatores considerados no experimento.

Como se trata de um experimento fatorial assimétrico, com fatores ocorrendo em dois, três e quatro níveis, cada fator com mais de dois níveis de variação foi transformado em dois fatores de dois níveis, para acomodação do experimento fatorial assimétrico em um experimento fatorial em dois níveis, que possui como vantagens maior simplicidade de planejamento e análise. Assim, o fator *A* foi substituído pelas variáveis auxiliares em dois níveis *X1* e *X2*, o fator *B* foi substituído por *X3* e *X4*, e o fator *C*, por *X5* e *X6*, conforme descrito na Tabela 3.

Para montagem do experimento fatorial fracionário e escolha das 36 condições experimentais que seriam testadas em laboratório, procedeu-se do seguinte modo. Inicialmente construiu-se um experimento fatorial completo com as variáveis *A*, *B* e *C*, representando-se cada uma dessas variáveis pelas respectivas variáveis auxiliares em dois níveis. Em seguida foram introduzidas ao experimento as variáveis *X7* e *X8*, porém sem o aumento do número de condições experimentais. Para isso os níveis dessas variáveis foram acoplados a interações entre variáveis já introduzidas ao experimento. Dessa forma, os níveis da variável *X7* foram determinados pela interação *X1X2X3X4* e os níveis da variável *X8*, pela interação *X3X4X5X6*.

Nesse experimento fracionado alguns efeitos encontram-se acoplados ou “confundidos”. Os padrões de acoplamento encontram-se apresentados na Tabela 4. Nessa tabela, a primeira linha indica que o efeito do fator *A* confunde-se com o efeito da interação entre os fatores *B* e *X7* e também se confunde com as interações *ABCX8* e *CX7X8*. As demais linhas da tabela podem ser interpretadas de forma semelhante.

Tabela 4: Padrões de acoplamento para o experimento fracionário $\frac{1}{4} 4 \times 3^2 \times 2^2$

padrões de acoplamento	
A = BX7 = ABCX8 = CX7X8	AX8 = BX7X8 = ABC = CX7
B = AX7 = CX8 = ABCX7X8	BC = ACX7 = X8 = ABX7X8
C = ABCX7 = BX8 = AX7X8	BX7 = A = CX7X8 = ABCX8
X7 = AB = BCX7X8 = ACX8	BX8 = AX7X8 = C = ABCX7
X8 = ABX7X8 = BC = ACX7	CX7 = ABC = BX7X8 = AX8
AB = X7 = ACX8 = BCX7X8	CX8 = ABCX7X8 = B = AX7
AC = BCX7 = ABX8 = X7X8	X7X8 = ABX8 = BCX7 = AC
AX7 = B = ABCX7X8 = CX8	

A escolha da fração de $\frac{1}{4}$ do experimento fatorial $4 \times 3^2 \times 2^2$ encontra-se representada na Figura 1, na qual as condições experimentais selecionadas para teste foram marcadas por “x”. Nessa figura os tipos de ligante foram indicados por *conv*, *pol* e *bor*, significando asfalto convencional, asfalto modificado com polímero e asfalto modificado com borracha, respectivamente. Os teores de ligante, indicados por 0, 1, 2 e 3, foram anteriormente descritos na Tabela 2.

		sem env. a longo prazo				env. a longo prazo acelerado em estufa				env. a longo prazo por exposição ao tempo			
		sem env. a curto prazo		4 h de env. a curto prazo		sem env. a curto prazo		4 h de env. a curto prazo		sem env. a curto prazo		4 h de env. a curto prazo	
		B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C
teor 0	conv				x	x							x
	pol		x					x			x		
	bor				x	x							x
teor 1	conv			x			x					x	
	pol	x							x	x			
	bor			x			x					x	
teor 2	conv			x			x					x	
	pol	x							x	x			
	bor			x			x					x	
teor 3	conv				x	x							x
	pol		x					x			x		
	bor				x	x							x

Figura 1: Escolha de ¼ do experimento fatorial $4 \times 3^2 \times 2^2$

A resistência das misturas a deformações permanentes foi avaliada através dos ensaios de *creep* estático e dinâmico, realizados em equipamento composto por uma prensa pneumática com carregamento controlado através de um relé programável, uma célula de carga e dois LVDTs (*linear variable differential transducers*) para medição dos deslocamentos. Em virtude das características do equipamento disponível para a realização desta pesquisa, a leitura dos deslocamentos foi realizada colocando-se os LVDTs em contato com o cabeçote de carga, e não no centro dos corpos de prova, conforme recomendado por Vianna et al. (2003). Os ensaios foram realizados a 40°C e a carga de compressão aplicada foi de 0,4 MPa, recomendada por Little et al. (1993) por representar a tensão média no centro de uma camada asfáltica de pavimentos em serviço. A aquisição dos dados da célula de carga e dos LVDTs foi realizada automaticamente por um programa desenvolvido em LabView, versão 5.1. Um exemplo da curva deformação \times tempo obtida a partir dos dados de um ensaio de *creep* estático encontra-se ilustrado na Figura 2.

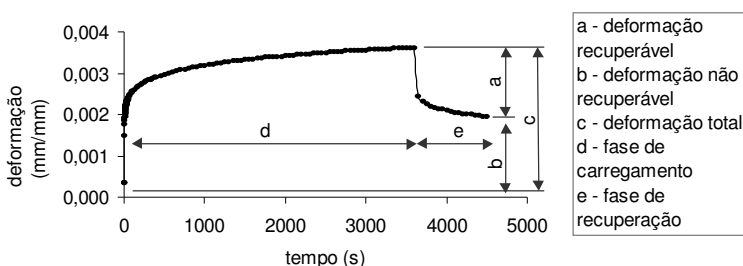


Figura 2: Curva deformação \times tempo típica de um ensaio de *creep* estático

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de *creep* estático e dinâmico são apresentados em forma de gráficos, construídos a partir de modelos de comportamento, que por sua vez foram determinados pela análise estatística dos dados.

5.1. Resultados do ensaio de *creep* estático

O ensaio de *creep* estático gera uma curva de fluência, ou curva de deformação *versus* tempo de ensaio, a partir da qual foram calculados os parâmetros de análise do ensaio. A deformação recuperável ou deformação elástica foi calculada pela diferença entre a deformação total ao final do ensaio de fluência e a deformação não recuperável ou deformação viscoplástica, que permanece após o ensaio de recuperação. A recuperação elástica foi calculada pela relação percentual entre a deformação recuperável e a deformação total. O módulo de fluência, ou relação entre a tensão aplicada e a deformação específica sofrida pelo corpo de prova (Von Quintus et al., 1991), foi calculado ao final do ensaio de fluência e a inclinação da curva deformação \times tempo, em escala log-log, foi calculada para o trecho entre 1000s e 3600s após o início do carregamento.

A partir da análise de variância realizada foram identificados os fatores cuja variação exerceu influência significativa nos parâmetros de resposta do ensaio de *creep* estático. Foram então montados modelos estatísticos de comportamento, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Modelos de regressão múltipla para os parâmetros do ensaio de *creep* estático

resposta (Y)	R ²	modelo (confiança de 95%)
deformação recuperável (mm/mm)	0,44	$Y = 0,0021 + 0,00004P_l(A) + 0,00026P_q(A) + 0,00023P(B) - 0,00025P(X7) - 0,000178P(X8)$
recuperação (%)	0,43	$Y = 61 - 3,25P_l(A) + 4,24P(B) - 1,92P(X8)$
módulo de fluência (MPa)	0,35	$Y = 121,3 - 7,6P_l(A) - 17,8P_q(A) - 11,5P(B) + 10,6P(X7)$
inclinação	0,45	$Y = 0,0947 + 0,0154P_l(A) + 0,0085P(B) + 0,0218P(C)$

No caso do fator quantitativo A, teor de ligante, as equações polinomiais variam conforme a distribuição granulométrica considerada e estão apresentadas na Tabela 6. As equações polinomiais correspondentes aos fatores qualitativos B, C, X7 e X8 são definidas conforme as convenções apresentadas na Tabela 7.

Tabela 6: Equações polinomiais para o fator quantitativo A

agregado faixa B	agregado faixa C
$P_l(A) = 4 \times A - 19$	$P_l(A) = 4 \times A - 23$
$P_q(A) = \left(\frac{A - 4,75}{0,5} \right)^2 - 1,25$	$P_q(A) = \left(\frac{A - 5,75}{0,5} \right)^2 - 1,25$

Tabela 7: Equações polinomiais correspondentes aos fatores qualitativos B, C, X7 e X8

fator	equação polinomial	variável auxiliar representativa do nível do fator	nível ou condição em que o fator é considerado
condição de env. a longo prazo	$P(B) =$	-1	sem envelhecimento
		0	5 dias em estufa ventilada a 85°C
		1	4 meses de exposição ao tempo
tipo de ligante asfáltico	$P(C) =$	-1	asfalto convencional
		0	asfalto modificado com polímero
		1	asfalto modificado com borracha
distribuição gran. agregado	$P(X7) =$	-1	centro da faixa B do DNER (1997)
		1	centro da faixa C do DNER (1997)
condição de env. a curto prazo	$P(X8) =$	-1	sem envelhecimento
		1	4 h em estufa ventilada a 135°C

Nas Figuras 3a e 3b encontram-se apresentados os resultados da deformação recuperável em função das condições de envelhecimento a curto e longo prazos, para misturas com agregados apresentando distribuições granulométricas correspondentes aos centros das faixas B e C do DNER (1997), respectivamente.

Os resultados mostraram que o processo de envelhecimento a curto prazo sofrido pelas misturas diminuiu a deformação recuperável apresentada pelas mesmas. Ao contrário, a deformação recuperável aumentou com o envelhecimento a longo prazo, sendo que os corpos de prova envelhecidos por exposição ao tempo apresentaram um aumento da deformação recuperável equivalente ao dobro do aumento apresentado por corpos de prova envelhecidos em estufa. Observou-se também que misturas com agregados da faixa B apresentaram deformação recuperável maior do que a apresentada por misturas com agregados da faixa C. O tipo de ligante utilizado não influenciou de forma significativa a variação da deformação recuperável apresentada pelas misturas.

Resultados semelhantes foram obtidos quando a análise foi realizada em função da recuperação. Constatou-se assim que o enrijecimento decorrente do envelhecimento aumentou a recuperação elástica apresentada pelas misturas, talvez por transformar parte da parcela da deformação que antes era viscosa, em deformação elástica retardada.

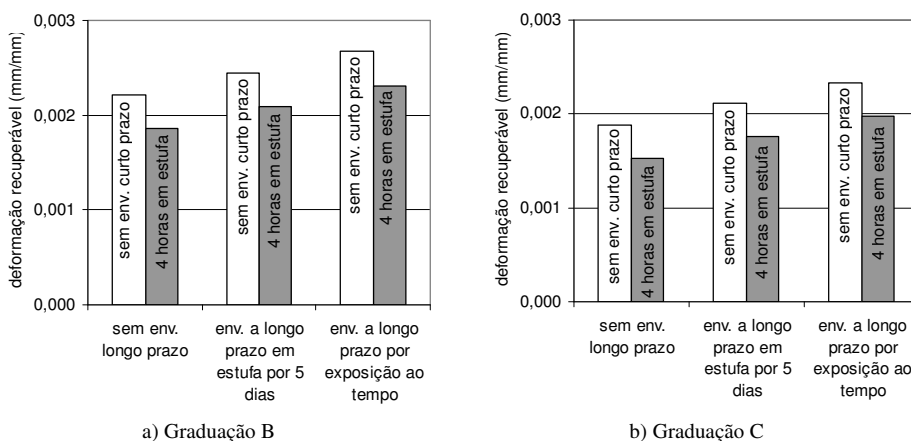


Figura 3: Variação da deformação recuperável do ensaio de *creep* estático em função das condições de envelhecimento a curto e longo prazos

O módulo de fluência das misturas diminuiu com o envelhecimento a longo prazo, conforme exposto na Figura 4. Como módulos menores significam deformações totais maiores, misturas compactadas envelhecidas ao tempo apresentaram as maiores deformações totais.

A inclinação da curva de fluência foi maior para misturas envelhecidas a longo prazo e para misturas compostas por asfaltos modificados, conforme pode ser observado na Figura 5. Isso significa que misturas compostas por asfaltos modificados foram mais suscetíveis a deformações permanentes do que misturas compostas por asfalto convencional. Como, de acordo com a literatura consultada, a adição de modificadores ao asfalto em geral aumenta a resistência das misturas a deformações permanentes, esse comportamento indica que o ensaio

de *creep* estático não foi adequado para distinguir as propriedades elásticas dos asfaltos modificados.

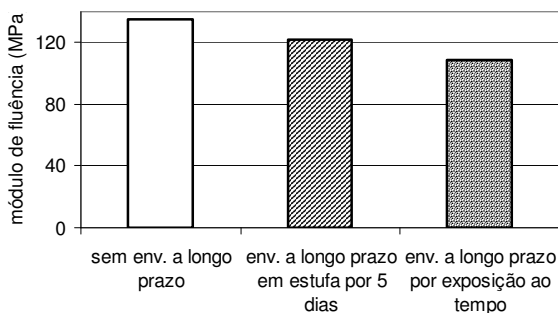


Figura 4: Variação do módulo de fluência do ensaio de *creep* estático em função da condição de envelhecimento a longo prazo

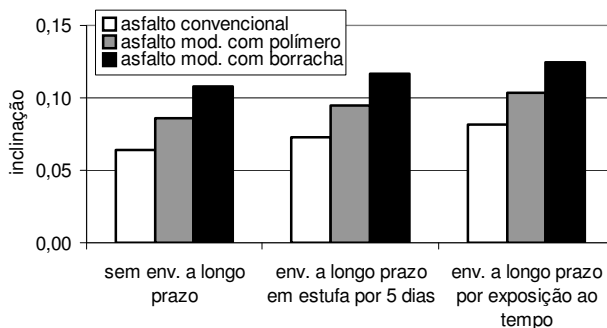


Figura 5: Variação da inclinação da curva de fluência do ensaio de *creep* estático em função do tipo de ligante e da condição de envelhecimento a longo prazo

5.2. Resultados do ensaio de *creep* dinâmico

Através do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica obtiveram-se os valores de deformação total do corpo de prova ao final dos 5000 ciclos de aplicação de carga; o módulo de fluência, calculado pela relação entre a tensão aplicada e a deformação total; e a inclinação da curva de fluência, calculada entre 100 e 5000 s de ensaio. Os modelos estatísticos de comportamento para os parâmetros do ensaio de *creep* dinâmico encontram-se apresentados na Tabela 8 e seguem as convenções anteriormente apresentadas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 8: Modelos de regressão múltipla para os parâmetros do ensaio de *creep* dinâmico

resposta (Y)	confiança	R ²	modelo
deformação total (mm/mm)	99% e 95%	0,52	$Y = 0,0030 + 0,00031P_i(A) - 0,00069P(B) - 0,00057P(C) + 0,00041P(X7) - 0,00036P(X8)$
módulo de fluência (MPa)	99% e 95%	0,58	$Y = 148 + 32,7P(B) + 22,5P(C) - 15,2P(X7)$
	99%	0,32	$Y = 0,162 - 0,024P(C) + 0,0146P(X7) + 0,0145P(X8)$
inclinação	95%	0,38	$Y = 0,162 + 0,013P_i(A) - 0,024P(C) + 0,0146P(X7) + 0,0145P(X8)$

Nas Figuras 6a, 6b, 6c e 6d estão apresentados os resultados da deformação total do ensaio de *creep* dinâmico, sendo que nas duas primeiras figuras os resultados referem-se a misturas com agregados da faixa B e, nas duas últimas, a misturas com agregados da faixa C. As misturas que tiveram seu comportamento apresentado nas Figuras 6a e 6c não foram envelhecidas a curto prazo, ao passo que as misturas das Figuras 6b e 6d, sim.

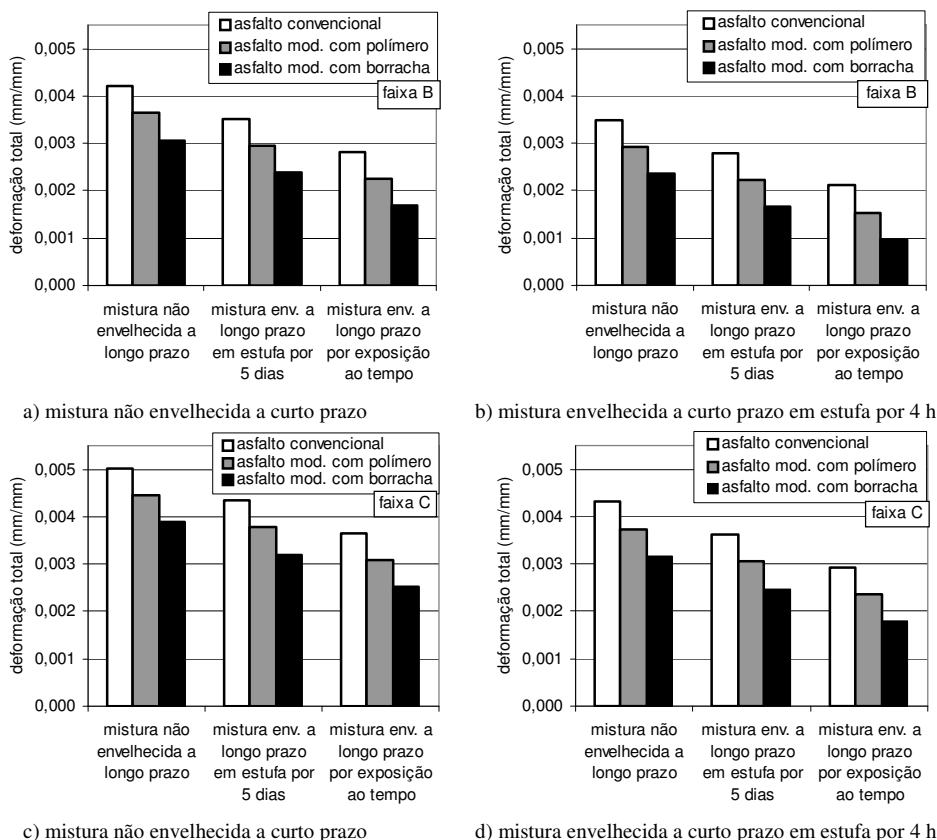


Figura 6: Variação da deformação total do ensaio de *creep* dinâmico em função do tipo de ligante e da condição de envelhecimento a longo prazo

Os resultados mostraram que os processos de envelhecimento a curto e longo prazo e a adição de modificadores diminuíram a deformação total apresentada pelas misturas compactadas, e que misturas com agregados da faixa B apresentaram deformações totais menores do que as apresentadas por misturas com agregados da faixa C. Embora a variação da deformação total com o teor de ligante na mistura não tenha sido representada graficamente, os resultados mostraram que a deformação total aumentou com o aumento do teor de ligante na mistura.

De forma correspondente à variação sofrida pela deformação total, o módulo de fluência aumentou com a adição de modificadores ao asfalto e com o envelhecimento a longo prazo sofrido pelas misturas compactadas, conforme Figura 7. Esse aumento significa redução da

suscetibilidade das misturas a deformações permanentes, nessas condições. Pode-se observar também que misturas com agregados da faixa B (Figura 7a) apresentaram módulos de fluência maiores do que os apresentados por misturas com agregados da faixa C (Figura 7b).

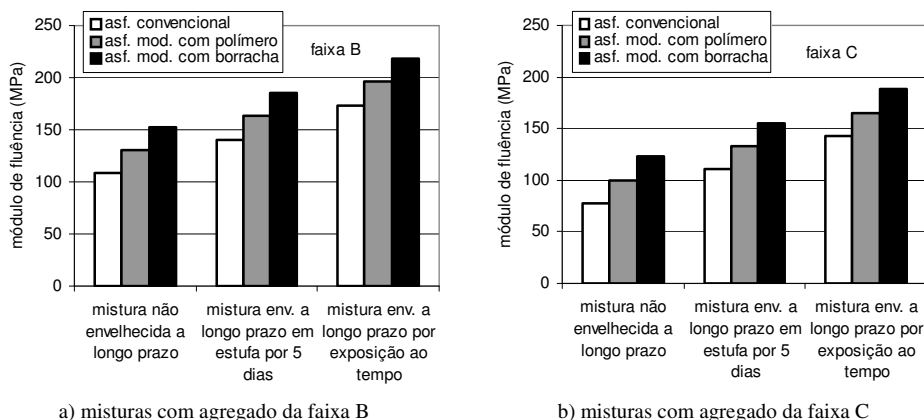


Figura 7: Variação do módulo de fluência do ensaio de *creep* dinâmico em função do tipo de ligante e da condição de envelhecimento a longo prazo

A inclinação da curva de fluência variou com o tipo de ligante e com a distribuição granulométrica do agregado, conforme Figura 8. Misturas com asfalto convencional e com agregados da faixa C apresentaram as maiores inclinações, o que significa menor resistência a deformações permanentes.

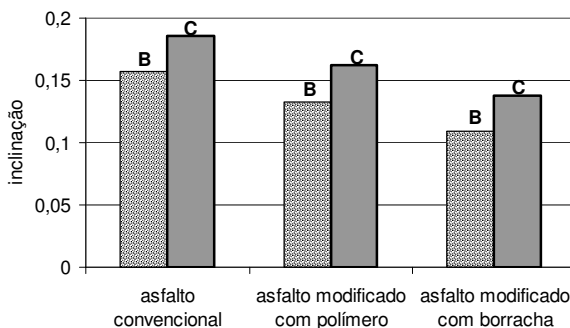


Figura 8: Variação da inclinação da curva deformação \times nº de ciclos do ensaio de *creep* dinâmico em função do tipo de ligante e da distribuição granulométrica do agregado

6. CONCLUSÕES

Através dos resultados do ensaio de *creep* estático constatou-se que o envelhecimento a longo prazo tornou as misturas mais suscetíveis a deformações permanentes e que a adição de modificadores ao asfalto não teve influência significativa nesse comportamento. Entretanto, de acordo com a literatura consultada, o envelhecimento e a adição de modificadores em geral aumentam a resistência das misturas a deformações permanentes. Concluiu-se assim que o ensaio de *creep* estático não foi adequado para a avaliação do comportamento das misturas

estudadas, pois as submete a um carregamento estático, dando lugar ao comportamento viscoso do material e a um possível esmagamento com o tempo de carregamento.

Por outro lado, a análise dos resultados do ensaio de *creep* dinâmico mostrou que o envelhecimento a curto e longo prazos, a adição de modificadores ao asfalto e a utilização de agregados com diâmetros maiores tornaram as misturas menos suscetíveis a deformações permanentes. Quanto à influência do tipo de modificador, a adição de 20% de borracha moída de pneus descartados proporcionou um aumento da resistência a deformações permanentes equivalente ao dobro do aumento proporcionado pela adição de 4,5% do polímero SBS.

Em resumo, concluiu-se que a resistência a deformações permanentes das misturas, inclusive daquelas compostas por asfaltos modificados, aumentou com o envelhecimento. Finalizando, cabe ressaltar que os modelos estatísticos apresentados foram construídos a partir dos dados laboratoriais obtidos nesta pesquisa e, portanto, seu uso deve restringir-se a comparações entre os materiais e os procedimentos utilizados no experimento realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2001) *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Edição publicada sob a designação PP2-00. American Association of State Highway and Transportation Officials, 3p.
- Bahia, H. U.; H. Zhai e A. Rangel (1998) Evaluation of Stability, Nature of Modifier, and Short-Term Aging of Modified Binders Using New Tests LAST, PAT, and Modified RTFO. *Transportation Research Record*, n. 1638, p. 64-71.
- Button, J. W. (1996) Permeability of Asphalt Surface Seals and Their Effect on Aging of Underlying Asphalt Concrete. *Transportation Research Record*, n. 1535, p. 124-130.
- Copland, J. S.; M. T. Yap e F. N. Finn (1993) *Review of Relationships Between Modified Asphalt Properties and Pavement Performance*. Publicação SHRP-A-631. Strategic Highway Research Program, 243p.
- DNER (1997) *Especificação de Serviço DNER-ES 313/97. Pavimentação – Concreto Betuminoso – Norma Rodoviária*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- Leite, L. F. M. (1999) *Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero*. 266p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Liang, R. Y. e S. Lee (1996) Short-Term and Long-Term Aging Behavior of Rubber Modified Asphalt Paving Mixture. *Transportation Research Record*, n. 1530, p. 11-17.
- Little, D. N.; J. W. Button e H. Youssef (1993) Development of Criteria to Evaluate Uniaxial Creep Data and Asphalt Concrete Permanent Deformation Potential. *Transportation Research Record*, n. 1417, p. 49-57.
- Morilha JR, A. e G. Trichês (2003) Análise Comparativa de Envelhecimento em Laboratório de Nove Ligantes Asfálticos. *Anais da 34ª Reunião Anual de Pavimentação*, Campinas, p. 110-128.
- Petersen, J. C. (1990) Effects of Physicochemical Factors on Asphalt Aging. *Serviceability and Durability of Construction Materials*, v. 1, p. 244-253.
- Sosnovske, D. A.; Y. AbWahab e C. A. Bell (1993) Role of Asphalt and Aggregate in the Aging of Bituminous Mixtures. *Transportation Research Record*, n. 1386, p. 10-21.
- Vianna, A. A. D; L. M. G. Motta; R. G. Domingues (2003) Ensaio de Compressão Axial de CBUQ – Uma Nova Técnica de Medição das Deformações. *Anais do XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Rio de Janeiro, v. 1, p. 747-752.
- Von Quintus, H. L.; J. A. Scherocman; C. S. Hughes; T. W. Kennedy (1991). *NCHRP Report 338: Asphalt-aggregate mix analysis system*, AAMAS. TRB, National Research Council, Washington, D.C.

Endereço dos autores

Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Departamento de Transportes – STT

Av. Trabalhador Sancarlenense, 400, Centro – Cep 13566-590 – São Carlos – SP

e-mail: glauco@sc.usp.br

santanna@sc.usp.br