

Eixo Temático ET-11-004 - Outros

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO CAP 50-70 REJUVENESCIDO COM ÓLEO DE GIRASSOL

Joe Villena^{1,2}, Andréa Ryba Lenzi¹, Milena Lemes Teixeira¹, Alexandre Labegalini¹

¹Universidade Federal do Paraná, Departamento de Transportes, PR.

²Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, PR.

RESUMO

O ligante asfáltico é um dos principais constituintes da mistura asfáltica e é considerado como um material de duas fases, uma líquida e uma sólida chamados, respectivamente, de maltenos e asfaltenos. Os maltenos sofrem oxidação devido às altas temperatura e ao contato com o oxigênio do ar e a água. Como resultado, a mistura asfáltica torna-se mais rígida, quebradiça e suscetível ao fissuramento por fadiga. Quanto isto acontece, a mistura é fresada e utilizada, geralmente, como matéria prima de outras camadas do pavimento ou aterros sem que exista nenhuma valorização do ligante presente na mistura. Uma possibilidade para a reutilização do ligante envelhecido é o uso de materiais rejuvenescedores os quais podem devolver ao ligante as suas propriedades originais para que a mistura, assim rejuvenescida, possa ser usada na construção de um novo revestimento do pavimento. O material mais utilizado para este fim é o agente rejuvenecedor (AR), derivado do óleo de xisto. No entanto, devido à preocupação ambiental e possibilidade de esgotamento deste derivado, algumas pesquisas estão sendo desenvolvidas no intuito de verificar a possibilidade do uso de óleos vegetais no rejuvenescimento do ligante envelhecido. A presente pesquisa visa avaliar as características físicas do ligante asfáltico CAP 50-70 rejuvenescido com óleo de girassol. Amostras novas, envelhecidas, rejuvenescidas com óleo e com agente rejuvenecedor AR-5 foram caracterizadas quanto à penetração, ponto de amolecimento, viscosidade Brookfield, ductilidade e massa específica. Os resultados mostraram que o óleo de girassol consegue modificar as características físicas do ligante envelhecido tornando-o mais macio. Quando utilizados na mesma proporção, o óleo é mais efetivo do que o AR-5 no processo de rejuvenescimento. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir, que o óleo de girassol é uma alternativa viável para a reciclagem de misturas asfáltica envelhecidas.

Palavra-chave: Misturas asfálticas envelhecidas; Reclaimed Asphalt Pavement; Características físicas; Óleo de Girassol; AR-5.

INTRODUÇÃO

A mistura asfáltica é o material mais utilizado, no mundo todo, como revestimento da estrutura do pavimento. Esta mistura é produzida a partir da usinagem, em planta, de ligante asfáltico e agregados pétreos a altas temperaturas. Após usinagem, a mistura é transportada para o local da obra e compactada. Para Garcia, Schlangen e Ven (2009) o ligante asfáltico pode ser considerado como um material de duas fases, uma líquida, denominada de maltenos (saturados, aromáticos e resinas), e uma sólida, denominada de asfaltenos. Ao longo dos anos, a fase líquida se oxida, se transformando em asfaltenos, até que o ligante se torna duro e quebradiço, em virtude da predominância da chamada fase sólida. A oxidação do ligante confere características mais rígidas e, por consequência, mais frágeis ao pavimento, o que acarreta no aparecimento de trincas de fadiga devido à passagem das cargas aplicadas pelos veículos.

O processo de oxidação é dividido em duas etapas: a primeira é a oxidação de curto prazo que ocorre devido às altas temperaturas e ao contato do ligante com o ar durante a usinagem e compactação da mistura asfáltica; e, a segunda é o envelhecimento de longo prazo (mais lento que a primeira), que ocorre durante a vida útil do pavimento e que se deve ao

contato do ligante com o ar e a água. Os principais mecanismos envolvidos no envelhecimento dos ligantes são a perda de componentes voláteis (saturados e aromáticos) e a reação química do ligante com o oxigênio do ar. Em laboratório, o equipamento que simula o envelhecimento de curto prazo é o RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test*) e o que simula o envelhecimento de longo prazo é o PAV (*Pressure Aging Vessel*) (BERNUCCI et al., 2008).

As rodovias brasileiras desempenham um importante papel na economia do país, uma vez que cerca de 60% do escoamento da produção ocorre por meio do modal rodoviário. Além dessa notável importância, deve ser ressaltada a sua contribuição também na movimentação de pessoas (CNT, 2016). Nesse sentido, o estado de conservação do pavimento é de suma importância para proporcionar maior segurança, economia e conforto ao usuário.

Durante a sua vida útil, o pavimento pode passar por processos de manutenção, conservação e restauração. Estes processos envolvem, muitas vezes, a fresagem e remoção do revestimento asfáltico para a sua substituição por uma mistura nova. O material fresado, geralmente, é utilizado como matéria prima para outras camadas do pavimento ou para aterros sem que exista nenhuma valorização do ligante asfáltico presente na mistura. Assim, o aumento da rigidez das leis ambientais, aliada à necessidade de atitudes mais sustentáveis, tem aumentado a preocupação com a reutilização dos resíduos, com a minimização dos impactos ambientais por eles causados e a consequente redução dos custos relacionados à produção. Em consonância com essa ideia, a reciclagem a quente de misturas asfálticas, apresenta-se como uma das mais promissoras técnicas para a reabilitação e manutenção de pavimentos asfálticos. Muitos estudos relacionados à mistura asfáltica e a pavimentos reciclados têm sido desenvolvidos e despertado a atenção de muitos pesquisadores, principalmente quanto ao uso de um percentual de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement* - pavimento asfáltico reciclado) na reciclagem a quente.

Embora pesquisas apontem o envelhecimento do ligante asfáltico como o fator mais relevante para o baixo desempenho apresentado por algumas misturas recicladas, pelo uso combinado de RAP como mistura virgem, o desafio nesse momento se encontra em promover o rejuvenescimento desse ligante, de tal forma que este possa recuperar certas propriedades perdidas com o passar do tempo, por efeito da oxidação, e passe a apresentar desempenho satisfatório novamente, sob o ponto de vista técnico (similar a mistura virgem) e econômico (redução dos custos de produção). Então, pensando-se na possibilidade de se reutilizar esse ligante envelhecido, materiais rejuvenescedores passaram a ser empregados como um meio de se devolver ao ligante as suas propriedades originais e permitir que a mistura, assim rejuvenescida, possa ser usada na construção de um novo revestimento. Atualmente, existem agentes rejuvenescedores (AR) comerciais, derivados do óleo de xisto que apresentam bons resultados quanto à capacidade de rejuvenescimento da mistura asfáltica envelhecida. No entanto, outros materiais além dos AR poderiam ser utilizados no rejuvenescimento, inclusive óleos de origem vegetal ou sintético.

Neste sentido, Romera et al. (2006) utilizaram óleo de motor reciclado e concluíram que este material foi capaz de restituir certas características ao ligante estudado. Da mesma forma, Asli et al. (2012) também afirmam que ligantes envelhecidos podem ser recuperados, para uma determinada penetração, desde que uma quantidade adequada de rejuvenescedor seja utilizada. Os autores utilizaram óleo de cozinha residual, que apresentou resultados satisfatórios, já que as propriedades verificadas no ligante rejuvenescido eram semelhantes às propriedades do ligante virgem. Já Zaumaniset al. (2014) utilizaram óleo vegetal (canola e amendoim) e de motor usados, resíduos de gordura vegetal, óleo orgânico (utilizado como um rejuvenescedor comercial), *tall oil* destilado (DTO – coproduto da produção de papel), extrato aromático entre outros. Os autores concluíram que todos os materiais utilizados apresentaram bons resultados, mas nenhum deles foi capaz de restituir as propriedades no mesmo nível de um ligante virgem.

Percebe-se, após a breve revisão bibliográfica apresentada, que vários tipos de óleos vegetais poderiam ser utilizados como agentes rejuvenescedores. Por outra parte, deve-se lembrar que, devido à sua origem, os ARs derivados de óleo de xisto poderão se esgotar num futuro próximo, situação pouco provável de acontecer para os óleos de origem vegetal. Assim,

justificam-se as pesquisas sobre o uso de óleos como agentes rejuvenescedores do ligante asfáltico envelhecido. Nesta pesquisa, será estudada a influência do óleo de girassol como rejuvenescedor, visando o seu uso a escala industrial. Espera-se que os resultados possam contribuir para o aperfeiçoamento de tecnologias relacionadas à reciclagem de misturas asfálticas.

Objetivo

Avaliar as características físicas do ligante asfáltico CAP 50-70 rejuvenescido com óleo de girassol.

MATERIAIS

Na presente pesquisa foram utilizados: ligante asfáltico, óleo de girassol e agente rejuvenescedor AR-5. O ligante asfáltico utilizado é o CAP 50/70 (Figura 1a) e foi fornecido pela empresa CBB Asfaltos. Foi utilizado óleo de girassol (Figura 1b) de uma marca comercial. O agente rejuvenescedor AR-5 (Figura 1c) foi fornecido pela empresa Betunel Indústria e Comércio Ltda.



Figura 1. Materiais utilizados na presente pesquisa: a) ligante asfáltico, b) óleo de girassol e c) agente rejuvenescedor AR-5. Fonte: Os autores (2017).

MÉTODOS

Etapa 1 - Caracterização física dos materiais - Nesta etapa foi realizada a caracterização física do ligante asfáltico virgem (CAP 50-70 novo), óleo e AR-5 mediante os ensaios de:

- penetração – segundo a norma DNIT 155/2010 – ME (DNIT, 2010b);
- ponto de amolecimento – segundo a norma DNIT 131/2010 – ME (DNIT, 2010a);
- viscosidade Brookfield – segundo a norma ABNT NBR 15184:2004 (ABNT, 2004);
- ductilidade – segundo a norma DNER – ME 163/98 (DNER, 1998); e,
- massa específica – segundo a norma DNER – ME 193/96 (DNER, 1996).

Etapa 2 - Envelhecimento do ligante asfáltico virgem – Nesta etapa o ligante asfáltico foi envelhecido na estufa de filme fino rotativo (RTFOT) a uma temperatura de 163°C por um período de 85 minutos seguindo o procedimento descrito na norma ABNT NBR 15235 (ABNT, 2009). Após envelhecimento, o ligante foi coletado e dividido em amostras para dar continuidade aos ensaios de caracterização. A Figura 2 mostra as amostras de ligante antes e depois do ensaio.



Figura 2. Amostras de ligante: a) antes e b) após envelhecimento no RTFOT. Fonte: Os autores (2017).

Etapa 3 - Caracterização física do ligante asfáltico envelhecido - Nesta etapa foram realizados os mesmos ensaios da Etapa 1 com o intuito de determinar a mudança nas características físicas do ligante asfáltico após envelhecimento no RTFOT.

Etapa 4 - Dosagem de amostras de ligante asfáltico envelhecido rejuvenescido com óleo de girassol - Para esta etapa foram dosadas amostras de ligante envelhecido e porcentagens de óleo de girassol de 1,5%, 3,5% e 5%. O ligante envelhecido com adição de óleo de girassol foi denominado de ligante rejuvenescido.

Etapa 5 - Caracterização física do ligante asfáltico rejuvenescido com óleo de girassol - As amostras de ligante rejuvenescido foram caracterizadas fisicamente mediante os mesmos ensaios da Etapa 1. Nesta etapa foi determinado o teor ótimo de óleo que permitiria ao ligante envelhecido atingir as mesmas características físicas que o ligante virgem.

Etapa 6 - Caracterização física do ligante asfáltico rejuvenescido com teor ótimo de óleo de girassol e agente rejuvenescedor AR-5 - Nesta etapa foi realizada a caracterização física do ligante rejuvenescido com o teor ótimo de óleo de girassol, determinado na Etapa 5. Adicionalmente, outra amostra de ligante envelhecido foi rejuvenescido com um teor de agente rejuvenescedor AR-5 igual ao teor ótimo de óleo de girassol. Este último procedimento foi realizado com o objetivo de verificar a diferença nas características físicas do ligante envelhecido promovidas tanto pelo óleo de girassol como pelo agente rejuvenescedor AR-5.

Etapa 7 - Caracterização física do ligante asfáltico rejuvenescido com teor ótimo de óleo de girassol, envelhecido - Nesta etapa, uma amostra de ligante rejuvenescido com o teor ótimo de óleo determinada na Etapa 5 foi submetida ao envelhecimento no RTFOT. Após envelhecimento, foi verificada a perda de massa, a penetração e a viscosidade da amostra. O objetivo desta última etapa foi verificar se o óleo seria degradado pelo calor durante o envelhecimento e a magnitude de tal degradação nas propriedades físicas do ligante rejuvenescido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização física dos materiais

As características físicas do ligante virgem, óleo de girassol e AR-5 são mostradas na Tabela 1. Na Tabela 1 são mostradas, também, as especificações brasileiras (DNIT 095/2006) para o ligante asfáltico CAP 50-70.

Caracterização física do ligante envelhecido e rejuvenescido

As características físicas do ligante envelhecido, rejuvenescido com várias porcentagens de óleo de girassol (1,5; 3,5 e 5%) são mostradas na Tabela 2 e na Figura 3. Na Figura 3 é mostrada, também, a interpolação de valores realizada entre os dados e que servem para determinar os valores de óleo que poderiam ser adicionados ao ligante envelhecido para que o mesmo apresente características físicas similares aos do ligante virgem.

Tabela 1. Características físicas do ligante virgem, óleo de girassol e AR-5.

Ensaio	Especificação do CAP 50-70	Ligante virgem	Óleo de girassol	AR-5
Penetração (x 0,1 mm)	50-70	52		
Viscosidade Brookfield (cP)			56	16.500
25 °C				375
60 °C				13
135 °C	> 274	322		
150 °C	> 112	163		
177 °C	57-285	61		
Ponto de amolecimento (°C)	> 46	49,4		
Ductilidade (mm)	> 60	> 100		
Massa específica (g/cm ³)		1,011		
Perda de massa após envelhecimento no RTFOT (%)	< 0,5	0		

Fonte: Os autores (2017).

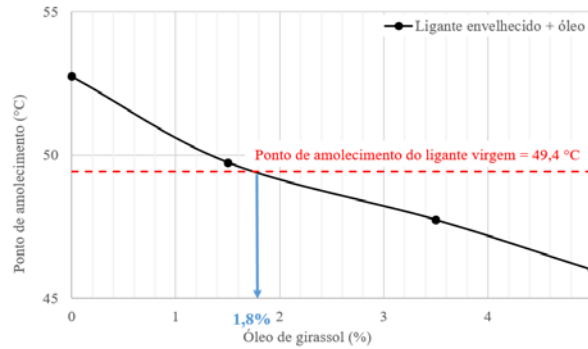
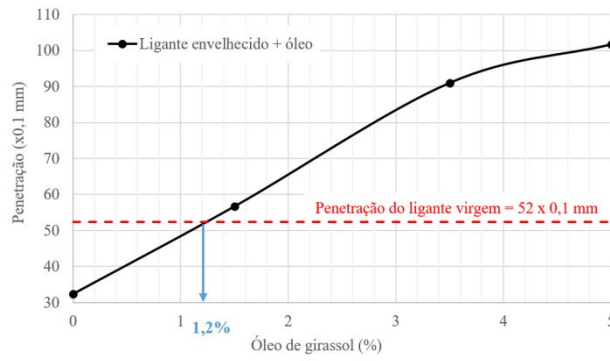
Tabela 2. Características físicas do ligante envelhecido, rejuvenescido com óleo e AR-5 e rejuvenescido envelhecido.

Características físicas	Ligante envelhecido	Ligante rejuvenescido com % de óleo				Rejuvenescido envelhecido	Ligante envelhecido + 1,2% de AR-5
		1,5	3,5	5	1,2		
Penetração (x 0,1 mm)	32	57	91	102	49	19	47
Viscosidade Brookfield (cP)							
135 °C	440	378	310	273	387	490	420
150 °C	216	188	160	142	193	244	206
177 °C	76	69	61	55	70	89	74
Ponto de Amolecimento (°C)	52,8	49,8	47,8	46,0	52		54
Ductilidade (mm)	> 100	> 100	> 100	> 100			> 100
Massa específica (g/cm ³)	1,006	1,007	1,006	1,020			

Fonte: Os autores (2017).

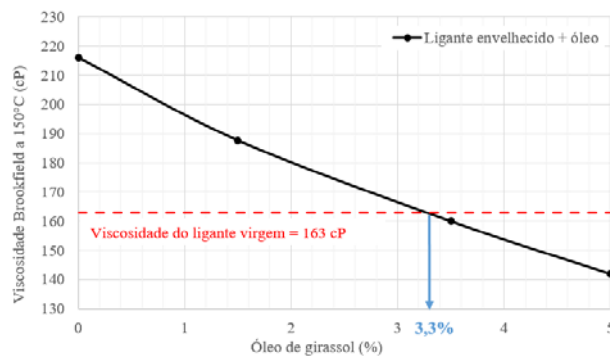
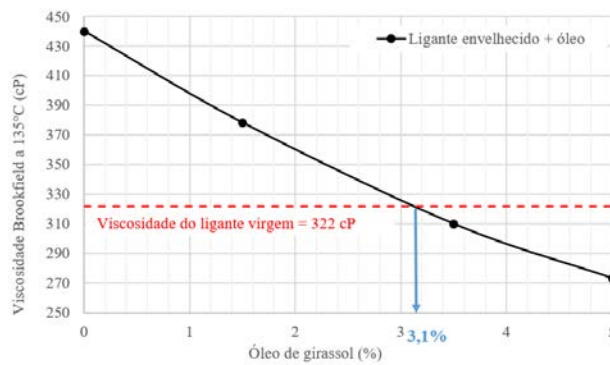
Dentre as características físicas avaliadas (Tabela 2), as únicas que, aparentemente, não sofreram nenhuma mudança significativa foram a ductilidade e a massa específica. No caso da ductilidade todas as amostras, tanto a virgem, a envelhecida e as rejuvenescidas apresentaram valores superiores aos 100 cm (capacidade máxima do ductilômetro utilizado). No caso da massa específica, a variação não foi maior do que 1% para todas as amostras. Desta forma, as análises realizadas nas seguintes, consideram somente as propriedades de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade.

Os resultados dos ensaios de caracterização física mostraram que após envelhecimento no RTFOT, a penetração do ligante asfáltico diminui e a viscosidade e o ponto de amolecimento aumentaram. Este comportamento é considerado normal visto que o processo de envelhecimento por oxidação causa o endurecimento do ligante devido à transformação de parte dos aromáticos em resinas e parte em parte das resinas em asfaltenos.



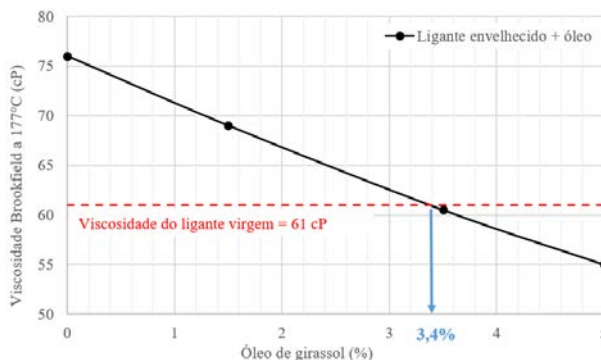
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 3. Características físicas do ligante envelhecido e rejuvenescido com 1,5%, 3,5% e 5% de óleo de girassol em função do teor de óleo adicionado: a) penetração; b) ponto de amolecimento; d) viscosidade a 135 °C; e) viscosidade a 150 °C; e, e) viscosidade a 177 °C. Fonte: Os autores (2017).

Os resultados mostrados na Figura 3 mostram que o teor de óleo de girassol a ser adicionado no ligante envelhecido, necessário para que este último atinja as mesmas propriedades físicas do ligante virgem, não é constante. Existe uma grande diferença entre o teor de óleo que seria escolhido a partir dos dados do ensaio de penetração (Figura 3a) o qual é de, aproximadamente, 1,2% como o que seria escolhido a partir do ensaio de ponto de amolecimento (Figura 3b) de 1,8% e a partir dos ensaios de viscosidade (Figura 3c, d, e) os quais são de, aproximadamente, 3,3%.

É interessante perceber, a partir destes dados, que cada uma destas propriedades físicas é afetada de forma diferente pela adição do óleo. Ou seja, não existe um teor único de óleo que poderia devolver ao ligante envelhecido as mesmas características do ligante virgem. Para entender melhor este fenômeno seria necessário a realização de um estudo que permitisse determinar as mudanças na composição química do ligante envelhecido causadas pela adição do óleo sobretudo às que se referem ao aumento do teor de aromáticos na estrutura do ligante.

Determinação do teor ótimo de óleo de girassol para rejuvenescimento do ligante envelhecido

A definição do teor ótimo de óleo foi baseada na especificação brasileira de cimentos asfálticos (DNIT 095/2006), a qual determina os valores máximos e mínimos das características físicas do ligante CAP 50/70 (Tabela 1), e os possíveis teores de óleo obtidos a partir da análise feita na Figura 3. Desta forma, o teor de óleo a ser adicionado no ligante envelhecido deveria ser tal que permitisse ao ligante apresentar características físicas similares às do ligante virgem e que tais características se enquadrassem dentro das especificações brasileiras. Dentre as várias opções disponíveis (Figura 3) optou-se por escolher o teor de 1,2% por ser o valor mínimo que permite cumprir com as especificações vigentes e atingir um valor de penetração similar ao do ligante virgem.

Caracterização física do ligante asfáltico rejuvenescido com teor ótimo de óleo de girassol e agente rejuvenecedor AR-5

As características físicas da amostra de ligante asfáltico rejuvenescido com 1,2% de óleo de girassol e da amostra com 1,2% de AR-5, assim como do ligante envelhecido sem adições e do ligante virgem, ambos utilizados a modo de comparação, são mostradas na Tabela 3. Adicionalmente é mostrado o valor esperado para cada uma das características analisadas, baseado na Figura 3, para uma adição de 1,2% de óleo.

Tabela 3. Características físicas do ligante virgem e do ligante envelhecido rejuvenescido com 1,2% de óleo e 1,2% de AR-5.

Características físicas	Virgem	Ligante envelhecido	Valor esperado após regeneração com 1,2% de óleo	Ligante rejuvenescido	
				+1,2% de óleo	+ 1,2% de AR-5
Penetração (x 0,1 mm)	52	32	52	49	47
Viscosidade Brookfield (cP)					
135 °C	322	440	390	387	420
150 °C	163	216	192	193	206
177 °C	61	76	70	70	74
Ponto de Amolecimento (°C)	49,4	52,8	50,3	52	54
Ductilidade (mm)	> 100	> 100		> 100	> 100

Fonte: Os autores (2017).

Os resultados da Tabela 3 mostram que o teor de 1,2% de óleo, estimado como ótimo, permite atingir uma penetração de 49 x 0,1 mm a qual, embora sendo inferior, é próxima da penetração do ligante virgem, 52 x 0,1 mm. Já a amostra com adição de 1,2% de AR-5 atingiu um resultado quase similar, 47 x 0,1 mm. Considerando que estes valores são bastante próximos, poderia se concluir que tanto a adição de 1,2% de óleo como de AR-5 teriam o mesmo efeito na recuperação da penetração do ligante envelhecido. Teores de óleo superiores a este permitiram diminuir a viscosidade e o ponto de amolecimento, mas incrementariam em demasia o valor da penetração e tornariam o ligante muito mole a temperatura ambiente.

Os resultados da Tabela 3 mostram, também, que o valor do ponto de amolecimento das amostras rejuvenescidas ficou um pouco acima do valor esperado para a adição de 1,2% de óleo. Já a adição de AR-5 parece estar aumentando o valor do ponto de amolecimento do ligante envelhecido ao invés de diminuí-lo. Este comportamento estaria relacionado a um efeito de endurecimento do ligante envelhecido, que não seria lógico. Neste caso, maiores estudos deverão ser realizados para verificar este fenômeno.

Os valores da viscosidade da amostra rejuvenescida com óleo apresentaram valores similares aos esperados. Já os valores da amostra com adição de AR-5 ficaram acima dos valores esperados. Embora a expectativa fosse de que a adição de óleo não permitiria baixar a viscosidade até os mesmos valores do ligante virgem, ficou constatado que a adição de AR-5 é menos efetiva do que óleo nesta tarefa. Neste sentido, a adição de óleo teria maior influência do que o AR-5 na diminuição da viscosidade do ligante envelhecido.

Caracterização física do ligante asfáltico rejuvenescido envelhecido

Na Tabela 2 foram mostradas as propriedades físicas do ligante rejuvenescido envelhecido. Este ligante é um ligante virgem que foi envelhecido, rejuvenescido com 1,2% de óleo e, finalmente, envelhecido no RTFOT. O objetivo da avaliação desta amostra foi estudar se o ligante envelhecido com óleo de girassol consegue manter suas características físicas estáveis após envelhecimento ou se ocorre a degradação do óleo dentro do ligante rejuvenescido e qual seria a influência dessa degradação no ligante. Caso o óleo tivesse servido para recuperar a estrutura química (aromáticos e saturados) do ligante envelhecido, seria esperado que após envelhecimento este ligante apresentasse características similares aos do ligante envelhecido.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 4 como quociente, em porcentagem, entre o valor da característica física avaliada do ligante envelhecido, ou do ligante rejuvenescido envelhecido, e o ligante virgem. Caso os valores das características físicas dos ligantes envelhecidos e o ligante virgem fossem iguais, o quociente seria de 100%. A Figura

mostra que houve uma variação nas características físicas do ligante rejuvenescido envelhecido em relação ao ligante envelhecido. Especificamente, a penetração diminuiu e a viscosidade aumentou evidenciando o fato do ligante rejuvenescido envelhecido ser mais duro que o ligante envelhecido.

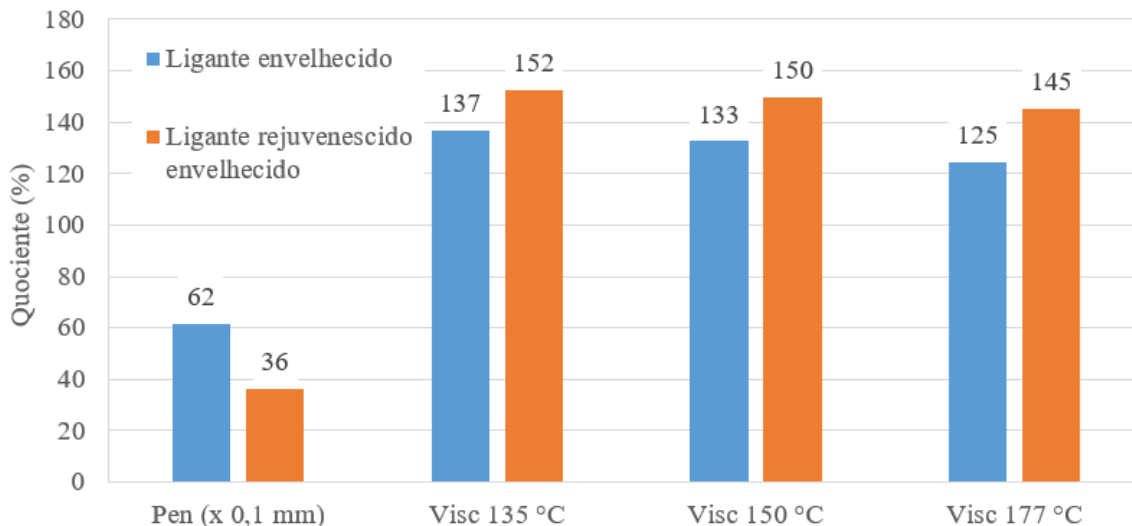


Figura 4. Quociente, em porcentagem, entre a característica física avaliada do ligante envelhecido, ou o ligante rejuvenescido envelhecido, e o ligante virgem. Fonte: Os autores (2017).

Com base nos resultados mostrados, poderia se afirmar que o óleo de girassol somente estaria amolecendo o ligante envelhecido sem necessariamente rejuvenescer a sua estrutura química. Caso o óleo fosse, de fato, um rejuvenescedor, a amostra de ligante rejuvenescido envelhecido teria apresentado características físicas similares ao da amostra de ligante envelhecido.

É possível, no entanto, que o critério de determinação do teor ótimo de óleo a ser adicionado no ligante envelhecido tenha sido errado. A escolha de um teor de óleo maior a 1,2% poderia permitir que o ligante rejuvenescido envelhecido apresentasse características físicas similares aos do ligante envelhecido. Assim, o teor ótimo de óleo deveria ter sido definido não só em função das características físicas do ligante virgem senão, também, das características físicas do ligante envelhecido já que é este o ligante que estará presente na mistura asfáltica em campo.

São necessários, portanto, maiores estudos sobre o tema que considerem a realização de ensaios de caracterização química que permitam determinar quais substâncias, presentes no óleo, estariam rejuvenescendo ou somente amolecendo o ligante. A partir destes ensaios seria possível identificar o teor e tipo de óleo que poderia ser utilizado para rejuvenescer, de forma efetiva, o ligante.

CONCLUSÕES

A adição de óleo de girassol permite modificar as características físicas do ligante asfáltico envelhecido, tais como penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. A massa específica não sofreu variações maiores do que 1% e todos os resultados de ductilidade foram superiores a 100 cm.

Não existe um teor único de óleo que poderia devolver ao ligante envelhecido as mesmas características físicas do ligante virgem. Dentre os teores determinados, foi escolhido o teor de 1,2% pois o mesmo permite manter um valor de penetração mínimo, similar ao do ligante virgem. Teores de óleo superiores a este permitiram diminuir a viscosidade e o ponto de

amolecimento, mas incrementariam em demasia o valor da penetração deixando o ligante muito mole a temperatura ambiente.

A adição de AR-5 no ligante envelhecido não se mostrou tão efetiva quanto à adição de óleo de girassol, considerando a mesma proporção de adição em ambos os casos. A adição de óleo permite incrementar a penetração, diminuir a viscosidade e diminuir o ponto de amolecimento do ligante envelhecido, enquanto que a adição do AR-5 permite incrementar a penetração, diminuir a viscosidade e, aparentemente, aumentar o ponto de amolecimento do ligante envelhecido.

O envelhecimento da amostra rejuvenescida com óleo evidenciou o endurecimento do ligante a maiores níveis do que da amostra de ligante envelhecida sem adição de óleo. Neste caso, duas hipóteses são possíveis: o óleo de girassol somente serve para amolecer, mas não para rejuvenescer o ligante; ou, o critério de definição do teor ótimo de óleo deve ser escolhido para atingir tanto as características físicas do ligante virgem quanto do ligante envelhecido.

Considerando os dados coletados no presente estudo, o uso de óleo de girassol é uma alternativa viável para o rejuvenescimento e reciclagem de ligantes e, eventualmente, misturas asfálticas envelhecidas. No entanto, maiores estudos devem ser desenvolvidos com a finalidade de avaliar a modificação da estrutura química do ligante pela adição de óleo.

AGRADECIMENTOS

Os autores da presente pesquisa agradecem à empresa CBB Asfaltos pelo fornecimento do ligante asfáltico e à empresa Betunel Indústria e Comércio Ltda. pelo fornecimento do agente rejuvenescedor AR-5.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15184: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15235: materiais asfálticos: determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASLI, H.; AHMADINIA, E.; ZARGAR, M. Investigation on physical properties of waste cooking oil - rejuvenated bitumen binder. **Construction and Building Materials**, v. 37, p 398-405, 2012.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. A. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 501 p.
- CNT - Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias - Relatório Gerencial**. SEST. SENAT. 2016. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso em: 31 maio 2017.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER - ME 163/98: Materiais betuminosos - determinação da ductilidade**. Rio de Janeiro: IPR, 1998.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER – ME 193/96: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica**. Rio de Janeiro: IPR, 1996.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNIT 131/2010 - ME: Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2010b.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNIT 155/2010 - ME: Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2010a.
- DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **DNIT 095/2006 - EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material**. Rio de Janeiro: IPR, 2006.
- GARCIA, A.; SCHLANGEN, E.; VEN, M. V. D. **Two ways of closing cracks on asphalt concrete pavements: microcapsules and induction heating**. **KEM Key Engineering Materials**, v. 417-418, p. 573-576, 2009.

ROMERA R.; SANTAMARÍA A.; PEÑA J.J.; MUÑOZ M.E.; BARRAL M.; GARCÍA E.; JAÑEZ, V. Rheological Aspects of the Rejuvenation of Aged Bitumen. **Rheol Acta**, v. 45, p. 474-478, 2006.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; POULIKAKOS, L.; FRANK, R. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 538-550, 2014.