

PRIMEIROS RESULTADOS DO PROJETO CIRPOL: ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE BETUMES ENVELHECIDOS

María González¹; María del Mar Colás²; Antonio Garcia³; Iruñe Indacoechea⁴; Pedro Lastra⁵; Daniel Castro⁶; Teresa Carvalho⁷

¹MOEVE, Departamento Técnico de Asfaltos, Carretera de Daganzo M-100 km. 5.5, 28806 Alcalá de Henares, Madrid, España.

email: maria.gonzalez@cmoeveglobal.com

²MOEVE, Departamento Técnico de Asfaltos, Carretera de Daganzo M-100 km. 5.5, 28806 Alcalá de Henares, Madrid, España.

email: marimar.colas@moeveglobal.com

³MOEVE, Departamento Técnico de Asfaltos, Carretera de Daganzo M-100 km. 5.5, 28806 Alcalá de Henares, Madrid, España.

email: a.garcia.siller@moeveglobal.com

⁴GITECO-UC Universidad de Cantabria, Santander, España.

email: irune.indacoechea@unican.es

⁵GITECO-UC Universidad de Cantabria, Santander, España.

Email: pedro.lastragonzalez@unican.es

⁶GITECO-UC Universidad de Cantabria, Santander, España.

email: daniel.castro@unican.es

⁷MOEVE, Avenida Columbano Bordalo Pinheiro, n.º 108 - 3º 1070-067 Lisboa, Portugal.

email: teresa.carvalho@moeveglobal.com

Sumário

A circularidade das misturas betuminosas na Europa, especialmente as de elevado desempenho, está atualmente limitada pelas percentagens máximas de reutilização permitidas pela legislação. Embora seja permitida a reciclagem de materiais em camadas ou aplicações de menor qualidade, em países como Espanha, que possui uma rede rodoviária já consolidada, a principal procura de misturas betuminosas é para a camada de desgaste. Esta situação promove a existência de dois problemas fundamentais que dificultam a circularidade do sector: 1) a perda de materiais de elevado desempenho em aplicações de baixo valor acrescentado, e 2) a necessidade de extração de novas matérias-primas para cobrir a procura de manutenção e substituição de camadas de desgaste em todo o continente. Em linha com as políticas ambientais atuais, é fundamental o desenvolvimento de iniciativas que permitam reutilizar o material fresado, recuperando ou melhorando as suas propriedades iniciais, alcançando a circularidade real/total do setor. Fruto desta ideia surgiu o projeto CIRPOL “Circularidade nos Transportes Maximizando a Reutilização de Misturas Betuminosas com polímeros”.

A premissa necessária para a reutilização ótima de misturas betuminosas, com betume modificado com polímeros, baseia-se na capacidade de tratar estes materiais a fim de restaurar ou devolver as suas propriedades iniciais. Para tal, é necessário poder caracterizar o seu grau de envelhecimento, não só nos termos habituais do betume, mas também tendo em conta o efeito que tem no polímero. Este trabalho apresenta os primeiros resultados do projeto CIRPOL na caracterização de betumes modelo, com diferentes graus de envelhecimento e de betumes extraídos de fresagens reais através de ensaios empíricos, reológicos e espectrométricos, bem como o estudo de misturas utilizando estes betumes em conjunto com rejuvenescedores e diferentes proporções, sendo o objetivo definir um enquadramento adequado para otimizar a utilização do material recuperado.

PALAVRAS-CHAVE: RAP, betume, modificado, envelhecimento.

1. Introdução

Os betumes modificados com polímeros (BMP) têm sido utilizados há décadas em todo o mundo com o objetivo de obter pavimentos betuminosos de elevado desempenho e durabilidade. A utilização deste tipo de ligantes em camadas de desgaste para tráfegos exigentes é combinada com a utilização de agregados de elevada qualidade, que podem ser reutilizados, contribuindo para a circularidade do setor da pavimentação. Um conhecimento adequado do estado do ligante no momento em que se realiza a fresagem permitirá evitar a perda desse material, que poderá contribuir para aplicações maior valor acrescentado.

O material mais utilizado na modificação de betumes é o copolímero em bloco estireno-butadieno-estireno (SBS), que se caracteriza por ser uma estrutura que combina blocos elastoméricos (butadieno), que conferem elasticidade ao betume. São utilizados principalmente para a produção de misturas de elevado desempenho em camadas de desgaste, devido ao seu melhor comportamento mecânico, à sua capacidade de suportar cargas elevadas e à sua maior resistência a falhas por fadiga ou deformações plásticas. Embora nos betumes convencionais o processo de envelhecimento seja bem conhecido (em certo grau), o dos BMPs é menos compreendido. Para extrair o máximo potencial da reutilização do material fresado que contenha esse tipo de ligante, é fundamental entender como é que o envelhecimento afeta a estrutura e as propriedades do ligante modificado.

No caso dos BMPs, além da deterioração do betume base, ocorre a degradação do polímero. No caso do SBS, devido à estrutura molecular com ligações duplas C=C insaturadas, o bloco elastomérico é sensível ao dano por envelhecimento oxidativo durante a exposição a condições ambientais de temperatura, humidade e radiação, sendo que as mudanças geradas afetam a rede polimérica e a efetividade do polímero como modificador.

O avanço necessário para otimizar a reutilização de misturas betuminosas com betumes modificados com polímeros baseia-se na capacidade de tratar o material fresado de forma a restituir propriedades semelhantes às iniciais. Para isso, é necessário, em primeiro lugar, ser capaz de caracterizar o grau de envelhecimento, não apenas nos termos habituais para os betumes convencionais, que estão bem caracterizados, mas também levando em consideração o efeito que o envelhecimento tem sobre o polímero. Atualmente, não existe um protocolo estabelecido, nem consenso, sobre quais os ensaios necessários para uma caracterização precisa e eficiente do envelhecimento nos BMPs.

Os parâmetros básicos de caracterização dos betumes são a determinação da penetração (EN 1426) e da temperatura de amolecimento (EN 1427), pois fornecem, de maneira simples, informações sobre a consistência do betume e sobre a temperatura a que o ligante começa a fluir. No entanto, esses ensaios empíricos não são suficientes para avaliar o comportamento dos BMPs devido ao comportamento viscoelástico originado pela estrutura polimérica. Por esse motivo, nos últimos anos, começaram a ser introduzidos ensaios de tipo reológico, que permitem uma avaliação mais completa dos BMPs por meio da análise das componentes viscosa e elástica do comportamento mecânico do material, sendo a percentagem de recuperação obtida nesses ensaios considerada por alguns autores como um índice reológico de interesse para avaliar a integridade da rede polimérica dos BMPs envelhecidos. Além disso, ensaios físico-químicos, como a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), têm sido usados em vários estudos, pois permitem detetar a oxidação do betume e a degradação do SBS.

A mudança na estrutura e composição do betume durante o envelhecimento resulta numa deterioração das suas propriedades físicas e reológicas. Na reutilização de material fresado, tem-se explorado a aplicação de um rejuvenescedor, que, em muitas ocasiões, apresenta um efeito positivo sobre os betumes convencionais envelhecidos: aumenta a penetração, a ductilidade e diminui a viscosidade e o módulo complexo do ligante. No entanto, o efeito desses materiais nos BMPs não é suficiente, pois, embora possam influenciar positivamente o betume envelhecido, não recuperam a atividade da rede polimérica. Poucos estudos abordam em profundidade a reutilização de fresado com BMP. Destacam-se os estudos realizados por alguns autores que, com o objetivo de agir sobre a falta de atividade polimérica nos BMPs envelhecidos, investigaram as propriedades rejuvenescidas na adição de betumes modificados com polímeros, com resultados promissores.

Este artigo apresenta diferentes métodos de caracterização de betumes modificados com polímeros em estado virgem e com diferentes graus de envelhecimento, com o objetivo de determinar quais os ensaios que representam melhor o grau de envelhecimento dos betumes modificados com polímeros. Também foi estudado o efeito sobre as propriedades de ligantes altamente envelhecidos, tanto em modelos de laboratório como em ligantes provenientes de fresado real, da incorporação de um betume rejuvenescedor desenhado ad hoc.

2. Materiais e métodos

Para a realização deste trabalho, foram estudados ligantes modelo em estado original, com diferentes graus de envelhecimento, assim como um ligante extraído de um fresado proveniente de uma camada de desgaste fabricada com BMP. Os ligantes modelo foram preparados introduzindo um envelhecimento em laboratório de betumes do tipo 50/70 e BMP (45/80-65). Foram considerados três graus de envelhecimento a longo prazo: o alcançado mediante a combinação do envelhecimento RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test, EN 12607-1) e posterior envelhecimento a pressão com o PAV (Pressure Aging Vessel, EN 14769) durante 20 horas, 40 horas e 60 horas. Foi definido um conjunto de ensaios para a caracterização dos ligantes nos diferentes estados de envelhecimento, que inclui ensaios empíricos, reológicos e espectroscópicos. Dentro dos ensaios empíricos, foram incluídos a determinação da penetração (EN 1426), do ponto de amolecimento (EN 1427) e da viscosidade dinâmica (EN 13302). Os ensaios reológicos incluem a determinação do módulo complexo de corte e do ângulo de fase usando um reómetro de corte dinâmico (DSR, EN 14770) entre 10 e 80 °C a frequências entre 0,1 Hz e 10 Hz, a determinação da resistência à flexão a baixas temperaturas por meio do BBR (Bending Beam Rheometer, EN 14771), a suscetibilidade à deformação plástica e a componente elástica da deformação por meio do ensaio MSCR (Multiple Stress Creep Recovery, EN 16659) a 60 °C, e a resistência à fadiga por meio do ensaio LAS (Linear Amplitude Sweep) conforme a norma AASHTO TP 101. Além disso, foi incluída uma caracterização por espectroscopia infravermelha no intervalo médio (4000-400 cm⁻¹). Na segunda fase, os ligantes envelhecidos artificialmente e o extraído de material fresado proveniente do pavimento foram misturados, em laboratório, com um ligante rejuvenescedor experimental do tipo BMP em duas proporções: 50% ligante envelhecido/50% ligante novo e 20% ligante envelhecido/80% ligante novo, para simular dois graus de mistura diferentes entre o ligante proveniente do fresado e o novo. Essas misturas foram submetidas ao conjunto de ensaios previamente selecionado.

3. Resultados e análise

3.1 Caracterização de ligantes envelhecidos

A seguir, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados para caracterizar os ligantes BMP modelo envelhecidos. Os resultados da caracterização do ligante BMP, tanto no estado original como com os diferentes graus de envelhecimento, são comparados com um betume base convencional (B 50/70) de referência, bem como com um betume modificado obtido de uma fresagem real (RAP).

A avaliação da penetração (Figura 1) mostra que os betumes originais têm uma penetração maior do que os envelhecidos, devido ao aumento da rigidez associado às alterações químicas que ocorrem durante o envelhecimento. É de notar que o resultado obtido na amostra de RAP apresenta o valor mais baixo. A análise da temperatura de amolecimento apresenta a tendência contrária: a temperatura de amolecimento aumenta à medida que o betume envelhece. Neste caso, observa-se que o ligante extraído do RAP apresenta o valor mais elevado. Estes resultados mostram um comportamento coerente com o grau de envelhecimento, ou seja, o betume proveniente da fresagem real é o ligante com maior grau de envelhecimento, superior mesmo ao do terceiro ciclo de PAV. As tendências dos ligantes convencional e o modificado são muito semelhantes, embora pareça que o ligante modificado é menos suscetível ao envelhecimento, com diferenças menores entre os ciclos de PAV, especialmente no caso da penetração.

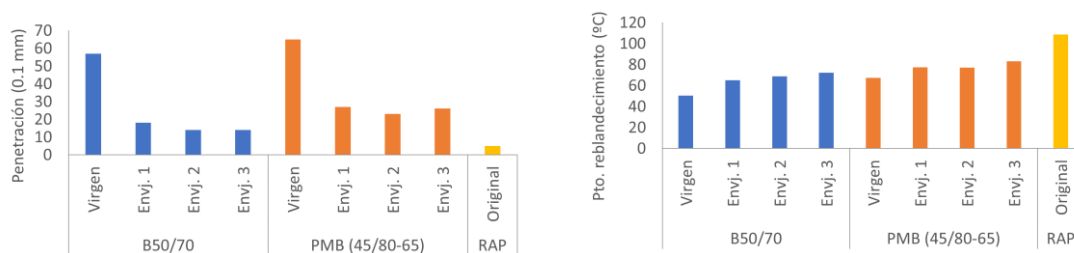


Figura 1. Esquerda: resultados do ensaio de penetração. Direita: resultados do ensaio da temperatura de amolecimento

Na Figura 2 observa-se a viscosidade obtida a diferentes temperaturas. O betume convencional apresenta uma viscosidade menor que o betume BMP, como era de se esperar, e essa viscosidade aumenta progressivamente à medida que aumenta o grau de envelhecimento, sendo a viscosidade obtida pelo ligante do RAP a maior de todas. Esses resultados estão em linha com a menor penetração e maior temperatura de amolecimento do RAP em comparação com o BMP envelhecido em laboratório.

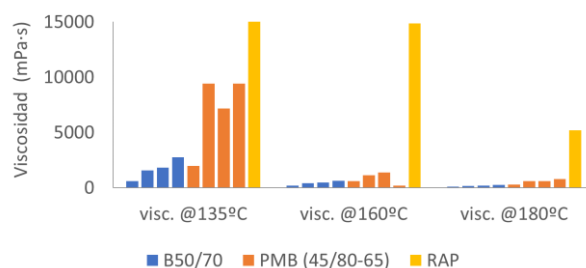


Figura 2. Resultados do ensaio de viscosidade

Observa-se que todos os ensaios empíricos permitem diferenciar graus de envelhecimento tanto em ligantes convencionais como em modificados. No entanto, não permitem evidenciar a natureza distinta de cada um deles. Por esse motivo, foi proposta a caracterização reológica por meio do DSR.

O ensaio conforme a norma EN 14770 permite determinar o módulo complexo G^* e o ângulo de fase sob um esforço de corte oscilatório a diferentes temperaturas e frequências. Foram calculadas as temperaturas nas quais o módulo complexo atinge os valores limite de 5 MPa e 15 kPa, respetivamente (Figura 3). Segundo [9], a temperatura na qual se atinge o valor de 5 MPa está relacionada com o comportamento à fadiga em ligantes altamente envelhecidos. Assim, os valores de temperatura nos quais $G^* = 5$ MPa serão menores quanto mais resistente for o ligante à fadiga. Por outro lado, a temperatura a partir da qual o módulo complexo fica abaixo de 15 kPa indica o limite acima do qual há uma fluência relevante do material, ou seja, está associada a uma mudança de consistência. Essa temperatura, nos ligantes convencionais, está diretamente relacionada com a temperatura de amolecimento, enquanto que, no caso dos ligantes modificados, fornece uma informação mais completa sobre a transição elástico-viscosa. Nesse caso, embora a temperatura em que o valor $G^* = 15$ kPa seja próxima à da temperatura de amolecimento, a correlação não é direta devido à contribuição da fase polimérica no comportamento viscoelástico do material. Ao aumentar o grau de envelhecimento, não se observam variações relevantes nos valores de temperatura nos quais $G^* = 5$ MPa (Figura 3) no betume convencional ou no betume envelhecido. O ligante extraído do RAP apresenta o valor mais elevado de $T@G=5$ MPa, indicando que sua rigidez é maior, o que provavelmente prejudica sua resistência à fadiga. Os ângulos de fase correspondentes a essas temperaturas mostram uma leve diminuição ao aumentar o grau de envelhecimento, indicando uma menor contribuição viscosa no comportamento do material. No entanto, os valores correspondentes aos BMPs e aos betumes convencionais nos três graus de envelhecimento são semelhantes, indicando que esse parâmetro não permite diferenciar esses ligantes em estados de envelhecimento avançado. O ligante extraído apresenta um valor de ângulo de fase mais elevado do que os

betumes envelhecidos em laboratório. Nesse caso, esse comportamento pode ser interpretado como consequência da elevada rigidez do ligante.

Quanto aos valores de mudança de consistência dos ligantes ($T@G^* = 15 \text{ kPa}$), observa-se uma tendência análoga à observada na temperatura de amolecimento. No que se refere aos ângulos de fase, observa-se uma diferença notável entre o betume convencional e o modificado, com o segundo a apresentar valores menores. Verifica-se que o envelhecimento provoca uma leve diminuição dos valores do ângulo de fase no betume convencional, enquanto que, no BMP, observa-se uma diminuição desse parâmetro em comparação com o obtido para o ligante sem envelhecimento, mantendo-se aproximadamente constante após 20, 40 e 60 horas de envelhecimento PAV. O valor obtido do ligante extraído do RAP é semelhante ao dos BMPs envelhecidos.

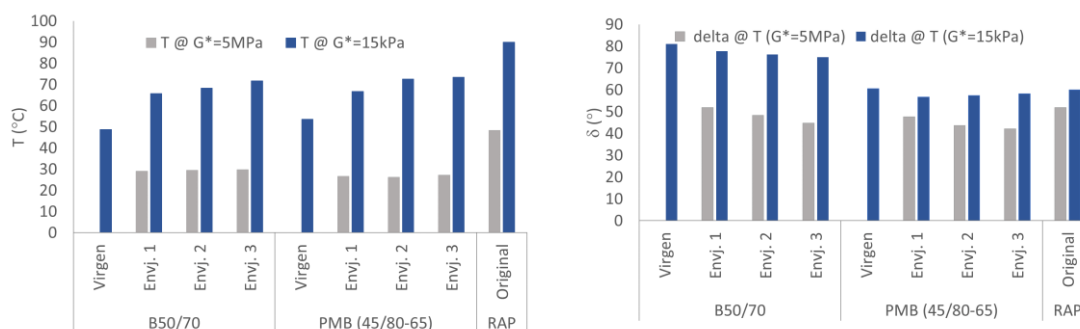


Figura 3. Resultados dos ensaios DSR. $T@G^*=5\text{MPa}$ e $T@G^*=15\text{kPa}$ e valores de ângulo de fase (δ) a essas temperaturas

O ensaio de fluência-recuperação MSCR permite avaliar a suscetibilidade à deformação plástica ou conformidade não recuperável (J_{nr}) e a componente elástica da deformação. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4. À esquerda, está representado o valor J_{nr} , que representa a deformação permanente, enquanto que à direita está o valor $\%R$, correspondente à recuperação elástica.

Observa-se uma diminuição do parâmetro J_{nr} em ambos os betumes de referência, chegando ao seu mínimo no caso da amostra de RAP real. No entanto, no caso do parâmetro $\%R$, observa-se um leve aumento à medida que aumenta o grau de envelhecimento do betume convencional, embora se mantenha estável no caso do BMP, com valores semelhantes à amostra de RAP. A diminuição do parâmetro J_{nr} está relacionada, por um lado, com o aumento da rigidez dos ligantes à medida que aumenta o seu grau de envelhecimento, e por outro, com o facto de que, no caso dos betumes com polímeros, estes ainda apresentam elasticidade (elevada $\%R$).

Em cada grau de envelhecimento, a conformidade não recuperável a 3,2 kPa é maior nos ligantes convencionais do que nos modificados, indicando que a suscetibilidade à deformação permanente nesses ligantes é superior à dos ligantes modificados. Tanto nos ligantes convencionais como nos modificados, o envelhecimento leva a uma diminuição do parâmetro J_{nr} , o que indica que o envelhecimento reduz a suscetibilidade às deformações plásticas. Esse comportamento está relacionado com a rigidificação observada durante o envelhecimento, por meio de outros ensaios.

O parâmetro que fornece mais informações é a deformação recuperável: observa-se que os betumes convencionais apresentam inicialmente uma capacidade de recuperação limitada após um esforço, enquanto que os betumes modificados apresentam valores elevados de recuperação associados à elasticidade fornecida pelo copolímero. Com o envelhecimento, a capacidade de recuperação dos betumes convencionais aumenta, embora os valores se mantenham sempre muito abaixo dos valores de $R\%$ dos betumes modificados e em níveis que não são associados a um comportamento elástico relevante. Esse comportamento pode ser devido ao aumento da rigidez durante o envelhecimento. No caso dos BMP, observa-se que o envelhecimento leva a uma leve diminuição da deformação recuperável, possivelmente como consequência da deterioração do

polímero. Mesmo assim, os valores obtidos no BMP nos diferentes estados de envelhecimento são elevados. O ligante extraído do RAP apresenta valores semelhantes aos obtidos nos BMPs envelhecidos.

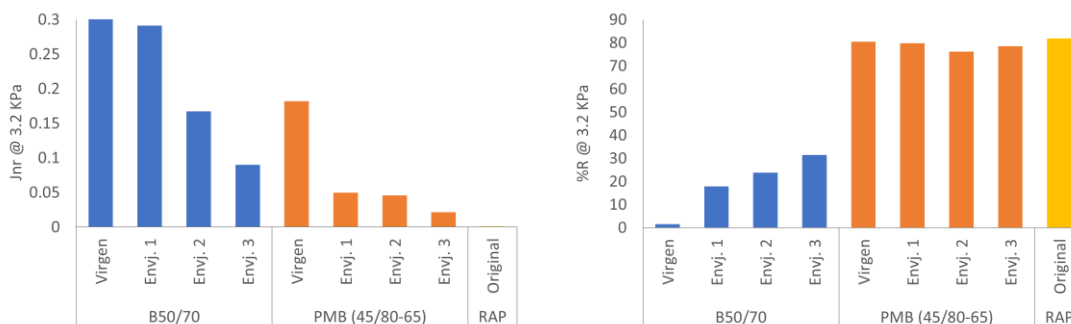


Figura 4. Resultados do ensaio MSCR

Foi realizado o ensaio de fadiga de ligantes (LAS), que permite determinar a resistência do ligante aos danos por fadiga de forma acelerada, por meio da aplicação de cargas cíclicas de amplitude crescente. A Figura 5 mostra os resultados para deformações de 2,5% e 10%, podendo observar-se que a resistência à fadiga, em termos do número de ciclo até à falha, do betume convencional é inferior à do BMP, num determinado grau de envelhecimento. Tanto no caso do BMP como no caso do ligante convencional, o envelhecimento provoca uma redução na resistência à fadiga do ligante. No caso das amostras de RAP, os valores são muito baixos, o que é coerente com a alta rigidez apresentada pelo ligante.

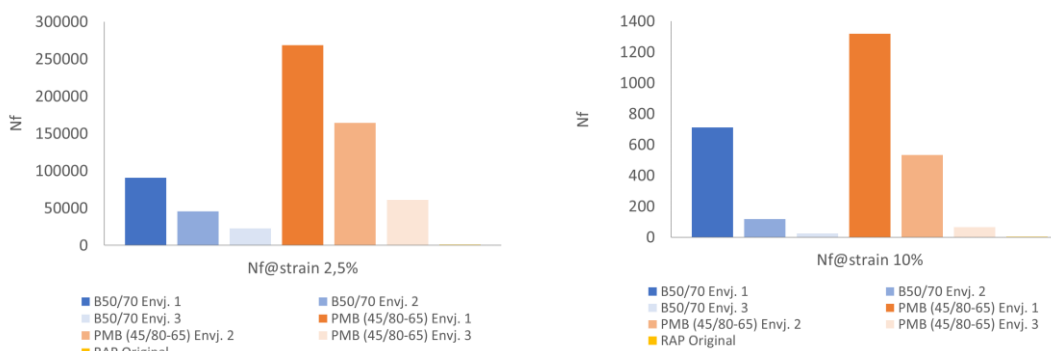


Figura 5. Resultados do ensaio LAS

Com o objetivo de avaliar o estado de envelhecimento, em termos químicos e moleculares, foram caracterizados os betumes virgens e envelhecidos através de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). O FTIR permite relacionar o aparecimento de determinados grupos funcionais, em particular sulfóxidos caracterizados pela ligação S=O e grupos carbonílicos (aldeídos, cetonas, ésteres, etc.) caracterizados pelo grupo C=O, dos componentes do ligante no seu grau de envelhecimento.

A análise dos espectros das amostras, com diferentes graus de envelhecimento, mostra um aumento na área do pico dos compostos tipo carbonilo, a 1700 cm⁻¹, em relação a grupos funcionais como o metilo (1375 cm⁻¹) e o etileno (1460 cm⁻¹), que não são significativamente afetados pela oxidação do ligante. O índice carbonilo foi determinado de acordo com a equação (1).

$$x = \frac{\text{Área Pico (1700 cm}^{-1}\text{)}}{\text{Área Picos (1375 + 1460 cm}^{-1}\text{)}} \quad (1)$$

Na Figura 6, é mostrado o índice carbonilo para os três estágios de envelhecimento acelerado em laboratório e o obtido para o betume extraído do RAP. Observa-se que o envelhecimento do PMB é mais progressivo e

lento do que no caso do betume convencional, onde, nos primeiros estágios de envelhecimento acelerado, são alcançados valores semelhantes aos obtidos no RAP

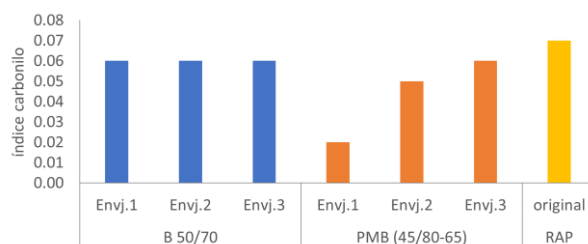


Figura 6. Índice carbonilo FTIR

Considerando os resultados obtidos nos ensaios realizados, de forma geral, observa-se que o envelhecimento dos betumes, sejam convencionais ou modificados com polímeros, implica uma degradação das propriedades, sendo que as mais visíveis são o aumento da rigidez e a perda de resistência à fadiga.

Os resultados obtidos indicam que a amostra de RAP apresenta um envelhecimento superior ao obtido em laboratório para os betumes de referência, mesmo para aqueles submetidos a 60 horas de envelhecimento PAV.

3.2 Efeito do rejuvenescedor nas propriedades dos ligantes envelhecidos

Para este estudo, os ligantes envelhecidos por 60h através do PAV e o extraído do material fresado proveniente de pavimentos foram misturados com um ligante rejuvenescedor experimental do tipo BMP, em duas proporções: 50% ligante envelhecido/50% ligante novo e 20% ligante envelhecido/80% ligante novo, para simular dois graus diferentes de mistura entre o ligante recuperado do material fresado e do ligante novo. A primeira proporção simula que a mistura entre o ligante novo e o envelhecido ocorra 100% durante o processo de fabricação da mistura betuminosa com RAP, enquanto a segunda simula que a mistura entre os dois betumes não seja completa, e parte do betume envelhecido não se mistura completamente com o betume virgem. As misturas de ligantes foram submetidas ao conjunto de ensaios definido para os ligantes modelo.

Na Figura 7, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de penetração e temperatura de amolecimento. Observa-se que, ao misturar o ligante envelhecido (tanto real quanto de laboratório) com o BMP rejuvenescedor, ocorre um aumento na penetração e uma diminuição da temperatura de amolecimento, que alcançam valores próximos de 30 (0,1 mm) sob a hipótese de mistura total e superiores a 60 (0,1 mm) no caso da mistura parcial, situando-o na faixa de um PMB (45/80-65) padrão.

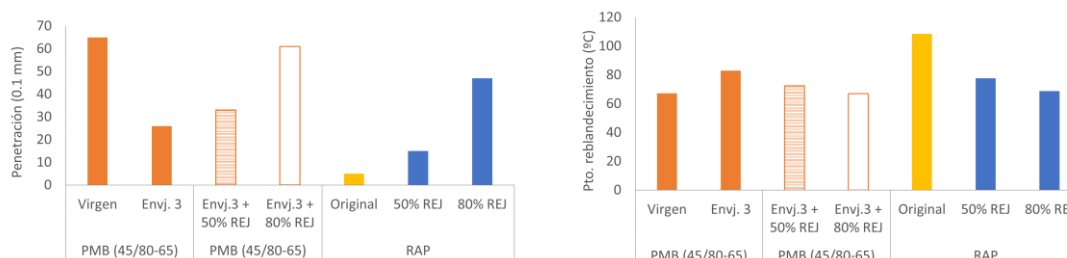


Figura 7. Esquerda: resultados do ensaio de penetração (com rejuvenescedor). Direita: resultados do ensaio da temperatura de amolecimento (com rejuvenescedor).

Por outro lado, a determinação da viscosidade em diferentes temperaturas indica que o betume rejuvenescedor tem um impacto positivo importante na redução da viscosidade do betume extraído do RAP (Figura 8). Em

todos os casos, a viscosidade é reduzida significativamente, e ao adicionar 80%, o valor da viscosidade, tanto do betume envelhecido (env.3) quanto do RAP, atinge valores próximos aos de um BMP (45/80-65) original.

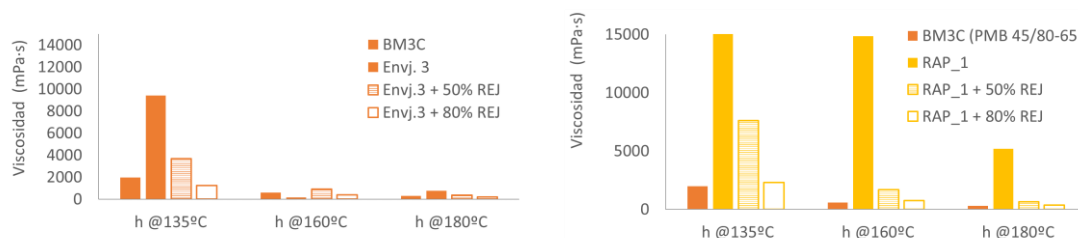


Figura 8. Resultados del ensayo de viscosidad (con rejuvenecedor)

Em relação ao módulo complexo, a adição do betume rejuvenecedor reduz o módulo do ligante e, embora sob a hipótese de mistura total, os valores alcançados são superiores aos de um BMP (45/80-65) de referência, sob a hipótese de mistura parcial, considerando que 50% do betume do RAP se mistura com o betume de aporte, são alcançados valores de módulo semelhantes aos de um BMP (45/80-65).

Na Figura 9, observa-se como a temperatura na qual se atinge um valor de módulo de 5 MPa, que está relacionada com a resistência à fadiga do material, é reduzida ao aumentar a percentagem de betume rejuvenecedor, indicando uma diminuição na rigidez do ligante. De forma similar, a temperatura na qual se atinge um módulo de 15 kPa também se reduz ao aumentar a percentagem de betume rejuvenecedor, devido a uma redução na rigidez da mistura. A temperatura, ao adicionar 80% de betume rejuvenecedor, é semelhante à de um BMP (45/80-65) de referência. O ângulo de fase apresenta um comportamento análogo.

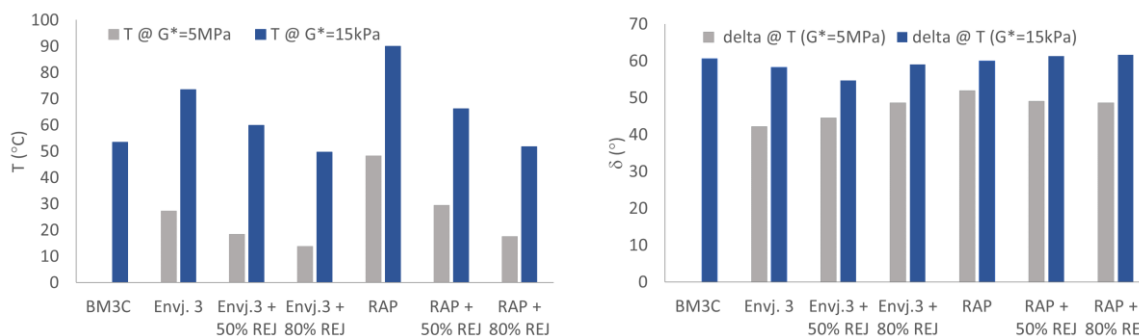


Figura 9. Resultados do ensaio DSR (com rejuvenecedor)

Em relação à conformidade não recuperável de fluência (Jnr) e ao percentual de recuperação elástica (%R), a adição de 50% de betume rejuvenecedor parece ter um efeito limitado em ambos os parâmetros, tanto no BMP envelhecido artificialmente como no extraído do RAP (Figura 12). No entanto, ao aumentar a percentagem para 80%, também ocorre um aumento significativo de Jnr, superando os valores originais do betume BMP sem envelhecer, embora ainda dentro de um bom comportamento face às deformações plásticas, com valores inferiores a 0,5 kPa.

Quanto à redução observada relativamente à percentagem de recuperação, ao reduzir-se a rigidez da mistura betume-rejuvenecedor, a deformação do ligante, durante o ensaio, é maior, afetando o valor final de %R, o que impede que se alcancem os valores originais de elasticidade. Em todo o caso, parece que o rejuvenecedor incrementa a ductilidade do ligante.

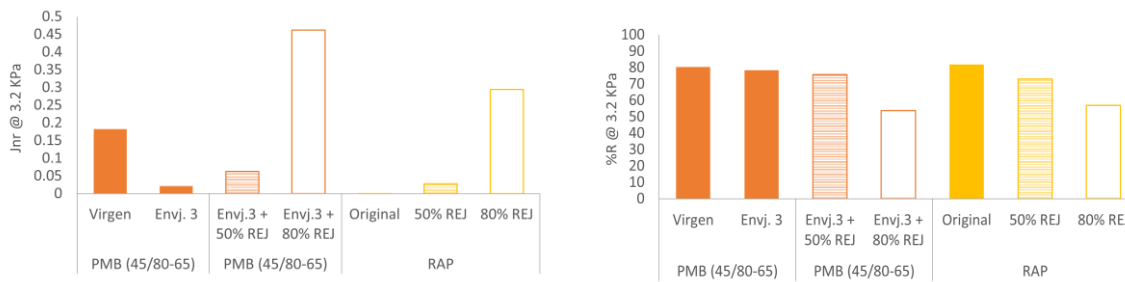


Figura 10. Resultados do ensaio MSCR (com BMP rejuvenecedor)

O efeito do betume rejuvenecedor, relativamente à resistência à fadiga dos betumes envelhecidos, conforme o ensaio LAS, é mostrado na Figura 11, tanto para o betume BMP envelhecido em laboratório como para o betume extraído do RAP. A adição do betume rejuvenecedor aumenta o número de ciclos de carga que os betumes envelhecidos conseguem suportar até à falha por fadiga.

No caso do betume extraído do RAP, que, por estar mais envelhecido, parte de uma resistência à fadiga muito baixa (Figura 11), o maior efeito é observado quando se aumenta a percentagem de betume rejuvenecedor até 80%, como era de se esperar, embora não atinja a resistência à fadiga da mistura envelhecida artificialmente. Esses resultados estão alinhados com os obtidos no ensaio DSR, embora, nesse caso, se observem diferenças na melhoria alcançada ao adicionar o betume rejuvenecedor ao ligante envelhecido em laboratório ou ao proveniente de RAP real.

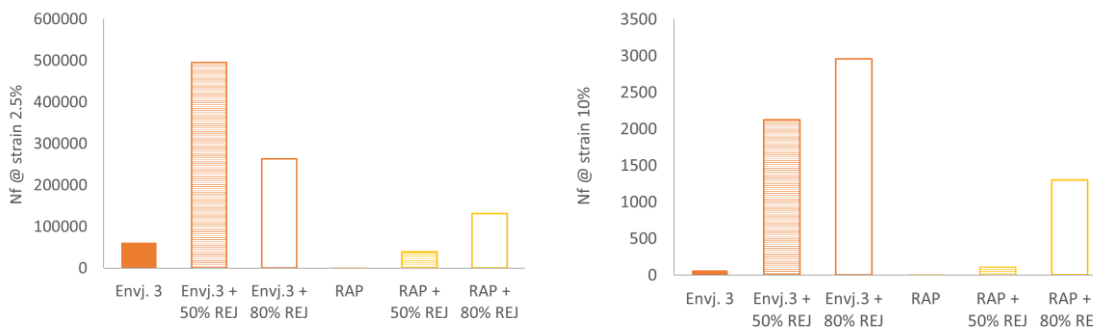


Figura 11. Resultados do ensaio LAS (com BMP rejuvenecedor)

Na Figura 12, é apresentado o índice carbonilo obtido a partir das curvas do ensaio FTIR realizado sobre as misturas de betume envelhecido e o novo betume rejuvenecedor. Pode-se observar uma redução no índice de envelhecimento ao adicionar o betume rejuvenecedor, embora o sinal não desapareça em nenhum dos casos.

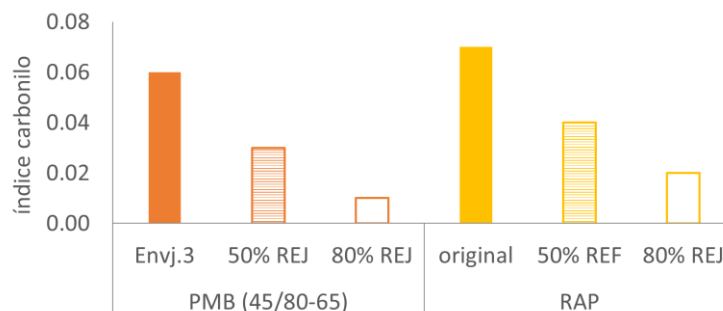


Figura 12. Índice carbonilo – Ensaios FTIR (com BMP rejuvenecedor)

4. Conclusões

Neste artigo, são apresentados os primeiros resultados do projeto CIRPOL na caracterização de betumes envelhecidos por meio de ensaios empíricos, reológicos e espectroscopia infravermelha, assim como no estudo do efeito de introduzir um rejuvenescedor nesses betumes envelhecidos. As principais conclusões obtidas até ao momento são detalhadas a seguir:

- A amostra de RAP apresenta um grau de envelhecimento superior ao das amostras modelo de laboratório submetidas a 60h de envelhecimento PAV. Esta amostra é a que apresenta maior rigidez, menor resistência à fadiga (LAS) e maior grau de oxidação (FTIR).
- Embora todos os ensaios sejam úteis para caracterizar o comportamento do ligante, os que parecem mais determinantes são aqueles que têm maior relação com a elasticidade do ligante, e, portanto, com a rede polimérica. Até o momento, destacam-se os ensaios DSR, MCRST e LAS, pois todos eles têm variáveis que dependem da elasticidade do ligante.
- A caracterização FTIR fornece informações relevantes sobre o envelhecimento dos BMPs. Parece fornecer mais informações sobre o envelhecimento dos betumes modificados com polímeros do que sobre o grau de envelhecimento de um betume base convencional.
- O estudo de modelos que simulem diferentes graus de mistura entre o ligante envelhecido e o ligante rejuvenescedor pode ser útil para ajustar as características do ligante de aporte e permitir obter o melhor desempenho.

Agradecimentos

Esta investigação faz parte do projeto CPP2021-008654 (CIRPOL), financiado pelo MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU” /PRTR.

Referências

- [1] Liu, G., Nielsen, E., Komacka, J., Leegwater, G., Van De Ven, M. (2015). *Influence of soft bitumens on the chemical and rheological properties of reclaimed polymer-modified binders from the ‘old’ surface-layer asphalt*, Constr. Build. Mater. 79, 129–135.
- [2] Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y., Zhang, Y., (2006). *Improving the aging resistance of styrene–butadiene–styrene tri-block copolymer modified asphalt by addition of antioxidants*. Polymer Degradation and Stability, Volume 91, Issue 4, Pages 795-804.
- [3] Ma, T., Huang, X., Zhao, Y., Bahia, H.U. (2010). *Compound rejuvenation of polymer modified asphalt binder*. J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit. 25, 1070–1076.
- [4] Margaritis, A., Pipintakos, G., Jacobs, G., Hernando, D., Bruynen, M., Bruurs, J., Van den bergh, W. (2021) *Evaluating the role of recycling rate and rejuvenator on the chemo-rheological properties of reclaimed polymer-modified binders*, Road Materials and Pavement Design, 22:sup1, S83-S98.
- [5] Yan, C., Huang, W., Ma, J, Xu, J., Lv, Q., Lin, P. (2020). *Characterizing the SBS polymer degradation within high content polymer modified asphalt using ATR-FTIR*, Construction and Building Materials, Volume 233, 117708.
- [6] Cuciniello, G., Leandri, P., Filippi, S., Lo Presti, D., Losa, M., Airey, G. (2018). *Effect of ageing on the morphology and creep and recovery of polymer-modified bitumens*. Mater Struct 51, 136.
- [7] Lin, P.; Huang, W.; Liu, X.; Apostolids, P.; Wang, H.; Yan, C. (2020). *Laboratory evaluation of the effects of long-term aging on high content polymer modified asphalt binder*. Journal of Materials in Civil Engineering. Volume 32 (7).
- [8] Torres, H.P., Fernandes, S.R.M., Loureiro, C.D.A, Moura, C.F.N, Silva, H.M.R.D., Oliverira, J.R.M. (2020). *Use of polymer modified binders as rejuvenators in recycled asphalt mixtures*. Int. J. Pavement Res. Technol. 13, 654–664 (2020).
- [9] Barceló Martínez, F., González González, M., Pereira Mozota, C., Pérez Mena, V. (2019). *Reología de los ligantes españoles en el contexto de la nueva versión de la norma EN 12591*. Asfalto y pavimentación, N35, Vol. IX.