



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Infraestructuras sostenibles: desarrollo de mezclas asfálticas con residuos de la plasticultura

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Juan Griñán Llor
Director: Ramón Francisco Pamies Porras
Codirector: Gloria Motos Cascales



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, 2021

Índice

1- Introducción.....	2
2- Estado del arte	6
3- Objetivos	19
4- Materiales y métodos	21
4.1- Polietileno de baja densidad	21
4.2- SBS	22
4.3- Betún	23
4.4- Equipos de caracterización.....	24
5- Caracterización térmica de los polímeros	28
5.1- Ensayo termogravimétrico (TGA).....	29
6- Betunes modificados	33
6.1- Preparación de las mezclas.....	33
6.2- Ensayos de caracterización	34
6.2.1- Ensayo de viscosidad	35
6.2.2- Ensayo de penetración	37
6.2.3- Ensayo de punto de reblandecimiento	39
6.2.4- Ensayo de recuperación elástica	41
7- Análisis comparativo.	45
8- Resumen y conclusiones.....	47
9- Bibliografía	48

1- Introducción

La mezcla asfáltica es un material comúnmente utilizado para pavimentar carreteras, está formado por áridos (material granulado compuesto por arenas y gravas) y betún. El betún es un producto negro, viscoso y de composición muy compleja que actúa como agente ligante. En la terminología técnica española, el betún es un producto derivado del crudo del petróleo. Los betunes asfálticos son materiales termoplásticos de comportamiento viscoso muy complejo, dependiente de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas y pequeños tiempos de carga el betún presenta un carácter elástico, mientras que, a temperaturas moderadamente elevadas o tiempos de aplicación muy largos, desaparece prácticamente la elasticidad y el betún se deforma permanentemente y fluye [1].

Por otra parte, la contaminación por residuos plásticos es uno de los principales problemas medioambientales de nuestro tiempo. El plástico abandonado en medios naturales se fragmenta en trozos pequeños llamados “microplásticos”, al producirse esta fragmentación se liberan gases, principalmente metano y etileno, los cuales contribuyen en gran medida al calentamiento global. Debido a que los microplásticos no se degradan, estos terminan siendo absorbidos o ingeridos por diversos organismos.

La agricultura es uno de los principales sectores consumidores de plásticos a nivel mundial, en la Región de Murcia se consumen más de veinte mil toneladas al año, según Solplast S. A., una empresa fabricante de plásticos para la agricultura. La plasticultura es la utilización de plásticos en aplicaciones agrícolas, ha supuesto una revolución en la agricultura española aportando los siguientes beneficios [2]:

- Permite un nuevo modelo de negocio que hace rentable la agricultura, contribuyendo al progreso económico y social.
- Incremento de la renta de diversas regiones y aumento de la población.
- España se ha convertido en una potencia hortofrutícola que abastece a toda Europa.
- Mejora la productividad agraria en cantidad y calidad.
- Disminuye el consumo de agua y energía y lo hace más eficiente.
- Reduce la utilización de pesticidas, fitosanitarios y fertilizantes.

Los principales usos de los plásticos en la agricultura son para cubiertas de invernadero, ensilado y acolchado. A pesar de los beneficios del uso de plásticos en la agricultura, estos presentan algunos inconvenientes. La principal limitación del uso de plásticos en la agricultura es que deben ser recogidos tras el cultivo y reciclados adecuadamente según la normativa ambiental (Directiva 2008/98/EC).



Figura (1): Cubierta de invernadero

En el caso de los plásticos utilizados para cubiertas de invernadero y ensilado, denominados plásticos gruesos, hoy en día es posible reciclar el 100 % de estos plásticos para volver a fabricarlos, son plásticos limpios, de mayor valor y fáciles de reciclar. Sin embargo, para los plásticos utilizados en acolchado, también denominados plásticos finos por su pequeño espesor, aún no se ha encontrado una solución viable para su reciclado. Esto es debido a que estos plásticos se encuentran mucho más degradados que los utilizados en cubiertas de invernadero (intervienen factores como la exposición a la radiación UV y a la temperatura y que son de menor espesor). En general, los plásticos de acolchado son plásticos sucios (tasa de suciedad 40%-60%), de menor valor y complejos de reciclar.

Las características de los betunes son suficientes para obtener mezclas capaces de resistir la acción conjunta del tráfico y los agentes ambientales, pero, hoy en día, los ligantes bituminosos trabajan en condiciones cada vez más severas y extremas, presentando limitaciones en su respuesta ante cargas y sollicitaciones climáticas y su utilización en determinadas situaciones puede presentar importantes problemas. Con el objetivo de mejorar el comportamiento de los betunes y cumplir con las necesidades actuales se han desarrollado betunes modificados, los cuales consisten en la adición de un agente que modifica su estructura consiguiendo una mejora de sus propiedades [1]:

- Reducción de la susceptibilidad a la temperatura (reducir la sensibilidad del betún a las variaciones de temperatura).
- Mejor comportamiento mecánico y reológico.

- Buena adhesividad.
- Resistencia al envejecimiento.



Figura (2): Construcción de carretera

Uno de los agentes más empleados en la modificación de betunes son los polímeros, en especial los polímeros termoplásticos. Cuando el polímero se calienta, este se ablanda por lo que se puede incorporar al betún. Cuando este se enfría, vuelve a endurecerse, confiriendo a la mezcla una alta resistencia. Los polímeros más utilizados para la modificación de betunes para carreteras son, de entre los polímeros termoplásticos, el polietileno (PE) y el etileno acetato de vinilo (EVA) [1].

Sin embargo, debido al alto coste de los polímeros, en comparación con el del betún, el uso comercial del betún modificado es solo atractivo cuando la cantidad de polímero necesaria para mejorar significativamente el rendimiento de la mezcla es muy pequeña. Este inconveniente puede ser resuelto mediante el uso de polímeros de deshecho de la agricultura, anteriormente mencionados.

El objetivo general de este proyecto es desarrollar mezclas asfálticas modificadas con residuos de la plasticultura. De esta manera, obtendremos un betún modificado con mejores propiedades que las mezclas convencionales y más económico que el betún modificado comercial. También conseguimos extender el ciclo de vida de estos plásticos, lo que implica una reducción tanto de los residuos como de las emisiones de gases de efecto invernadero. Todas estas acciones impulsan el desarrollo de una economía circular y sostenible.

La economía circular es un modelo de producción y consumo basado en la reutilización y reciclaje de materiales y productos todas las veces que sea posible, creando un valor añadido. Implica una reducción de los residuos, ya que se extiende el ciclo de vida de los materiales [3].

Uno de los motivos para avanzar de una economía de producción lineal, en la que se consumen recursos, a una economía circular en la que se aprovechan, es el aumento de la demanda de materias primas, así como la escasez de recursos. Esto es debido a que el modelo tradicional requiere de grandes cantidades de materiales y energía, a bajo costo y de fácil acceso [3].



Figura (3): Esquema del funcionamiento de la Economía Circular

Según la Asociación Nacional de Fabricantes de Mezclas Asfálticas, Asefma, en el año 2020, se estimó la producción anual de mezclas asfálticas en 17 millones de toneladas [4]. Teniendo en cuenta además los residuos que se producen de la plasticultura, se podrían obtener mezclas asfálticas con mejores propiedades y más económicas, favoreciendo el desarrollo de la economía circular.

Este proyecto también ayuda a cumplir los “Objetivos de Desarrollo Sostenible” de la ONU o también conocido como “Agenda 2030”. Se trata de una iniciativa de las Naciones Unidas lanzada en 2015, basada en 17 objetivos de desarrollo sostenible cuya finalidad es asegurar el progreso social y económico sostenible en todo el mundo. En este caso, se cumple el objetivo 9 “Industria, innovación e infraestructura”, el cual hace referencia al desarrollo de industrias e infraestructuras sostenibles, así como la inversión en investigación e innovaciones científicas [5].

2- Estado del arte

Para la realización de este trabajo, se ha compilado una serie de artículos científicos relevantes que se han ordenado cronológicamente en este apartado.

En el año 2007, se publicó un artículo en la revista “Journal of Hazardous Materials” sobre un estudio de laboratorio en el cual se utilizaron muestras de estireno butadieno estireno (SBS) para obtener betunes modificados. El estudio fue realizado por Burak Sengoz, en la universidad Dokuz Eylül de Turquía. Los betunes modificados con polímeros se produjeron mezclando betún base (grado de penetración 50/70) con copolímeros en diferentes proporciones. La caracterización de los betunes modificados con polímeros fue obtenida mediante métodos convencionales. La morfología de las muestras, así como la distribución del área porcentual de los polímeros en el betún base se caracterizó y determinó mediante microscopía óptica de luz fluorescente y el software de análisis de imágenes Qwin-Plus, respectivamente. Los resultados indicaron que las propiedades y la morfología de los betunes modificados dependen del tipo de polímero y su contenido. La modificación de los polímeros mejora las propiedades convencionales del betún de base, como la penetración, el punto de reblandecimiento y la susceptibilidad térmica. A bajos contenidos de polímeros, las muestras revelan la existencia de partículas de polímeros dispersas en una fase continua del betún, mientras que a altos contenidos de polímeros se observa una fase polimérica continua [6].

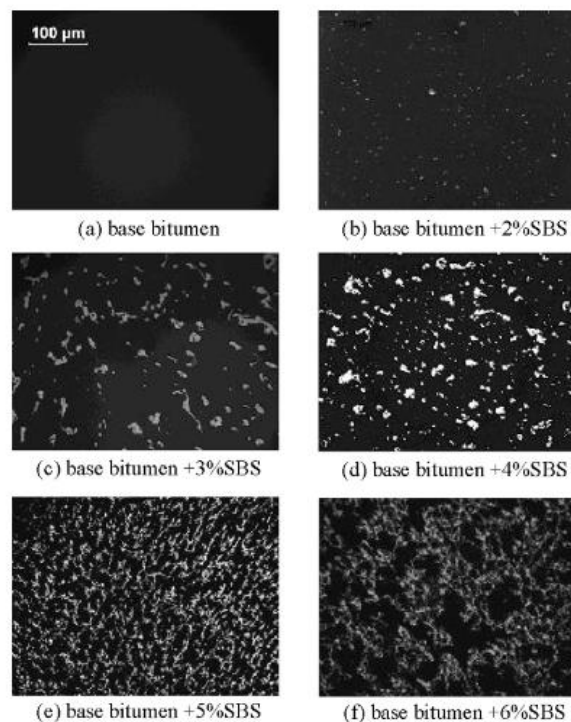


Figura (4): Imágenes fluorescentes de diferentes concentraciones de SBS

En el año 2008, se publicó una investigación en la revista “Polymer Testing” sobre las propiedades térmicas y mecánicas del betún modificado con polietileno reciclado. La investigación fue realizada en la Universidad de Huelva, por Cristina Fuentes-Audén. El estudio trata sobre la influencia de la concentración de polímeros en las propiedades reológicas y térmicas y en la microestructura del betún modificado con polietileno reciclado. Con este objetivo, se utilizó un polietileno reciclado como agente modificador para mejorar las características mecánicas de un betún de grado de penetración 150/200. La evolución de la microestructura y el comportamiento térmico y reológico de las mezclas se siguió mediante microscopía óptica, mediciones MDSC, ensayos de cizallamiento estacionario y oscilante, y análisis térmico mecánico dinámico (DMTA). Las concentraciones de polímero reciclado de hasta 15 % en peso condujeron a una mejora de las propiedades reológicas del betún modificado, útil para aplicaciones de pavimentación. Las mayores concentraciones de polímero reciclado dan lugar a ligantes modificados adecuados para tejados [7].

En el año 2008, se publicó una investigación en la revista “Construction and Building Materials” sobre la influencia del envejecimiento de betunes en la evolución de la estructura, morfología y reología de un betún base y un betún modificado con SBS. El autor principal del artículo es Shao-Peng Wu, el estudio se realizó en la Universidad Tecnológica de Wuhan (China) en colaboración con la Universidad Tecnológica de Delft (Holanda). Se estudió la influencia del envejecimiento en la evolución de la estructura, morfología y reología de un betún base y un betún modificado con SBS. Estas características se investigaron mediante infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), microscopía de fuerza atómica (AFM) y el reómetro de cizallamiento dinámico (DSR), respectivamente. Se aplicaron dos métodos de envejecimiento por simulación en laboratorio, denominados prueba de horno de laminación de película fina (RTFO) y prueba de recipiente de envejecimiento a presión (PAV). La temperatura de envejecimiento del PAV se seleccionó a 60 °C, que se considera coherente con la alta temperatura real dentro de un pavimento de asfalto en el campo. Tras el envejecimiento, se comprobó que había más grupos carbonilo y sulfóxido pero menos segmentos de cadena de butadieno. Con la oxidación del betún de base y la degradación de los segmentos de SBS, aparecieron evidentes micelas de asfalto en ambos ligantes, en consonancia con los cambios del punto de reblandecimiento y la reología del betún de base y los ligantes modificados con SBS [8].

En el año 2009, se realizó, en la universidad de Huelva, un análisis comparativo de betún modificado con polímeros reactivos y no reactivos (virgen y reciclado). El artículo fue publicado en la revista “Journal of Industrial and Engineering Chemistry” y escrito por F.J. Navarro. El objetivo principal de esta investigación era comparar la capacidad de modificación de dos tipos diferentes de modificadores del betún: los plastómeros y elastómeros, no reactivos, y los polímeros reactivos. El grupo de polímeros no reactivos incluía un copolímero en bloque (SBS), polímeros termoplásticos reciclados (mezclas de EVA/LDPE) y caucho de neumático, que se mezclaron a una temperatura de procesamiento de 180 °C. En el segundo grupo, se consideró un prepolímero reactivo MDI-PEG, un modificador de baja temperatura de procesamiento (90 °C). El estudio se centró en la caracterización del comportamiento termorreológico de las muestras de betún modificado seleccionadas. Además, se evaluó el comportamiento térmico (mediante DSC modulado), y la morfología (mediante microscopía óptica) de estas muestras de betún modificado. Todos estos modificadores del betún mejoran significativamente las propiedades termomecánicas del ligante resultante, especialmente a altas temperaturas de servicio. Sin embargo, mientras que el betún modificado con polímeros no reactivos sufre oxidación debido a la alta temperatura de procesamiento utilizada (180 °C), el betún modificado con MDI-PEG no experimenta este fenómeno debido a la menor temperatura de procesamiento involucrada (90 °C). En general, los polímeros no reactivos deben añadirse en concentraciones mucho mayores que el polímero reactivo para obtener resultados similares, aunque este último requiere un período adicional de curado, a temperatura ambiente, para inducir una modificación adecuada. Por último, sólo el betún modificado con MDI-PEG es estable cuando se almacena a alta temperatura (163 °C), mientras que todos los betunes modificados con polímeros no reactivos estudiados sufren separación de fases o precipitación de partículas [9].

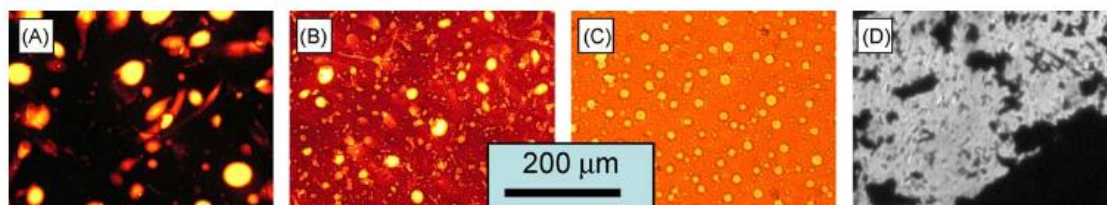


Figura (5): Imágenes ópticas (A) 5% EVA; (B) 5% EVA/LDPE; (C) 3% SBS; (D) 9% caucho

En el año 2010, se publicó un estudio en la revista “Journal of Applied Polymer Science” sobre las propiedades viscoelásticas y características morfológicas de las mezclas de betún modificadas con polímeros. El estudio fue dirigido por Aneta Vasiljevic-Shikaleska. Se investigó el estado de dispersión, las propiedades viscoelásticas y mecánicas (como el módulo de Young, la ductilidad, la penetración y el punto de rotura Fraas) del betún modificado con polímeros. Se modificó el betún con polietileno de baja densidad procedente de bolsas procesadas (PEbags) y copolímero de bloque aleatorio de estireno-butadieno (SBR). Las mezclas se caracterizaron mediante microscopía óptica, análisis térmico mecánico dinámico (DMTA) y otros métodos convencionales. Las fotomicrografías indicaron diferentes morfologías; las bolsas de PE presentaron dispersiones con partículas de polímero casi esféricas; mientras que en el caso del SBR, se observaron dominios fibrilares. Las mediciones de DMTA indicaron cambios significativos en los módulos de almacenamiento y pérdida del betún modificado; dependiendo del contenido de polímero en la matriz del betún, estos valores fueron de tres a cuatro veces mayores en comparación con el betún puro. Las mezclas con SBR mostraron una resistencia significativamente mayor al agrietamiento a bajas temperaturas debido a la disminución de la temperatura de transición del vidrio de -14°C a -34°C . Por el contrario, las bolsas de PE dieron mejores resultados a temperaturas más elevadas, ya que, como resultado de la mayor resistencia a la deformación permanente, el punto de reblandecimiento del betún modificado pasó de 52°C a 73°C . También se investigó la influencia de las mezclas de bolsas de PE/SBR en las propiedades del betún en función de la composición y la proporción de estas. Se comprobó que la mejora de la resistencia a la deformación, la deformación permanente y el agrietamiento del betún se consiguió con la adición de mezclas de PE y SBR, ya que el caucho aumentó las propiedades del betún a bajas temperaturas y la poliolefina a altas temperaturas [10].

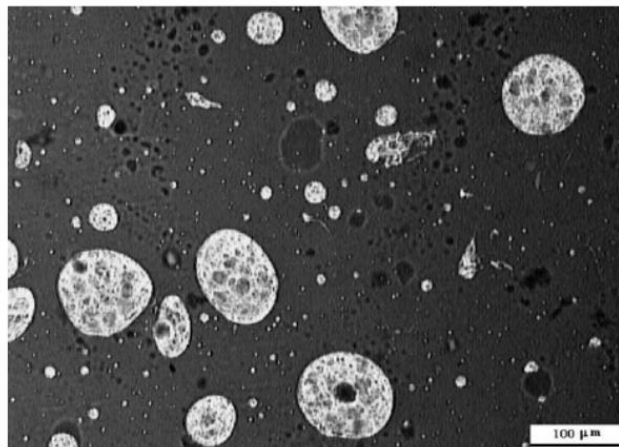


Figura (6): Estado de la dispersión 4% PEbags



Figura (7): Estado de la dispersión 4% SBR

En el año 2011, se publicó un artículo en la revista “International Journal Civil and Environmental Engineering” en el cual se estudiaban las propiedades reológicas del betún modificado con polietileno y con polipropileno. El autor principal del artículo es Noor Zainab Habib. Este artículo presenta una parte de la investigación sobre las propiedades reológicas del betún modificado por termoplásticos, polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP), y su interacción con el betún base de grado de penetración 80. El estudio reológico del betún modificado con polímeros (PMB) se realizó mediante pruebas de penetración, punto de ablandamiento de anillo y bola y de viscosidad. Se observó que el copolímero termoplástico muestra un profundo efecto en la penetración, más que en el punto de reblandecimiento. El comportamiento viscoelástico del betún modificado con polímeros depende de la concentración del polímero, la temperatura de mezcla la técnica de mezclado, el poder de disolución del betún base y la estructura molecular del polímero utilizado. El PP ofrece una mejor mezcla en comparación con el HDPE y el LLDPE. La viscosidad del betún base también mejoró con la adición del polímero. El comportamiento pseudoplástico fue más prominente para el HDPE y el LLDPE que para el PP. Los mejores resultados se obtuvieron cuando la concentración de polímero se mantuvo por debajo del 3% [11].

TABLE II
PENETRATION TEST RESULTS

Polymer %	HDPE Penetration (dmm)	LLDPE Penetration (dmm)	PP Penetration(dmm)
0.5	36	36	33
1	32	35	34
1.5	28	30	35
2	22	30	30
2.5	21	27	30
3	23	25	28
5	23	13	15

TABLE III
SOFTENING POINT TEST RESULTS

% Polymer	HDPE °C	LLDPE °C	PP °C
0.5	52	50	53
1.0	51	53	54
1.5	52	54	54
2.0	58	53	55
2.5	62	54	55
3.0	67	60	55
5.0	79	67	59

Tabla (1): Resultados penetración y punto de reblandecimiento

En el año 2012, se publicó un artículo en la revista “International Journal of Engineering Research and Applications” (IJERA) sobre la utilización de residuos plásticos para modificar pavimentos flexibles y rígidos. El autor principal es K.S.B. Prasad. El estudio investigó el uso potencial del plástico de desecho como modificador del ligante. Diferentes proporciones de plástico como el polipropileno (PP), el polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE) se mezclaron con ligante de grado 80/100. A estos ligantes, no modificados y modificados, se les realizaron las pruebas reológicas para su caracterización. Las pruebas de rendimiento, incluyendo la estabilidad Marshall y la pérdida de estabilidad, se llevaron en las mezclas asfálticas calientes (HMA). Los resultados mostraron mejores valores para el hormigón asfáltico. Se trata de un proceso ecológico [12].

En el año 2014, se publicó un artículo en la revista “Molecular Crystals and Liquid Crystals” sobre la modificación de las características del betún mediante el uso de polietileno reciclado. El estudio fue dirigido por Ching Yern Chee, en la Universidad de Malaya (Malasia). El objetivo de este estudio era evaluar el efecto del polietileno reciclado sobre las propiedades físicas y reológicas del betún modificado con polímeros. Para estudiar el efecto del contenido de polietileno en el ligante bituminoso se realizaron cuatro tipos de análisis: reológico, mecánico, térmico y de morfología superficial. Se utilizó un reómetro de cizallamiento dinámico para estudiar las propiedades reológicas del ligante compuesto. Los estudios termogravimétricos mostraron que la estabilidad térmica del ligante modificado con polietileno mejoraba en comparación con el ligante no modificado. El aumento gradual del contenido de polímeros incrementó el módulo de cizallamiento complejo, el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida del ligante de betún [13].

En el año 2014, se investigó el efecto de los residuos de botellas de plástico sobre la rigidez y las propiedades de fatiga de las mezclas asfálticas modificadas, se publicó un artículo sobre la investigación en la revista “Materials & Design” escrito por Amir Modarres. El objetivo principal de esta investigación fue investigar el efecto de los residuos de botellas de plástico (tereftalato de polietileno (PET)) en la rigidez y especialmente en las propiedades de fatiga de las mezclas asfálticas a dos temperaturas diferentes de 5 y 20°C. Asimismo, el efecto del PET se comparó con el estireno butadieno (SBS), que es un aditivo polimérico convencional que se ha utilizado ampliamente para modificar las mezclas asfálticas. Se añadieron diferentes contenidos de PET (2-10% en peso de betún) directamente a la mezcla con el procedimiento en seco. A continuación, se realizaron ensayos de módulo de resistencia y de fatiga en probetas cilíndricas con un procedimiento de carga de tracción indirecta. En general, la rigidez de la mezcla se redujo al aumentar el contenido de PET. Aunque la rigidez de la mezcla asfáltica aumentó inicialmente al añadir una cantidad menor de PET. Según los resultados, la rigidez de la mezcla modificada con PET era aceptable y garantizaba las características de deformación adecuadas de estas mezclas para grandes cargas. A ambas temperaturas, el PET mejoró el comportamiento a la fatiga de las mezclas estudiadas. Las mezclas modificadas con PET mostraron una rigidez y un comportamiento a la fatiga comparables a los del SBS a 20°C. Sin embargo, a 5°C la fatiga de las mezclas modificadas con SBS fue superior a las modificadas con PET, especialmente a niveles de deformación más altos [14].

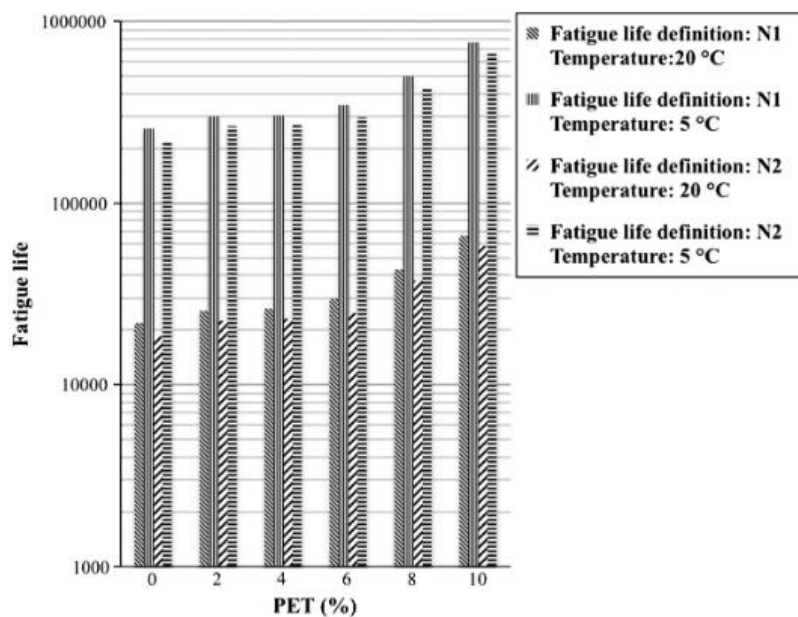


Figura (8): Resultados ensayo de fatiga

En el año 2015, se publicó un estudio en la revista “Construction and Building Materials” sobre las propiedades reológicas de asfaltos modificados con caucho de neumáticos usados y polietileno de baja densidad reciclado. El estudio fue dirigido por Kenzhen Yan, en la Universidad de Hunan (China). Para identificar el efecto de la modificación de los compuestos de caucho de neumáticos usados (WTR) y polietileno de baja densidad reciclado (RPE) sobre las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos, en este estudio se prepararon asfaltos modificados con WTR/RPE con diferentes contenidos de WTR y RPE. Sus características reológicas se midieron mediante pruebas convencionales y métodos mecánicos dinámicos utilizando un reómetro de cizallamiento dinámico (DSR) y un reómetro de haz de enlace (BBR). Después de la mezcla con WTR y RPE, los asfaltos muestran una disminución del ángulo de penetración y de fase, un aumento del punto de reblandecimiento, de la viscosidad rotacional y del módulo complejo, lo que indica que las propiedades reológicas intermedias y de alta temperatura de los asfaltos han sido mejoradas por la modificación de WTR y RPE. Sin embargo, el efecto de modificación de WTR y RPE en las propiedades reológicas a baja temperatura de los asfaltos es controvertido, ya que la adición de WTR y RPE introduce una disminución tanto de la rigidez de fluencia como del valor m . Las propiedades reológicas de los asfaltos modificados con WTR o RPE dependen en gran medida del contenido de WTR o RPE, y se pueden conseguir mejores propiedades mecánicas utilizando una combinación de WTR y RPE. Además, en los asfaltos modificados con WTR/RPE se desarrolla una red de polímeros, y aunque su formación está muy influenciada por el contenido tanto de WTR como de RPE, el WTR puede tener un efecto predominante en ella [15].

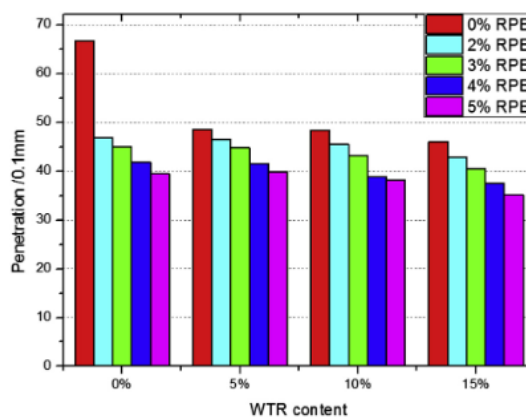


Figura (9): Valores de la penetración a diferentes contenidos de WTR y RPE

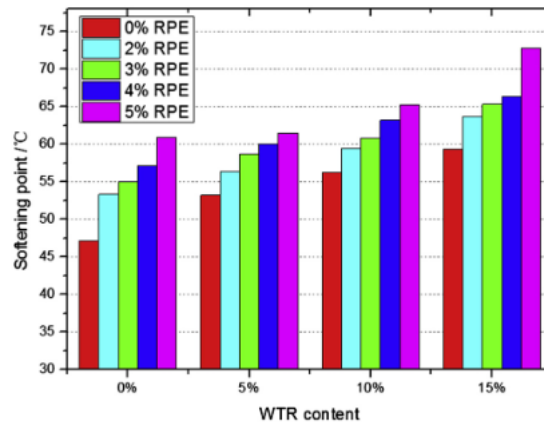


Figura (10): Punto de reblandecimiento a diferentes contenidos de WTR y RPE

En el año 2016, se publicó un artículo en la revista “Journal of Materials in Civil Engineering” en el que se estudiaba el efecto de los residuos de plástico y de las cenizas de neumáticos sobre el comportamiento mecánico del betún. El autor del artículo es Sandip Karmakar, investigador del Instituto Indio de Ciencia y Tecnología de la Ingeniería. Este artículo trata de la utilización de residuos de plástico y de caucho de neumáticos como modificantes del betún para la construcción de carreteras de bajo presupuesto, en lugar del betún modificado con polímeros (PMB) convencional, debido a su alto valor de precio. Entre estos residuos poliméricos, sólo se utilizan en esta investigación los que contienen polietileno de alta densidad molecular (HM-HDPE), polipropileno (PP), polietileno de baja densidad (LDPE) y cenizas de caucho de neumáticos (TRA) para modificar las propiedades del betún convencional. Los resultados de la investigación experimento indican que la adición de un 1% en peso de plástico mixto (MP) al betún caliente de grado 60/70 proporciona la mejora de las características de resistencia a la temperatura, las propiedades viscosas y las propiedades de recuperación elástica con una buena compatibilidad y cohesión a nivel micro, satisfaciendo el criterio esencial de PMB 40 [16].

En el año 2018, se realizó un estudio sobre la utilización de residuos de polímeros como alternativa fiable para la modificación del ligante asfáltico. El estudio se publicó en la revista “Construction and Building Materials” y fue dirigido por Liliانا M.B. Costa, en la Universidad de Miño (Portugal). Este estudio tenía como objetivo evaluar los beneficios potenciales de la modificación de un betún convencional de grado de penetración 35/50, con restos de polímeros no contaminados (acetato de vinilo de etileno y polietileno de alta densidad) cuidadosamente seleccionados de las plantas de reciclaje de plásticos. También se utilizó un polímero virgen (estireno-butadieno-estireno) como material de referencia, ya que es el polímero más utilizado para la modificación del betún. Se evaluaron exhaustivamente las prestaciones (estabilidad

física, de almacenamiento y propiedades reológicas) y las características morfológicas de los diferentes ligantes modificados con polímeros de desecho y se compararon con las del betún 35/50 y el ligante modificado con polímeros vírgenes. Se llegó a la conclusión de que los ligantes modificados con EVA reciclado y con SBS virgen podían tener un comportamiento similar, concretamente en lo que respecta a su viscosidad y propiedades reológicas. Además, el ligante modificado con EVA presentó una estabilidad de almacenamiento ligeramente superior, probablemente debido a su dispersión homogénea. El betún modificado con polietileno de alta densidad reciclado revela algunas propiedades físicas prometedoras (asociadas a la resistencia a las roderas), pero presenta la peor resiliencia y recuperación de la fluencia [17].

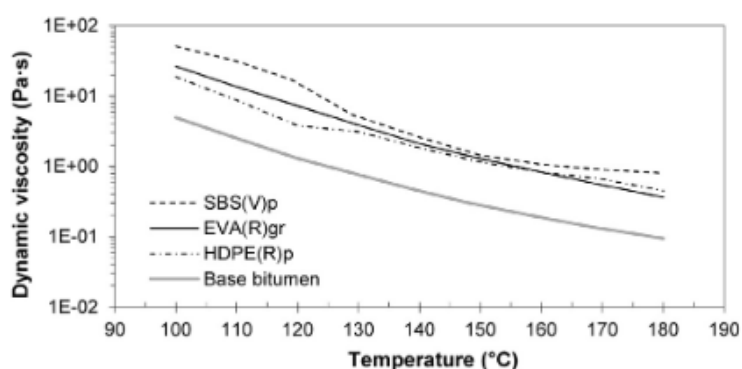


Figura (11): Viscosidad dinámica de los ligantes

En el año 2019, se publicó un estudio en la revista “Petroleum Science and Technology” sobre el comportamiento reológico de los betunes modificados con polietileno reciclado. El autor del estudio es E. S. Okhotnikova. En la investigación se obtuvieron betunes modificados con polímeros mediante la introducción de polietileno reciclado en betunes de diferentes grados y se estudiaron mediante viscosimetría, ensayo de cizallamiento oscilante y microscopía óptica. Se demostró que cuando se añadió polietileno reciclado al betún, el intervalo de plasticidad del betún aumentó y el comportamiento reológico cambió. El comportamiento reológico del betún modificado con polímeros dependía de la viscosidad del betún puro y de la concentración de polímeros. Se reveló la concentración crítica de polietileno reciclado, a la que se produjo la formación de la estructura co-continua en el betún modificado con polímeros. Basándose en el comportamiento reológico y la estructura de los betunes modificados con polímeros, se llegó a la conclusión de que el campo de aplicación de los betunes modificados con polímeros dependería de la concentración de polímeros [18].

En el año 2020, se publicó un artículo en la revista “Journal of Cleaner Production” sobre el plástico reciclado como modificador del betún. El estudio fue dirigido por Sabzoi Nizamuddin, en la Universidad RMIT (Real Instituto de Tecnología de Melbourne) en Australia. Este estudio evalúa el uso de un plástico blando muy común y ampliamente disponible, el polietileno lineal de baja densidad reciclado (R-LLDPE), para la modificación del betún. Para evaluar su aplicabilidad en el sector de las carreteras, se compararon las mezclas de betún base y de betún modificado con R-LLDPE mediante una evaluación física, química, reológica y térmica. Se observó que, debido a la adición de altas concentraciones de R-LLDPE, la viscosidad y el punto de reblandecimiento aumentaron de 0,62 Pa s y 44,1 °C hasta 5,75 Pa s y 122,3 °C, respectivamente, mientras que el valor de penetración disminuyó de 59,3 a 14,3 (0,1 mm). Un aumento progresivo de la viscosidad con el incremento de la concentración de R-LLDPE indica una reducción sustancial de la trabajabilidad debido a la mayor fase dominante del polímero. El aumento de las intensidades de los picos y la ausencia de nuevos picos durante el análisis de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) confirma el éxito de la mezcla del polímero reciclado en la matriz del betún. El análisis termogravimétrico (TGA) muestra que el betún modificado tenía una menor evaporación y una mayor estabilidad térmica que el betún base. La evaluación reológica puso de manifiesto cómo la adición de R-LLDPE afectó significativamente a la termo-susceptibilidad del betún y mejoró la resistencia a la deformación permanente a alta temperatura y la recuperación elástica. Basándose en los resultados generales de este estudio, puede afirmarse que el R-LLDPE, si se dosifica correctamente y se obtiene de fuentes homogéneas, puede mejorar el rendimiento general del betún sin inconvenientes significativos. En particular, el 3% de R-LLDPE se considera una modificación adecuada para la mayoría de las condiciones ambientales, mientras que el 6% de R-LLDPE sólo es ideal para los climas tropicales. No se recomienda una dosificación mayor [19].

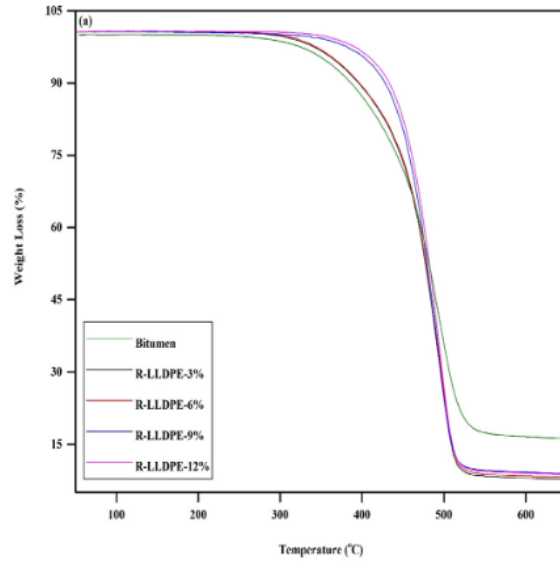


Figura (12): TGA

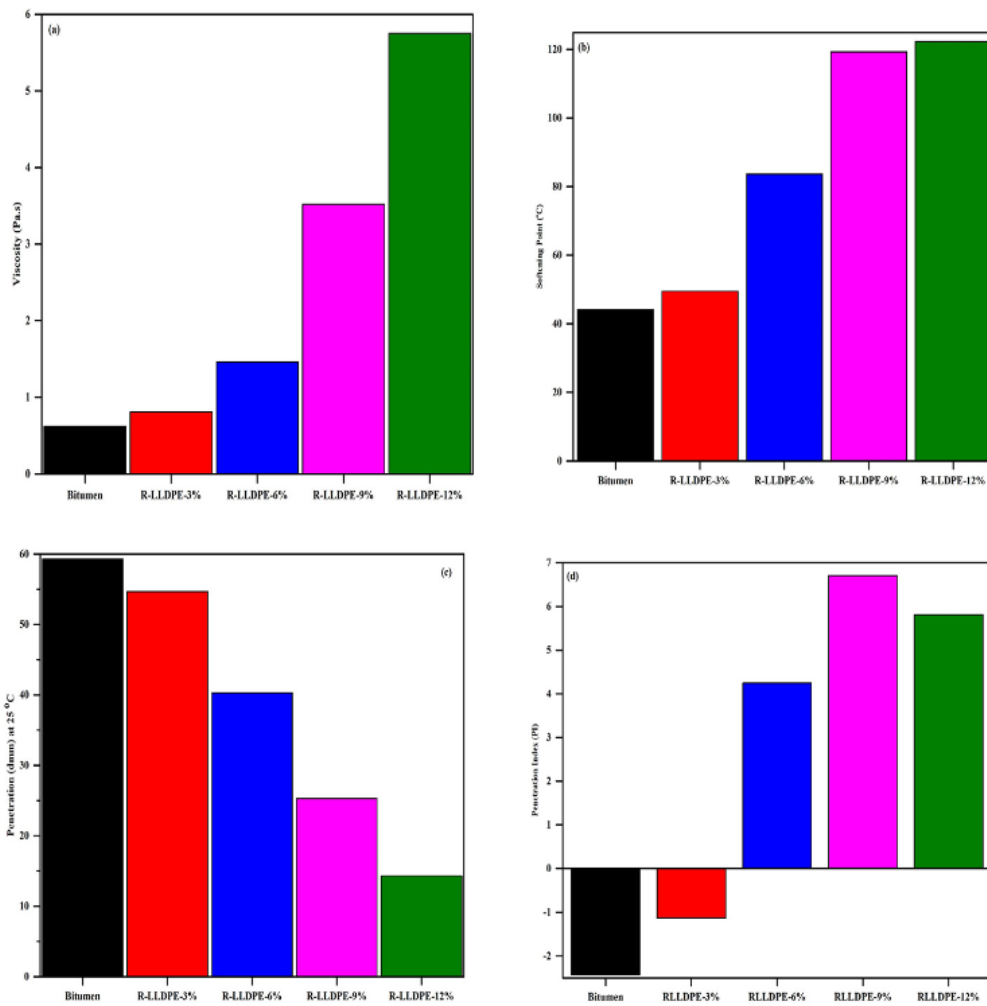


Figura (13): (a) Viscosidad a 135°C, (b) punto de reblandecimiento, (c) penetración y (d) índice de penetración de las diferentes proporciones de R-LLDPE

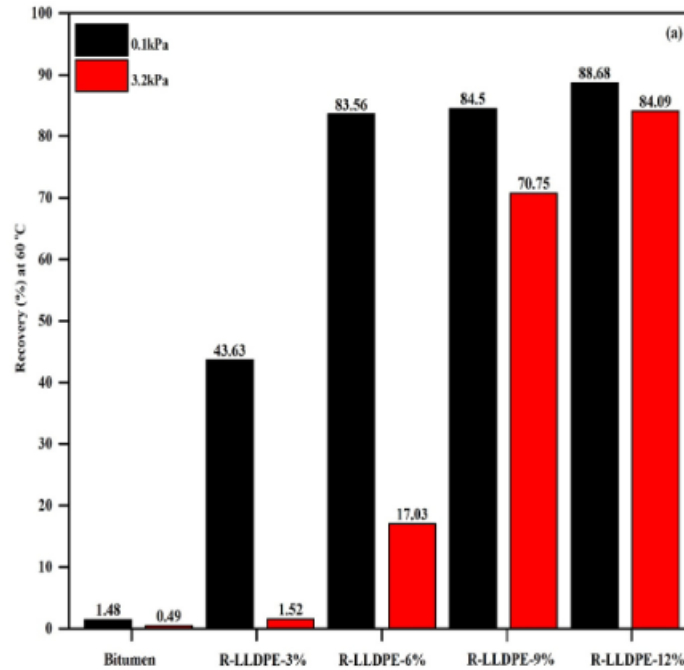


Figura (14): Porcentaje de recuperación elástica

En el año 2021, se ha publicado un artículo en la revista “Journal of Applied Polymer Science”, escrito por Tian Xia, sobre el comportamiento reológico del betún modificado por polietileno y polipropileno recuperados de diferentes fuentes de reciclaje. En este trabajo se han estudiado las propiedades reológicas, térmicas y mecánicas del betún modificado con polietileno (PE) recuperado y polipropileno (PP) procedente de diferentes fuentes de reciclaje. Se investigó la resistencia a las roderas a alta temperatura del betún modificado con polímeros (PMB) mediante un ensayo de rampa de temperatura reológica y un ensayo de recuperación de fluencia por esfuerzos múltiples (MSCR). Se encontró que, para algunos betunes modificados, una meseta del módulo complejo G^* podría formarse con el incremento de la temperatura, revelando la estabilidad reológica. Además, estas muestras con estabilidad reológica revelaron una mayor recuperación de la fluencia y una menor conformidad de la fluencia medida por el ensayo MSCR. La temperatura de transición vítrea (T_g) medida por el análisis mecánico dinámico se utilizó para evaluar la resistencia al agrietamiento bajo una temperatura baja de PMB. La influencia del PE reciclado en la T_g del betún modificado fue diferente a la del betún modificado con PP reciclado, en comparación con el betún modificado con polímeros vírgenes correspondiente. Una posible razón de los diferentes efectos de las fuentes de reciclaje sobre las propiedades de servicio del betún modificado fue explorada por los comportamientos de cristalización y fusión del polímero en el betún, ya que el polímero con mayor grado de cristalinidad podría dotar de rigidez al betún modificado, lo que estaba estrechamente relacionado con sus propiedades de servicio, especialmente la resistencia a las roderas [20].

3- Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es desarrollar betunes modificados con residuos de plásticos de la agricultura, para así obtener una mejora en las propiedades del betún y contribuir al desarrollo de una economía circular y sostenible.

Las infraestructuras terrestres son fundamentales para el desarrollo económico y mejora de la calidad de vida de un país, por ello es importante trabajar en acciones que impulsen su crecimiento y evolución en infraestructuras sostenibles y de altas prestaciones. En este proyecto se pretende establecer la viabilidad del uso de polímeros de deshecho de la agricultura en infraestructuras terrestres, principalmente desechos de plásticos de invernadero, los cuales se componen en su mayoría de polietileno de baja densidad, es decir, polímeros termoplásticos.

Los nuevos betunes modificados desarrollados serán caracterizados y se compararán con un betún convencional (sin modificar) y un betún modificado con polímeros vírgenes.

Objetivos específicos

- Definir los residuos de plástico susceptibles de ser utilizados para la modificación de los betunes. El tipo de materiales incluidos y su procedencia son fundamentales para el correcto funcionamiento de la mezcla asfáltica, en este caso, se trata de polímeros termoplásticos procedentes de plásticos de invernadero. Será necesario llevar a cabo un análisis térmico previo del material, con el objetivo de descartar aquellos que se degraden a las temperaturas de fabricación de la mezcla asfáltica.
- Establecer las concentraciones adecuadas de polímero y betún, asegurando una mezcla uniforme y que no presente dificultades en su manejabilidad o comportamientos no deseados.
- Caracterización de los betunes modificados. Se realizarán diferentes ensayos de laboratorio que permitan evaluar las propiedades reológicas de los betunes modificados.

- Análisis y comparación de los resultados. Una vez se hayan realizado los ensayos de caracterización de los betunes modificados, se analizarán los resultados y se compararán con los de un betún sin modificar y un betún modificado con polímeros vírgenes comercial. De esta forma podremos evaluar la mejora que ha supuesto la adición de polímeros reciclados y establecer la viabilidad del uso de estos.

4- Materiales y métodos

En esta sección se van a describir los materiales utilizados en este TFG y los distintos equipos de caracterización empleados para determinar la viabilidad del producto final.

4.1- Polietileno de baja densidad

El polietileno es un termoplástico que se sintetiza a partir del etileno, cuando se hace el proceso de destilación del crudo para obtener las diferentes fracciones, se desprende gas etileno, posteriormente mediante un proceso de polimerización industrial se consigue unir las pequeñas moléculas de etileno para formar una molécula más grande que es el polietileno, el cual es sólido.

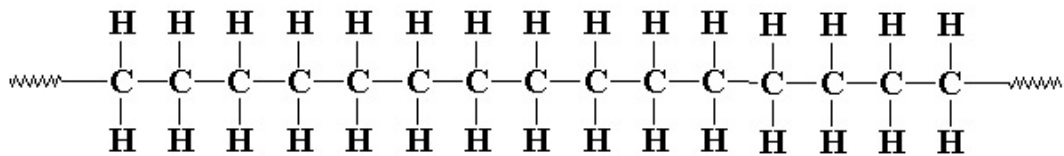


Figura (15): Molécula de polietileno (C₂H₄)_n

En ocasiones, algunos de los carbonos tienen asociadas largas cadenas de polietileno, esto se conoce como polietileno de baja densidad (LDPE) o polietileno ramificado. Cuando no existe ramificación, se tiene polietileno de alta densidad (HDPE), este ofrece una mayor resistencia que el polietileno de baja densidad, pero es más caro y difícil de fabricar [21].

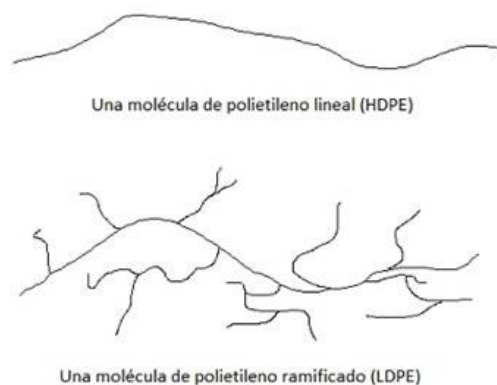


Figura (16): Estructura polietileno de alta densidad (HDPE) y de baja densidad (LDPE)

Al ser un plástico termoplástico, es decir, las cadenas no están unidas mediante enlaces químicos, sino que son cadenas independientes que interactúan entre sí por medio de fuerzas de Van der Waals, se puede reciclar. Esto es debido a que al calentarlo no se está rompiendo ningún enlace químico, por lo que no se está degradando.

El polietileno de baja densidad es el plástico más utilizado en cubiertas de invernadero, debido a sus propiedades mecánicas y ópticas, ya que una de las funciones de las cubiertas es que dejen pasar una cierta cantidad de luz, la necesaria para la fotosíntesis, a la vez que refracte ciertos tipos de radiación como podría ser la infrarroja.

4.2- SBS

El estireno-butadieno-estireno (SBS) es un elastómero termoplástico obtenido mediante la polimerización de una mezcla de estireno y butadieno. Se trata de un copolímero en bloque, su cadena está formada por un bloque de poliestireno, seguido de un bloque de polibutadieno y finalmente otro bloque de poliestireno [22].



Figura (17): Cadena de SBS

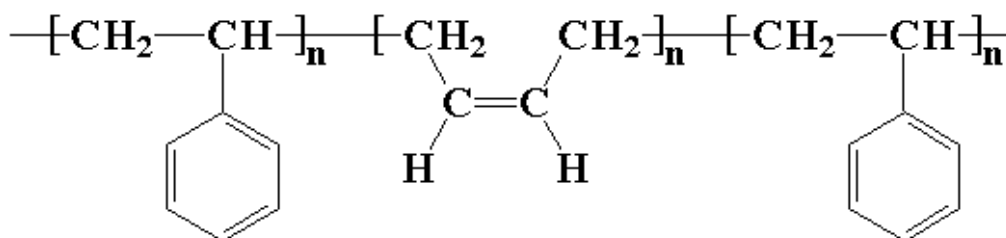


Figura (18): Estructura química SBS

El poliestireno es un polímero duro y resistente, le confiere al SBS su durabilidad, el polibutadieno es un material parecido al caucho, es el que aporta al SBS sus características elásticas [22]. Como ya se ha mencionado, el SBS es un elastómero, este tipo de plásticos tienen entrecruzamiento químico entre sus cadenas, por lo tanto, no se pueden reciclar. Se puede observar en la figura (18) que la estructura química del

SBS contiene un doble enlace correspondiente al bloque del polibutadieno. Es a través de este doble enlace donde se pueden realizar las reacciones de entrecruzamiento o curado que dan lugar a la estructura final.

4.3- Betún

Los betunes son mezclas muy complejas de hidrocarburos procedentes de los crudos petrolíferos, como se ha referido en la introducción. Se componen principalmente de carbono (82-88 %) e hidrógeno (8-11 %), y en menor proporción otros elementos como el nitrógeno (0-1 %), el azufre (0-6 %) y el oxígeno (0-1.5 %), combinados de múltiples formas. También están presentes algunos metales pesados, vanadio y níquel principalmente, medidos en ppm [23].

La composición de los betunes depende en gran parte del origen del crudo y del tratamiento que se ha llevado a cabo para la producción del betún, por lo que es muy complejo realizar una descripción exacta de la composición del betún, ya que puede variar bastante. Por ello se recurre a fraccionarlos en familias, se realiza una primera separación del betún mediante precipitación en n-heptano, un hidrocarburo saturado, se obtienen dos fracciones, una insoluble denominada asfaltenos y una soluble denominada maltenos. Los maltenos, a su vez, pueden fraccionarse en saturados, aromáticos y resinas [1].

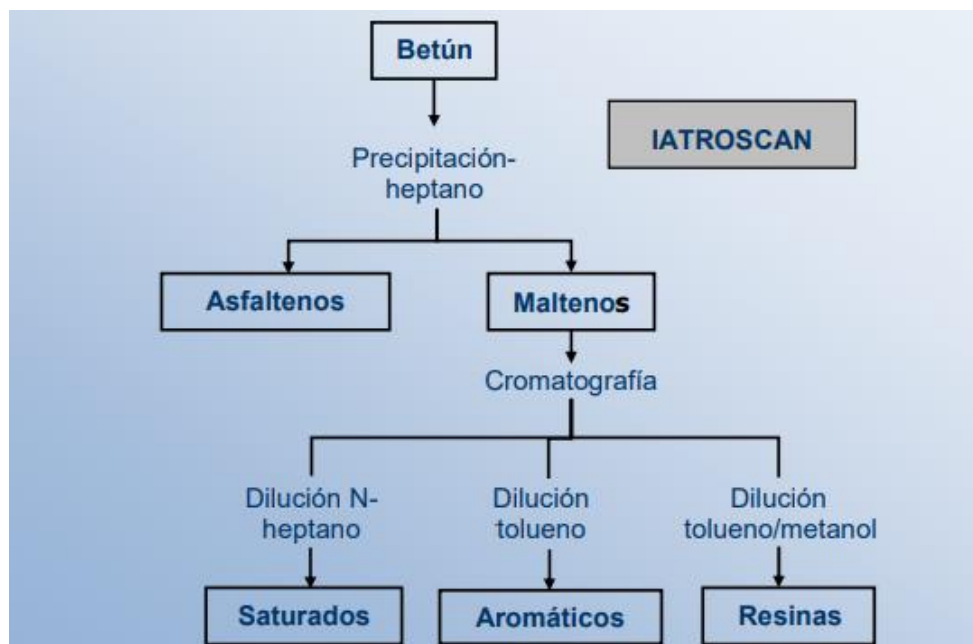


Figura (19): Familias de betún

El comportamiento mecánico del betún no solo depende de factores externos como la temperatura o el tiempo de aplicación de la carga, sino también de la composición y la estructura del betún. El método de análisis SARA (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos), el cual consiste en un método de fraccionamiento, permite estudiar la dependencia de la composición [1]:

- El aumento del contenido de asfaltenos, produce un aumento de la viscosidad y una disminución de la susceptibilidad térmica.
- El aumento de la relación asfaltenos/resinas disminuye la resistencia al envejecimiento (aumento de la viscosidad con el tiempo).
- El incremento del contenido en resinas aumenta la viscosidad y la susceptibilidad térmica.
- El aumento del contenido de saturados disminuye la viscosidad del betún.

4.4- Equipos de caracterización

a) TGA

Para el ensayo termogravimétrico (TGA) se ha utilizado un analizador termogravimétrico “TGA/DSC 1HT” de Mettler-Toledo. El equipo se encuentra situado en el edificio I+D+I de la UPCT, concretamente en el Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT).



Figura (20): Analizador termogravimétrico

b) Agitador de aletas

Para la preparación de las mezclas se ha utilizado un agitador de varilla “AGV-10” de Bunsen. El equipo se sitúa en el Centro Tecnológico de la Construcción (CTCON).



Figura (21): Agitador de aletas

c) Viscosímetro

En el ensayo de viscosidad se ha utilizado un viscosímetro rotacional “viscolead one” de Fungilab. El equipo está situado en el Centro Tecnológico de la Construcción (CTCON).



Figura (22): Viscosímetro rotacional

d) Penetrómetro

Para el ensayo de penetración se ha utilizado un penetrómetro automático "Pivot" de controls group. El equipo se encuentra situado en el Centro Tecnológico de la Construcción (CTCON)



Figura (23): Penetrómetro automático

e) Anillo-bola

Para el ensayo de punto de reblandecimiento se ha utilizado el equipo anillo-bola de controls group. Está situado en el Centro Tecnológico de la Construcción (CTCON).

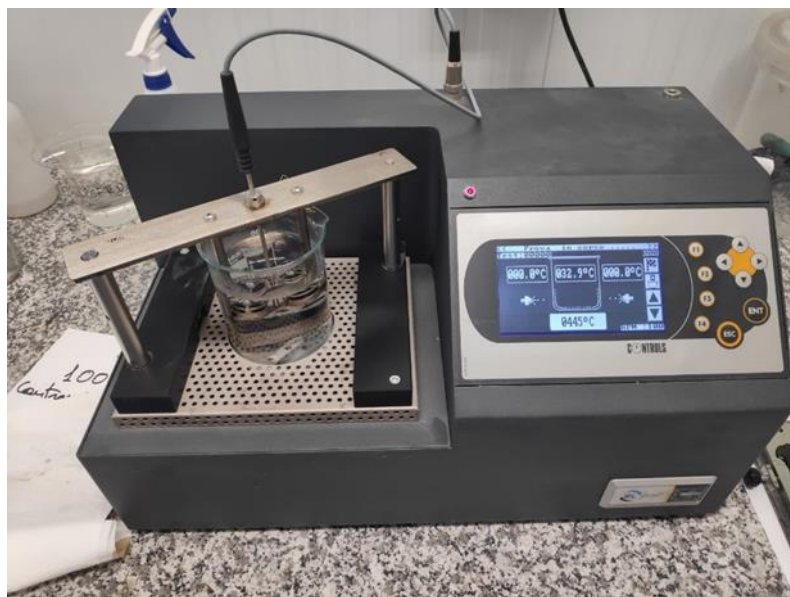


Figura (24): Equipo ensayo anillo-bola

f) Ductilómetro

En el ensayo de recuperación elástica se ha utilizado un ductilómetro modelo “81-PV10B02” de controls group. El equipo se encuentra situado en el Centro Tecnológico de la Construcción (CTCON).



Figura (25): Ductilómetro

5- Caracterización térmica de los polímeros

En este proyecto se han utilizado dos tipos de residuos de plásticos para la modificación de los betunes:

- **Plástico A:** Polietileno de baja densidad (PE) procedente de invernaderos y acolchado.
- **Plástico B:** Polietileno de baja densidad (PE) procedente de invernaderos y acolchado, modificado con estireno-butadieno-estireno (SBS).



Figura (26): Polímeros modificadores

Como se ha explicado en el apartado 4.2, el SBS es un plástico elastomérico que no se puede reciclar. Una forma de reciclarlos es mezclarlos con otros materiales, en este caso se ha incluido en el polietileno, esto supone una mejora de las propiedades elastoméricas y hace que el polietileno, el cual tiene una temperatura de transición vítrea muy baja, se asemeje a un elastómero.

Los plásticos utilizados en este proyecto han sido diseñados y fabricados por GWC (Green World Compounding), una empresa de la Región de Murcia que se encarga de recuperar y valorizar residuos plásticos, transformándolos en nueva materia prima plástica.

5.1- Ensayo termogravimétrico (TGA)

Los plásticos son materiales muy económicos y tienen una buena relación de propiedades mecánicas y densidad. Sin embargo, son muy sensibles a la temperatura, por tanto, es necesario comprobar que no se degradan a la temperatura de procesamiento del betón, para ello se ha realizado un ensayo termogravimétrico (TGA).

El TGA es un análisis térmico que mide la masa de una muestra a lo largo del tiempo, a medida que cambia la temperatura. Se usa principalmente para la caracterización de materiales en lo que respecta a la composición.

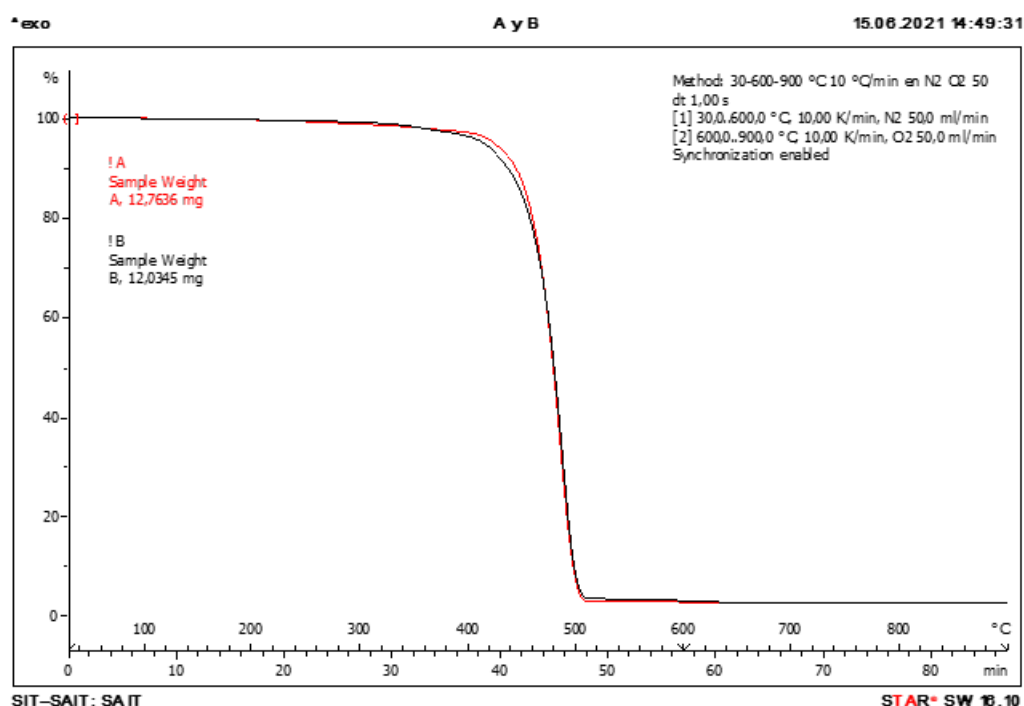


Figura (27): Gráfica TGA muestras A y B

En la figura (27) se muestran los resultados del ensayo termogravimétrico de los polímeros A y B, en el eje de ordenadas aparece el porcentaje de masa de las muestras y en el eje de abscisas la temperatura. En la esquina superior derecha se indica el procedimiento del ensayo, primero se han calentado las muestras de 30°C a 600°C, a 10°C/minuto, en una atmósfera inerte de nitrógeno, en este intervalo se produce la degradación del polímero. Posteriormente se ha hecho otro calentamiento de 600°C a 900°C, a 10°C/minuto, en una atmósfera de oxígeno, para ver si las muestras contienen residuos orgánicos.

También se proporciona el peso de cada muestra, 12.7636 mg el plástico A y 12.0345 mg el plástico B. A continuación, se analizará en detalle cada muestra.

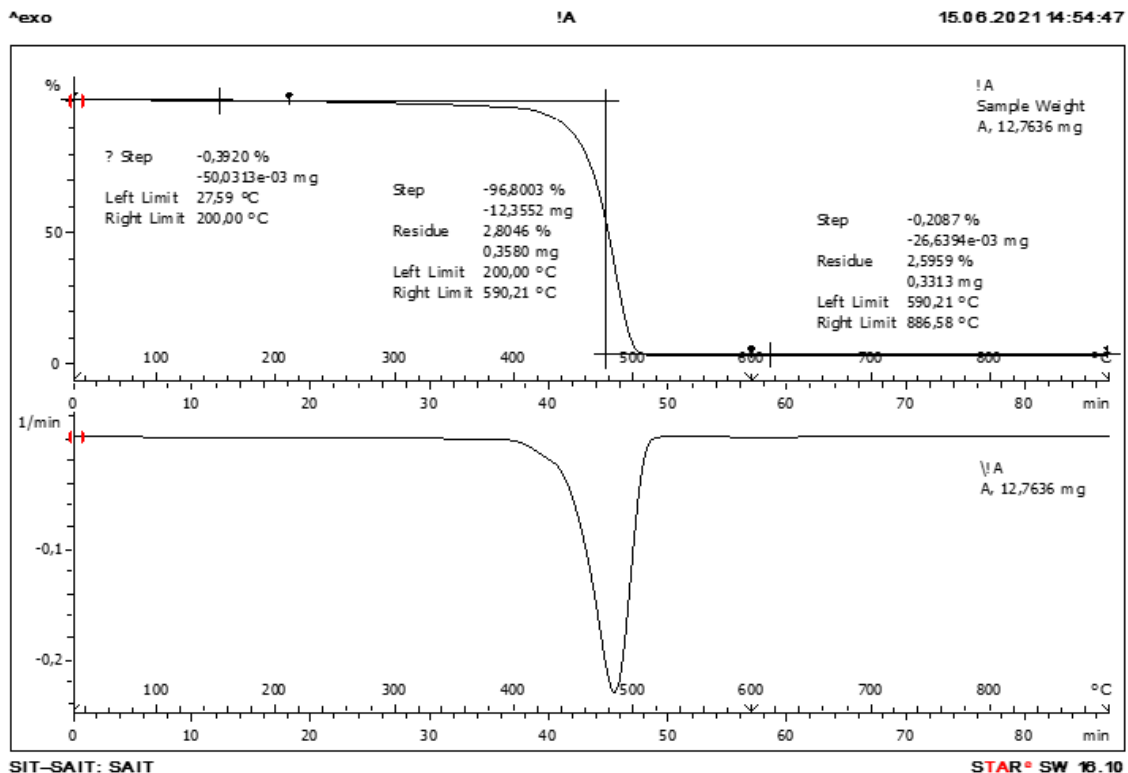


Figura (28): Gráfica TGA muestra A

La figura (28) representa el ensayo termogravimétrico del polímero A, se pueden diferenciar 3 pasos, cada uno de ellos es un “step”. El primer paso consiste en un calentamiento hasta 200°C, en este rango de temperaturas solo se pierden sustancias volátiles, es decir, sustancias que se evaporan fácilmente, por ejemplo, el agua. Se ha perdido tan solo un 0.3920%, lo cual podemos atribuir a sustancias volátiles.

El segundo paso es un calentamiento desde 200°C hasta 600°C, se puede observar un brusco descenso en el porcentaje de masa de la muestra, esto corresponde a la degradación del polímero, se degrada el 96.8003% de la muestra. La temperatura de degradación es aquella a la cual la degradación se encuentra al 50%, en la figura 28 viene indicada con una barra vertical y es de aproximadamente 480°C.

Tras el calentamiento hasta 600°C ha quedado un 2.8046% de masa, el cual corresponde a residuos.

En el tercer paso, la muestra se ha calentado desde 600°C hasta 900°C y se ha cambiado a una atmósfera de oxígeno para identificar qué tipo de residuos han quedado tras la degradación. Se ha quemado un 0.2087% de la masa restante, debido a la combustión del oxígeno, este porcentaje corresponde a residuos orgánicos, el resto son residuos inorgánicos que no se pueden quemar.

Estos residuos inorgánicos podrían ser principalmente restos de tierra, ya que los plásticos se han usado en la agricultura, cabe destacar que el hecho de que durante la fase final se haya desprendido una pequeña cantidad de masa, podría ser indicativo de la presencia de algún tipo de carbonato, es posible que haya una pequeña cantidad de carbonato cálcico el cual es abundante en la Región de Murcia. El carbonato cálcico se descompone en dióxido de carbono a elevadas temperaturas. En todo caso, el residuo que queda es muy bajo por lo que se puede concluir que el plástico ha sido lavado correctamente antes de ser procesado.

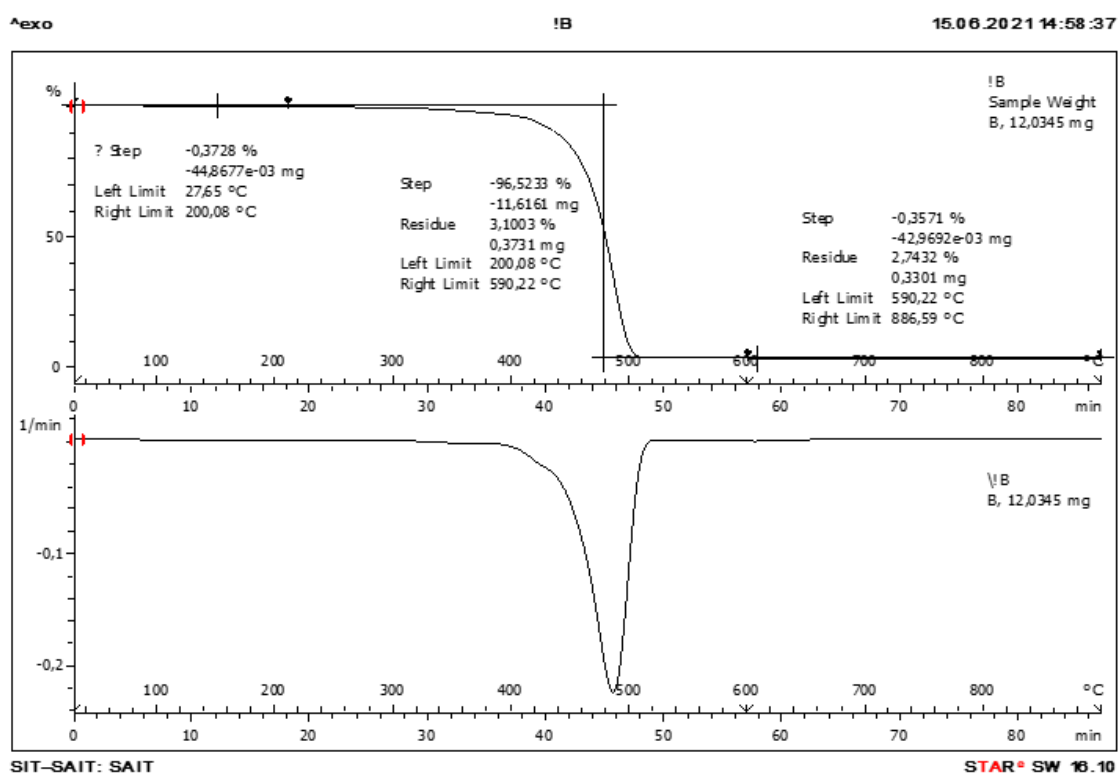


Figura (29): Gráfica TGA muestra B

La figura (29) representa el ensayo termogravimétrico del polímero B, en el calentamiento hasta 200°C se pierde un 0.37% de masa (sustancias volátiles). En el segundo paso, se degrada el 96.523% de la muestra, con una temperatura de degradación de 480°C. Se queda un 3.10% de residuos, de los cuales un 0.35% corresponde a residuos orgánicos y un 2.743% a residuos inorgánicos.

Hemos definido la temperatura de degradación como aquella a la que ocurre un 50% de degradación del total de la masa. La temperatura de degradación de ambos plásticos es de 480°C, como se puede observar en la figura (27) la degradación de las dos muestras es prácticamente idéntica. La temperatura de trabajo del betún es de aproximadamente 150°C o 160°C, por lo que no habrá problemas de degradación de los

polímeros. Por lo tanto, la estabilidad térmica de ambos plásticos es lo suficientemente alta y las temperaturas de trabajo del betún no afectarán sus características fisicoquímicas.

6- Betunes modificados

6.1- Preparación de las mezclas

Una vez realizado el análisis térmico de los polímeros, hemos podido comprobar que estos no se degradan a las temperaturas de fabricación del betún, luego podemos proceder a la elaboración de los betunes modificados. Los betunes modificados se han fabricado a partir de un betún de grado de penetración 50/70, proporcionado por el Centro Tecnológico de la Construcción (CTCON).



Figura (30): Betún 50/70

Las mezclas se han preparado utilizando un agitador de aletas, en el cual estuvieron durante 4 horas aproximadamente, a una temperatura media de 160°C y con una velocidad de agitación de 400 rpm. Inicialmente se realizaron unas mezclas con el 5% de polímero, pero debido a la elevada viscosidad y difícil manejabilidad que presentaban, se redujo la concentración al 3%.

Se han obtenido dos betunes modificados:

- BM1: Betún 50/70 con un 3% de plástico A.
- BM2: Betún 50/70 con un 3% de plástico B.

6.2- Ensayos de caracterización

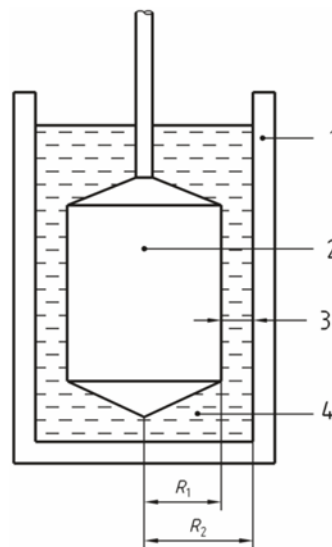
Los betunes modificados con plásticos reciclados se han sometido a diferentes ensayos de caracterización, con el fin de estudiar su comportamiento reológico. Los ensayos realizados a los betunes son los siguientes:

- **Ensayo de penetración según norma UNE-EN 1426:** Determina la consistencia de una muestra de betún bajo condiciones fijas de carga, tiempo y temperatura.
- **Ensayo de punto de reblandecimiento anillo-bola según norma UNE-EN 1427:** Nos da el valor de la temperatura de reblandecimiento del betún, parámetro utilizado para medir la susceptibilidad térmica de los ligantes bituminosos.
- **Ensayo de recuperación elástica según norma UNE-EN 13398 mediante ductilómetro:** Determina la capacidad de recuperación de los betunes sometidos a la acción de fuerzas tangenciales.
- **Ensayo de viscosidad según norma UNE-EN 13302:** Mide la viscosidad del betún a una temperatura determinada. Permite estudiar el comportamiento del ligante en fase líquida.

6.2.1- Ensayo de viscosidad

La viscosidad dinámica de un fluido es la relación entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de corte, el esfuerzo cortante es la fuerza que actúa tangencialmente a una superficie dividida por el área de esta y la velocidad de corte es el gradiente de velocidad en un fluido en movimiento perpendicular al esfuerzo.

La viscosidad dinámica se determina usando un viscosímetro de rotación de aguja según norma UNE-EN 13302, similar al que se puede observar en la figura (31). El principio de funcionamiento consiste en un par de torsión aplicado a una aguja (por ejemplo, un cilindro) en movimiento rotatorio en un recipiente especial, el cual contiene la muestra a medir, este par mide la resistencia relativa a la rotación de la aguja proporcionando una medida de la viscosidad dinámica de la muestra.



- Leyenda
- 1 Recipiente que contiene la muestra
 - 2 Aguja
 - 3 Espesor de la muestra sometida al ensayo
 - 4 Muestra a ensayar
 - R_1 Radio aguja
 - R_2 Radio interno del recipiente que contiene la muestra

Figura (31): Esquema viscosímetro rotacional

Para caracterizar el comportamiento de los ligantes en fase líquida, se ha medido la viscosidad a diferentes temperaturas. De esta forma se ha obtenido el gráfico de viscosidad-temperatura, el cual nos proporciona información sobre la manejabilidad del betún. A continuación, se muestran las curvas de viscosidad del betún 50/70 modificado con los plásticos A y B, también se muestra a modo de comparación la curva de un betún 50/70 sin modificar y la del betún modificado con polímeros vírgenes PMB 45/80-65, un betún modificado comercial de Repsol.

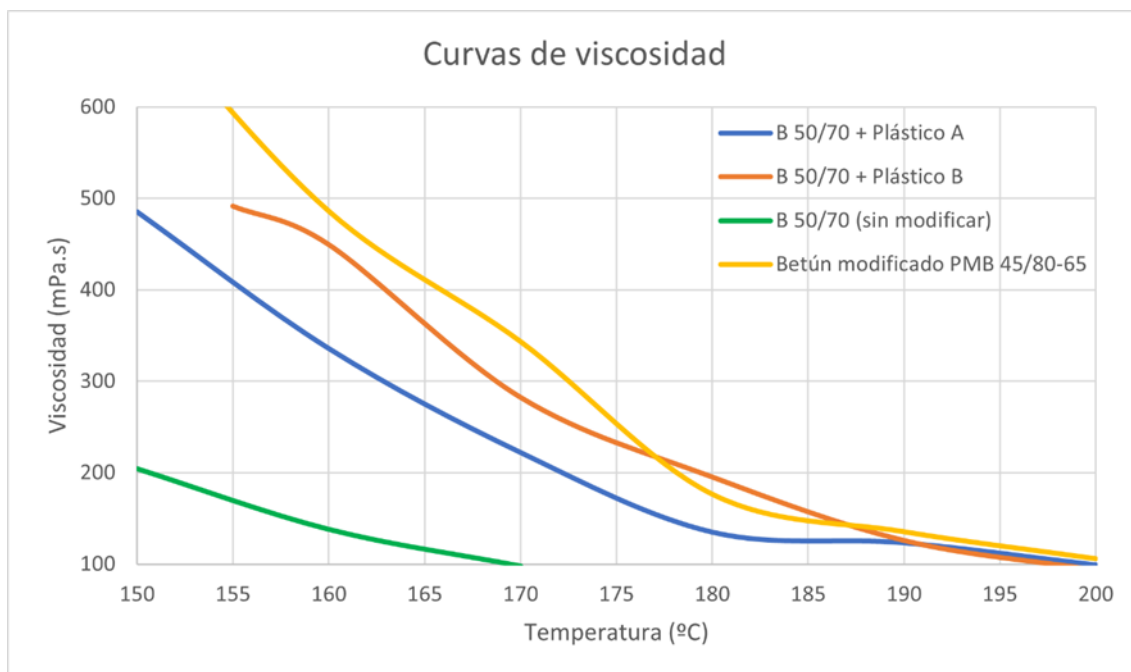


Figura (32): Gráfico viscosidad-temperatura

Como se puede observar en la figura (32) y en la tabla (2), la adición de los polímeros ha supuesto un incremento en los valores de viscosidad, siendo la viscosidad del betún modificado con plástico B mayor que la del betún modificado con plástico A, por lo que la temperatura de fabricación del betún modificado con plástico B será mayor.

Temperatura (°C)	Viscosidad (mPa·s)			
	B 50/70	BM1	BM2	PMB 45/80-65
130	497.5	—	—	—
140	311.8	—	—	—
150	204.1	485.1	—	—
160	138	335.7	449.5	486.2
170	98	222.1	282.3	343.6
180	—	135	195.1	176.7
190	—	123.4	125.6	135.7
200	—	99.21	93.28	106.2

Tabla (2): Viscosidad-temperatura de los betunes

La temperatura de fabricación de la mezcla será aquella para la que se alcanza la viscosidad de 200 mPa.s, esta viscosidad se alcanza a 150°C para el betún 50/70, a 173°C aproximadamente para el betún modificado con plástico A y a 180°C para el betún modificado con plástico B. La diferencia entre las temperaturas de fabricación de los betunes modificados es de tan solo 7°C, no es una diferencia significativa, por lo que podemos considerar que ambos se fabricarían aproximadamente a 180°C.

6.2.2- Ensayo de penetración

La norma UNE-EN 1426 define la penetración del betún asfáltico como la “consistencia, expresada como la profundidad, en décimas de milímetro, que alcanzará una aguja normalizada al penetrar verticalmente en una muestra de producto en condiciones determinadas de temperatura, carga, y duración de la aplicación de la carga”.

El ensayo se realiza en un penetrómetro, a una temperatura de 25°C, 100 g de carga y 5 s de duración de la carga aplicada. El valor obtenido en estas condiciones es lo que se conoce como grado de penetración del betún, se expresa como ya se ha mencionado en décimas de milímetro (x 0.1 mm). Cuanto más blando sea el betún, mayor será el grado de penetración.

La penetración es un parámetro fundamental en la caracterización del betún, al punto que, en muchos países, entre ellos España, es el ensayo de referencia para clasificar los betunes de carreteras. En este proyecto se ha utilizado un betún clasificado como 50/70, esto significa que tiene una penetración mínima a 25°C de (50 x 0.1) mm y una penetración máxima a 25°C de (70 x 0.1) mm.

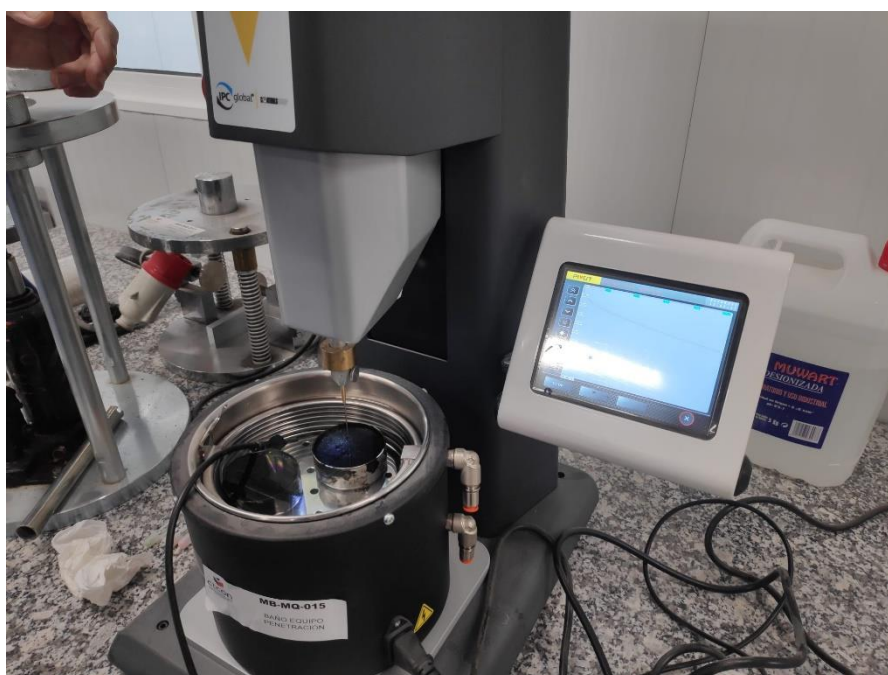


Figura (33): Ensayo de penetración

Se han tomado 3 valores de la penetración para cada betún modificado, los cuales vienen recogidos en la tabla (4), para que los resultados sean válidos, la diferencia entre el valor de la penetración más alto y el más bajo no puede ser mayor de 2.

Penetración en 0.1 mm	Hasta 49	De 50 a 149	De 150 a 249	250 o superior
Máxima diferencia entre la determinación más alta y la más baja	2	4	6	8

Tabla (3): Rango máximo entre determinaciones válidas

	Penetración 1	Penetración 2	Penetración 3	Valor medio
BM1	(32 x 0.1) mm	(33 x 0.1) mm	(31 x 0.1) mm	(32 x 0.1) mm
BM2	(29 x 0.1) mm	(30 x 0.1) mm	(30 x 0.1) mm	(30 x 0.1) mm

Tabla (4): Resultados ensayo de penetración

La diferencia entre la determinación más alta y la más baja del BM1 es de 2, para el BM2 es de 1, por lo que podemos dar por válidos los resultados. El valor de la penetración del betún modificado con polietileno es de (32 x 0.1) mm, mientras que la del betún modificado con polietileno y SBS es de (30 x 0.1) mm, la adición de SBS ha supuesto una pequeña mejora en la consistencia del betún.

6.2.3- Ensayo de punto de reblandecimiento

El punto de reblandecimiento es la temperatura a la cual el betún alcanza una determinada consistencia en las condiciones normalizadas de ensayo. Se determina mediante el método anillo-bola, el cual consiste en dos discos horizontales del producto a ensayar, moldeados en dos anillos de latón, se deben calentar en un baño líquido cuya elevación de temperatura está controlada y en cada uno de ellos se apoya una bola de acero. Se anota el punto de reblandecimiento, que corresponde a la media de las temperaturas a las que los dos discos se reblandecen lo suficiente para permitir que cada bola, envuelta en ligante bituminoso, descienda una distancia de $(25 \pm 0,4)$ mm.

Para puntos de reblandecimiento entre 28°C y 80°C se emplea agua recién destilada y enfriada o agua desionizada para evitar que puedan quedar atrapadas burbujas de aire en la superficie de la muestra, lo que afectaría a los resultados. Para puntos de reblandecimiento superiores a 80°C y hasta 150°C, se emplea glicerol.

En los betunes modificados, se repite el ensayo si:

- La diferencia entre las dos temperaturas es mayor de 2°C
- La bola rompe la película que la rodea antes de tocar la placa de fondo, o bien se observa un desprendimiento parcial de betún de la bola.

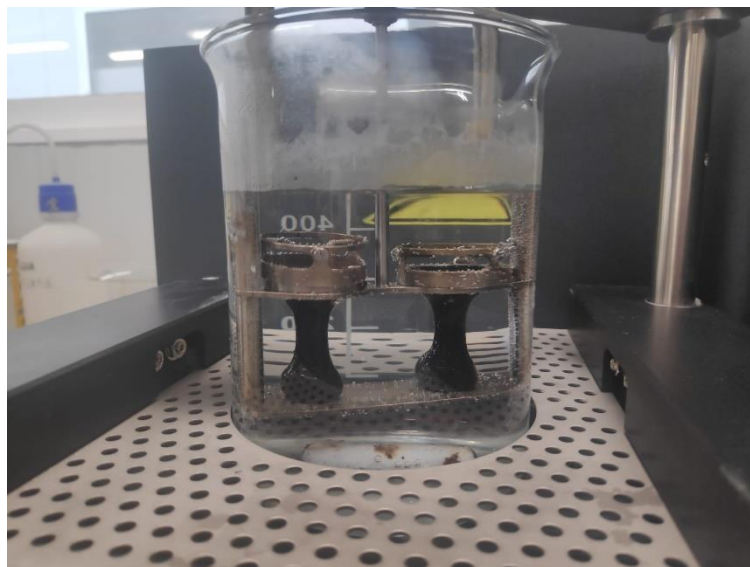


Figura (34): Método anillo-bola

El punto de reblandecimiento es una característica fundamental en cuanto al comportamiento del betún a alta temperatura, nos da información sobre la susceptibilidad térmica, esta propiedad hace referencia a la variación de las características del betún con la temperatura. Los valores de punto de reblandecimiento típicos de los betunes de carretera en España son de 49-51°C y de 53-55°C para los betunes de penetración 50/70 y 35/50 respectivamente.

En las figuras (35) y (36) se muestran los resultados del ensayo anillo-bola:



Figura (35): Punto de reblandecimiento BM1

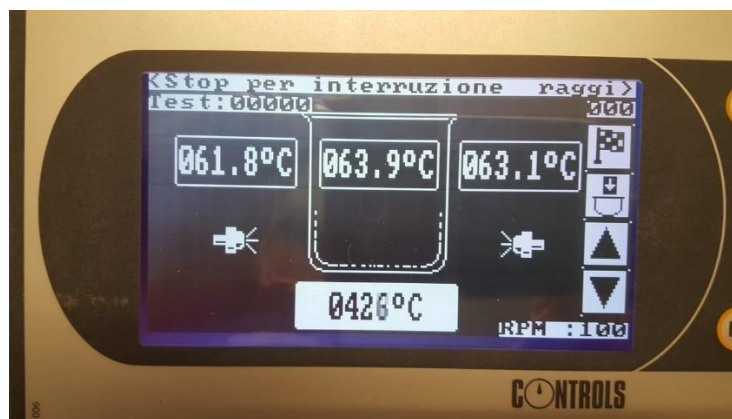


Figura (36): Punto de reblandecimiento BM2

Como se ha explicado anteriormente, el punto de reblandecimiento corresponde a media de las temperaturas que marcan los dos discos, el BM1 tiene un punto de reblandecimiento de 59.6°C y el BM2 de 62.45°C. El betún modificado con el plástico B tiene un mayor punto de reblandecimiento, por lo tanto, será menos susceptible a altas temperaturas.

6.2.4- Ensayo de recuperación elástica

Una medida importante del comportamiento de un betún modificado es su capacidad para recuperarse elásticamente después de una deformación. Para medir esta propiedad se ha realizado el ensayo de recuperación elástica en ductilómetro.

En el método del ductilómetro se somete la probeta empleada para la medida de la ductilidad a un estiramiento de 50 mm/min, a 25°C, hasta producir una elongación de 200 mm. Después del estiramiento se para el ductilómetro y se corta el hilo de betún con unas tijeras por la mitad y se deja recuperar durante 30 minutos. Transcurrido este tiempo se anota la longitud, en mm, de cada medio hilo, calculándose la recuperación elástica como el porcentaje de longitud recuperada.

Puede darse el caso de que la probeta rompa antes de alcanzar los 200 mm de elongación, esto se conoce como rotura prematura, se deberá medir la longitud alcanzada en el momento de la rotura y su recuperación elástica.

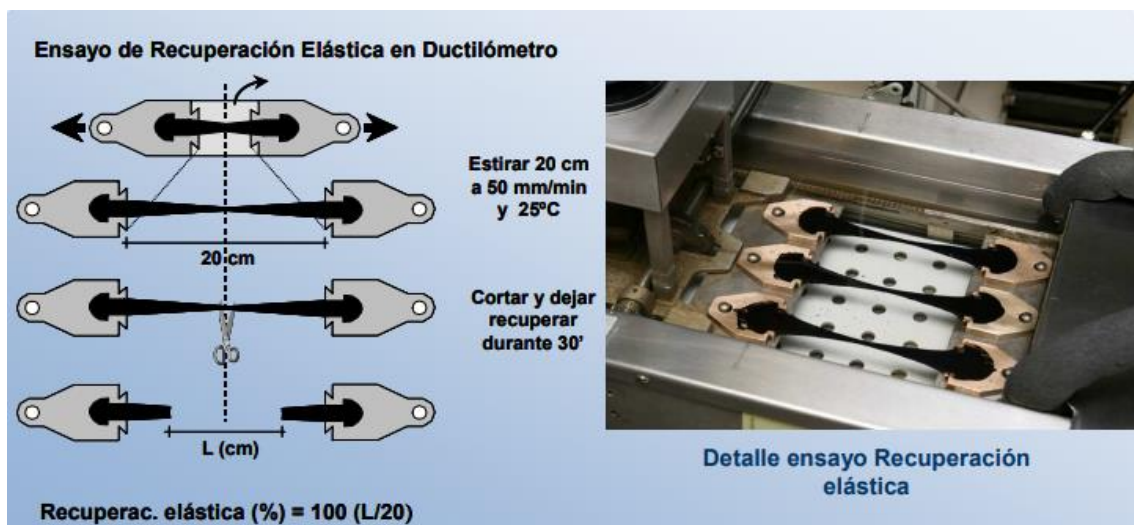


Figura (37): Ensayo de recuperación elástica en ductilómetro

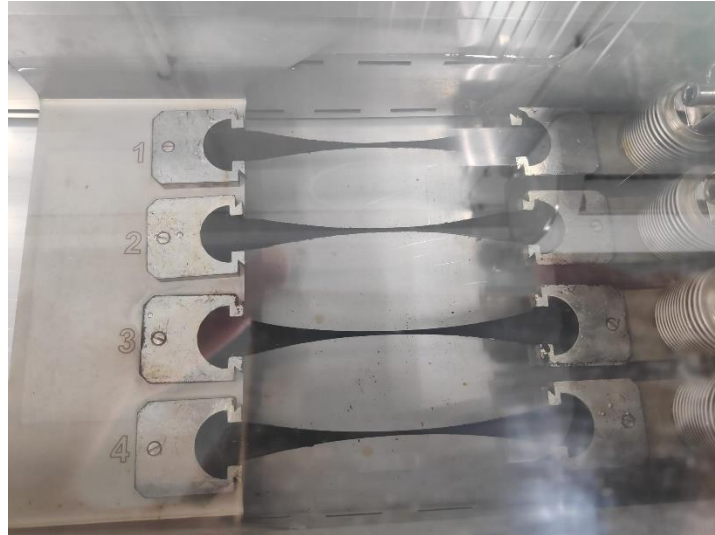


Figura (38): Hilos de betún

En la figura (38) se muestran los hilos de betún, es decir, las probetas de betún moldeado y estirado. Se han utilizado 4 probetas, las que van numeradas como 1 y 2 son del betún modificado con polietileno (BM1), las que van numeradas como 3 y 4 corresponden al betún modificado con polietileno y SBS (BM2).

Las probetas de BM1 sufrieron rotura prematura, mientras que las probetas de BM2 se elongaron hasta 200 mm sin romper, esto es debido a la elasticidad del SBS. La probeta 1 rompió a 185 mm y la probeta 2 a 192 mm. En la figura (39), aparecen los hilos de betún estirados a 200 mm, podemos observar la rotura prematura de los hilos 1 y 2. En la figura (40), se han cortado los hilos de betún 3 y 4 y tras 30 minutos de reposo podemos observar la recuperación elástica.

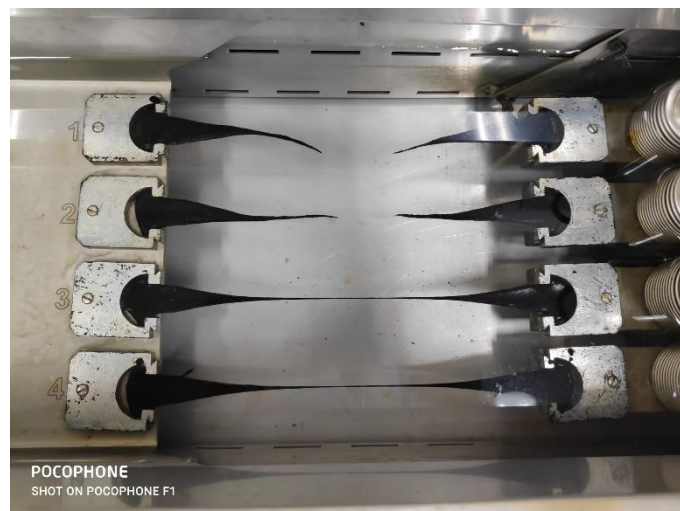


Figura (39): Elongación hasta 200 mm



Figura (40): Recuperación elástica

Tras haber medido la distancia entre las puntas de los medios hilos, podemos hacer los cálculos de la recuperación elástica.

En el caso de no haber rotura prematura, podemos calcular el porcentaje de recuperación elástica como:

$$RE (\%) = \frac{L}{200} \times 100$$

Ecuación (1): Porcentaje de recuperación elástica sin rotura prematura

Siendo:

RE: Porcentaje de recuperación elástica

L: Distancia entre las puntas de los medios hilos (mm).

$$RE3 (\%) = \frac{42.8}{200} \times 100 = 21.4\%$$

Ecuación (2): Recuperación elástica probeta 3

$$RE4 (\%) = \frac{36.8}{200} \times 100 = 18.4\%$$

Ecuación (3): Recuperación elástica probeta 4

En el caso de rotura prematura, se calcula el porcentaje de recuperación elástica como:

$$RE (\%) = \frac{d}{Lrp} \times 100$$

Ecuación (4): Porcentaje de recuperación elástica rotura prematura

Siendo:

RE: Porcentaje de recuperación elástica

d: Distancia entre las puntas de los medios hilos, midiendo desde la longitud de la rotura (mm).

Lrp: Longitud a la que se produce la rotura prematura (mm).

$$RE1 (\%) = \frac{58.8}{185} \times 100 = 31.8\%$$

Ecuación (5): Recuperación elástica probeta 1

$$RE2 (\%) = \frac{53.2}{192} \times 100 = 27.7\%$$

Ecuación (6): Recuperación elástica probeta 2

Según la normativa del ensayo de recuperación elástica de los betunes modificados UNE-EN 13398, “si los valores de recuperación elástica obtenidos para las dos probetas no difieren en más de un 5% en valor absoluto, se determina la media aritmética de estos dos valores”.

En el caso del BM1, se han obtenido para cada probeta unos valores de recuperación elástica de 31.8% y 27.7%, estos difieren en un 4.1%, por lo que son válidos. Para el BM2, se ha obtenido un 21.4% y 18.4%, difieren en un 3% por lo que también son válidos. En la tabla (5) se ha calculado la media de aritmética de ambas probetas.

Muestra	Recuperación elástica (%)
BM1	29.75
BM2	19.9

Tabla (5): Resultados ensayo de recuperación elástica

7- Análisis comparativo.

Una vez caracterizados los betunes modificados con plásticos reciclados, se van a comparar los resultados con los de un betún 50/70 convencional (sin modificar) y con los del betún modificado con polímeros vírgenes PMB 45/80-65, este último es un betún modificado comercial de Repsol.

La nomenclatura de los betunes modificados con polímeros se compone de las letras PMB (polymer modified bitumen), seguidas de los valores de penetración mínima y máxima (45/80 en este caso) y el tercer número precedido de un guion corresponde al punto de reblandecimiento (65).

Ensayo	Norma	B 50/70	BM1	BM2	PMB 45/80-65
Penetración	UNE-EN 1426	(54 x 0.1) mm	(32 x 0.1) mm	(30 x 0.1) mm	(50 x 0.1) mm
Viscosidad a 170°C	UNE-EN 13302	98 mPa·s	222.1 mPa·s	282.3 mPa·s	343.6 mPa·s
Recuperación elástica	UNE-EN 13398	—	29.75%	19.9%	87%
Punto de reblandecimiento	UNE-EN 1427	52°C	59.6°C	62.45°C	65.8°C

Tabla (6): Análisis comparativo de los resultados

Analizando los resultados del ensayo de penetración, podemos comprobar que la adición de polímeros al betún provoca una disminución de la penetración, siendo los betunes modificados de este proyecto los que tienen el valor más bajo. Se han obtenido dos betunes modificados con mejor consistencia que el betún convencional y que el betún comercial, por lo que tendrán una mayor resistencia a la deformación.

En cuanto a la viscosidad, como era de esperar los polímeros han provocado que ésta aumente. Los betunes modificados BM1 y BM2 tienen un valor de viscosidad intermedio entre el betún 50/70 y el comercial, por lo que será más difícil trabajar con ellos que con el betún 50/70 pero más fácil que con el betún comercial. Sin embargo, observando la figura (32), el betún modificado comercial alcanza la viscosidad de 200

mPa·s a la temperatura de 178°C aproximadamente, podríamos considerar que tanto para la fabricación de los betunes modificados con polímeros reciclados como para la fabricación de los betunes modificados con polímeros vírgenes habría que aumentar la temperatura 30°C con respecto a la del betún convencional.

La recuperación elástica del betún modificado comercial es muy superior a la de los betunes modificados con polímeros reciclados, esto se debe a que los polímeros que se han utilizado en este proyecto están mucho más desgastados y han perdido propiedades.

Los betunes modificados con polímeros reciclados han mejorado el punto de reblandecimiento del betún convencional 50/70, haciéndolo menos susceptible a altas temperaturas, aunque no llegan al punto de reblandecimiento del betún modificado comercial, se quedan muy cerca.

Los resultados del BM1 y el BM2 son muy parecidos, podemos intuir que hay poca diferencia debido a que el BM2 lleva muy poco SBS en comparación con el polietileno.

8- Resumen y conclusiones

En este TFG, se han empleado residuos de plásticos de la agricultura para la modificación de betunes, por lo tanto, se han obtenido dos betunes modificados. Tras realizar unos estudios preliminares, se ha establecido que las concentraciones adecuadas de adición del residuo son de un 3%, por lo que las composiciones de las muestras han sido de betún 50/70 con un 3% de polietileno de baja densidad reciclado, y betún 50/70 con un 3% de polietileno de baja densidad reciclado y mezclado con SBS.

Se ha realizado un análisis térmico para verificar que los plásticos utilizados no se degradan a las temperaturas de trabajo del betún, que suelen ser en torno a 160°C. La estabilidad térmica de los reciclados tiene valores superiores a esta temperatura.

Posteriormente, se han realizado una serie de ensayos de caracterización de los betunes modificados. Un ensayo de viscosidad, en el que se ha podido estudiar la viscosidad de los betunes a diferentes temperaturas, así como establecer su temperatura de fabricación. El ensayo de penetración ha servido para evaluar la consistencia de los betunes. El ensayo de punto de reblandecimiento ha proporcionado información sobre la susceptibilidad térmica de los betunes, es decir, la variación de las propiedades con la temperatura. Por último, se ha realizado un ensayo de recuperación elástica. Los resultados de estos ensayos se han evaluado y comparado con los de un betún 50/70 sin modificar y con los de un betún modificado comercial.

En conclusión, se ha obtenido un betún modificado que ha mejorado las propiedades del betún convencional, pero sin llegar a las prestaciones del betún modificado comercial. Sin embargo, nuestro producto tiene el valor añadido de que emplea plásticos reciclados, reduciendo la contaminación y favoreciendo la economía circular.

Como trabajos futuros, habría que hacer más ensayos de caracterización de estos betunes, podrían ser ensayos que evalúen propiedades de durabilidad como la resistencia al envejecimiento, propiedades mecánicas, como pueden ser la fragilidad mediante el punto de Fraass (muy utilizado en la caracterización de betunes), ensayo de tracción o propiedades de adhesividad al árido. Una vez se hayan caracterizado los betunes, se podrían preparar las mezclas bituminosas, es decir, la mezcla del betún con los áridos y evaluar su puesta en obra.

Otra futura línea de trabajo podría ser realizar estudios con distintas concentraciones de polímeros o utilizar otros residuos difíciles de reciclar, como podrían ser los neumáticos.

9- Bibliografía

- [1] Ochoa, F. J. (s.f.). *Firmes bituminosos: Concepción, fabricación y puesta en obra*. Eadic, Escuela abierta de desarrollo en ingeniería y construcción.
- [2] Plásticos A. E. (2015). *La plasticultura en España*. Obtenido de <https://www.anaip.es/images/Divisiones/Agricultura/Catlogo-La-Plasticultura-en-Espaa-ANAIP-3-Mb.pdf>
- [3] *Noticias Parlamento Europeo*. (16 de febrero de 2021). Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201ST005603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- [4] Vilachán, L. M. (4 de Febrero de 2021). *Profesionales hoy*. Obtenido de [La producción de asfalto cae un 10,1% en 2020 | Potencia \(profesionaleshoy.es\)](https://www.profesionaleshoy.es/produccion-de-asfalto-cae-un-10-1-en-2020-potencia)
- [5] *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. (2021). Obtenido de <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- [6] Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. *Journal of Hazardous Materials*, 150(2), 424-432.
- [7] Fuentes-Audén, C., Sandoval, J. A., Jerez, A., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F. J., Partal, P., & Gallegos, C. (2008). Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen. *Polymer Testing*, 27(8), 1005-1012.
- [8] Wu, S. P., Pang, L., Mo, L. T., Chen, Y. C., & Zhu, G. J. (2009). Influence of aging on the evolution of structure, morphology and rheology of base and SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1005-1010.
- [9] Navarro, F. J., Partal, P., García-Morales, M., Martín-Alfonso, M. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., ... & Diogo, A. C. (2009). Bitumen modification with reactive and non-reactive (virgin and recycled) polymers: a comparative analysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15(4), 458-464.

- [10] Vasiljevic-Shikaleska, A., Popovska-Pavlovska, F., Cimmino, S., Duraccio, D., & Silvestre, C. (2010). Viscoelastic properties and morphological characteristics of polymer-modified bitumen blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 118(3), 1320-1330.
- [11] Habib, N. Z., Kamaruddin, I., Napiyah, M., & Isa, M. T. (2011). Rheological properties of polyethylene and polypropylene modified bitumen. *International Journal Civil and Environmental Engineering*, 3(2), 96-100.
- [12] Prasad, K. S. B. (2012). Utilization of waste plastic as a strength modifier in surface course of flexible and rigid pavements.
- [13] Chee, C. Y., Azahari, H., & Rehan, M. (2014). Modification of bitumen characteristic by using recycled polyethylene. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 604(1), 33-40.
- [14] Modarres, A., & Hamed, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials & Design*, 61, 8-15.
- [15] Yan, K., Xu, H., & You, L. (2015). Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene. *Construction and Building Materials*, 83, 143-149.
- [16] Karmakar, S., & Roy, T. K. (2016). Effect of waste plastic and waste tires ash on mechanical behavior of bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016006.
- [17] Costa, L. M., Silva, H. M., Peralta, J., & Oliveira, J. R. (2019). Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification—Performance and morphological assessment. *Construction and Building Materials*, 198, 237-244.

- [18] Okhotnikova, E. S., Frolov, I. N., Ganeeva, Y. M., Firsin, A. A., & Yusupova, T. N. (2019). Rheological behavior of recycled polyethylene modified bitumens. *Petroleum Science and Technology*, 37(10), 1136-1142.
- [19] Nizamuddin, S., Jamal, M., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2020). Recycled plastic as bitumen modifier: The role of recycled linear low-density polyethylene in the modification of physical, chemical and rheological properties of bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121988.
- [20] Xia, T., Zhang, A., Xu, J., Chen, X., Xia, X., Zhu, H., & Li, Y. (2021). Rheological behavior of bitumen modified by reclaimed polyethylene and polypropylene from different recycling sources. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(20), 50435.
- [21] Monzó, F. (2020). *Desarrollo de filmes de nanocomposites con propiedades ópticas especiales a partir de hidróxidos dobles laminares híbridos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [22] Driver, W.E. Química y Tecnología de Plásticos. Ed. México, D.F: CECSA, (1982).
- [23] Gómez, A., Martínez, A., León, N. M., & Dueñas, A. P. (2003). Betunes asfálticos: materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente. In *Anales de la Real Sociedad Española de Química* (No. 4, pp. 43-52). Real Sociedad Española de Química.