

# PROJETO ECOSURF: CAMADAS DE DESGASTE DESCONTÍNUAS DE ALTAS PRESTAÇÕES PRODUZIDAS COM MATERIAL FRESADO REUTILIZADO EM TAXAS DE 30%

M<sup>a</sup> Elena Bautista Dávila  
Repsol, Madrid, España, mebautistad@repsol.com

Hélio Nunes, Repsol  
Lisboa, Portugal, hnunes@repsol.com

M<sup>a</sup> Lucía Miranda, Repsol  
Madrid, España, marialucia.miranda@repsol.com

## RESUMO

A reciclagem de misturas betuminosas é fundamental para a circularidade no setor da pavimentação. Atualmente, a maioria das intervenções que ocorrem nas estradas consistem em operações de reabilitação superficial, nas quais se fresa apenas a camada de desgaste. A normativa espanhola atual não permite a incorporação de material fresado em camadas de desgaste para as categorias de tráfego mais exigentes, pelo que este material retirado nas operações de reabilitação se está a desvalorizar ao ser reutilizado em camadas intermédias e de base, apesar do seu alto potencial de reutilização e da sua qualidade.

Nesta comunicação descrevem-se os trabalhos realizados para a formulação de uma mistura descontínua BBTM para camadas de desgaste. Na sua composição utiliza-se 30% de material fresado oriundo de camadas de desgaste, os quais são caracterizados para determinar as suas propriedades físicas e reológicas, e um betume modificado incluindo rejuvenescedor, que restaura as características do ligante envelhecido até conseguir as propriedades finais de um betume modificado de grau PMB 45/80-65. A mistura é comparada com outra equivalente sem material reutilizado, tanto em laboratório como num troço experimental na A1, na região de Madrid.

## PALAVRAS CHAVE

Reciclagem, economia circular, ligante modificado rejuvenescedor.

## OBJETIVO

Nesta comunicação, expõe-se a experiência e os resultados da utilização de um betume modificado com rejuvenescedores numa mistura descontínua do tipo BBTM11B, com uma taxa de reutilização de 30% de material recuperado e selecionado da camada de desgaste, para alcançar um betume final na mistura de tipo semelhante a um PMB 45/80-65, para aplicação numa obra de reabilitação superficial da via de veículos lentos da autoestrada A-1, ao passar pela Comunidade de Madrid (km 44+200 a 44+950) com tráfego pesado T0 (IMD 1982 veículos pesados/dia), com inclinação longitudinal ascendente de 4,1%, com a intenção de submeter o trecho experimental às solicitações de tráfego mais exigentes possíveis. Comparando-o com outro trecho contíguo entre o km 44+950 e 45+700 com o mesmo tipo de mistura BBTM11B com PMB 45/80-65 e sem material reutilizado. Na Figura 1, mostra-se o mapa com a configuração dos trechos.



Figura 1. Configuração dos trechos

## 1. Introdução

Se analisarmos os dados publicados sobre a quantidade de mistura betuminosa utilizada conforme o tipo de camada do pavimento, mostram que na maioria dos países da Europa mais de 50% são para camadas de desgaste, e em particular em Espanha representa cerca de 70%, segundo dados da Associação Europeia de Produtores de Asfalto (EAPA) [1]. Esses dados indicam que a maioria das intervenções consiste em operações de reabilitação superficial e, pontualmente, estrutural do pavimento, que envolvem processos de fresagem de misturas betuminosas (RAP) e geração de grandes quantidades desse material, desafiando sua reutilização numa percentagem elevada para fabricação de novas misturas. Além disso, deve-se considerar a diminuição de pedreiras com agregados de qualidade ou a impossibilidade de abertura de novas pedreiras de agregados naturais, pelo que, a reutilização do material fresado para a fabricação das misturas betuminosas deve ser uma realidade e uma necessidade, focada em qualquer tipo de camada e mistura.

Na atual normativa espanhola de prescrições técnicas gerais para estradas e pontes, o PG3, contempla-se a possibilidade de utilizar até 15% de material fresado como agregado nas misturas colocadas em camadas de base e intermédias [2], e no PG4, que trata da reutilização de camadas de pavimentos e pavimentos betuminosos, no seu Artigo 22 (Reutilização a quente e semi-quente em central de camadas betuminosas) contempla a utilização de taxas mais elevadas em camadas de base e intermédias (até 80%) [3].

Tendo em conta as exigentes propriedades físicas requeridas aos agregados, ao não se permitir na normativa a utilização de fresado nas camadas de desgaste, está-se a desvalorizar o material fresado dessas camadas. A utilização desse fresado de alto potencial, tanto do ponto de vista económico como ambiental, mitigaria o problema da falta de disponibilidade de agregado virgem.

Atualmente, a tecnologia de fabricação de misturas recicladas melhorou enormemente. Além disso, há um maior conhecimento sobre o rejuvenescimento de ligantes envelhecidos. Em suma, é cada vez mais importante focar na fresagem seletiva de camadas e na análise das suas características para avaliar a sua capacidade de reutilização para a melhoria da qualidade de novas misturas betuminosas.

Neste projeto, foram formuladas, desenvolvidas e fabricadas misturas recicladas a quente para camadas de desgaste descontínuas, que utilizam na sua composição até 30% de material recuperado de mistura betuminosa de camada de desgaste. Para a fabricação dessas misturas, foi formulado um betume modificado com rejuvenescedor, com o qual se recuperam as prestações do ligante envelhecido de forma que as suas características finais sejam as de um betume modificado de tipo PMB 45/80-65.

## 2. Materiais

### 2.1 Fresado reutilizado

O fresado proveniente dos pavimentos de estradas é um material com grande potencial de reutilização em novas misturas betuminosas, pelo que deve ser tratado e analisado em detalhe para conhecer as suas propriedades, principalmente se vai ser utilizado em camadas de desgaste. Na Figura 2, mostra-se a pilha do fresado da camada de desgaste que foi utilizado para este trabalho.



Figura 2. Pilha de fresado de camadas de desgaste

Para este projeto, foi selecionada, recuperada e analisada uma camada de desgaste envelhecida de mistura descontínua. Por outras palavras, foi realizada uma fresagem seletiva da camada, depósito em central, análise seletiva do material e, finalmente, tratamento em duas frações, uma vez avaliado que o material cumpria para ser rejuvenescido e reutilizado.

Os ensaios utilizados para conhecer as suas características essenciais foram a granulometria das partículas (EN 933-1), o teor de ligante solúvel (EN 12697-1) e a recuperação de ligante solúvel (EN 12697-3). Sobre este último, para conhecer seu estado físico, foram utilizados ensaios empíricos como penetração com agulha (EN 1426), temperatura de amolecimento (EN 1427) e ponto de fragilidade Fraass (EN 12593); ensaios químicos para conhecer a sua composição como teor em asfaltenos (ASTM D3219), e ensaios reológicos prestacionais utilizando o reómetro de corte dinâmico (DSR) (EN 14770), para avaliar o seu comportamento a temperaturas intermédias e altas de serviço, e por fim ensaios de fluência-recuperação sob múltiplos esforços repetidos.

Na Tabela 1 indicam-se os resultados das características obtidas em relação ao ligante extraído do material fresado.

Tabela 1. Caracterização do ligante extraído do fresado selecionado

Ensaio	Ligante do fresado
Ligante s/mistura (%)	<b>3,7</b>
Penetração (0,1 mm)	<b>5</b>
Temperatura de amolecimento (°C)	<b>84,4</b>
$T_{G^*} = 15 \text{ kPa}$ (25 mm, 1 mm gap)	<b>85,4</b>
$\delta T_{G^*} = 15 \text{ kPa}$	<b>67,8</b>
$T_{G^*} = 5 \text{ MPa}$ (8 mm, 2 mm gap)	<b>39,0</b>
$\delta T_{G^*} = 5 \text{ MPa}$	<b>46,9</b>

Para melhorar o conhecimento do grau de modificação do ligante envelhecido recuperado, foram realizados ensaios de espectroscopia IV (Infravermelhos) comparativos com um betume modificado, betume convencional e polímero virgem, concluindo que se tratava de fresado com um ligante bastante envelhecido e com a presença de polímeros. Na Figura 3, mostra-se o gráfico da espectroscopia IV.

#### Espectroscopia IV.

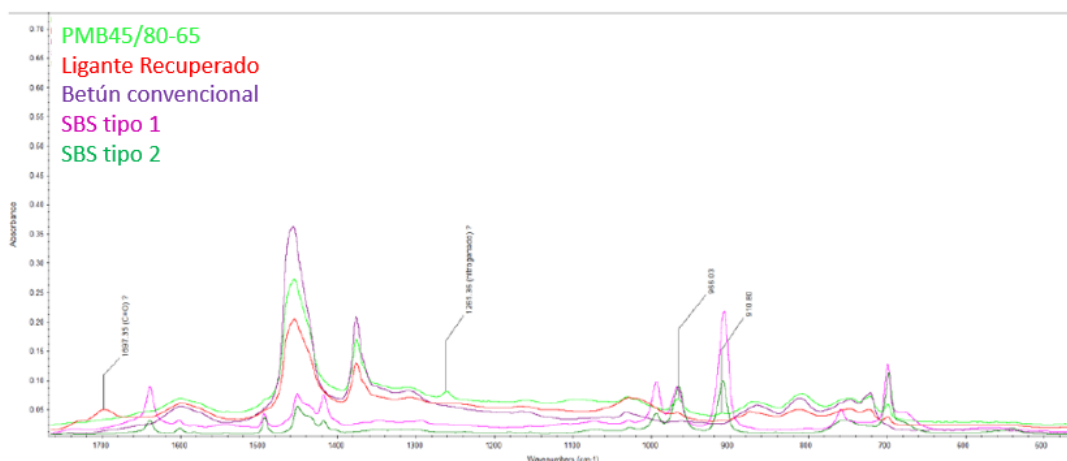


Figura 3. Espectroscopia IV do ligante recuperado, polímeros e betumes de referência

Os dados empíricos mostraram baixa consistência e altos valores da temperatura de amolecimento. Os dados reológicos, como a consistência a elevadas temperaturas de serviço ( $T_{G^*} = 15 \text{ kPa}$ ), indicaram valores muito altos de temperatura e ângulo de fase, mostrando que se tratava de um ligante com elevado grau de envelhecimento e que não recuperava com eficácia as cargas comparativamente a ligantes modificados menos

envelhecidos. Os valores obtidos a temperaturas intermédias ( $TG^* = 5 \text{ MPa}$ ) também indicaram valores altos de temperatura e ângulo de fase em comparação com os obtidos com um ligante modificado fresco.

Esses ensaios foram essenciais para conhecer o grau de envelhecimento do ligante e as suas propriedades mecânicas, para assim avaliar que tipo de betume modificado era necessário formular e que grau de rejuvenescimento era necessário.

## 2.2 Betume modificado com polímeros e rejuvenescedores

Sobre os componentes que fazem parte do fresado, o ligante foi o que sofreu um envelhecimento mais severo, com perda das suas propriedades essenciais como aglutinante de todo o material granular e capacidade de dar uma resposta eficaz às cargas do tráfego, enquanto os agregados só tiveram um desgaste superficial. No entanto, para o ligante envelhecido é possível conseguir uma recuperação das suas propriedades com a incorporação de aditivos denominados "rejuvenescedores" no betume modificado base, para conseguir um novo betume modificado que busca as mesmas prestações de um BMP virgem.

Para a adição de "rejuvenescedores" é fundamental, em primeiro lugar, conhecer as características do betume envelhecido disponível no material fresado, tal como foi analisado e indicado no ponto anterior, pois permitenos fixar a dosagem de rejuvenescedores é necessária para regenerar, no maior grau possível, a composição química do betume envelhecido. Para isso, utilizamos e avaliamos parâmetros ou relações, considerando uma série de índices que nos permitem relacionar as diferentes proporções dos componentes químicos do betume (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos). Na Figura 4, mostram-se os componentes químicos dos betumes. Na Figura 5, mostra-se uma representação esquemática de como esses componentes se distribuem no betume.

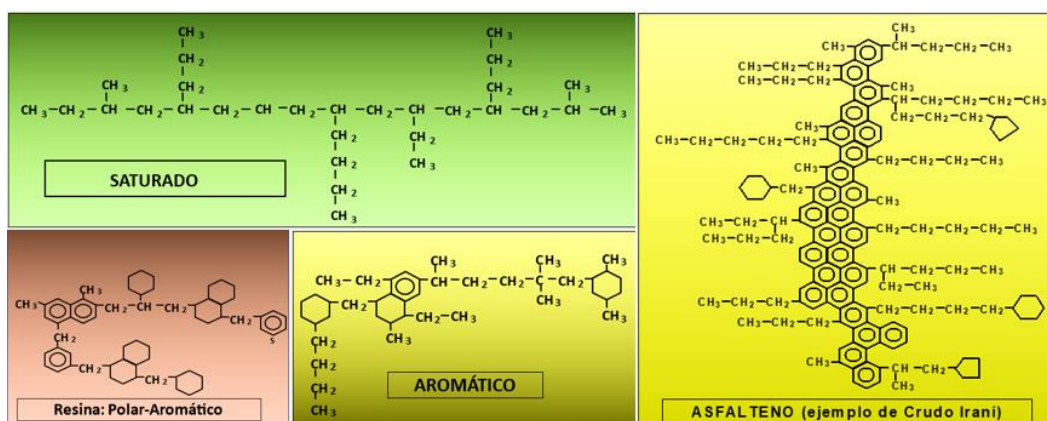


Figura 4. Componentes químicos do betume



Figura 5. Distribuição dos componentes no betume

Esta informação permite-nos entender a influência dos maltenos na estabilidade do betume face à oxidação, a compatibilidade dos componentes polares dos maltenos face aos hidrocarbonetos saturados e a instabilidade coloidal dos componentes sólidos (asfaltenos e parafinas) face aos componentes líquidos dispersantes (polares e hidrocarbonetos insaturados). O objetivo é manter uma estrutura físico-química de cada um dos grupos presentes, nas proporções adequadas, para assegurar um bom comportamento face às solicitações do tráfego.

Além disso, é necessário avaliar o ligante final que queremos ter na mistura em função da taxa de reciclagem que se vai incorporar à mistura e o tipo final de mistura a conseguir, sem esquecer a tecnologia que vai ser usada na fabricação da mistura reciclada.

Com base em todos esses fatores e indicações prévias, foi formulado um betume modificado (PMB 45/80 REJUV) com a carga polimérica adequada e aditivos rejuvenescedores na sua composição, com o objetivo de restaurar as propriedades do ligante envelhecido e conseguir um ligante modificado final do tipo PMB 45/80-65, empregando uma taxa de reciclagem de 30% para obter uma mistura descontínua a quente tipo BBTM11B. Preparou-se em laboratório uma mistura deste PMB REJUV formulado nas mesmas proporções que na mistura final com o ligante extraído da fresado. As análises do PMB REJUV e da mistura de PMB REJUV com o ligante envelhecido proveniente da fresagem constam da Tabela 2.

Tabela 2. Características do PMB 45/80 REJUV e resultados da caracterização da mistura do ligante envelhecido com PMB 45/80 REJUV

Ensaio	PMB 45/80 REJUV	Especificação		PMB 45/80 REJUV R30	PMB 45/80-65 Referência
		Min.	Máx.		
Penetração, 0,1 mm	87	70	100	40	45-80
Temperatura de amolecimento, °C	70,0	65	70	66	≥65
Força ductilidade, 5 °C, J/cm <sup>2</sup>	6,8	--	--	4,3	≥3
Recuperação elástica, %	92	≥70	--	80	≥70
<b>Betume envelhecido pelo RTFOT</b>					
T <sub>G*</sub> = 15 kPa (25 mm, 1 mm gap)	51,3			63,3	58,4
δ T <sub>G*</sub> = 15 kPa	56,4			63,1	60,7
T <sub>G*</sub> = 5 MPa (8 mm, 2 mm gap)	12,1			19,1	16,3
δ T <sub>G*</sub> = 5 MPa	56,6			49,2	48,2

### 2.3 Fórmula de trabalho

Uma vez conhecidas as características do fresado da camada de desgaste e formulado o betume com rejuvenescedor, procedeu-se à formulação em laboratório da mistura betuminosa com percentagens de fresado até 30%. Para isso, selecionou-se uma mistura descontínua tipo BBTM11B, utilizando como agregado natural um agregado porfírico procedente de Villacastín (Segovia), areia calcária de Morata de Tajuña (Madrid) e filer de aportação.

As características dos agregados naturais utilizados na formulação da mistura cumprem com as especificações do PG-3, para misturas betuminosas descontínuas a quente, para camadas de desgaste.

### 3. Trecho experimental

Após a formulação do betume modificado com rejuvenescedor com base na seleção, tratamento e estudo do fresado, a fórmula e verificação das misturas BBTM11B no laboratório e a verificação de que podiam ser fabricadas em central, procedeu-se à execução do trecho experimental.

#### 3.1 Ensaio de caracterização das misturas do trecho experimental

Foram fabricadas as duas misturas para os trechos experimentais, uma incorporando o fresado com o PMB 45/80 REJUV e a outra sem fresado com PMB 45/80-65 convencional. As granulometrias das fórmulas de trabalho, bem como o fuso granulométrico das misturas BBTM 11B, estão na Tabela 3.

Tabela 3. Fórmulas de trabalho das duas misturas (padrão sem fresado e 30% de fresado)

Peneiros, UNE EN	Fuso granulométrico mistura BBTM 11B (PG3)		Fórmula trabalho padrão	Fórmula trabalho REJUV R30
16	100	100	100	100
11,2	90	100	99	100
8	60	80	67	69
4	17	27	20	22
2	15	25	18	21
0,5	8	16	11	13
0,063	4	6	5,2	5,6
Ligante s/m (%)	5,0		5,3	5,2

Estas misturas foram caracterizadas através de ensaios de teor de ligante, EN 12697-39, granulometria dos agregados, EN 12697-2, densidade máxima, EN 12697-5, densidade aparente das amostras, EN 12697-6, teor de vazios, EN 12697-8, sensibilidade à água, EN 12697-12, ensaio de rolamento, EN 12697-22, escorrimento, EN 12697-18, perda de partículas, EN 12697-17, ensaio de rigidez, EN 12697-26, e resistência à fadiga, EN 12697-24. Na Tabela 4, constam os ensaios realizados sobre a mistura fabricada para o trecho de experimental.

Tabela 4. Ensaios mecânicos sobre provetes de mistura fabricada para o trecho experimental compactados em laboratório

Mistura BBTM 11B	Padrão	REJUV R30
Densidade máx. (Mg/m <sup>3</sup> )	2,524	2,514
Densidade aparente, (Mg/m <sup>3</sup> )	2,121	2,064
Vazios mistura (%)	16	17,9
Vazios agregados (%)	26,6	28,6
Vazios preenchidos ligante (%)	40,1	37,4
Resistência em ar (ITS) (MPa)	1,61	1,37
Resistência em água (ITS) (MPa)	1,51	1,23
Resistência conservada (ITSR) (%)	94,3	89,7
WTS ar (µm/ 1000 ciclos)	0,069	0,066
RD ar (%)	7,06	6,50
RD ar (mm)	2,12	1,96
Escorrimento (%)	0,34	0,22
Perda partículas (%)	5,7	4,7
Módulo rigidez, (MPa)	2984	2145
Fadiga 4 ptos, $\epsilon_6$ (µm/m)	210	189

Além de compactar amostras para a realização de ensaios mecânicos, foram recuperadas através de extração com diclorometano (EN 12697-1, EN 12697-3) para posterior caracterização. Os resultados obtidos na caracterização de ambos os ligantes estão na Tabela 5.

Tabla 5. Caracterização de ligantes extraídos das misturas fabricadas para o trecho experimental

Mistura BBTM 11B	Padrão	REJUV R30
Ligante s/mistura (%)	4,7	4,9
Penetração (0,1 mm)	34	40
Temperatura de amolecimento (°C)	75,2	74,6
MSCRT 60°C		
Recuperação a 3,2 kPa (%)	89,0	86,3
$R_{diff}$ (%)	-0,4	-0,4
$J_{nr-diff}$ (kPa)	0,6	2,1

Os resultados da resistência à fissuração são apresentados nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Dados de ensaio de fissuração (ensaio Fénix) mistura REJUV

Temperatura de ensaio (°C)	20	5	-5
Mistura	BBTM 11B (REJUV R30)		
Indicador de Rigidez (IRT) (MPa/mm)	1,58	2,84	3,07
Energia total de rotura (Gd) (J/m <sup>2</sup> )	370	856	681
Tenacidade (T) (J/m <sup>2</sup> )	310	709	531
Indicador de tenacidade (IT) (mN)	557	607	184
Afastamento (d50pm) (mm)	2,19	1,22	0,68
Carga máxima (Fmax) (kN)	0,46	1,55	2,00
Resistência à tração (RT) (MPa)	0,16	0,60	0,74
Afastamento de tenacidade (DT) (mm)	1,73	0,85	0,35

Tabela 7. Dados do ensaio de fissuração (ensaio Fénix) mistura padrão

Temperatura de ensaio (°C)	20	5	-5
Mistura	BBTM11B (padrão)		
Indicador de Rigidez (IRT) (MPa/mm)	1,49	2,02	3,07
Energia total de rotura (Gd) (J/m <sup>2</sup> )	462	610	590
Tenacidade (T) (J/m <sup>2</sup> )	397	485	410
Indicador de tenacidade (IT) (mN)	566	305	115
Afastamento (d50pm) (mm)	1,76	0,95	0,60
Carga máxima (Fmax) (kN)	0,66	1,54	2,40
Resistência à tração (RT) (MPa)	0,24	0,52	0,91
Afastamento de tenacidade (DT) (mm)	1,39	0,58	0,26

As curvas de isotenacidade obtidas no ensaio Fénix encontram-se representadas na Figura 6.

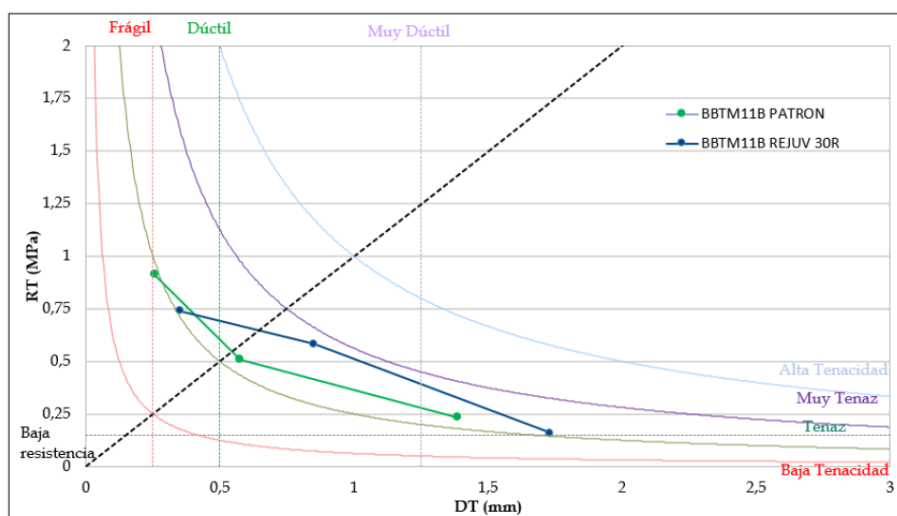


Figura 6. Curvas de isotenacidade (ensaio Fénix)

Finalmente, em ambos os trechos foram realizadas várias medições da macrotextura superficial, EN 13036-1, cujos resultados constam na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de macrotextura superficial

Ensayo	Padrão	REJUV R30
MTD médio (mm)	1,78	2,31

Na Tabela 9. apresenta-se o resumo comparativo dos resultados de todas as fases executadas.

Tabela 9. Comparativo dos resultados mecânicos nas diferentes fases do projeto.

Ensaio	Fórmula laboratório		Provas em central		Trecho experimental	
	Padrão	Rejuv R30	Padrão	Rejuv R30	Padrão	Rejuv R30
Densidade máxima (Mg/m <sup>3</sup> )	2,501	2,481	2,521	2,506	2,524	2,514
Conteúdo em vazios (%)	13,7	10,6	11,7	13,8	16,0	17,9
Resistência conservada (ITSR) (%)	100,7	101,0	86,1	90,8	94,3	89,7
WTS ar (µm/ 1000 ciclos)	0,022	0,073	0,033	0,032	0,069	0,066
Escorrimento (%)	-	-	0,35	0,34	0,34	0,22
Perda partículas (%)	5	9,2	9	5,2	5,7	4,7
Rigidez (MPa)	-	-	3162	3559	2984	2145
Fadiga (µm/m)	-	-	167	233	210	189

#### 4. Conclusões

Os resultados dos ensaios da formulação de laboratório, do ensaio industrial em central e da aplicação em obra, permitem concluir que a mistura formulada no projeto Ecosurf tem as mesmas características mecânicas e de desempenho que uma mistura tradicional sem adição de material reciclado. As propriedades mecânicas obtidas em ambas as misturas, caracterizadas segundo os ensaios que o PG-3 estabelece para a formulação de misturas a quente, são semelhantes. Portanto, com este projeto, demonstra-se que é possível executar camadas de desgaste ambientalmente mais sustentáveis, reutilizando material proveniente da fresagem das camadas de desgaste sobre as quais se pretende atuar. Nas figuras 7 e 8, mostra-se a aplicação da mistura reciclada no trecho experimental.



Figuras 7 e 8. Espalhamento da mistura reciclada no trecho experimental

Quanto aos ligantes, verificou-se que os resultados dos ensaios empíricos e reológicos realizados ao betume extraído do trecho experimental com betume PMB REJUV são semelhantes aos obtidos com o PMB 45/80-65 extraído da mistura padrão. Além disso, observa-se uma notável melhoria das propriedades de desempenho em relação às que apresentava o betume extraído da fresagem inicial.

Se analisarmos fundamentalmente os resultados obtidos da mistura reciclada descontínua fabricada em central comparativamente com a mistura de referência, podemos concluir que as propriedades mecânicas obtidas na mistura reciclada a 30% com betume modificado com rejuvenescedor, caracterizada segundo os ensaios que o PG-3 estabelece para a formulação de misturas a quente, são muito semelhantes às da mistura de referência.

Os valores de módulo da mistura padrão e da mistura com fresado e PMB REJUV, parâmetro que indica a rigidez das misturas, encontram-se na mesma ordem de magnitude. Assim, mantendo as temperaturas de mistura, com o betume modificado com rejuvenescedor compensa-se a rigidez que o ligante envelhecido aportado pelo fresado proporciona de forma satisfatória.

Por outro lado, os dados extraídos dos ensaios de fadiga a quatro pontos indicam muito bons valores de durabilidade da mistura reciclada, pois suporta ciclos de carga semelhantes a qualquer amplitude de deformação. Nas figuras 9 e 10, apresenta-se a compactação da mistura reciclada no trecho experimental.



Figuras 9 e 10. Compactação da mistura reciclada no trecho experimental

Segundo os resultados obtidos na análise dos ligantes recuperados de ambas as misturas, podem-se extrair várias conclusões:

- Ambos os ligantes têm temperaturas de amolecimento semelhantes, sendo um pouco mais duro o ligante de referência, mas apresentando valores da mesma ordem. Isso demonstra que o ligante modificado com rejuvenescedor compensou o envelhecimento do ligante reutilizado.
- Os ensaios reológicos de desempenho de fluência-recuperação sob esforços repetidos (MSCR) indicam valores de recuperação de cargas semelhantes em ambas as misturas. A 60°C, ambos os ligantes apresentam uma resposta elástica semelhante a um esforço de 3,2 kPa e uma  $R_{diff}$  entre a recuperação a 0,1 e 3,2 kPa com o mesmo valor.
- Quanto à deformação por fluência não recuperável a diferentes níveis de esforço ( $J_{nr-diff}$ ), parâmetro que indica a deformação permanente e a dependência da resistência ao esforço dos ligantes ensaiados, é um pouco melhor no caso do ligante de referência. No entanto, demonstra-se que a carga polimérica do ligante modificado com rejuvenescedor compensa a rigidez do ligante envelhecido do fresado, obtendo-se valores de deformação não recuperável bastante bons em comparação com a mistura de referência.

Os resultados do ensaio Fénix de fissuração, que avaliam a tenacidade e ductilidade dos materiais uma vez iniciada a fissuração a diferentes temperaturas, indicam que a mistura reciclada apresentou bons resultados, o que evidencia que a carga polimérica do PMB 45/80 REJUV compensa com sucesso a menor capacidade elástica do ligante envelhecido, além de promover o seu rejuvenescimento. Segundo os resultados mecânicos de fissuração analisados, podem-se extrair as seguintes conclusões:

- Do ponto de vista da resistência à tração a diferentes temperaturas, verifica-se que a mistura reciclada com o PMB 45/80 REJUV obtém valores semelhantes aos da mistura padrão, apresentando maior resistência a 5°C.
- Se analisarmos o resto dos parâmetros às diferentes temperaturas de ensaio, a mistura reciclada apresentou menor rigidez que a mistura padrão a 20°C. À temperatura de 5°C, a rigidez da mistura com fresado é maior, mas sendo parecida em ambas as misturas. Os valores a -5°C em ambas as misturas são iguais.
- Isso indica a boa atuação dos aditivos rejuvenescedores do PMB 45/80 REJUV sobre o ligante envelhecido do fresado, permitindo uma mistura menos rígida a temperaturas de serviço intermédias (em torno de 20°C).
- Além disso, a baixas temperaturas (5 e -5°C) é necessária uma maior energia para produzir a rotura da mistura com o ligante modificado com rejuvenescedor.
- Quanto à tenacidade de suportar a carga antes da rotura completa, a mistura reciclada apresentou melhor tenacidade a 5 e -5°C. Esta propriedade evidencia que a carga polimérica do PMB 45/80 REJUV compensa muito bem a menor capacidade elástica do ligante envelhecido, além de demonstrar a boa capacidade dos aditivos rejuvenescedores para compensar os componentes envelhecidos do ligante reutilizado.

Na Figura 11, mostra-se o estado final da mistura reciclada no trecho de experimental.



Figura 11. Estado final da mistura reciclada no trecho experimental

## Referências bibliográficas

- [1] “*Asphalt in figures 2023*”. <https://epa.org/asphalt-in-figures/>
- [2] Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos.
- [3] Orden Circular OC 2/2023 sobre reutilización de capas de firmes y pavimentos bituminosos.