

BETUME DE BORRACHA PARA MISTURAS DE ALTO MÓDULO

¹Teresa Carvalho, Maria del Mar Colas² e Vicente Perez Mena³

¹CEPSA Portuguesa, Asfaltos, Av. Columbano Bordalo Pinheiro 108 – 3º andar, 1250-999 Lisboa, Portugal

email: teresa.carvalho@cepsa.com <http://www.cepsa.pt>

²CEPSA, Asfaltos, Alcalá de Henares, Espanha

³CEPSA, Asfaltos, Alcalá de Henares, Espanha

Sumário

Os ligantes que incorporam na sua composição pó de borracha proveniente de pneus usados são uma realidade conhecida no mercado dos ligantes betuminosos. Estes ligantes apresentam vantagens técnicas inerentes à incorporação do pó de borracha e, ao mesmo tempo, aliam as vantagens ambientais pelo fato de aproveitarem um resíduo que passa a comporta-se como uma matéria-prima no fabrico destes ligantes.

Nesta comunicação pretende-se apresentar o desenvolvimento de um novo ligante para a sua utilização em misturas de alto módulo. Pretende-se apresentar não só as propriedades empíricas e reológicas, como também o comportamento das misturas fabricadas com este betume de borracha.

Palavras-chave: Ambiente; Inovação; Sustentabilidade; Ligantes betuminosos modificados; Borracha de pneus; Misturas de alto módulo

1 INTRODUÇÃO

Os ligantes betuminosos que incorporam na sua composição pó de borracha proveniente de pneus usados, tanto sejam betumes melhorados ou modificados com borracha são uma realidade já presente no mercado de ligantes betuminosos. Estes ligantes reúnem as vantagens técnicas conferidas pela utilização do pó de borracha, em conjunto com as vantagens ambientais derivadas da eliminação de um resíduo, que passa a converter-se numa matéria-prima no fabrico destes ligantes para aplicação em misturas betuminosas.

Até à data, os fabricantes de ligantes betuminosos têm desenvolvido betumes modificados com borracha para serem aplicados em misturas betuminosas convencionais.

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um novo ligante para aplicação em misturas de alto módulo, colmatando a lacuna que existia na gama deste tipo de ligantes. Pretende-se apresentar este novo ligante através do estudo das propriedades empíricas e reológicas do mesmo e do comportamento das misturas fabricadas com este Betume Melhorado com Borracha de Alto Módulo.

Nas misturas de alto módulo são de destacar as limitações à sua utilização impostas pelos Cadernos de Encargos dos Donos de Obra até ao momento, no que se refere à limitação de espessuras das camadas de pavimento aplicadas, a fim de evitar problemas de fragilidade. A utilização destes betumes melhorados, dando lugar a ligantes com propriedades superiores às dos betumes convencionais e por conseguinte, às misturas com eles fabricados, conduzem à redução dos problemas mencionados. Este novo ligante apresenta desempenhos intermédios entre os relativos a um betume tradicional de penetração 15/25 e um modificado com polímeros do tipo PMB 10/40-70.

Para a caracterização do material realizou-se uma extensa análise reológica e igualmente do seu comportamento, comparado-o com betumes convencionais e modificados com polímeros de alto módulo. Estas comparações foram efetuadas recorrendo ao ensaio EBADE (ensaio desenvolvido pelo Laboratorio de Caminos da Universidade de Barcelona e que é usado para medir a ductilidade das misturas e conhecer a sua resposta aos fenómenos de fadiga a várias temperaturas) e reómetro DSR.

As propriedades mecânicas das misturas fabricadas com estes três ligantes foram estudadas através dos ensaios de módulo, fadiga e EBADE.

2 MISTURA DE ALTO MÓDULO

A utilização de ligantes de maior consistência permite a realização de misturas com uma maior rigidez, até ao ponto de, inclusivamente, permitir a redução da espessura da camada aplicada.

Atualmente é possível considerar a resistência para este tipo de misturas de 1,25 em relação a uma mistura convencional. Os ligantes utilizados para fabricar este tipo de misturas têm especificação para a penetração de 15/25.

Estas misturas foram fabricadas com elevados conteúdos de ligante (cerca de 5,3% e com um mínimo de 4,5% na intermédia e 4,75% na base) para evitar problemas de fragilidade, anteriormente mencionado, com uma percentagem de vazios a variar entre 4 e 6 %.

A curva granulométrica resulta de uma modificação da mistura do tipo semidensa, aumentando ligeiramente o conteúdo de filer para permitir esse aumento relativo de betume.

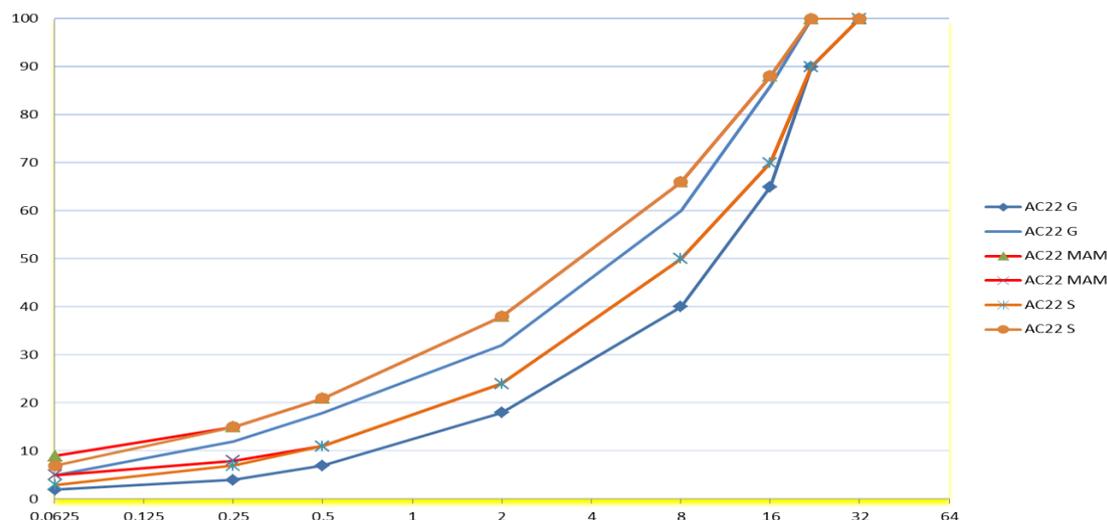


Fig.1. Curva granulométrica de MAM, AC 22S e AC 22G

Para além dos requisitos exigidos às misturas betuminosas convencionais, às misturas de alto módulo é adicionado o requisito de um módulo dinâmico a 20 °C, segundo a norma UNE –EN 12697-26, anexo C, maior ou igual a 11.000 MPa, com provetes compactados segundo a norma UNE-EN 12697-30, aplicando 75 golpes por face.

Também é necessário que o ensaio de resistência à fadiga, com uma frequência de 30 Hz e uma temperatura de 20 °C, segundo a normas UNE-EN 12697-24, anexo D, apresente um valor de deformação para um milhão de ciclos igual ou superior a 100 microdeformações.

Igualmente, a norma define uma espessura mínima de 6 cm e máxima de 13 cm, para evitar a rotura frágil destas camadas de pavimento, o arrefecimento rápido na colocação em obra (ao utilizar betumes mais viscosos este aspeto é de extrema importância na compactação) e problemas do suporte em plataformas não resistentes suficientemente.

Quadro 1. Principais características das misturas de alto módulo

Característica	Especificação	Observações
Fuso granulométrico	Peneiro EN %Passa 32 100 22 90-100 16 70-88 8 50-66 4 2 24-38 0,5 11-21 0,25 8-15 0,063 5-9	Baseado no fuso do AC22S modificado com mais finos.
Conteúdo mínimo de ligante	Camada intermedia.- 4,5 % s/m Camada de base.- 4,75 % s/m	
Espessura da camada	Camada intermedia.- 6 cm mínimo Camada de base.- 13 cm máximo	
Relação pó mineral/ligante	1,2 a 1,3	Recomendável
Conteúdo de vazios da mistura. (EN 12697-8)	4 a 6 %	Por conteúdo de ligante e finos que devem estar no limite
Resistência à deformação permanente. (EN 12697-22)	Declive de deformação máxima de 0,07 o 0,1 em função da zona térmica e da camada.	Não apresenta deformações.
Sensibilidade à água.(EN 12697-12)	80 % mínimo	Não demonstra haver problemas
Módulo dinâmico a 20 °C. (EN 12697-26 Anexo C)	Mínimo 11.000 MPa	
Resistência à fadiga a 20 °C e 30 Hz. (EN 12697-24 Anexo D)	Valor mínimo para a deformação a um milhão de ciclos de 100 microdeformações	

3 BETUME MELHORADO COM BORRACHA DE ALTO MÓDULO (BC 20/30)

Considerando as melhorias reológicas que são conferidas pelo pó de borracha proveniente de pneus usados aos betumes de borracha, foi formulado um ligante de penetração entre 20 a 30 dmm, em comparação com um betume convencional.

Como se pode verificar no Quadro 1, o BC 20/30 apresenta uma penetração semelhante e uma temperatura de amolecimento algo superior à de um betume duro do tipo 10/20 e cumpre perfeitamente as características requeridas para a estabilidade ao armazenamento.

Quadro 2. Características dos ligantes BC 20/30 e B 15/25

Características	Unidade	Método de ensaio EN	BC 20/30	B 15/25
Betume original:				
* Penetração (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	1426	24	21
* Temperatura de amolecimento (A&B)	°C	1427	64,4	62,3
* Índice de penetração (IP)	-	12591 anexo A	0,2	-0,4
* Estabilidade ao armazenamento		13399		
- Diferença Temperatura de amolecimento	°C	1427	2,4	-
- Diferencia penetração (25 °C)	0,1 mm	1426	6	-
* Recuperação elástica (25 °C; torsão)	%	13398	51	-

Também é de destacar a recuperação elástica, realizada neste caso, através do ensaio no ductilímetro, superior a 50%.

Realizaram-se ensaios com o reómetro de corte direto a fim de comparar mais aprofundadamente o comportamento reológico de ambos os ligantes. No diagrama de Black (Figura 2) pode-se constatar a tendência linear do betume convencional 15/25 enquanto o BC 20/30 se comporta, tal como já referido, como um material mais elástico.

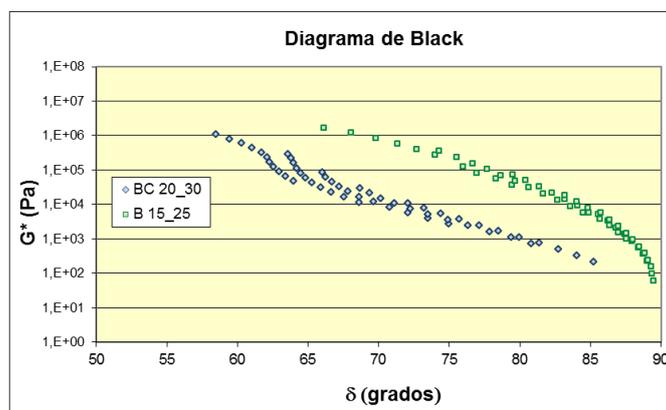


Fig.2. Diagrama de Black dos ligantes BC 20/30 e B15/25 no estado original

Confirma-se na curva isócrona (Figura 3) o comportamento referente à temperatura sob a frequência de 1,59 Hz tomada como referência: as propriedades viscoelásticas do BC 20/30 são notavelmente melhores que as do betume B 15/25, sobretudo quando o ângulo de fase é muito mais baixo (ligante mais elástico), em toda a gama de temperaturas.

Mesmo assim, é espectável uma menor suscetibilidade térmica do BC 20/30 face a um betume convencional (menor rigidez), enquanto que para temperaturas de serviço elevadas os valores de G^* são mais altos, o que se traduz numa menor deformabilidade.

Tudo leva a crer que o BC 20/30 conduza a um melhor comportamento face à fadiga e deformações plásticas da mistura do que um betume duro convencional.

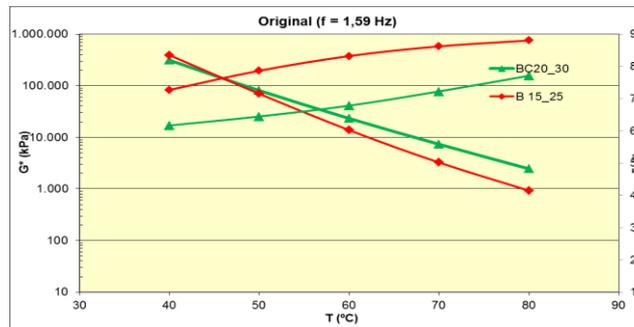


Fig.3. Representação isócrona dos ligantes BC 20/30 e B 15/25 no estado original

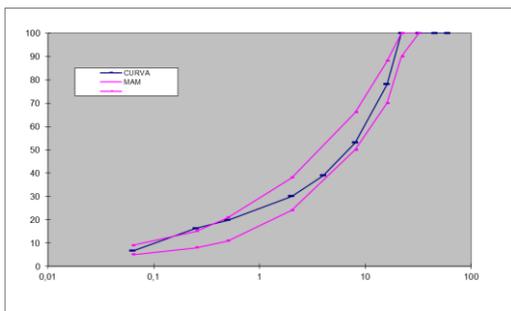
3.1 Mistura de Alto Módulo com BC-AM (BC 20/30)

Como exemplo, apresentam-se seguidamente os resultados de ensaios de laboratório realizados durante a formulação deste ligante. Assim, com o ligante BC 20/30 apresentam-se os seguintes resultados:

Quadro 3. Características BC 20/30

Penetração EN 1426 (0,1mm):	25
Temperatura de amolecimento EN 1427 (°C)	67,2
Viscosidade Brookfield mPa·s:	
135 °C	3550
150 °C	1247
175 °C	392

Utilizando a curva granulométrica mostrada (agregado de silício e filer de cal), conseguiram-se como média os seguintes valores nos ensaios de módulo de rigidez à tração direta:



Peneiro EN	Curva
60	100
45	100
32	100
22	100
16	78
8	53
4	38,9
2	30,1
0,5	19,8
0,25	16,3
0,063	6,6

Fig.4. Curva granulométrica

Quadro 4. Resultados dos ensaios

Provede	Densidade geométrica (g/cm ³)	Densidade sss (gr/cm ³)	Módulo dinâmico EN 12697-26 (MPa)
1	2,353	2,375	12.078
2	2,314	2,372	11.204
Media	2,334	2,374	11.640

4 RESULTADOS ENSAIO EBADE

Para caracterizar o comportamento deste ligante face a cargas repetitivas, foi realizado uma análise do mesmo através do ensaio EBADE, onde se submeteu a um conjunto de deformações a distintas temperaturas. Foram incluídos, com o intuito de comparar resultados, ensaios semelhantes para um betume convencional 15/25.

Os resultados obtidos encontram-se nos gráficos apresentados seguidamente:

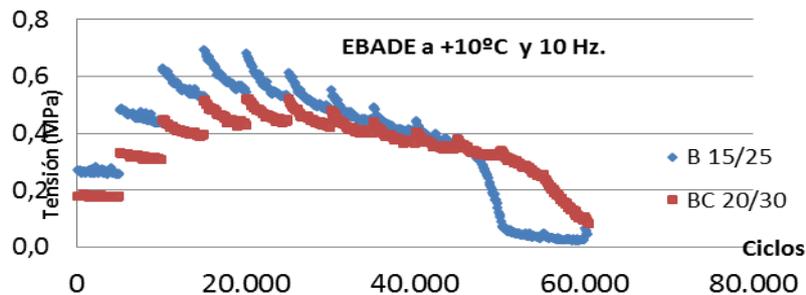


Fig.5. Ebade a 10 °C e 10 Hz

Analisando as tensões alcançadas por cada ligante ao longo dos ciclos, vemos como o betume convencional apresenta tensões superiores seguidas, com diferenças menores a maiores níveis de deformação, pelo betume BC 20/30. É importante destacar a rotura do ligante convencional a cerca de 50.000 ciclos, com uma queda acentuada da tensão admissível, enquanto que o BC 20/30 apresenta uma resistência superior.

Essa diferença de comportamento entre o B 15/25 e o BC 20/30 acontece igualmente a temperaturas baixas.

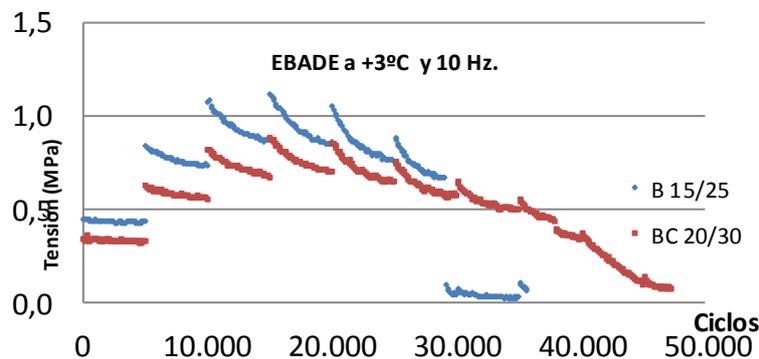


Fig.6. Ebade a 3 °C e 10 Hz

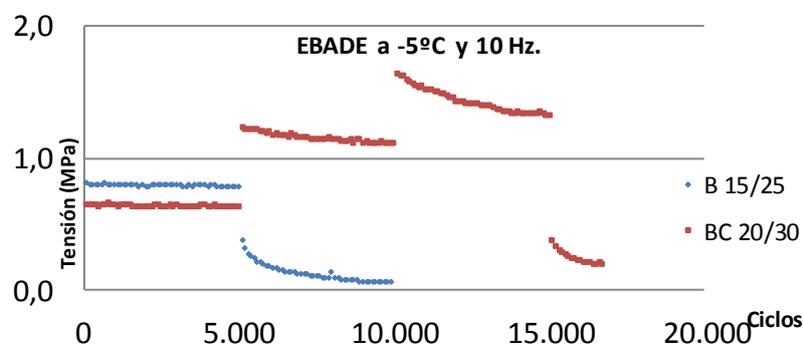


Fig.7. Ebade a -5 °C e 10 Hz

Tanto a 3 °C como a -5 °C, observa-se que conforme se aumenta a rigidez do material, se alcançam picos de tensão maiores em todos os ligantes.

Para todas as temperaturas ensaiadas, comprova-se a modificação real produzida pelo pó de borracha incorporado no comportamento do ligante BC 20/30, que oferece resistência durante maior número de ciclos, quando comparado com o B 15/25.

4.1 Análise dos Módulos de Rigidez

Os módulos medidos durante o ensaio EBADE apresentam o betume convencional B 15/25 como o mais rígido, alcançando valores inferiores. Isto, normalmente, implicaria, em condições similares de uma mistura betuminosa, módulos de rigidez mais elevados. No entanto, demonstra-se como a longo prazo se vê fragilizada por uma menor ductilidade deste betume. A descida do módulo no final do ensaio conduz a uma rotura do tipo frágil.

Não é este o caso do betume BC 20/30. O seu módulo evolui formando uma curva com menos tendência (menor suscetibilidade), sem rotura brusca e com capacidade para resistir a um maior número de ciclos.

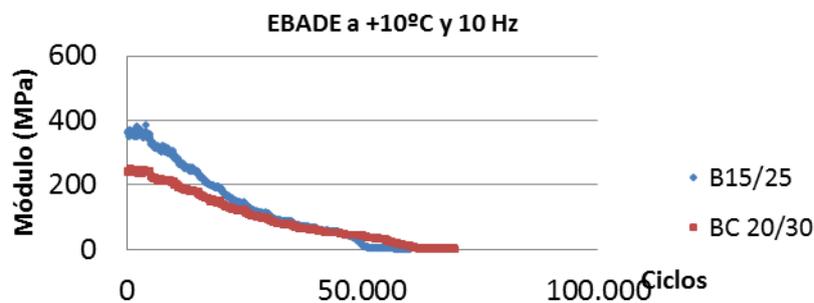


Fig.8. Ebade a 10 °C e 10 Hz

O comportamento a temperaturas mais baixas, e por conseguinte mais críticas no que se refere à rigidez e fadiga é apresentado nos gráficos a 3 °C e -5 °C:

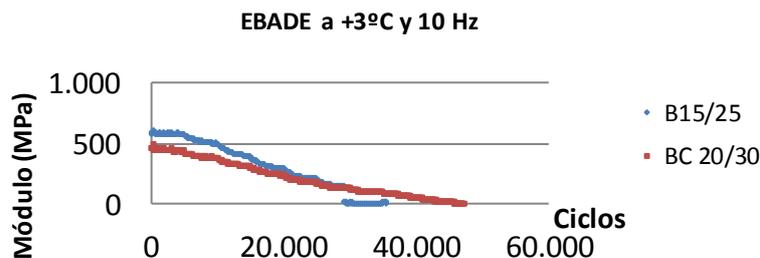


Fig.9. Ebade a 3 °C e 10 Hz

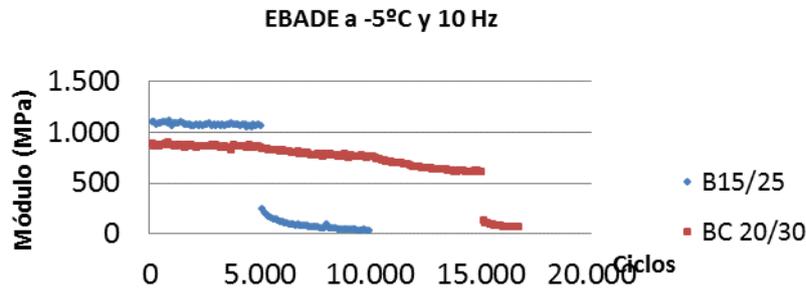


Fig.10. Ebade a -5 °C e 10 Hz

Novamente, o comportamento do betume convencional é esperado mais rígido mas também bastante mais frágil do que o betume melhorado com borracha e modificado com polímeros.

4.2 Energias de Deformação

A energia de deformação é um dos parâmetros mais interessantes deste ensaio. A energia dissipada é normalmente maior conforme aumenta a temperatura, ainda que o módulo e tensões alcançadas sejam menores. Energias dissipadas maiores implicam maior tenacidade dos ligantes, e por conseguinte das misturas betuminosas com eles fabricadas. Dissipar-se-á mais energia no processo de falha. De forma equivalente, seriam necessários mais ciclos de carga (passagem de veículos) para que se produza a falha. É um fator que afeta também, por exemplo, a velocidade de propagação das fissuras nas camadas do pavimento.

Nesta comparação de ligantes, supõe-se como premissa que se alcança as duas prescrições das misturas de alto módulo (módulos e tensões do ligante suficientemente elevados) e espera-se, à priori, um melhor comportamento face à fadiga no ligante que apresente maiores energias de deformação.

Como se pode verificar nos gráficos que se seguem, para todas as temperaturas estudadas, a superfície sob a curva de energia dissipada é maior no caso do betume de borracha de alto módulo do que no caso do betume convencional, demonstrando assim um melhor comportamento.

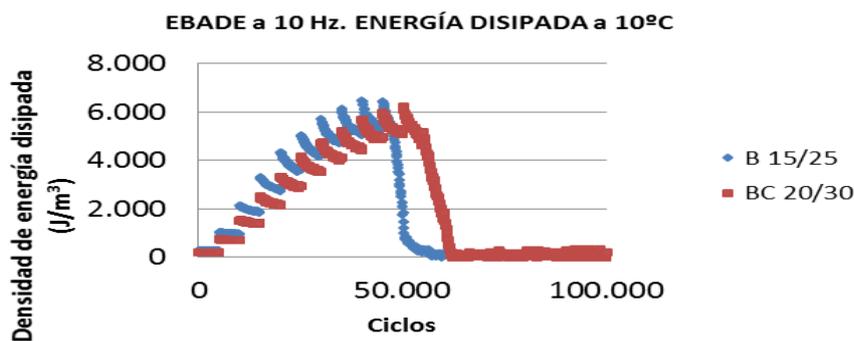


Fig.11. Energias dissipada a 10 °C

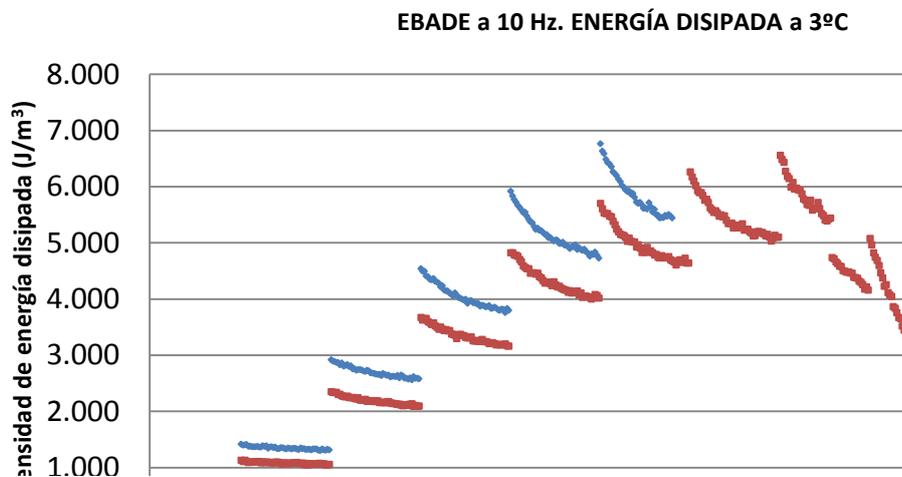


Fig.12. Energias dissipada a 3 °C

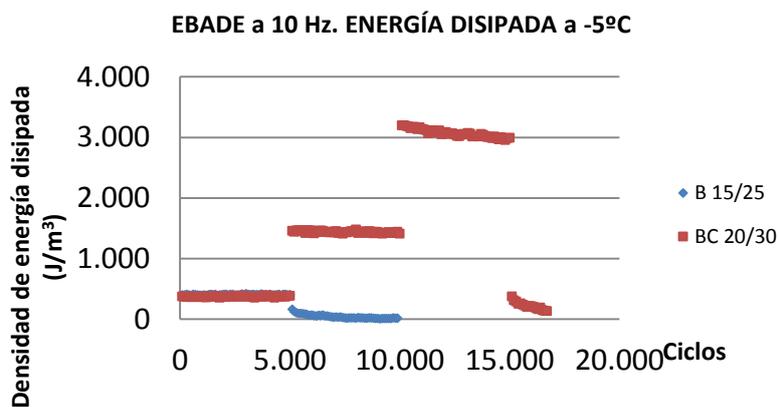


Fig.13. Energia dissipada a -5 °C

É interessante destacar as diferenças encontradas em função da temperatura de ensaio, especialmente no comportamento do B 15/25 que se fragiliza de uma forma muito mais drástica que o betume melhorado com borracha BC 20/30. A -5 °C. Este último é capaz de manter uma certa tenacidade até em três níveis de deformação, muito acima do caso do betume B 15/25.

Em todos os casos, o BC 20/30 demonstra uma tenacidade que sem dúvida melhoraria o desempenho das misturas de alto módulo com ele fabricadas, sobretudo em comparação com o B 15/25.

Os gráficos de densidade de energia dissipada mostram também como com deformações baixas a energia se mantém constante. É de destacar que os dois ligantes apresentam praticamente o mesmo resultado no primeiro ciclo de carga, ou seja, não se observa deterioração do material. Começam-se a ver diferenças ao aumentar a deformação nos ciclos de carga seguintes, mostrando assim os níveis de deformação de cada ligante a partir dos quais se deteta a falha. Por um lado, os níveis aumentam de uma forma lógica com a temperatura e com a rigidez do material, e por outro lado é de destacar como o B 15/25 começa a sofrer danos muito antes do BC 20/30.

Em geral podemos dizer que embora um betume convencional B15/25 seja capaz de conduzir a maiores valores de módulo e rigidez, a sua suscetibilidade térmica é mais acentuada, sendo que a rotura frágil do material se produz num menor número de ciclos. Por esse motivo também as deformações de rotura são claramente inferiores (Figura 11). Comparando, para a mesma temperatura, a resistência à fadiga do betume BC 20/30 estima-se superior ao do betume B 15/25, refletindo-se o mesmo nas misturas betuminosas de alto módulo com eles fabricadas.

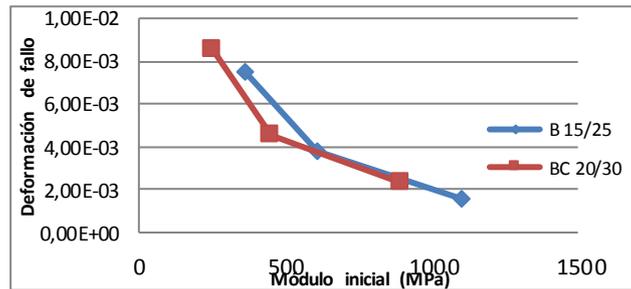


Fig.11. Módulo inicial face à deformação de falha a 10, 3 e -5 °C

4.3 Ensaio de Fadiga

Com o objetivo de confirmar o comportamento do ligante BC 20/30, foram realizados ensaios de fadiga em misturas de alto módulo fabricadas com este betume e também com o betume 15/25 convencional. Os resultados podem ser observados na figura seguinte como sendo retas de fadiga e confirmam o melhor comportamento do ligante que incorpora borracha, com uma lei de fadiga situada acima da do B 15/25 e com menor declive.

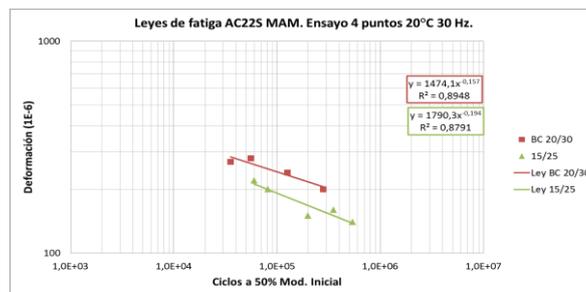


Fig.12. Ensaio de fadiga AC 22S

5 CONCLUSÕES

Podemos retirar as seguintes conclusões:

- (i) A incorporação de pó de borracha de pneus usados para a obtenção de betumes de alto módulo (BC 20/30) conduz a melhorias significativas destes ligantes em relação a um betume convencional 15/25;
- (ii) Destas melhorias destacam-se a menor suscetibilidade térmica, a maior elasticidade do material e um comportamento mais tenaz, que se traduz em misturas menos frágeis e mais resistentes à fadiga;

6 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos técnicos da Universidade Politécnica de Barcelona, Félix Pérez, Rodrigo Miró e Ramón Botella, pela sua colaboração na realização destes trabalhos.

7 REFERÊNCIAS

- Félix E. Pérez Jiménez, Rodrigo Miró Recasens, Adriana Martínez, Ramón Botella Nieto, Gonzalo A. Valdes Vidal: “Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas. Ensayos Fénix y EBADE”- . Revista Asfalto y Pavimentación.
- Maria del Mar Colás Victoria, Vicente Pérez Mena: “Reología de los betunes con caucho”. Revista Carreteras, especial CILA 2013.