

Estudo de Misturas Asfálticas com Ligante Modificado pelo Polímero EVA para Pavimentos Urbanos de Manaus - AM

Daniela M. G. D'Antona, Consuelo A. Da Frota
Grupo de Geotecnia, UFAM

Resumo: A presente pesquisa buscou soluções com materiais alternativos visando à construção de pavimentos urbanos para Manaus (AM) com maior vida útil e condizente com as suas condições de serviço, em particular, o seu desempenho mecânico frente às temperaturas regionais. Estudou-se o ligante regional, CAP 50/70, misturado com 4% do polímero EVA, e como partícipe em compósitos asfálticos. A incorporação do mencionado polímero teve como objetivo melhorar suas propriedades reológicas e, por conseguinte, o comportamento mecânico desse compósito – concreto asfáltico, empregado como revestimento nas vias urbanas da Capital do Estado do Amazonas. Os ligantes (virgem e modificado) foram caracterizados conforme a especificação da ANP e a metodologia *Superpave*. As misturas asfálticas foram avaliadas pelo ensaio de fluência por compressão axial, com carregamento dinâmico à temperatura de 40 °C. O material asfáltico modificado com EVA (AMP EVA) demonstrou melhores propriedades reológicas ou equivalentes ao asfalto convencional (REMAN), ao longo de todos os ensaios de caracterização. As misturas alternativas compostas com o CAP modificado (SEVA) obtiveram desempenho mecânico superior ao de misturas com cimento asfáltico habitualmente comercializado na região (SMAN).

Palavras-chave: *Ligante modificado, polímero EVA, mistura asfáltica, ensaio de compressão axial dinâmico.*

Study of Asphalt Mixtures Containing a Binder Modified with EVA Polymer for Use in Urban Pavements in Manaus

Abstract: In this research we investigated alternative materials to build urban pavements in Manaus, seeking for pavements with longer lifetime for usage and suitable mechanical properties to withstand the local temperatures. The asphaltic mixtures contained a regional binder, namely CAP 50/70, mixed with 4% of EVA polymer. The incorporation of the latter polymer was aimed at improving the rheological properties of asphaltic concrete used in roads in the Amazonas' capital. The asphalt binders (original and modified) were characterized in accordance with the ANP (National Petroleum Agency) specification and the Superpave methodology. The asphalt mixtures had their mechanical properties studied using creep dynamics at 40 °C. The EVA modified binder (AMP EVA) yielded either better rheological properties or properties equivalent to the conventional asphalt (REMAN) throughout all the characterization experiments. The alternative mixtures composed by the binder modified with 4% EVA (SEVA) had superior mechanical performance compared to mixtures made up with the binder commonly commercialized in the region (SMAN).

Keywords: *Modified binder, EVA polymer, asphalt mixture, creep dynamics.*

Introdução

As vias urbanas da capital do Estado do Amazonas mostram historicamente prematura deterioração. São diversas patologias associadas, destacando-se: afundamento plástico em trilha de roda ou deformação permanente – mormente, escorregamento no revestimento, depressões e trincas. Como principal causa, aludi-se o emprego de misturas betuminosas incompatíveis com as condições de serviço: compostas com excesso de agregados finos e de ligante, ausência de agregados graúdos, baixa aderência e coesão, e ligante com propriedades inadequadas à temperatura de campo – Manaus apresenta pavimentos, em geral, com temperaturas acima de 30 °C.

Em geral, as misturas asfálticas são submetidas a pesados e repetidos esforços pelo tráfego, podendo resultar em um acúmulo de deformações, que ao não retornarem totalmente ao seu estado inicial, geram as chamadas deformações plásticas ou permanentes. Tais problemas podem ser visualizados nos pavimentos por meio dos afundamentos em trilhas-de-roda, podendo, também, serem acompanhadas de escorregamento do revestimento asfáltico para o meio-fio da pista.

Manaus apresenta clima com temperaturas muito elevadas devido à sua proximidade à linha do Equador. Tal fato influen-

cia expressivamente no revestimento betuminoso devido, principalmente, o comportamento reológico do cimento asfáltico de petróleo, particularmente pela redução da sua viscosidade, tornando as misturas asfálticas mais suscetíveis à deformação permanente^[1].

A busca sempre constante de novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos levou ao desenvolvimento e uso de asfaltos modificados. A adição de polímeros aos ligantes asfálticos tradicionais, vem mostrando: maior coesão do ligante e adesão aos agregados, maior resistência ao envelhecimento e a redução da susceptibilidade térmica. Estas alterações contribuem para uma maior estabilidade em suas propriedades tornando o asfalto mais elástico ou mais duro, refletindo em maior resistência à fadiga e à deformação permanente^[2,3].

Estudos relacionados à incorporação do EVA ao ligante asfáltico indicam aumento da viscosidade e melhora no grau do desempenho do material betuminoso, devidas em parte à capacidade de solubilização do EVA nas frações saturadas do asfalto. Por outro lado os ensaios de envelhecimento acelerado mostraram que a presença do EVA reduz o processo de decomposição oxidativa do asfalto^[2,4].

Autor para correspondência: Daniela M. D'Antona, Departamento de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal do Amazonas, Cidade Universitária "Zeferino Vaz", Caixa Postal 6066, CEP: 13083-970, Av. Gen. Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 3000, Coroado, CEP: 69077-000, Manaus, AM, Brasil. E-mail: daniela_dantona@yahoo.com.br

Pautado no objetivo de aumentar a consistência do ligante sob altas temperaturas – caso de Manaus, optou-se, neste trabalho, adicionar o polímero EVA ao cimento asfáltico empregado regionalmente e avaliar suas propriedades (viscosidade, parâmetros viscoelásticos e rigidez) pelos métodos tradicionais (penetração, ponto de amolecimento, densidade e ponto de fulgor) e pelas especificações *Superpave*^[5], bem como, o seu desempenho como participe das misturas asfálticas, quanto à deformação permanente sob a temperatura de 40 °C.

As citadas especificações *Superpave*^[5] resultaram do Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária – *Strategic Highway Research Program* (SHRP), financiado pelo governo norte-americano em 1987 no valor de US\$ 150 milhões. Teve como objetivo a busca de um melhor desempenho em campo de misturas asfálticas, fundamentado, sobretudo, nas patologias quanto à deformação permanente, trincas a baixas temperaturas, envelhecimento, fadiga e descolamento por suscetibilidade à umidade. Concluído em março de 1993, tais especificações, no caso específico dos ligantes asfálticos, são baseadas em temperaturas máximas e mínimas dos pavimentos, bem como em ensaios reológicos segundo o desempenho em serviço. Classifica o cimento asfáltico de petróleo pelo grau de desempenho PG (*performance grade*). Por exemplo, um asfalto classificado como PG 64 -10, indica que o ligante é adequado para o uso à temperatura máxima de 64 °C e mínima de -10 °C.

Experimental

Materiais

As misturas pesquisadas foram do tipo concreto asfáltico (CA), também conhecidas como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), consistindo na combinação de agregados com graduação densa, uniformemente misturados e recobertos com ligante asfáltico, pré-misturado a quente em usina.

A composição mineral das misturas asfálticas constituiu-se pelo seixo rolado (agregado graúdo empregado regionalmente), areia de origem residual (agregado miúdo) e o cimento Portland (material de enchimento usual). Particularmente, o material aluvionar apresentou: a) superfície lisa e forma arredondada, características inerentes a esse material e responsáveis pelo menor intertravamento das partículas na mistura asfáltica, reduzindo, assim, a resistência ao cisalhamento; b) densidade relativa real e densidade aparente com valores iguais a 2,647 g.cm⁻³ e 2,629 g.cm⁻³, respectivamente (ASTM C128); c) absorção igual a 0,3% (ASTM C128); d) abrasão *Los Angeles* com valor de 35% (ASTM C131); e) textura classificando-o como pedregulho arenoso, possuindo a granulometria com menores diâmetros na faixa entre as peneiras 19,05 e 1,18 mm e, cerca de 20% de areia.

A areia de origem residual apresentou valores iguais a 2,677 e 2,648 g.cm⁻³ para as densidades relativas real e aparente (ASTM C127), respectivamente, e absorção de 0,4% (ASTM C127). Por outro lado, o cimento *Portland* obteve densidade igual a 3,133 g.cm⁻³ (ASTM D854).

Ligantes asfálticos

Na composição das misturas asfálticas fizeram parte dois ligantes: a) o cimento asfáltico de petróleo – CAP 50/70, empregado na construção das vias públicas manauaras e fornecido para a pesquisa em tela pela Refinaria Isaac Sabbá (REMAN) da empresa Petróleo Brasileiro S.A (Petrobrás); b) CAP 50/70 modificado com o polímero EVA^[6,7], sendo denominado neste trabalho como AMP EVA.

O copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA), nome comercial EVAX®, fabricado pela DuPont forneceu as seguintes características: 28% de teor de acetato de vinila, 0,951 g.cm⁻³ de densidade (ASTM D 1505), 82 °C de ponto de amolecimento (ASTM E 28) e 2,6 MPa de Resistência à tração (ASTM D 1708). Na sua incorporação ao CAP 50/70, utilizou-se um misturador constituído por um agitador mecânico, uma manta de aquecimento capaz de comportar um bécquer de 5 L e um controlador de temperatura. A homogeneização da mistura ocorreu durante duas horas segundo uma rotação de 300 RPM, sendo a mesma mantida a temperatura de 150 ± 5 °C.

Métodos

Caracterização dos Ligantes

Os experimentos foram realizados no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello (CENPES) da Petrobrás, na cidade do Rio de Janeiro, sendo os ligantes asfálticos caracterizados:

- segundo a forma tradicional, pelos ensaios: Densidade Relativa - NBR 6296/2004, Penetração - ABNT 6576/98, Ponto de Amolecimento - NBR 6560/2000 e Ponto de Fulgor - NBR 11341/ 2004, requeridos pela especificação brasileira – ANP 2005;
- conforme as especificações *Superior Performance Asphalt Pavements (Superpave)*^[5] do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), onde foram determinados: Ponto de Fulgor (garantia de segurança no manuseio), viscosidade pelo Viscosímetro Rotacional *Brookfield* (assegura adequado bombeamento, transporte e usinagem - ASTM D 4402), parâmetros viscoelásticos pelo Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (*Dynamical Shear Rheometer* - ASTM D 7175/2002), rigidez pelo Reômetro de Fluência em Viga (*Bending Beam Rheometer* - BBR), além do efeito quanto ao envelhecimento a curto e longo prazo pela Estufa de Filme Fino Rotativo (*Rolling Thin Film Oven Test*, RTFOT - ASTM D 2872) e Vaso de Envelhecimento Pressurizado (*Pressure Aging Vessel*, PAV), respectivamente.

Projeto de Mistura

Para o estudo do teor de ligante adotaram-se as seguintes premissas da especificação *Superpave*^[5]: a) utilização do Método *Rice* - ASTM D 2041, visando considerar a absorção do CAP pelos agregados, contribuindo, desta forma, para cálculos mais precisos das propriedades volumétricas; b) cálculo do teor de ligante de projeto para um valor de volume de vazios da mistura asfáltica igual a 4%; c) composições granulométricas abaixo da linha de densidade máxima e fora da zona de restrição.

Visando compor a mistura utilizou-se o método de *Bailey* para a seleção da graduação mineral, originalmente desenvolvido por Robert Bailey do Departamento de Transporte de Illinois (IDOT). Fundamenta-se num esqueleto de agregados objetivando resistir, principalmente, à deformação permanente – proposta do trabalho em pauta, de acordo com um adequado volume de vazios (Vv) e volume de agregado mineral (VMA)^[8]. Tais propriedades volumétricas também foram avaliadas conforme o designado pelo Instituto do Asfalto^[9].

Ensaio Mecânicos

Visando avaliar o desempenho das misturas asfálticas optou-se pelo ensaio de fluência, por compressão uniaxial dinâmica ou *creep* dinâmico, por ser capaz de detectar as diferenças de comportamento quanto à suscetibilidade à deformação permanente utilizando distintos ligantes^[1,10,11]. No citado experimento é possível obter

informações, devido aos ciclos de carga-d Descarregamento, que determinam as componentes elástica e plástica.

Realizaram-se os referidos experimentos no laboratório do Grupo de Geotecnia (GEOTEC) da Universidade Federal do Amazonas, por meio de uma prensa multifuncional do tipo *Universal Testing Materials* (UTM) ou Máquina Universal de Testes da marca IPC Global, inserida numa câmara de temperatura marca BASS, com capacidade para atingir valores de -15 a 85 °C. O mencionado equipamento possui mecanismos pneumáticos que possibilitam a aplicação de cargas dinâmicas, podendo-se variar tipos de pulsos, frequências e condições de confinamento, e apresenta interface computacional possibilitando a aquisição de dados^[10].

O ensaio de Compressão Axial Dinâmico (*Creep* Dinâmico) até o presente momento não é normalizado, e na presente pesquisa foi executado: a) em, pelo menos, 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 101,5 mm de diâmetro e altura variando entre 63 a 70 mm; b) a temperatura de 40 °C e por meio da aplicação de cargas de compressão axial cíclicas com pulsos na forma *haversine*; c) aplicando-se, inicialmente, uma carga pré-condicionante de 20 kPa por 10 minutos (600 ciclos) e, em seguida, o carregamento relativo à tensão axial (σ_{axial}) de 100 kPa (1 kgf.cm⁻²), durante 1 hora, equivalente a 3600 segundos, correspondendo a 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de descarregamento; d) obtendo-se as deformações por meio de LVDT's (*linear variable differential transducers*), assentados na face superior dos corpos de prova e em uma placa posicionada no topo da amostra, possibilitando, assim, uma distribuição uniforme da carga; e) finalizando o ensaio a remoção do carregamento, possibilitando, deste modo, a determinação da deformação permanente.

Resultados e Discussões

Caracterização do Ligante

Ensaio Tradicionais

A Tabela 1 apresenta os resultados alusivos aos ensaios tradicionais para as amostras do ligante convencional (REMAN) e modificado com 4% do polímero EVA (AMP EVA), referentes à condição virgem, ou seja, sem envelhecimento e, também, após simulação de envelhecimento em estufa RTFOT.

O ensaio de Penetração que consiste em uma medida indireta da consistência do ligante, devido à oxidação e perda de voláteis, mostrou que o envelhecimento acarretou endurecimento nas duas amostras, ou seja, ambas apresentaram redução da penetração. Os resultados presentes mostram, igualmente, que AMP EVA é mais consistente comparado ao REMAN, não obstante, tenha apresentado maior redução da penetração posterior ao envelhecimento. Tais resultados indicam bom desempenho relativo à resistência à deformação permanente.

Durante o desenvolvimento deste experimento, observou-se que ambos os ligantes atenderam aos limites especificados pela classificação que designa o CAP REMAM como CAP 50/70, ou seja, 50 a 70 décimos de milímetro para penetração e mínimo de 55% para a penetração retida (Tabela 1). No caso do cimento asfáltico modificado por polímero tipo III para uso em pavimentos a ASTM D 5841-95 especifica o intervalo de 30 a 150 décimos de milímetro, onde se enquadra o polímero EVA, a amostra AMP EVA apresentou valor da penetração segundo o especificado. Leite^[2], concernente a um CAP 20 com 5% EVA, obteve penetração igual a 55 décimos de milímetro, valor próximo ao determinado nesta pesquisa.

Outro experimento realizado neste trabalho diz respeito ao Ponto de Amolecimento, pelo método Anel e Bola, que indica: quanto

Tabela 1. Resultado dos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento e Envelhecimento.

Ligante	Penetração (0,1 mm)		Ponto de amolecimento (°C)		Variação de massa (%)
	Virgem	Após RTFOT	Virgem	Após RTFOT	
REMAN	56	40	53,2	59,2	0,091
AMP EVA	52	29	62,3	75,2	0,059

menor a temperatura do pavimento maior será a susceptibilidade do ligante ao afundamento de trilha de roda^[13]. Segundo a Tabela 2 a amostra AMP EVA apresentou maior valor de temperatura quando na condição virgem e após o envelhecimento na RTFOT, portanto, menos susceptível a deformações permanentes. Relativo a esse parâmetro a ANP especifica um valor mínimo de 46 °C para a classificação CAP50/70 na condição virgem e acréscimo, no máximo, igual a 8 °C após envelhecimento. Alusivo a tais valores ambos os ligantes pesquisados atenderam a temperatura mínima. Observa-se, também, que o cimento asfáltico modificado foi superior quanto ao valor mínimo especificado (51,7 °C) pela ASTM D5841-95. O aumento do PA, posterior ao envelhecimento, foi constatado de forma inequívoca em ambos os ligantes estudados. Leite^[2] encontrou para uma amostra modificada por EVA, na condição após RTFOT, o valor de 74,4 °C, equivalente ao resultado apresentado na Tabela 1.

A perda de massa ocorrida após o ensaio em RTFOT determina a perda de voláteis durante o processo de mistura e aplicação^[2], embora alguns ligantes possam ganhar massa devido ao efeito da oxidação do asfalto. No presente estudo, o ligante REMAN revelou maior ganho de massa quando comparado a amostra AMP EVA, atendendo ao limite máximo de 0,5% especificado para o CAP 50/70 (Tabela 1).

Ao se analisar conjuntamente o resultado oriundo do ensaio de Penetração e Ponto de Amolecimento, percebe-se ganho de consistência para o ligante AMP EVA, após envelhecimento em RTFOT, devido possivelmente a ocorrência de oxidação. Morilha^[14] verificou que o asfalto modificado com o polímero EVA apresentou resultado sugestivo de boa resistência ao envelhecimento, indicando ganho na recuperação elástica, mesmo tendo aumento em sua consistência. Leite^[2], também, constatou em um ligante modificado com EVA boa resistência ao envelhecimento, em decorrência da não existência de ligação dupla em suas moléculas, como ocorrem no polímero SBS, por exemplo.

Pelo conjunto dos resultados expostos e de acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP, 2005) o material asfáltico da REMAM comprovou sua classificação como CAP 50/70 e, o ligante modificado igualmente atendeu às especificações contidas na ASTM D 5841-95.

Ensaio Superpave

A Tabela 2 apresenta os resultados concernentes aos ligantes REMAM e AMP EVA obtidos no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). Este ensaio, especificado pela *Superpave*, avalia as propriedades viscoelásticas, por meio do módulo complexo de cisalhamento (G^*) e do ângulo de fase (δ), submetendo o ligante a tensões de cisalhamento oscilatórias. Pelos citados parâmetros controla-se a rigidez: a) a altas temperaturas (>46 °C) – característica inerente à capital do estado do Amazonas, assegurando-se ao asfalto resistência ao cisalhamento global em termos de elasticidade; b) a temperaturas intermediárias (entre 7 e 34 °C), certificando que o ligante não contribua para o trincamento por fadiga. O módulo complexo e ângulo de fase são definidos como:

$$G^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} \quad (1)$$

$$\delta = \omega \cdot (\Delta t) \Delta \quad (2)$$

onde:

- G^* = módulo complexo de cisalhamento, Pa;
- $\tau_{m\acute{a}x}$ = máxima tensão de cisalhamento aplicada, Pa;
- $\gamma_{m\acute{a}x}$ = máxima deformação devido à tensão de cisalhamento aplicada;
- δ = ângulo de fase;
- ω = frequência angular, 1/s; e
- Δt = tempo de defasagem, s.

A especificação *Superpave*^[5] requer para o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$, relacionado à deformação plástica, o valor de rigidez mínima igual a 1,1 e 2,2 kPa atinente às amostras virgens e após envelhecimento em RTFOT, respectivamente. Estes requisitos devem ser obtidos em temperatura mais elevada, alusiva a prevista para o pavimento onde será utilizado o ligante.

Visualiza-se na Tabela 2 que o ligante AMP EVA apresentou ao longo de todo ensaio ângulo de fase menor comparado ao CAP convencional, portanto, sugerindo superioridade quanto à elasticidade. Na condição envelhecida em RTFOT, essa amostra não transpôs o limite especificado, tendo o experimento sido finalizado a temperatura de 82 °C, com o parâmetro apresentando valor igual a 4,659 kPa, ainda muito superior ao valor requerido pela *Superpave*^[5]. Ao comparar o ângulo de fase, na mesma faixa de temperatura, antes e após envelhecimento em RTFOT, nota-se diminuição do valor do mesmo, revelando, conseqüentemente, ganho de elasticidade após envelhecimento para ambos os ligantes.

Leite^[2] menciona quanto à propriedade viscoelástica, ao comparar o parâmetro $G^*/\text{sen} \delta$, que nos asfaltos modificados por EVA a temperatura alta permanece constante ou aumenta de

1 a 2 PG (equivalente ao aumento em 6 ou 12 °C), à semelhança do que ocorre com os cimentos asfálticos comuns.

Do mesmo modo, comparam-se na Tabela 2 as máximas temperaturas alcançadas para o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$. Na condição virgem, as duas amostras obtiveram valor igual a 70 °C, entretanto, após envelhecimento, o ligante modificado com EVA melhorou seu desempenho apresentando ganho em 12 °C ou 2PG. Os resultados alcançados nesta pesquisa são próximos aqueles obtidos por Leite^[2], onde a temperatura encontrada pela citada autora correspondeu a 76 °C para o ligante virgem e 88 °C para a amostra condicionada em RTFOT, ou seja, 1 PG acima do valor atingido para amostra AMP EVA.

O parâmetro $G^*.\text{sen}\delta$, oriundo do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, utiliza-se, em geral, para a avaliação do desempenho quanto à fadiga, sendo o valor mínimo requerido igual a 5,0 MPa. Ainda, na Tabela 2, visualizam-se os resultados na condição após envelhecimento em RTFOT e PAV, onde se constata que amostra AMP EVA apresentou menores ângulos de fase. Igualmente, pela referida tabela, comparam-se as menores temperaturas, que atendem ao limite especificado, onde o ligante modificado mostrou-se, outra vez, com melhor desempenho, indicando temperatura de 16 °C, enquanto para o CAP REMAN o resultado foi igual a 19 °C. Novamente os dados de Leite^[2], obtendo a temperatura de 19 °C para amostra modificada com polímero EVA, corroboram os resultados desta pesquisa.

O comportamento viscoelástico do ligante pode ser analisado pelo ângulo de fase (δ), pois quanto maior o seu valor tem-se a predominância da fase viscosa. Na Figura 1 comparam-se este parâmetro e o módulo complexo (G^*), como vetores num plano XY e na temperatura de 70 °C, para os dois ligantes. O resultado indicou que amostra AMP EVA mostrou maior módulo complexo (G^*), por conseguinte maior resistência à deformação permanente e, ao mesmo tempo maior fase elástica, relativo ao ligante convencional.

Tabela 2. Módulo Complexo (G^*), ângulo de fase (δ) e parâmetros: $G^*/\text{sen}(\delta)$ (deformação permanente) e $G^*.\text{sen}(\delta)$ (fadiga) – DSR.

		REMAN			AMP EVA		
Deformação Permanente - Amostra virgem							
Temperatura (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ kPa	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ kPa	
58	7083	74,11	7,364	4412	67,46	4,777	
64	3318	77,48	3,399	2133	72,28	2,24	
70	1600	80,59	1,622	1079	76,97	1,108	
76	801	83,41	0,806	605	79,67	0,615	
Resultado		70 °C			70 °C		
Deformação Permanente - Amostra após RTFOT							
Temperatura (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ kPa	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ kPa	
64	7242	66,64	7,889	–	–	–	
70	3852	69,62	4,11	12500	60,31	14,39	
76	1994	72,76	2,088	7387	62,51	8,328	
82	–	–	–	4232	65,27	4,659	
Resultado		70 °C			82 °C		
Fadiga - Amostra após RTFOT e PAV							
Temperatura (°C)	G^* (kPa)	δ (°)	$G^*.\text{sen}(\delta)$ MPa	G^* (kPa)	δ (°)	$G^*.\text{sen}(\delta)$ MPa	
31	1644	41,15	1,082	–	–	–	
28	2566	39,67	1,638	–	–	–	
25	3957	38,07	2,44	3104	33,7	1,722	
22	6001	38,07	3,562	4511	32,54	2,426	
19	9102	34,61	5,169	6459	31,35	3,361	
16	–	–	–	9167	30,12	4,600	
13	–	–	–	12910	28,67	6,193	
Resultado		19 °C			16 °C		

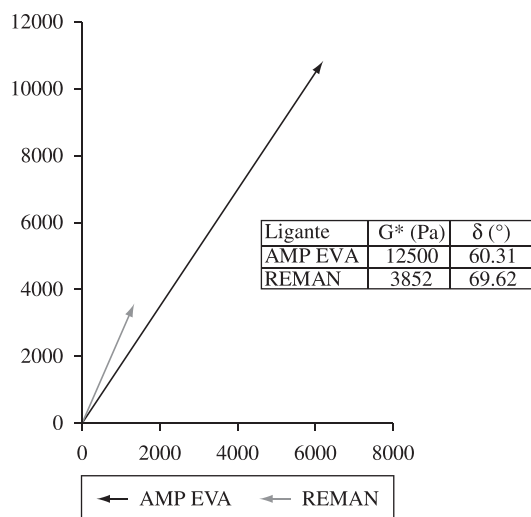


Figura 1. Comportamento Elástico e Viscoso dos ligantes a 70 °C.

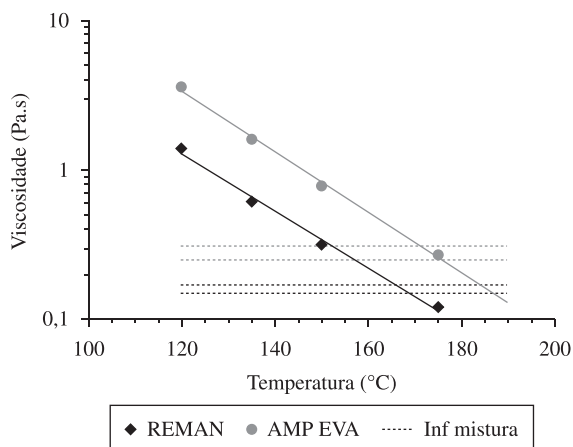


Figura 2. Resultado do ensaio de Viscosidade Dinâmica.

A viscosidade dinâmica determinou-se nas temperaturas 120, 135, 150 e 175 °C, sendo definida como a resistência ao fluxo desenvolvida por um material quando submetido a tensões^[13], tendo como finalidade garantir as condições adequadas de consistência do asfalto nas fases de usinagem, transporte e aplicação.

O cimento asfáltico tem comportamento termoviscoplástico – dependente da temperatura, tempo, velocidade e intensidade do carregamento^[9]. “Em temperaturas suficientemente baixas e/ou em altas taxas de carregamento, o material betuminoso reage essencialmente como um sólido elástico. Quando a temperatura aumenta e/ ou quando a taxa de carregamento reduz, a propriedade de viscosidade torna-se mais evidente. Em temperaturas suficientemente altas e/ ou longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto comporta-se como um fluido Newtoniano e pode ser descrito pela viscosidade independente da taxa de aplicação da carga^{[15]”}.

O modelo estrutural, proposto pelo SHRP, conceitua o cimento asfáltico como uma dispersão de moléculas polares em meio não polar, ajudando a compreender o efeito da temperatura nos ligantes asfálticos. Em temperaturas muito baixas a viscosidade mostra-se muito elevada – o ligante se comporta aproximadamente como um sólido (moléculas não se movem). À medida que a temperatura aumenta, baixa a viscosidade e, o ligante se apresenta como um líquido (fluxo de moléculas), sendo essa transição reversível^[16].

A Figura 2 ilustra os resultados para as duas amostras empregando o viscosímetro rotacional e as respectivas linhas de tendência. Observa-se que o aumento da temperatura acarreta na

redução da viscosidade de forma linear, corroborando com dados obtidos na literatura^[9,16]. Nota-se, ainda, que o ligante AMP EVA possui maior viscosidade, ou seja, maior resistência ao fluxo para as mesmas temperaturas comparado ao REMAN. As duas amostras atenderam ao limite especificado pela *Superpave*, ou seja, a viscosidade a 135° deve ser inferior a 3,0 Pa.s para permitir fluidez suficiente no recobrimento dos agregados e trabalhabilidade.

Pelo exposto, os critérios de desempenho foram alcançados pelos materiais asfálticos estudados, visando aplicação em pavimentos de Manaus. Contudo, a amostra AMP EVA demonstrou superioridade quanto ao comportamento à deformação permanente, após envelhecimento em RTFOT, e quanto à fadiga, em seguida ao envelhecimento – RTFOT e PAV.

Ressalta-se, igualmente, que o ligante AMP EVA apresentou os melhores resultados em todos os ensaios tradicionais, indicando maior consistência, assim como, nos ensaios *Superpave*, sugerindo superioridade em seu comportamento. Exceção ocorreu, apenas, no ensaio quanto à deformação permanente com amostra não envelhecida, onde apresentou valor similar ao asfalto convencional (REMAN). Por outro lado, pela classificação *Superpave* os ligantes pesquisados apontaram mesmo grau de desempenho (PG 70-16), além de terem superado o requerido para Manaus (PG 64 + 2), conforme mapeamento realizado por Leite e Tonial^[17].

Ensaio em Misturas

Os resultados do estudo de dosagem podem ser visualizados na Tabela 3, onde: os agregados detentores de um tamanho máximo nominal de 19 mm, com a especificação *Superpave*^[5] impondo limites tanto para os vazios no agregado mineral (VAM \geq 13%) como para a relação betumes-vazios ($65 \leq RBV \leq 75$). Dentro dos requisitos do citado método apenas o parâmetro VAM não foi atendido pela mistura SEVA.

A modificação do ligante pelo polímero EVA proporcionou uma redução de 1,4% no teor de CAP na mistura, relativo às amostras com o material REMAN, podendo estar associada à polaridade das carbonilas do cimento asfáltico modificado com EVA, detentoras de maior atração com o agregado logo, proporcionando melhor envolvimento, bem como, pode ser atribuída ao aumento da massa específica do ligante AMP EVA de 0,991 para 0,995 g.cm⁻³^[12].

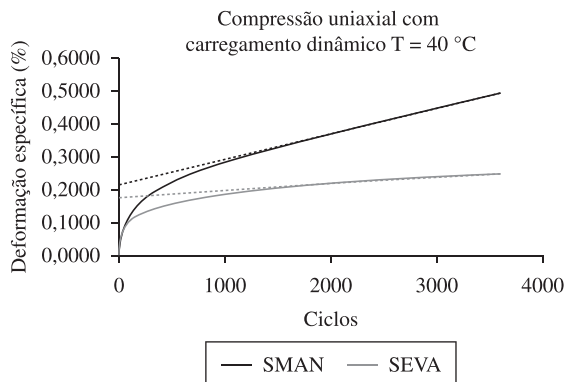
O ensaio de Compressão Axial Dinâmico realizou-se sob a temperatura de 40 °C, em corpos de prova de concreto asfáltico constituídos pelo mesmo esqueleto pétreo, variando-se exclusivamente o ligante, assim denominados: SMAN (cimento asfáltico CAP 50/70 - REMAN) e SEVA (cimento asfáltico modificado com 4% do Polímero EVA). Na Figura 3 mostra-se o resultado do corpo de prova com valor intermediário, onde se observa que as misturas constituídas com ligante REMAN alcançaram o dobro da deformação específica confrontadas às misturas SEVA. Realça-se, portanto, nestas misturas, o efeito positivo da adição do polímero EVA.

Visualiza-se, além disso, que a mistura SEVA mostrou maior tendência à estabilização ao compará-la com a mistura SMAN, fato este verificado pelo coeficiente angular da reta (8×10^{-5}) atinente à mistura convencional, sendo este valor quatro vezes superior ao coeficiente angular (2×10^{-5}) pertencente à mistura com ligante modificado. A capacidade do concreto asfáltico de resistir à deformação imposta pelas cargas está relacionada à coesão e ao atrito interno, atribui-se, portanto, um aumento da coesão oriunda da modificação do ligante pelo polímero EVA.

Os resultados da caracterização tradicional do ligante indicaram que a adição do polímero EVA ao CAP REMAN ocasionou um aumento na consistência do mesmo. Tal acréscimo, sob a temperatura de 40 °C, conduziu a uma maior resistência à deformação permanente, corroborando, deste modo, com a literatura pesquisada^[18].

Tabela 3. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas.

Mistura	Seixo(%)	Areia(%)	Fíler(%)	Ligante(%)	DMM	Dap	Vv(%)	VAM(%)	RBV(%)
SMAN	67,3	29,6	3,1	4,5	2,472	2,373	4	14,8	72,6
SEVA	67,3	29,6	3,1	3,1	2,415	2,319	4	11,3	65,5

**Figura 3.** Resultado do ensaio Compressão Uniaxial com carregamento dinâmico a 40 °C.

Conclusões

O asfalto modificado pelo polímero EVA apresentou menor valor no ensaio de Penetração e maior temperatura para o Ponto de Amolecimento, relativo ao cimento asfáltico convencional. O citado CAP exibiu maior viscosidade, ou seja, maior resistência ao fluxo para as mesmas temperaturas que o asfalto REMAN. Tais resultados são indicativos de maior consistência e, portanto, menor suscetibilidade à deformação permanente. O mesmo foi delineado ao longo dos ensaios de deformação permanente e fadiga, menor ângulo de fase que o CAP 50/70, sugerindo superioridade quanto à elasticidade, assim como maior módulo complexo, alvitando uma maior resistência à deformação.

A mistura composta por cimento asfáltico modificado exibiu menor teor de ligante para o volume de vazios de 4% e baixo valor de vazios no agregado mineral. Sob a temperatura de 40 °C, o efeito da modificação com polímero mostrou-se eficaz quanto à suscetibilidade a deformação permanente, pois se verificou que a mistura constituída com o ligante AMP EVA indicou resistência superior àquela composta com o CAP usualmente comercializado em Manaus.

Referências Bibliográficas

1. Frota, C. A.; Melo, D. M. & D'Antona, D. M. G. - "Influência da temperatura nas misturas asfálticas com resíduos de construção e demolição" in: Anais da 6ª Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, Porto - Portugal (2007).
2. Leite, L. F. M. - "Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero", Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil (1999).

3. Fernandes, M. R. S; Forte, M. M. C. & Leite L. F. M. - *Mater. Res.*, **3**, p.386 (2008).
4. Bringel, R. M.; Soares, S. A. & Soares, J. B. - "Propriedades químicas e reológicas de asfalto modificado por copolímero EVA", in: Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador-BA (2005).
5. The Asphalt Institute - "Superior Performance Asphalt Pavements (Superpave) Binder", 1, Lexington, KY (1996).
6. Oliveira, P. J. & Soares, B. G. - *Polímeros*, **1**, p.28 (2003).
7. Bianchi, O.; Zeni, M. & Ferreira, C. A. - *Polímeros*, **1**, p.73 (2005).
8. Vavrik, W. R.; Huber, G.; Pine, W. J.; Carpenter, S. H. & Bailey, R. - "Transportation Research Circular E-C044: Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design" (2002)
9. Instituto de Asfalto - "Manual de Asfalto". Série n.4 (2002).
10. Sá, M. F. P. & Motta, L. M. G. - "Utilização de ensaio de creep estático e dinâmico para caracterização de misturas asfálticas", in: Anais do 13º Encontro de Asfalto, p.91, Rio de Janeiro - RJ (1996).
11. Valkering, C. P. *et al.* - *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, **59**, p.590 (1990).
12. D'Antona, D. M. G. - "Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado por polímero eva e resíduo da construção civil para as vias urbanas de manaus", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas, Brasil (2009).
13. Specht, L. P. - "Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus", Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Brasil (2004).
14. Morilha Junior, A. - "Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil (2004).
15. Lu, X.; Isacson, U. & Ekblad, J. - *Mater. Struct.*, **32**, p.131 (1999).
16. Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P. & Soares, J. B. - "Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros", ABEDA, Rio de Janeiro (2007).
17. Leite, L. F. M. & Tonial, I. A. - "Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP", in: Anais do 12º Encontro de Asfalto, p.94, Rio de Janeiro - RJ (1994).
18. Greco J. A. S. - "Avaliação da Influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos" Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil (2004).

Enviado: 17/09/09

Reenviado: 10/06/10

Aceito: 15/07/10

DOI: 10.1590/S0104-14282011005000007