

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

ÁREA DE PROYECTOS DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Proyecto de Investigación

TÍTULO	Estudio del uso de materiales reciclados en firmes de carretera
TÍTULO EN INGLÉS	Study of the use of recycled materials in road pavements
DIRECTOR DE PROYECTO	Miguel Ángel Calzada Pérez
AUTOR	Javier Rodríguez Torres
GRUPO	Laboratorio de Caminos y Aeropuertos
FECHA	JULIO 2013

ÍNDICE DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	2
Tabla de ilustraciones.....	4
Capítulo 1. Introducción.....	7
Capítulo 2. Estudio del estado del arte	8
2.1. Ligante.....	8
Neumáticos usados	8
Plástico reciclado (polímeros)	14
2.2. Áridos	17
Aglomerado reciclado (fresado).....	18
Residuos cerámicos	21
Escoria de acería.....	26
Plásticos.....	31
Neumáticos usados	35
Vidrio	40
2.3. Efectos sobre el Medio Ambiente	57
Capítulo 3. Materiales empleados en el estudio.....	60
3.1. Ligantes	60
Betún convencional.....	60
Betún recuperado de fresado	61
3.2. Áridos	62
Caliza	62
Escoria de acería.....	64
Fresado.....	67
Capítulo 4. Ensayos en laboratorio	71
4.1. Metodología	71
Dosificación	71
Peso específico de áridos	73
Densidad de probetas	74

Ensayo de estabilidad y deformación Marshall	76
Resistencia conservada (Sensibilidad al agua)	78
Módulos de rigidez	80
Ensayo mediante compactador giratorio.....	81
4.2. Resultados	82
Ensayo de estabilidad y deformación Marshall	82
Ensayo de resistencia conservada (sensibilidad al agua)	85
Módulos de rigidez	87
Ensayo mediante compactador giratorio.....	89
Capítulo 5. Conclusiones	91
Capítulo 6. Resumen fotográfico de los ensayos	92
Agradecimientos	97
Referencias.....	98

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Tamaño de caucho para inclusión como ligante.	9
Ilustración 2. Influencia del tamaño de partícula principal en el comportamiento del flujo de los CTRMBs (betún modificado con caucho de desecho). F.J. Navarro et al. (2004).	10
Ilustración 3. Esquema fabricación ligante con caucho “vía húmeda”. Manual sobre empleo de NFU (CEDEX).....	12
Ilustración 4. Aplicación recomendada de los ligantes modificados con caucho en capa en rodadura Manual sobre empleo de NFU (CEDEX).....	14
Ilustración 5. Micrografías de microscopía óptica para mezcla binaria: (A) 10% y (B) 30% en peso de polímero reciclado. Regiones cristalinas con luz. Fuentes-Audén (2012).....	15
Ilustración 6. Resultados de ensayo de pista.	16
Ilustración 7. Perfil de aglomerado asfáltico con tejas recicladas.	17
Ilustración 8. Resultados del ensayo de envejecimiento por aire y calor RTFOT. (Dony A. et al., 2012)	20
Ilustración 9. <i>Resultados del ensayo de envejecimiento por RTFOT y PAV. Modelos a corto y largo plazo.</i> (Dony A. et al., 2012). Líneas. Continua: ligante de referencia. Discontinua, puntos, y rayas y puntos: probetas de rejuvenecimiento.....	20
Ilustración 10. Transición hecha por los áridos provenientes de residuos porcelánico o gres. (BECSA, 2012).....	22
Ilustración 11. Comparativa mezclas patrón, mezclas con 30% de áridos reciclados RICGP y prescripciones PG-3. (BECSA, 2012).....	23
Ilustración 12. Ciclo de vida del residuo procedente de tejas en la mezcla bituminosa. (AASHTO, 2012).	25
Ilustración 13. Composición química de las escorias de acerías españolas. (CEDEX, 2011).....	27
Ilustración 14. Propiedades físicas de las escorias de acerías españolas. (CEDEX, 2011).....	27
Ilustración 15. Gradación y puesta en obra de mezcla SMA. (Behnood y Ameri, 2012).	28
Ilustración 16. Resultados de los ensayos de estabilidad y deformación Marshall, y de tensión indirecta. (Behnood y Ameri, 2012).	29
Ilustración 17. Resultados de los ensayos de módulo de resiliencia a tensión indirecta. (Arabani y Azarhoosh, 2012).....	30
Ilustración 18. Residuos plásticos después de tratamiento de extrusionado y balanceado.	31
Ilustración 19. Polímeros reciclados a partir de residuos plásticos de la agricultura intensiva en invernaderos. (Universidad de Huelva, 2011).....	33
Ilustración 20. Extrusora de plástico reciclado. (Universidad de Huelva, 2011).....	34
Ilustración 21. Ejemplo tramo de prueba. (CEDEX, Ministerio de Fomento).....	37
Ilustración 22. Efecto del agua y deformaciones plásticas. (Carmona, 2008).	38
Ilustración 23. Imagen de capa superficial de asfalto con vidrio reciclado.	41
Ilustración 24. Ejemplo de ensayo TSR para probetas Marshall. G.W. Maupin (1998).	42
Ilustración 25. Vidrio reciclado procedente de planta. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).	44
Ilustración 26. Gradaciones tipo Topeka y binder. (Arabani M., 2010)	45
Ilustración 27. Gradación del residuo de vidrio como parte del árido de la mezcla bituminosa. (Arabani M., 2010)	46

Ilustración 28. Configuración del ensayo ITSM. Variación de carga y deformación para el ensayo dinámico ITSM (Arabani M., 2010).	46
Ilustración 29. Resultados del ensayo Marshall para el caso de gradación binder, con mejores niveles de estabilidad y volumen de huecos. (Arabani M., 2010).	47
Ilustración 30. Variación de módulo de rigidez de la mezcla bituminosa para diferentes contenidos de vidrio y temperaturas. (Arabani M., 2010).....	48
Ilustración 31. Ecuación de Volterra: deformación elástica instantánea más fase de fluencia y relajación. Modelo de Burgers: une en serie un modelo Maxwell y otro Kelvin.	49
Ilustración 32. Curvas de fluencia para mezcla convencional (superior de cada color) y mezcla de vidrio. Esfuerzos de 0,3 MPa. (Arabani M., 2013).	50
Ilustración 33. Curvas de fluencia para mezcla convencional (superior de cada color) y mezcla de vidrio. Esfuerzos de 0,1 y 0,15 MPa. (Arabani M., 2013).	50
Ilustración 34. Comparación del modelo de Burgers y los resultados de la investigación para cada esfuerzo a 40 °C: (a) mezcla convencional, y (b) mezcla glasphalt (Arabani M., 2013).	51
Ilustración 35. Comparación del modelo de Burgers y los resultados de la investigación para cada esfuerzo a 60 °C: (a) mezcla convencional, y (b) mezcla glasphalt (Arabani M., 2013).	51
Ilustración 36. Contenido de betún óptimo para cada porcentaje de inclusión de vidrio en la mezcla bituminosa. (Su y Chen, 2001).	53
Ilustración 37. Estabilidad Marshall respecto a la cantidad de vidrio incluido y al número de días en horno a 60 °C (ciclo seco). (Su y Chen, 2001).....	53
Ilustración 38. Estabilidad Marshall respecto a la cantidad de vidrio incluido y al número de días en horno a 60 °C (ciclo húmedo). (Su y Chen, 2001).	54
Ilustración 39. Estabilidad Marshall respecto al uso de betún convencional 85/100 o Modificado II. (Su y Chen, 2001).	55
Ilustración 40. El firme, con vidrio como parte de la mezcla bituminosa, reflejando la luz en uno de los tramos de prueba. (Su y Chen, 2001).	55
Ilustración 41. Capas estructurales para un pavimento flexible o rígido. Uso de material de desecho en capas de base y cimentación. (Huang et al., 2007).	57
Ilustración 42. Incremento de los volúmenes de desecho en el Reino unido y las distintas aplicaciones que se le pueden dar. (Huang et al., 2007).	59
Ilustración 43. Emisiones y posibles reducciones de ruidos, agentes tóxicos y residuos de producción para mezcla bituminosa con inclusión de neumático fuera de uso (NFU). (Peilong y Zhang, 2011).....	59
Ilustración 44. Fases de tamizado del material una vez llegado al laboratorio. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).....	72
Ilustración 45. Compactadora y mezcladora para probetas tipo Marshall con molde en posición de compactación. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).	75
Ilustración 46. Embudo, cuello, molde y tapa para fabricación de probetas tipo Marshall. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).....	77
Ilustración 47. Probetas con vidrio reciclado antes y después de ensayo Marshall. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).....	78
Ilustración 48. Cámara de vacío para probetas húmedas. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).	79

Ilustración 49. Mordaza para ensayo de resistencia conservada. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).	79
Ilustración 50. Prensa para rotura de probetas Marshall y sensibilidad al agua. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).....	80
Ilustración 51. Gráficas tensión-deformación para el estudio de estabilidad y deformación sobre probetas Marshall. Probetas de Referencia (Ofita-Caliza-Cemento).....	83
Ilustración 52. Gráficas tensión-deformación para el estudio de estabilidad y deformación sobre probetas Marshall. Probetas con vidrio reciclado (Ofita-Caliza-Vidrio-Cemento).....	84

Capítulo 1. Introducción

El uso de árido natural en la construcción constituye la piedra angular de cualquier proyecto en el que nos veamos envueltos. Dicha necesidad representa un flujo excesivo tanto de material para nueva ejecución, como material de residuo, convirtiéndose en un problema tanto económico como ecológico. Para dar una idea de la magnitud de su utilización, cabe decir que su uso se sitúa por detrás del agua, es decir, segunda materia prima utilizada con algo más de 12.000 kg/hab/año en 2008. Tan importante es su control y viabilidad que la propia Unión Europea lo establece como “flujo prioritario básico” en su política medioambiental establecida en 1996.

Hemos de plantearnos, a su vez, la tipología de la materia prima y su forma de adquirirla; su característica extractiva y de transporte por carretera, también suponen ciertas complejidades que podrían aminorarse con una capacidad de reciclaje y cercanía a los centros de consumo. Tenemos que establecer mecanismos que promuevan un reciclaje en la propia obra, si fuera posible; además de la utilización de materiales de fácil acceso.

Por otra parte, tendremos que adecuar todas las Normas vigentes para su asimilación a los materiales que estamos dispuestos a establecer dentro del firme de nuestras obras viales; algunas ya cuentan con facetas o anexos que permiten el uso de árido fresado de firme antiguo, pero todavía no existen caracterizaciones para productos cerámicos o vidrio reciclado.

El estudio e impulso de políticas y proyectos en esta dirección también conlleva una mejora para la sostenibilidad del planeta, adecuando un impacto ambiental lo más leve posible a las construcciones a llevar a cabo. Es un paso hacia la racionalidad en el uso de materiales y energías, que sin necesidad de pérdidas de calidad y seguridad, mantiene el orden natural y no expropia lo perteneciente a la Naturaleza. Será más complicado el conocimiento de números objetivos respecto a este impacto disminuido, pero pudiéndonos basar en la no utilización de maquinaria o energías de extracción y fabricación de nuevos materiales, pudiéramos hacernos una idea.

Para acabar con la introducción diremos que el siguiente objetivo, que podría ir a continuación del reciclado de materiales para su uso como árido o como aporte de texturas en el firme, sería el de conocer la posibilidad de reutilizar más veces el betún puesto en anteriores obras o el uso de otro material no ligado al petróleo, que provocara un asfalto puramente sostenible.

Capítulo 2. Estudio del estado del arte

Dentro de la mezcla bituminosa existen dos partes fundamentales que se complementan produciendo un pavimento apto para circulación de todo tipo de vehículos: árido y ligante. Una de esas partes es el árido, que como se atisba en la introducción, es el componente de la mezcla que será estudiado con más detenimiento en este proyecto, y que comprende todas aquellas partículas que producen el esqueleto estructural de la mezcla. Su origen es mineral y, habitualmente de primera extracción, dando unas características precisas al pavimento. Ésta última situación es la que tendremos por estudio, y así dar salida al flujo de material reciclado que posea las mismas capacidades que el mineral usualmente aceptado.

La otra parte de la mezcla la compone el ligante, cuya procedencia característica en estos días es el betún, fracción residual del cracking del petróleo; aunque en otros momentos también se utilizase el alquitrán y, en un futuro, los plastómeros y elastómeros. Éstos últimos producen grandes mejoras respecto a la mezcla normal: reducen la susceptibilidad a altas temperaturas, previenen de las deformaciones permanentes y reducen la rigidez a bajas temperaturas. Hablando de posibles materiales reciclados, que pudieran hacer su labor o mejorar su función, se sitúan los neumáticos y los plásticos.

2.1. Ligante

Las propuestas que establecíamos como punto de partida en el uso de materiales reciclados, como ligante en la mezcla bituminosa, eran neumáticos usados y plásticos de desecho. Ambos materiales, tras diversos estudios que ahora expondremos, muestran propiedades que implementarían la respuesta del pavimento a las cargas sufridas.

Neumáticos usados

Introducción

La incursión de un material como el caucho procedente de neumáticos usados dentro de la mezcla bituminosa nace del proceso de reutilización, que con carácter general, queremos dar a todos los materiales que como único fin tienen el vertedero.

Además esos materiales han de darnos un valor añadido en base a resistencia a deformaciones o rebaje de la energía necesaria para la constitución del aglomerado asfáltico; para así constituir un doble objetivo en este estudio: reciclaje y mejora del material usado.

Investigaciones

El término utilizado por varios autores y la ASTM para referirse a este material es el de Asphalt-Rubber (AR), que ha de contener como mínimo un 15% de caucho de desecho respecto del peso de mezcla. Éste reaccionará a altas temperaturas para ser parte fundamental en el aglomerado, proveyéndolo de un aumento de volumen posterior. En su fabricación existen dos vías: seca y húmeda. Lo habitual y de menor complejidad en fabricación es la vía húmeda, que comprende la adición de entre 18 y 26% del caucho a usar, para que se funda junto con el betún en el proceso de fabricación conjunto (B. Celauro et al., 2012). Este material también se verá expuesto a diversos ensayos que demuestren su fiabilidad en el trabajo encomendado, con especial incidencia en la resistencia a cizalla y a la deformación reológica. Como método de buena praxis, estos autores discriminan el tamaño del componente de caucho por los siguientes tamices:

Sieve #	Nominal size (mm)	% Passing
10	2.00	100
16	1.18	75-100
30	600 μm	25-100
50	300 μm	0-45
100	150 μm	0-10
300	75 μm	0

Ilustración 1. Tamaño de caucho para inclusión como ligante.

Con la ayuda del viscosímetro Brookfield, adaptado a una función de mezclador de cizalladura de bajo rango, permitió conocer los óptimos a utilizar respecto del desecho de caucho triturado. También cabe decir que este tipo de mezcla y por la vía húmeda con que es fabricada, reduce la temperatura de susceptibilidad y es claramente adecuada para territorios de climas mediterráneos.

Para abarcar la otra vía de fabricación; la vía seca se refiere al aglutinamiento de áridos, ligante y miga de goma simultáneamente. Este método ya fue recogido en Suecia en los años sesenta llamándolo "Rubit", y su finalidad eran la de actuar en contra de la nieve y el hielo en mezclas de tipo discontinuo. En estos momentos, dicha vía está en estudio en países tropicales (Magalhaes y Barbosa, 2003); que además de

implantarlo en forma de ligante, también se incluye como sustituto de un 2,5% del árido natural. Esta inclusión conlleva un estudio más complejo en cuanto al tamaño del desecho de caucho (se usa estos tamices: #10-#16-#40-#200), y como decíamos en la vía húmeda, un escurpulosos control del tiempo empleado en su producción y la temperatura sostenida. Como resultados apreciables se constata que los módulos de resiliencia y resistencia conservada descienden; dando aumentos en la vida útil debido a la resistencia a la fatiga. Se ven también mejoradas muchas otras características de las mezclas bituminosas.

Expondré algunos de los resultados obtenidos en diversos estudios (F.J. Navarro et al., 2004); en los que se comprueba que el aspecto reológico y viscoelástico de la mezcla establecida, mejora considerablemente. Eso sí, habiendo incluido en la miga de caucho algún aditivo modificante del material de desecho, resolviendo los problemas que afectan a este tipo de ligante a baja temperatura. También se han detectado fenómenos procedentes de insolubles que posee el caucho, que provocan un mejor comportamiento a altas temperaturas; dando especial relevancia a la utilización de partículas menores de 0,35 mm que producen dichas mejoras, pero estableciendo unos parámetros adecuados de manejo y bombeo del fluido.

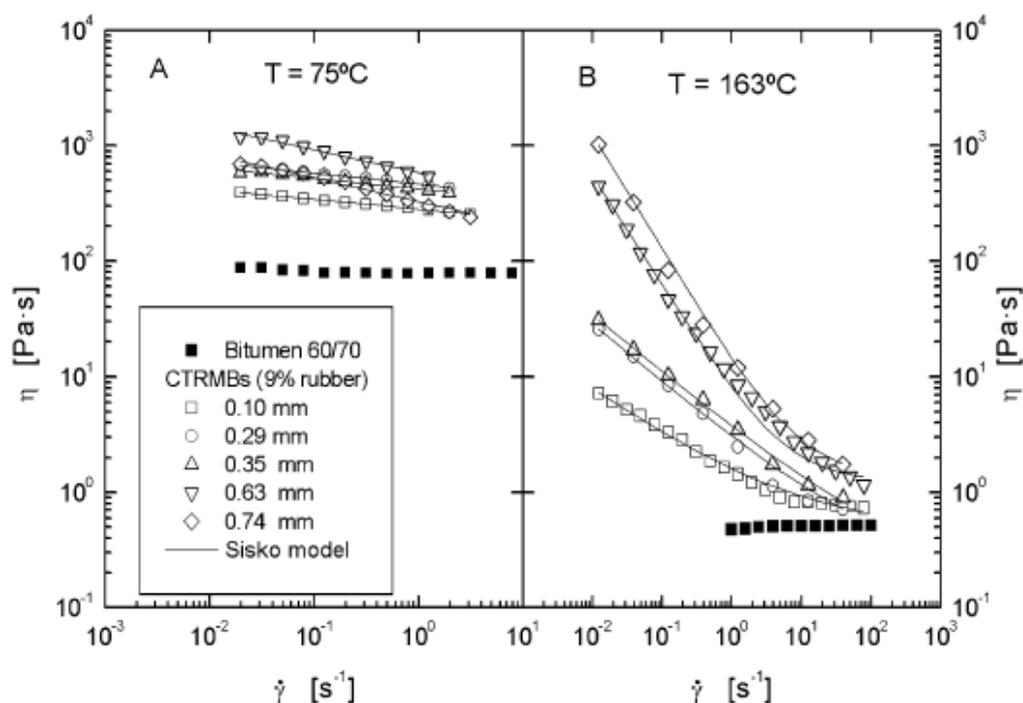


Ilustración 2. Influencia del tamaño de partícula principal en el comportamiento del flujo de los CTRMBs (betún modificado con caucho de desecho). F.J. Navarro et al. (2004).

También se tomará como referencia el trabajo del Departamento de Transportes de California (CALTRANS), en su artículo sobre el uso de caucho usado en firmes de carretera. En él se estudia y se recomienda el betún modificado de alta viscosidad (BMAVC), que produce los siguientes beneficios:

- Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión de las capas inferiores, que las mezclas fabricadas con betún convencional, debido a los elevados contenidos de ligante que permite esta técnica.
- Menor susceptibilidad a la temperatura que las mezclas bituminosas fabricadas con betún convencional.
- Mejor resistencia a las roderas que las mezclas que utilizan betún convencional, por su elevada viscosidad, punto de reblandecimiento y resiliencia (ligante más elástico y viscoso a las temperaturas altas de servicio).
- Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación que las mezclas convencionales, por el hecho de utilizar mayores dotaciones de ligante y por la presencia de los antioxidantes del caucho de neumáticos.
- Se consigue mejorar las características de las mezclas, con la consiguiente reducción de costes de mantenimiento y de interrupción del tráfico por reparaciones en el firme.
- Mantienen durante más tiempo el contraste con las marcas viales debido a que permiten introducir más betún y dura más el color negro de la superficie.

Es importante destacar que con los ligantes modificados convencionales se consiguen ventajas similares que con los ligantes modificados/mejorados con caucho (BMC, BC). Pero conviene tener en cuenta que con los precios actuales, los betunes con caucho permiten aumentar la viscosidad de una manera más económica que los polímeros nuevos; de manera que se hace posible la aplicación de betunes muy viscosos, con los que no se contaba hasta ahora por cuestión de precio.

Además, si se emplean en el rango de viscosidades medias, usuales de los ligantes modificados convencionales, los betunes con caucho no alcanzan el grado de modificación reológica de estos ligantes, pero es suficiente para algunas aplicaciones y se reduce el coste, de manera que permiten un uso más amplio de tales betunes.

Normativa vigente

Para completar la utilización de los neumáticos usados (NFU) como componente del betún modificado, haremos una recopilación de las sugerencias y normativa específica que se establece en el “Manual de empleo del caucho” del CEDEX. En él se establecen los diversos tipos de ligante que aparecen respecto del uso del propio caucho: betún mejorado con caucho (BC), betún modificado con caucho (BMC), y betún modificado de alta viscosidad con caucho (BMAVC). Sus diferencias se centran en la dosificación que poseen de caucho, que van desde el 8% que puede contener el BC, hasta el 20-22% que podría contener el de alta viscosidad; produciendo betunes con características muy similares a los normalizados como asfálticos o modificados con polímeros vírgenes.

También se especifica el tratamiento dado tanto por “vía húmeda” como por “vía seca”, del que ya extrajimos conclusiones en las investigaciones realizadas recientemente: “vía húmeda” utilizada como dispersión del caucho dentro del ligante, del que formará parte y acrecentará sus características; y “vía seca”, en la que el caucho se añade como árido, dando lugar a otro comportamiento dentro de la propia mezcla.

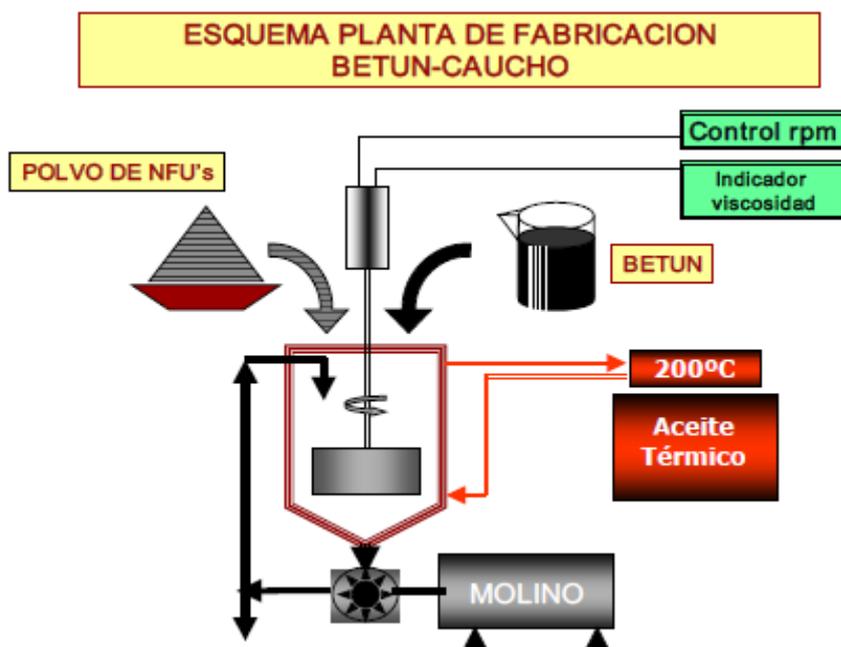


Ilustración 3. Esquema fabricación ligante con caucho “vía húmeda”.
Manual sobre empleo de NFU (CEDEX).

Dentro del mismo documento se especifica el coste que se añade a la fabricación de la mezcla, debido a la inclusión del caucho reutilizado: alto coste del polvo de caucho, semejante al del propio betún; coste por el incremento de dotación de ligante en la mezcla, aumento del coste por el incremento en 10 °C de la temperatura de mezcla, y el coste derivado de la mejora del equipamiento de cara al tratamiento de mezcla modificadas y su rebaje de rendimiento.

Tras ver el posible sobrecosto de mezclas con estas adiciones de caucho reutilizado, surgen los beneficios globales, tanto a nivel de Medio Ambiente como a nivel de mejora en las características del aglomerado producido. Comenzaremos dando cuenta de los beneficios medioambientales como pueden ser:

- Cumplir con el principio medioambiental de jerarquía, reutilizando y reciclando los residuos que como único destino tenían el vertedero y su posible recuperación energética, una vez quemados.
- Permitir el descenso del nivel sonoro por rodadura. Estudios americanos revelan que hasta en 3 o 4 dB(A), aunque no se sepa su durabilidad a lo largo del uso.
- No aumentar el nivel de emisiones a la atmósfera durante su fabricación, quedando cerca de las habituales mezclas asfálticas, para sólo depender del tipo de planta y el equipamiento que posea.
- No presentar riesgos para la salud de los empleados de las centrales de fabricación o de las extendedoras y compactadoras.
- Posibilitar un nuevo reciclaje del propio aglomerado modificado con caucho, formando parte de un nuevo firme en forma de aglomerado reciclado (California Department of Transportation, 2005).

Por otra parte, añadiremos las ventajas de fabricación y construcción que podemos extraer de su utilización:

- El polvo de caucho actúa como espesante, dando una mayor viscosidad al ligante, que de esta manera envolverá al árido más fácilmente sin problemas de escurrimientos o exudaciones.
- Modifica la reología de la mezcla, dando como resultado un aglomerado menos susceptible a cambios de temperatura, y con mayor resistencia y resiliencia, aunque sin llegar a las características superiores que obtenemos con el uso de polímeros.
- Mayor resistencia tanto a roderas como a agrietamientos producidos por la fatiga de los esfuerzos.

- Aumento de la resistencia al envejecimiento, derivado del mayor contenido de ligante presente en la mezcla y de los antioxidantes intrínsecos en el caucho de los neumáticos.

De esta técnica se consiguen unos resultados tan eficaces que podrían hacer de menos otras como la de “vía seca” o los betunes de caucho almacenables (0,5% de caucho incorporado a la mezcla bituminosa). Ante esto quedarían sus progresos marcados por la política estatal, que designa qué problemas son de primera necesidad (Medio Ambiente, inversión en mejora de carreteras, etc.) y promueve su desarrollo gracias a las distintas normativas que incrementan su uso.

Mezcla bituminosa en capa de rodadura	Tráfico	Tipo de betún recomendado
Drenante Discontinua Densa o semidensa	T00 y T0	BMC (entendiendo como tal aquel que cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3), en todas las opciones expresadas en las tablas 542.1 y 543.1 del PG-3
	T1 y T2	BMC (entendiendo como tal aquel que cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3), en todas las opciones expresadas en las tablas 542.1 y 543.1 del PG-3 BC (entendiendo como tal aquel que no cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3 pero sí cumple las especificaciones definidas en el Anejo 4 de este Manual), en las mismas condiciones que los betunes de penetración indicados en las tablas 542.1 y 543.1 del PG-3
	T3 y T4	BC (entendiendo como tal aquel que no cumple las especificaciones establecidas en el artículo 215 del PG-3 pero sí cumple las especificaciones definidas en el Anejo 4 de este Manual), en las mismas condiciones que los betunes de penetración indicados en las tablas 542.1 y 543.1 del PG-3

Ilustración 4. Aplicación recomendada de los ligantes modificados con caucho en capa en rodadura Manual sobre empleo de NFU (CEDEX).

Plástico reciclado (polímeros)

Introducción

Dentro de nuestra recopilación de posibles materiales que podrían formar parte de la mezcla bituminosa, no podemos obviar a los plásticos. Se trata de un producto de uso habitual en la vida cotidiana de las personas (bolsas, envases de productos, cubiertas de invernaderos, etc.); pero que tiende a ser olvidado una vez ha cumplido su uso establecido en la sociedad. Esto conlleva un acarreo a los vertederos, que no son capaces de degradar el material hasta cientos de años después.

Con ese punto de partida, al igual que nos ocurre con el resto del estudio, se plantea la idea de aumentar la vida útil del material, dándole un mayor valor del que nos daba: se reutiliza y no conlleva gastos energéticos de movimiento a vertedero. Esta idea expresa la posible producción de mezclas bituminosas sintéticas, que tengan un porcentaje de asignación de polímero plástico en la cantidad de ligante a utilizar.

Investigaciones

De estudios como el de Fuentes-Audén (2012), extraemos que con la adición de cierta cantidad de polímeros reciclados, complementamos el trabajo del betún, componiendo una mezcla con mejoras termomecánicas. Esta adición sólo es de cadenas de polímeros, sino que se trata de establecer una composición binaria entre dichos polímeros y aceites de tipo nafténico (parafinas), dando como resultado un ligante con aceptables resultados reológicamente hablando. Estos resultados tienden a ser homogéneos a bajas y medias temperaturas, en las que la viscosidad se encuentra controlada, con un producto con similar textura a un gel.

Para tomar referencia del comportamiento de este material proveniente de reciclado, se toma la resina de conífera, que tiene utilidad en engrudos de tipo sellante. Para concretar el porcentaje de adiciones con el que podemos establecer dichos resultados, se sitúa sobre el 30% en peso; que marca una línea muy diferenciada: por debajo de este valor, el comportamiento es homogéneo y mayoritariamente viscoso; por encima, se asemeja más a la textura gel de la que hablábamos, y que redundaba en un complejo y alterado comportamiento termo-reológico. Estas diferencias se aprecian de manera más clara a altas temperaturas, a las cuales se produce el proceso de fusión del polímero reciclado.

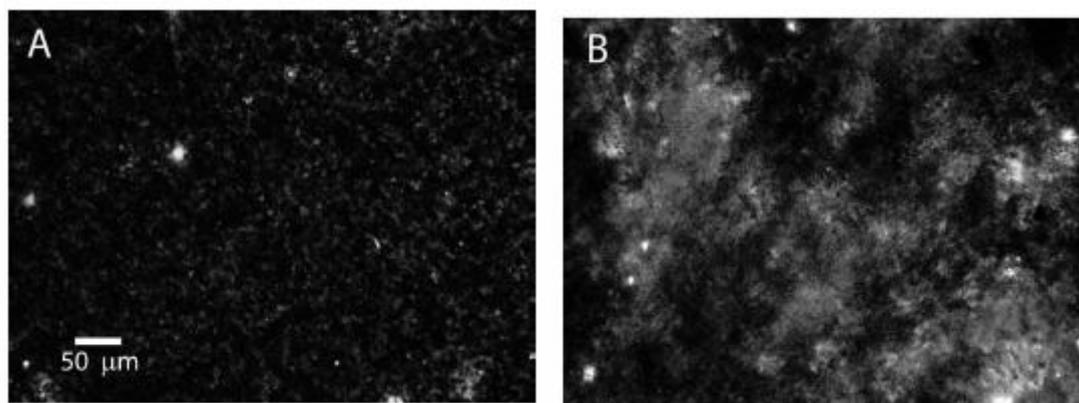


Ilustración 5. Micrografías de microscopía óptica para mezcla binaria: (A) 10% y (B) 30% en peso de polímero reciclado. Regiones cristalinas con luz. Fuentes-Audén (2012).

Como conclusión respecto a estas mezclas binarias, la autora deja entrever que su uso se ve en entredicho por su comportamiento termodinámico; exponiendo a la mezcla final a roderas o roturas por deformación.

Por otro lado, existen estudios como el de D. Casey et al. (2007), con mejores previsiones que utilizan otro tipo de componentes plásticos reciclados: Polietileno de Alta Densidad (HDPE). Esta adición, que al igual que la anterior, ha de introducir parafinas para su correcta adecuación a la mezcla bituminosa, ha de rondar el 4% en peso de ligante. A partir de una metodología clara para este tipo de ligante, los ensayos de fatiga y de pista revelan un comportamiento similar al de las mezclas habituales, no llegando al nivel que producen los betunes modificados con polímero virgen.

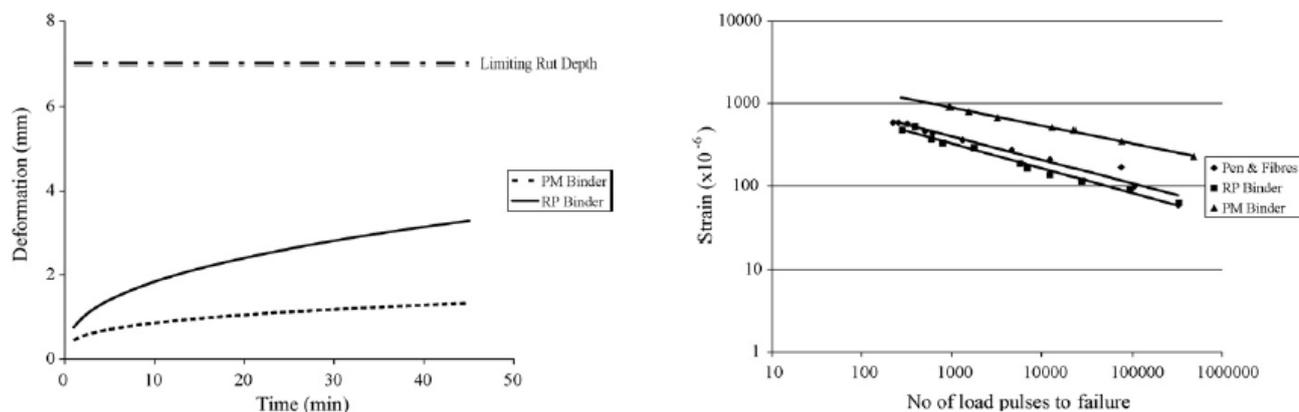


Ilustración 6. Resultados de ensayo de pista.

Resultados de módulo de rigidez a tracción indirecta. **Pen & Fibras:** Betún modificado con fibras. **RP Binder:** Betún modificado con polímero reciclado. **PM Binder:** Betún con polímero virgen.

También se revela que la utilización de otros plásticos reciclados de tipos: MDPE, PVC, PP, PET y ABS; no consiguen atender las prescripciones necesarias para el ligante. En cambio, el ya mencionado HDPE y el LDPE (Polietileno de Baja Densidad), sí que consiguen las expectativas necesarias para seguir con su adecuación en nuestras carreteras. Como conclusiones a estos ensayos, con resultados esperanzadores en cuanto a su futura utilización, habrá que comentar que sería conveniente el añadir un mínimo porcentaje de polímero virgen que reponga los parámetros de elasticidad, que no llega a demostrarnos el polímero de reciclado.

2.2. Áridos

Lo habitual es que esta parte se forme con partículas minerales procedentes de cantera, con gran calidad y buena prestancia dentro de la mezcla bituminosa. Nuestro reto pasará por dejar de utilizar en gran medida dichas partículas vírgenes y probar que otros materiales podrían tenerse en cuenta para ser parte del árido de la mezcla.

Ya hay grandes caminos abiertos respecto al uso de fresado, aglomerado recuperado de un firme antiguo; pero iremos más allá con el estudio de otros materiales procedentes de los residuos de construcción (RCD) y domésticos. Dentro de los RCD que pudieran ser aceptables para la integración en el firme son los materiales cerámicos, tales como las tejas o los ladrillos. Ha habido ya algunos intentos en pequeñas comunidades residenciales en Estados Unidos, en las que han comprobado varias competencias interesantes del firme de tejas recicladas: menor necesidad de ligante y, que las fibras de celulosa presentes en las propias tejas, producen un mismo efecto que los polímeros, dando mayor durabilidad al firme. Este intento también deja otros efectos menos beneficiosos y que deberían ser mejorados como su fragilidad ante tráfico pesado y su color perdido al poco tiempo de uso, dando cierta inseguridad al conductor.



Ilustración 7. Perfil de aglomerado asfáltico con tejas recicladas.

Dentro de los materiales domésticos que podríamos incluir como candidatos a formar parte del pavimento de nuestras carreteras, se sitúan el vidrio y el plástico; éste último procedente de actividades industriales o comerciales, con dificultades de reciclado como el PVC.

Revisando un artículo (Huang, Bird y Heidrich, 2006), se aduce que nuestra querencia de construir y hacer más infraestructuras debería ser revisada, conteniendo ese impulso hacia el mantenimiento y reparación de lo ya conseguido y constituido.

Detectan que si este progreso continúa su camino, la cantidad de árido de calidad disminuirá de tal manera, que en 2020 podría estar casi agotado; eso sin hablar de que su informe indica una sobreexplotación de vertederos, que darían con un cierre próximo (5 a 10 años).

Hemos tenido un tiempo, y más en España, en el que el progreso era una mera huida hacia adelante sin pensar el desgaste que ello conlleva; y al parecer es un error. Tenemos que pensar, aunque parezca lejano, en dicho agotamiento del árido natural que produce grandes calidades en las carreteras, y en la posible disminución del uso del petróleo como materia energética de referencia. Puede que hablar de agotamientos sea exagerado, pero hay que pararse a pensar en que la extensión y progreso de las ciudades y sus infraestructuras de conexión, hace cada vez más difícil el encuentro de grandes canteras o de que la distancia a los centros habitados sea la suficiente para no molestar o interrumpir las vidas de sus gentes.

Para concretar más el estudio respecto al reciclaje de materiales y su posterior introducción en el pavimento de carretera, nos centraremos en la composición del árido con posibilidad de inclusión en él, y el vidrio como componente principal.

Aglomerado reciclado (fresado)

Introducción

Para comenzar con los materiales que podrían ser incluidos en nuestra mezcla como árido, estudiamos el aglomerado reciclado. Aunque pudiera parecer que este material tendría una aceptación más que adecuada, dado su carácter similar a la mezcla que queremos fabricar, no resulta así. El aglomerado proveniente de fresado posee un componente de deformación y de soporte de esfuerzos, derivado de su vida útil, que conlleva un trabajo distinto en su puesta como reciclado. En el propio laboratorio, hemos podido comprobar que el ligante recuperado pasa de tener de 50 a 70 en el ensayo de penetración, a unos índices que superan en poco la decena. De igual manera, ocurre con el ensayo de anillo y bola, que supera en algo más de un minuto, el punto de reblandecimiento habitual del betún.

Todo esto hace del betún un material envejecido y muy poco deformable, teniendo realmente un ligante poco maleable a esfuerzos futuros y con posibles vicios ocultos. Por otra parte, respecto del árido que nos provee el fresado, cabe decir que es de una calidad apreciable debido a sus buenas características que poseía siendo virgen, antes de su puesta inicial. Los ensayos que se establecen por Norma sobre ellos, demuestran unos valores muy aceptables para su nueva puesta en obra.

Investigaciones

Para ahondar más en el uso del fresado (a partir de ahora, RAP: Reclaimed Asphalt Pavement), existen estudios que aseguran que con ciertos aditivos podríamos aglomerar las mezclas con una rebaja importante del gasto energético. En ello se basa el estudio de R. Vidal (2013), que con el uso de zeolitas sintéticas produce mezclas que pasan de ser calientes (HMA) a semicalientes (WMA), y con una durabilidad semejante entre ellas, con una inclusión de RAP del 15%.

El uso de las zeolitas está destinado para otros usos como pueden ser las filtraciones de agua o como catalizador de distintas reacciones químicas. En el estudio del que hablamos se les da otra utilidad, cristalizándolas hidrotérmicamente; para cuando la temperatura se eleve a la hora de la fabricación de la mezcla, se forme una espuma que incremente el volumen del material y reduzca su viscosidad, provocando un aglomerado más sencillo y con temperatura menor.

Sobre la capacidad de durabilidad del firme no se discute en exceso, porque su fin básico es el de mejora de condiciones de vida, relativo al cambio climático. Se trata de un estudio más ecológico que de ingeniería, pero a su vez, estableciendo unas pautas que podrían llevarse a cabo estudiando su eficacia en carretera.

Dejando al lado este estudio de carácter medioambiental, existe otro estudio sobre este material (Dony A. et al., 2012), que emprende otra vía por la que podamos utilizar el aglomerado fresado. Se centra en la mejora de las condiciones del ligante a utilizar en la mezcla, que va a contener betún reciclado y virgen en cantidades iguales.

Se asegura en el artículo, que se es capaz de establecer una mezcla entre ligantes con distintas características gracias a ciertos agentes rejuvenecedores, que recuperan la entidad del ligante envejecido en su mezcla con el virgen. Éstos proveerán de renovadas aptitudes ante los esfuerzos futuros, con el restablecimiento de las propiedades reológicas, básicas en la viabilidad de un pavimento para una larga vida útil. Los agentes rejuvenecedores que se utilizan son: aceites aromáticos, provenientes de ligante reciclado; aceites vegetales, usados en ciertas ocasiones en mezclas frías y riegos; y un betún suave 160/220 (SB).

Respecto a los resultados, hay que comentar que los métodos utilizados para conocer la dimensión que nos puede dar esta mezcla de ligantes, son los de "Resistencia al envejecimiento por efecto de calor y aire" (UNE EN 12607) y

“Envejecimiento a largo plazo acelerado por recipiente de presión PAV” (UNE EN 14769).

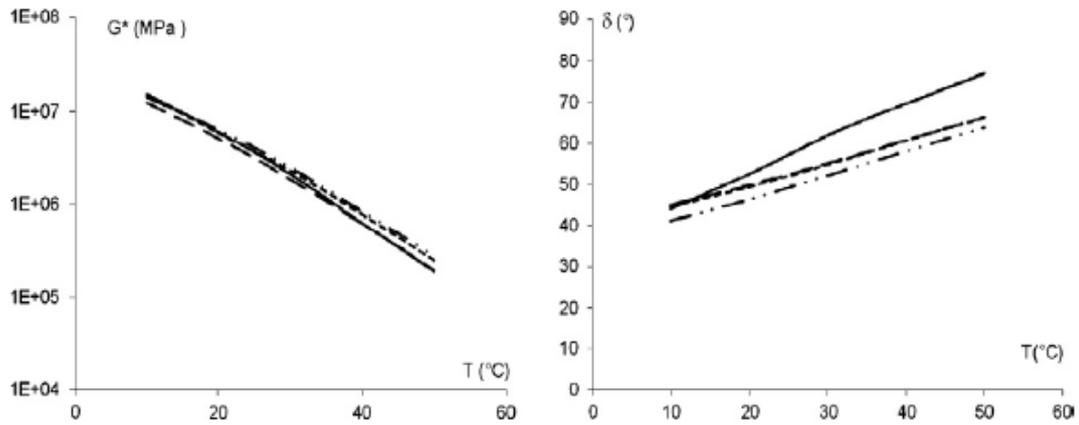


Ilustración 8. Resultados del ensayo de envejecimiento por aire y calor RTFOT. (Dony A. et al., 2012)

Líneas. Continua: ligante de referencia. Discontinua, puntos, y rayas y puntos: probetas de rejuvenecimiento.

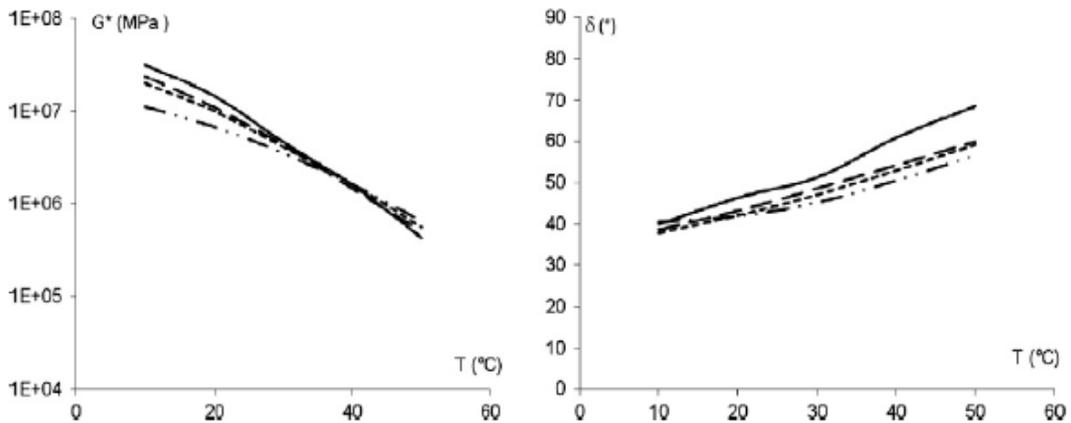


Ilustración 9. Resultados del ensayo de envejecimiento por RTFOT y PAV. Modelos a corto y largo plazo. (Dony A. et al., 2012). **Líneas.** Continua: ligante de referencia. Discontinua, puntos, y rayas y puntos: probetas de rejuvenecimiento.

Las diferencias como podemos ver en las gráficas se denota más en las deformaciones que en los módulos de resistencia de las probetas ensayadas, en las que incluso a altas temperaturas, es mayor para el ligante reciclado. Esta situación es más que favorable para los objetivos que se proponían en el estudio, pero a partir de ella sacan conclusiones respecto a la metodología a utilizar para la fabricación de este ligante reciclado:

- Parámetros del proceso: tiempo de mezcla, temperatura de producción, etc.
- Tipo de planta de producción (equipo de fabricación)
- Modo de introducción del ligante reciclado
- Tipo de betún virgen

Residuos cerámicos

Introducción

Después de conocer ciertas bondades que nos puede conllevar el árido procedente del fresado, y a su vez, el ligante que posee; pasamos al conocimiento sobre el uso de residuos cerámicos, ya sean procedentes de la industria azulejera como de las propias tejas o residuos de pizarra que cubren gran cantidad de nuestros tejados. No es ésta una cuestión difícil de establecer, ya que estos residuos, en un porcentaje establecido y con sus características naturales, pueden proveer de un comportamiento aceptable para capas intermedias, e incluso, de rodadura.

Por otra parte, también hay que comentar que este tipo de materiales ya están presentes en la fabricación de hormigón y en la preparación de bases y rellenos de carreteras de menor exigencia; adecuándose a las nuevas legislaciones medioambientales que promueven una reutilización de residuos de construcción.

Investigaciones

En el estudio planteado por BECSA Construcciones (2012), en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia, promueven una metodología específica para este tipo de materiales, nuevos para el objetivo marcado. Se hace necesaria una completa trituración del material, que normalmente viene con dimensiones muy poco adecuadas para su incorporación inmediata a la mezcla.

Se procede con un mecanismo consecutivo de selección y acopio, pisado y fractura de azulejos mediante explanadora de cadenas, cribado en criba mecánica rotatoria, trituración, machaqueo y clasificación en planta, obteniéndose granulometrías de fracción fina de 0-4 mm y de fracción gruesa de 4-11 mm de áridos cerámicos reciclados. La gran problemática a partir de aquí, serán las diferencias establecidas entre los áridos naturales y este suelo azulejero: mayor humedad natural y una limpieza bastante menor; complicando un aglomerado correcto con ciertas faltas de adhesividad. Otros problemas serán su gran desgaste, mayor que en áridos calizos; y la proporción mayor en cuanto a lajas, debido a su procedencia.

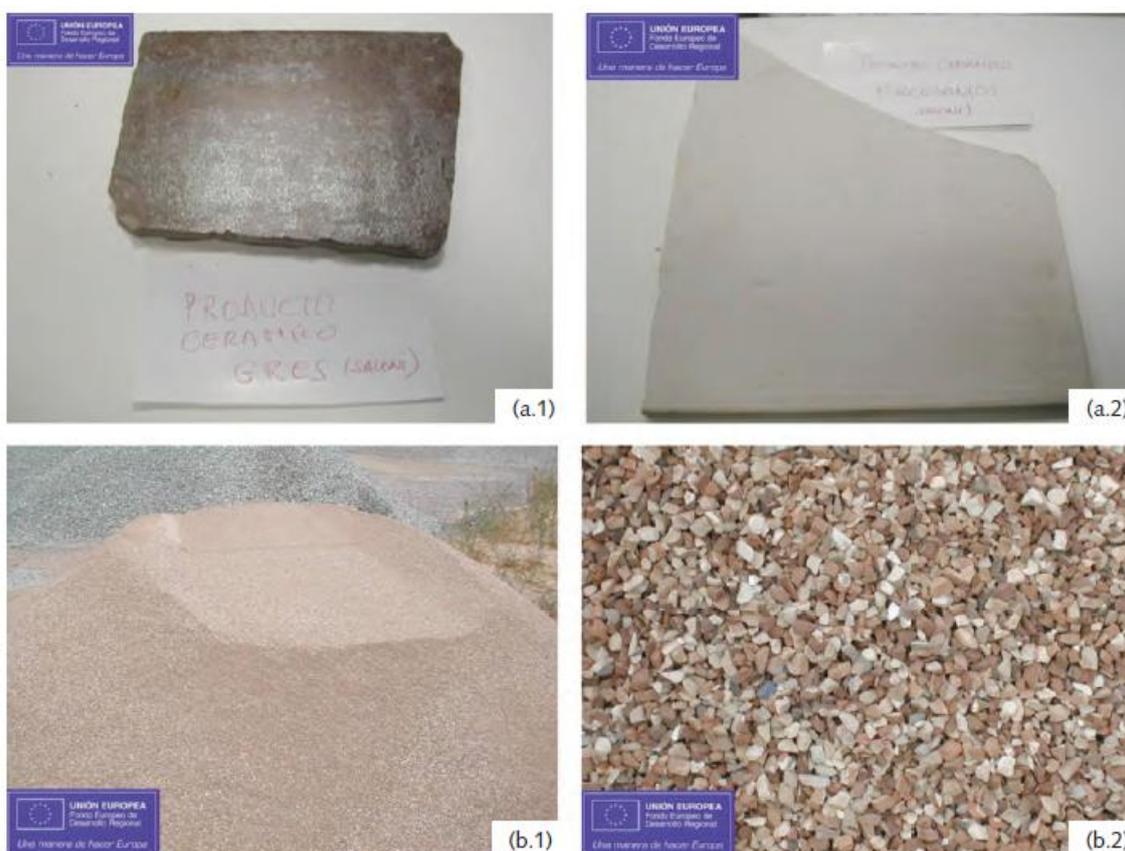


Ilustración 10. Transición hecha por los áridos provenientes de residuos porcelánico o gres. (BECSA, 2012).

A la hora de profundizar con los ensayos de este nuevo árido, queda demostrado que este material tiene dificultades para resistir los esfuerzos que pulimentan su superficie, proyectando una zona con poca macrotextura, no apta para tráficos exigentes tipo T00 o T1 según PG3. Con ello, se procede con una nueva vía de posible uso y es conteniendo un porcentaje de azulejo reciclado, ayudado por el árido virgen. Este porcentaje se sitúa en el orden del 30%, en el que siguen apareciendo muestras evidentes de pulimento superficial, pero que quedan ocultos una vez hecha

la puesta en obra, donde se recobran unos índices adecuados para su implantación en arcenes y en capas de rodadura de tráfico T32.

Como reflejo de los resultados una vez producidas las mezclas AC22 y BBTM B11, se expone la siguiente gráfica, con la comparativa con los distintos áridos empleados y la normativa vigente:

Mezclas	Betún sobre mezcla (%) (EN 12697-39)	Relación filler/betún	Densidad aparente (g/cm ³) (EN 12697-6)	Huecos mezcla (%) (EN 12697-8)	Pista Ensayo Rodadura WTS (%) (EN 12697-22)	Sensibilidad agua ó ITSr (%) (EN 12697-12)	IC(1) (% perdida) (NLT-162)	Estabilidad máxima(1) (EN 12697-34)	Deformación(1) (mm) (EN 12697-34)	Pérdida partículas húmedo(1) (%) (NLT-362/92)	Pérdida partículas seco (%) (EN 12697-17)	
AC22 BIN	Patrón 100% calizo	4,04	1,00	2,31	7,66	0,096	87,1	6,1	18,71	2,78	-	-
	Calizo + 30% RICGP	4,22	1,31	2,29	8,33	0,067	94,0	20,0	16,39	2,76	-	-
	Prescripciones PG-3	≥ 4,00	1,10	-	5,00-8,00	≤ 0,07 ≤ 0,10	≥ 80%	≤ 25,0 ^(a)	≥ 12,50 ^(a)	2,00-3,50 ^(a)	-	-
BBTM 11B	Patrón 100% cuarcita	4,74	1,23	2,45	4,05	0,134	97,6	17,8	17,53	2,64	-	-
	Cuarcita + 30% RICGP	4,53	1,22	2,30	7,44	0,084	80,7	2,7	18,02	2,81	-	-
	Prescripciones PG-3	≥ 4,50	1,20	-	4,00-6,00	≤ 0,07 ≤ 0,10	≥ 85%	≤ 25,0 ^(a)	≥ 12,50 ^(a)	2,00-3,50 ^(a)	-	-
BBTM 11B	Patrón 100% cuarcita	4,63	1,18	2,06	20,58	0,041	73,2	-	-	-	26,0	9,5
	Cuarcita + 30% RICGP	5,11	1,15	1,88	24,70	0,037	67,0	-	-	-	24,2	11,3
	Prescripciones PG-3	≥ 4,75	1,00-1,20	-	≥ 12,0	≤ 0,07	≥ 90%	-	-	-	≤ 25,0 ^(a)	≤ 15,0

^(a) Complemento de caracterización Marshall

^(b) Prescripción no vigente

- Dato no aplicable

Ilustración 11. Comparativa mezclas patrón, mezclas con 30% de áridos reciclados RICGP y prescripciones PG-3. (BECSA, 2012).

El efecto de la adición de áridos cerámicos en sustitución parcial de los naturales se materializa en un ligero aumento de la dotación de ligante en las mezclas, obteniéndose por lo general, mezclas bituminosas con menor densidad, y en una mejora de la resistencia a deformaciones plásticas por rodadura. Por tanto, se concluye que puede resultar técnicamente viable la reutilización de residuos cerámicos y porcelánicos procedentes de la industria azulejera para la obtención de áridos reciclados, permitiendo sustituir hasta un 30% del árido natural de la mezcla bituminosa en caliente por dichos áridos en función de las características específicas

del residuo, de la capa de firme y del tipo de mezcla bituminosa a diseñar, en condiciones de buen funcionamiento superficial y mecánico con tráficos de categorías T1 a T4.

Otro material que podemos enmarcar dentro de los residuos cerámicos son los desechos que producen las tejas de nuestras cubiertas. La visión que plantearé proviene de gran cantidad de estudios americanos que cuentan con un tipo de cubiertas distintas a las nuestras, y que no sólo llevan la parte puramente cerámica, sino que también juegan con la integración de fibra de vidrio en su interior. Hay que decir que normalmente, las cubiertas establecidas con componentes de fibra de vidrio, ya llevan consigo elementos como caucho o pinturas bituminosas.

Como decía, muchos estudios para este tipo de uso involucrando a las tejas, provienen de legislaciones de Estados americanos en consonancia a las normativas que va implementando la AASHTO a este respecto. El primero del que haré mención es el de McGraw (2005), hace la comparativa entre el trabajo habitual de cualquier mezcla bituminosa en caliente con otro aglomerado con un porcentaje del hablado reciclaje (RAS, Recycled asphalt shingles). En él descubrimos una necesidad imperiosa instalada en EEUU respecto al precio que alcanzaban los áridos vírgenes, contemplando además los inmensos gastos producidos por el desplazamiento de los distintos residuos a vertedero.

Con una motivación económica de inicio, prueban el RAS y se demuestra que incluso las características se mejoran gracias a la composición inicial de las cubiertas. Lo que controlan con gran cuidado es la proporción de uso y el tamiz por el que no se permite su inclusión, prohibiendo que el residuo forme parte del árido grueso a emplear (todo ha de pasar por tamiz Nº 4 ASTM); además de que la comparativa entre la cantidad de ligante a utilizar entre una mezcla caliente habitual y una hecha a base de RAS, no supere un 0,75% en peso sobre la mezcla.

Otros escritos que forman parte de la literatura del RAS, van más allá y especifican ciertas mejoras que produce su inclusión como árido (Ohio Department of Transportation, 1997). En él se establecen rangos de adición de residuo de teja (0-5-10-15%), tipo de árido principal, proveedor del material residual y tamaño del mismo. Con las comparaciones que se promueven con los distintos modelos asignados, se revela que existe una apreciable mejoría en el comportamiento de la nueva mezcla derivado de la fibra de vidrio que contienen las cubiertas. Estas mejoras se refieren, sobre todo, a la resiliencia y resistencia a esfuerzos de tracción, y también con una invariabilidad de comportamiento ante un intervalo grande de temperaturas. Lo que

quedaría por mejorar en mezclas como las presentadas serían los comportamientos ante temperaturas por debajo de los 0 °C y su capacidad de mitigar los signos del envejecimiento y la fatiga.

Para concluir con las características que nos puede permitir el uso de este residuo, se hace mención de ciertos resultados de ensayos que dan pie a proseguir con el estudio de esta mezcla:

- Aceptable porcentaje de huecos en la mezcla final.
- La adición del residuo junto con la fibra de vidrio mejora la estabilidad Marshall y los ensayos de pista.
- Mejora, de igual manera, el ensayo de tensión indirecta.
- Aumenta la rigidez visto en el ensayo de resiliencia a 40 °C.
- El ensayo a fatiga revela que con un 5% de adición sobre mezcla además de acompañarlo con cal hidratada, mejora su respuesta a tensión indirecta.

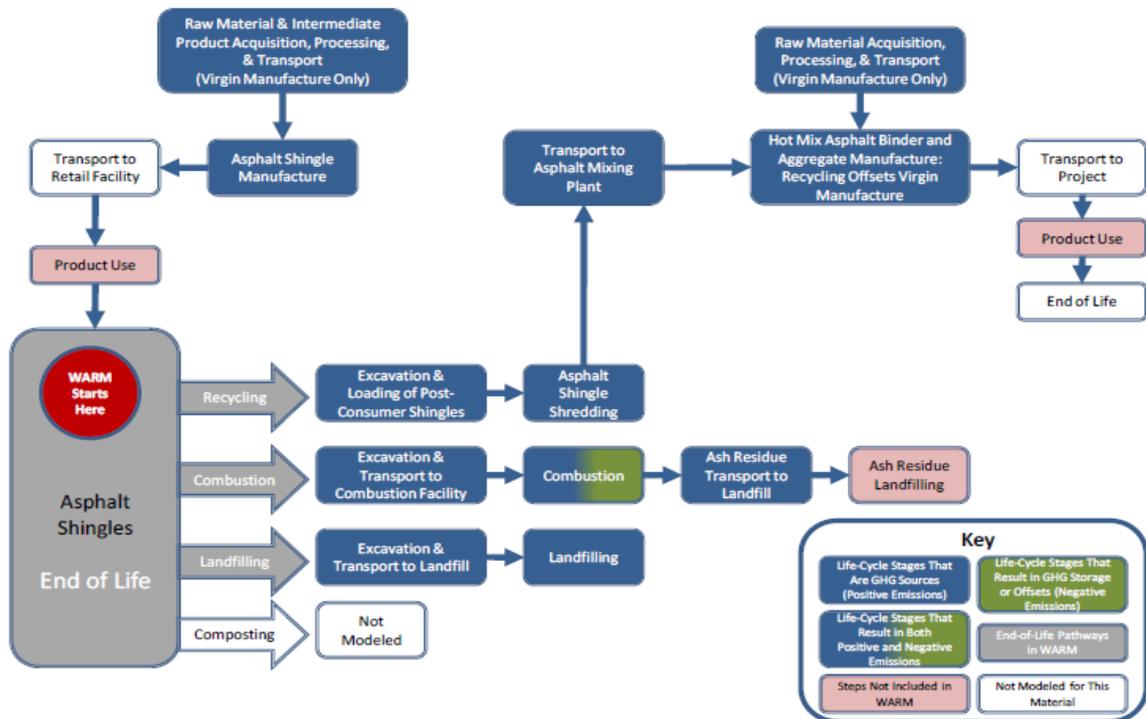


Ilustración 12. Ciclo de vida del residuo procedente de tejas en la mezcla bituminosa. (AASHTO, 2012).

Escoria de acería

Introducción

Con el impulso dado en la reconversión industrial española a los hornos eléctricos para acerías, se produce un tipo de residuo distinto al que daban los antiguos altos hornos. Se trata de la escoria, ya sea negra o blanca, diferentes según el proceso en que nos veamos envueltos: la negra proviene de la fusión del material, cuando se eliminan impurezas de silicio y manganeso; y la blanca, proveniente de la etapa de afino y baño, que permite la eliminación de todo tipo de óxidos.

Conviene conocer que el volumen que se manejaba, con datos del Ministerio de Industria para 2006, es de 1,9 millones de toneladas de escoria; 1,6 millones de toneladas sólo de escorias negras, por lo que era necesario establecer cauces de valorización en cuanto a su posible uso después de la producción de acero.

Las escorias blancas tienen una reutilización más restringida, a la posibilidad de formar parte de la composición del cemento en sustitución de la marga. Además no necesitan de tratamiento previo, siempre y cuando se mantenga un nivel de calidad y seguridad respecto de la no inclusión de elementos extraños, como trozos metálicos, o tamaños superiores a los 50 mm.

Las escorias negras tienen un mercado de reutilización mucho más extenso, dado que pueden formar parte de:

- Fabricación del clínker de cemento, como parte de la adición de hierro.
- Capas de rodadura de firmes con pavimento de mezcla bituminosa.
- Material para explanadas, bases y subbases de carretera.
- Árido para hormigón.

Cabe decir que excepto para la primera opción, su posterior utilización conlleva un pretratamiento: machacado, separación de metales, cribado y clasificación, y en casos particulares, envejecimiento.

Composición química	Rango (%)	Valor medio (%)
FeO	7,0-35,0	25
Fe ₂ O ₃	11,0-40,0	25
CaO	23,0-32,0	25
CaO libre	0-4,0	2
SiO ₂	8,0-15,0	11
Al ₂ O ₃	3,5-7,0	5
MgO	4,8-6,6	5
MnO	2,5-4,5	4

Ilustración 13. Composición química de las escorias de acerías españolas. (CEDEX, 2011).

Propiedad	Árido grueso	Árido fino
Tamaño (mm)	4,76-25,0	0-4,76
Densidad aparente (Mg/m ³)	3,35	3,70
Absorción (%)	3,29	2,84
Porosidad (%)	10,5	–
Desgaste de Los Ángeles (%)	≈20	–

Ilustración 14. Propiedades físicas de las escorias de acerías españolas. (CEDEX, 2011).

Como contrapunto a su uso habitual, se deben conocer los riesgos que hay que manejar como su naturaleza expansiva, debido al óxido de cal y magnesio libre en su composición; y también sus lixiviados, que presenta un carácter de pH básico y podrían obturar los sistemas de drenaje establecidos en construcciones cercanas con su fácil reacción con el hidróxido de calcio.

Investigaciones

Para proseguir con la consecución de la escoria como posible árido a utilizar en la mezcla bituminosa, expongo la idea de su uso para mezclas de tipo SMA (Stone

Mastic Asphalt). Éstas tienen la particularidad de contener una granulometría discontinua y una cantidad alta de huecos, eso incluyendo grandes contenidos de ligantes cercanos al 7% sobre áridos. Son mayoritariamente utilizadas en el norte de Europa, y confieren a las capas de rodadura grandes cualidades como buena rugosidad, larga durabilidad y una impermeabilidad total, debido a su alta dosificación de ligante (modificado, en la mayoría de casos) y la incorporación de fibra de celulosa, que impide deformaciones plásticas, a pesar del dicho contenido de betún. Sin embargo, parte de sus desventajas quedan de manifiesto en lo descrito como ventajas, ya que tiene dificultades de drenaje y su coste de inversión es muy elevado, contando además con un transporte y puesta en obra más dificultoso.

En el estudio propuesto por Behnood y Ameri (2012), se propone la comparación entre una mezcla SMA basada en árido natural calizo, que sirva como referencia, y otras en las que se cambian las gradaciones de árido grueso o fino por la escoria negra. También cuenta con un betún modificado por el copolímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), ya que no se establecen aditivos universales para este tipo de mezclas. Proyectan unas mezclas que contienen una dosificación de ligante en el intervalo de 5-7,5%, respecto del que encuentran el óptimo en 6,5%, aproximadamente. Dicho óptimo se conviene a partir de una cantidad de huecos mínimos en el mineral (VMA) del 17% y un contenido de huecos en mezcla del 3,5%.

Tamiz de Diseño	Porcentaje que Pasa
19.0 mm	100
12.5 mm	85-95
9.5 mm	Máx. 75
4.75 mm	20-48
2.36 mm	16-24
0.60 mm	12-16
0.30 mm	12-15
0.075 mm	8-10
0.02 mm	Menor que 3



Ilustración 15. Gradación y puesta en obra de mezcla SMA. (Behnood y Ameri, 2012).

Para la compactación, proceden con 50 golpes por cara, debido a que aunque no se establecen criterios para estas mezclas, el llegar hasta los 75 golpes, produce rotura del esqueleto mineral y no consigue aumentos apreciables en su densidad. Una vez preparada la mezcla, someten a las probetas a los siguientes ensayos, capaces de dar unas tendencias para un mejor uso: estabilidad Marshall, tensión indirecta, estabilidad al agua y fluencia dinámica (Dynamic Creep Test). De todos ellos, se puede sacar la opinión de que el uso de la escoria de acería como árido produce resultados alentadores desde el punto de vista de resistencia, resiliencia y durabilidad, pero sobre todo, asociada a las mezclas que establecen la dicha escoria como árido grueso de la mezcla. La caliza sigue poseyendo mejores condiciones, como árido fino.

Type of mixture	Optimum bitumen content (%)	Marshall stability (kN)	Marshall Flow (mm)	Bulk density (gr/cm ³)	VMA (%)	Void content (%)	MQ (kN/mm)
LL	5.9	8.84	3.34	2.341	17.9	3.72	2.65
LE	6.6	10.86	2.95	2.520	18.5	3.51	3.68
LM	6.7	11.08	2.89	2.486	18.7	3.48	3.83
EL	6.1	9.46	3.17	2.421	18.1	3.64	2.98
ML	6.1	9.61	3.16	2.437	18.1	3.65	3.04

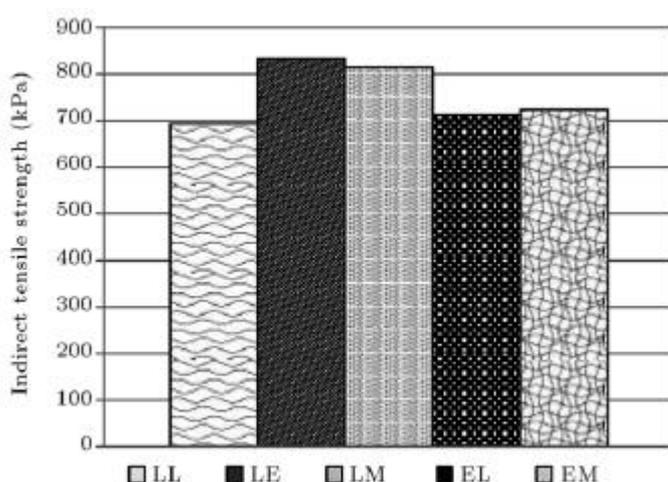


Ilustración 16. Resultados de los ensayos de estabilidad y deformación Marshall, y de tensión indirecta. (Behnood y Ameri, 2012).

En otros artículos (Arabani, 2012), se va más allá con una mezcla que contiene dos de nuestros materiales para reciclado revisados. Se añan en la misma mezcla la escoria de acería y el aglomerado fresado, el primero formando el esqueleto grueso y, siendo el árido fino, el fresado. Se podría pensar que la utilización de escoria como único componente de la mezcla sería viable, visto las buenas características que posee;

pero no es así debido a ser excesivamente susceptible a cambios de volumen y tener formas algo inadecuadas para una fácil compactación y mezcla.

Proponen una gradación parecida a la SMA, con hasta un 75% del árido por debajo de 4,75 mm, promovido por una trituración expresamente adecuada para dicha mezcla. Además de utilizar un betún 60/70 sin necesidad de aditivos. Sus resultados revelan las siguientes afirmaciones:

- El reemplazo del cemento por fresado o escoria produce efectos adversos en la mezcla, sobre todo de adhesividad.
- El uso de escoria como árido grueso y fresado como fino, aumenta la estabilidad Marshall y devalúan su deformación.
- En el ensayo de fluencia dinámica obtienen resultados un 40% menor al nivel de referencia exigido.
- El ensayo de fatiga con tensión indirecta revela grandes progresos con la mezcla de escoria y RAP.

Mixture type	Resilient modulus (MPa)	Changes to control mix (%)
Control mix	948	0
FA:RCA	1365	+44
CA:RCA	793	-16.4
FA:SS	1084	+14.3
CA:SS	1896	+100
FA:RCA + CA:SS	2228	+135

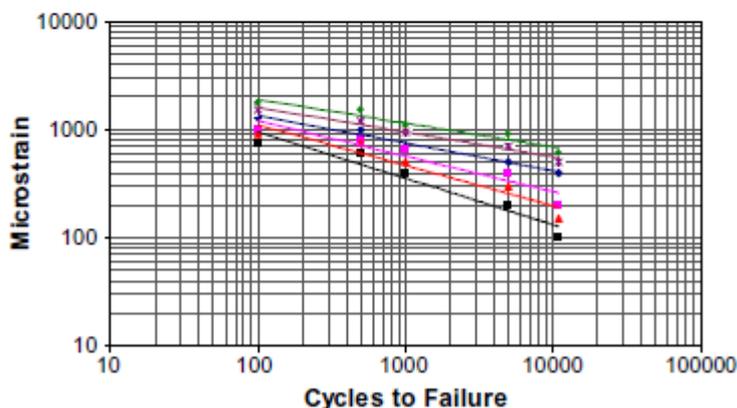


Ilustración 17. Resultados de los ensayos de módulo de resiliencia a tensión indirecta. (Arabani y Azarhoosh, 2012).

Y como último comentario a este artículo, habrá que decir que los porcentajes que producen las anteriores aseveraciones son de: 57% fracción gruesa, 37% fracción fina y 6% de fíller, siendo éste último una posible mezcla de cemento con cal hidratada que reduzca la sensibilidad hidráulica del material.

Plásticos

Introducción

El uso del plástico en nuestro día a día conlleva una polémica que está siendo contemplada desde diversos puntos de vista, pero que no termina con su utilización habitual: envases, protecciones, objetos domésticos, mobiliario, etc. El plástico forma parte de nuestra forma de vida y cada vez alcanza cotas mayores de residuos, a lo que tendremos que hacer frente con la reutilización y el reciclaje, que evite su lugar en los vertederos, donde podrían estar descomponiéndose cientos de años.

En nuestro caso, el reciclaje de polímeros provenientes de plásticos de desecho no es nuevo, pero siempre visto desde la óptica de “vía húmeda”, es decir, la mezcla preparada entre ligante y polímeros, previa al aglomerado con los áridos de la mezcla bituminosa. Esto ya fue expuesto en el apartado de ligantes; en cambio, ahora se entra en la dimensión de la “vía seca”, que promueve una mezcla conjunta de betún, áridos y polímeros, éstos últimos añadidos durante la fabricación. Se produce una situación que va más allá del modificado del betún, sino que permite la existencia de ciertas partículas plásticas que no llegan a fundir y que presentan aspectos muy interesantes para el firme de carretera.



Ilustración 18. Residuos plásticos después de tratamiento de extrusionado y balanceado.

Investigaciones

Recientes estudios como el de Verma (2008), se dedican a explicar el desarrollo de esta técnica que se muestra bastante implantada en los países del sudeste asiático donde la cantidad de residuo de plástico hace inviable un desarrollo sostenible. El proceso comienza cuando se agregan las partículas de plástico durante el aglomerado, produciéndose la fusión casi total del mismo, lo que construye una cubierta aceitosa muy beneficiosa para el trabajo del firme. Esta adición se establece entre el 4 y el 5% sobre mezcla, modificando los puntos de reblandecimiento y mejorando sus prestaciones de flexibilidad, lo que le lleva a la mezcla a un mejor comportamiento para un intervalo de temperatura mayor, llegando a resistir los 55 °C sin llegar a desestabilizarse.

Los ensayos tomados como base para estas adiciones son el de estabilidad Marshall y el de sensibilidad al agua. En el caso del Marshall, la estabilidad se ve incrementada substancialmente, en el orden de dos veces mayor a la obtenida por una mezcla habitual, sin tratamiento plástico. Y en cuanto a la sensibilidad al agua, se denota una mejora, incluyendo una observación que comenta que la mezcla estará mejor preparada para los esfuerzos en situaciones de clima húmedo (típico del sudeste asiático), pronosticando una vida útil más duradera.

Esta idea que habla de una mayor vida útil, se contempla desde la óptica que la película que establecen conjuntamente el ligante y el plástico refuerza las características del ligante, convergiendo en una mezcla con mayor resistencia y durabilidad a superiores cargas. Este hecho certifica que el aumento de vida útil de una capa de estas características se sitúa en los 10 años, mientras que en el caso de mezclas convencionales, su calidad óptima se establece en los 5 a 6 años, sin necesidad de mantenimientos. Respecto al coste que supone la implantación de este aglomerado, hay que decir que es ligeramente mayor en comparación con un firme con los materiales habituales; pero por otra parte, ese sobrecoste, consigue reducir residuos no biodegradables y una capa de rodadura de excelentes condiciones.

Otros estudios como el que está en curso en la Universidad de Huelva, intenta sacar partido de una necesidad casi alarmante dentro del tratamiento de residuos de Andalucía: los plásticos que recubren los cultivos intensivos en invernaderos. Aunque haya mencionado esta situación como de la que deriva toda la investigación, no lo es; ya que la principal es el alto coste que produce el uso de polímeros vírgenes dentro del ligante bituminoso. Lo establecido hasta la fecha era el uso de polímeros como estos: polietilenos de alta y baja densidad, estireno-butadieno, etileno-acetato de vinilo, etileno-propileno-dieno, Estireno-butadieno-estireno, etc. Todos ellos contribuyen a ese aumento de coste, que sólo se puede ver aplacado por el uso de polímeros

procedentes de residuos plásticos que incorporen las ventajas del betún modificado, sin complicar su futuro por culpa de su precio.

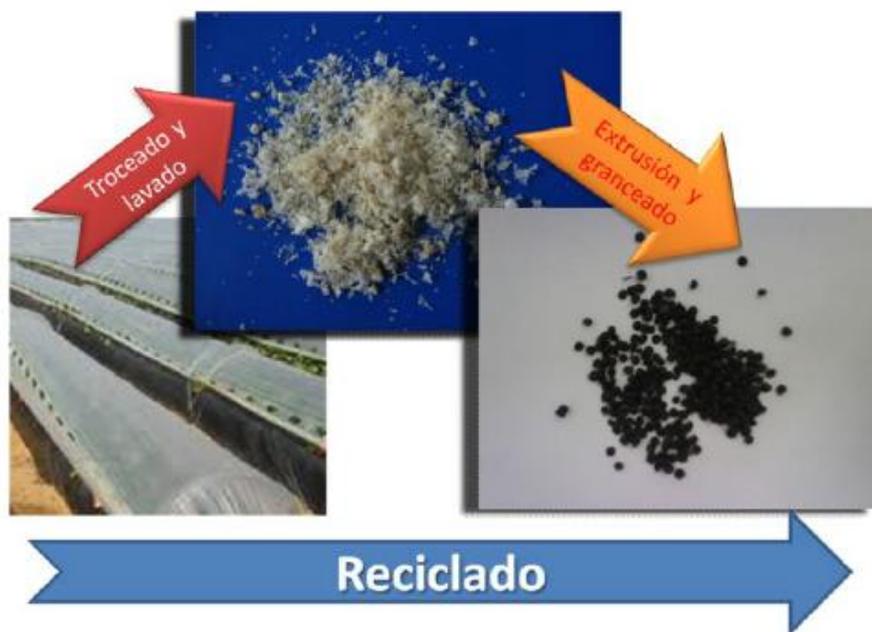


Ilustración 19. Polímeros reciclados a partir de residuos plásticos de la agricultura intensiva en invernaderos. (Universidad de Huelva, 2011)

La mayoría de estos invernaderos están hechos a base de polietileno de baja densidad lineal (LDPE), aunque también se utilizan combinados con copolímeros de etileno vinil acetato (EVA). Éstos desde el punto de vista técnico, tienen dos problemas fundamentales que hay que abordar en la gestión del plástico agrícola:

- Elevado grado de contaminación con otros elementos distintos al plástico, que pueden convertirse en obstáculos de elevada dificultad.
- Nivel excesivo de degradación, debido a su exposición duradera al Sol.

Para entrar de lleno en la investigación acerca de sus aptitudes para estar en la mezcla bituminosa, se modifican los betunes con polímeros termoplásticos como las poliolefinas. Entre sus beneficios se encuentran una menor susceptibilidad térmica del ligante, consiguiendo una mayor resistencia a la fluencia, para condiciones de altas temperaturas de servicio; y también, mayor resistencia a fractura cuando la temperatura alcanza ciertos mínimos. Todo esto está concretado en el caso de la “vía húmeda”, que aporta una mayor facilidad para la entrada de dichos polímeros dentro

del ligante. En el caso de la “vía seca”, en la que nos encontramos, ya hemos conocido que su adición a la mezcla se produce cuando ya están aglomerándose el árido y el ligante, hecho que conlleva unos inconvenientes de cara a la envuelta del árido y que la presencia del plástico reciclado sea notoria y manifiesta en la propia mezcla.

Las evoluciones de la técnica de “vía seca” van encaminadas a un mezclado templado, bajando hasta los 100°C en ciertos casos, derivando dos ventajas fundamentales: más fácil incorporación del plástico triturado y menor gasto energético por el descenso de temperatura de aglomerado. Por todo ello, el estudio que plantean se encamina en busca de los siguientes objetivos:

- Conocer en profundidad las interacciones betún-polímero para conseguir una mejora significativa de las propiedades de la mezcla bituminosa.
- Promover la rápida incorporación del polímero en la mezcla bituminosa durante su procesado por vía seca.
- Modificación física del plástico, mediante la adición de aditivos que faciliten su incorporación en la mezcla bituminosa. Este polímero modificado tendrá gran aplicación en el caso de las mezclas templadas preparadas por vía seca.



Ilustración 20. Extrusora de plástico reciclado. (Universidad de Huelva, 2011)

Los resultados que se extraigan de este proceso conllevarán una implementación dentro de las carencias que existen en la actualidad para mezclas de este nivel tecnológico destinado al reciclaje de materiales. Algunas de ellas son:

- Falta de sistemas de almacenaje para ligantes a altas temperaturas modificados con polímeros por “vía húmeda”.

- Posibilidad de reciclado de un mayor rango de plásticos, llegando a no importar su nivel de suciedad y degradación.
- No existencia de procesos y formulación que establezcan mecanismos para llevar a cabo la “vía seca”.
- Poco éxito en las carreteras en las que se ha colocado mezclas con polímeros reciclados.

Neumáticos usados

Introducción

Como se decía en el apartado de ligantes, la utilización de neumático usado en el firme de carretera ya forma parte de la normativa europea y española, en cuanto al reciclaje del caucho, y su posterior adición a la mezcla bituminosa. Por ello, al igual que ocurría en el caso de los polímeros, existe otra manera de establecerlos dentro de la misma: la “vía seca”. No sólo nos limitaremos a tener presente el caucho reciclado como mejora del ligante, sino que también podría formar parte del esqueleto sólido, procurando las mejoras vinculadas a este material resistente y con poca susceptibilidad térmica.

La novedad vinculada a este trabajo, y de la que ya hablamos antes, es el “marcado CE”; que establece normativa respecto a los siguientes términos: estabilidad, densidad y durabilidad. Con ello la Unión Europea anima y exige nuevos mecanismos que mejoren el bienestar social, rebajando los impactos al Medio Ambiente, y con unas carreteras que tengan la misma o mejor aptitud ante los esfuerzos que se le exigen. Aún así, la gran mayoría de obras que utilizan caucho reciclado se decantan por el uso del mismo dentro del ligante, formando los betunes modificados, ampliamente implantados en el mercado de obra civil y con grandes resultados en capas drenantes.

Investigaciones

Para este apartado tomaré como referencia el trabajo de Carmona et al. (2008), en el que tenían como objetivo el establecer unos parámetros para el acondicionamiento del comentado material, además de disponerlo en algunas carreteras de Extremadura. Sus objetivos iniciales se recogen en los siguientes puntos:

- Fomentar la utilización en la contratación pública de los materiales procedentes del reciclaje de NFU's.
- Dar cumplimiento a los instrumentos legislativos relativos al empleo y gestión de NFU's, (Real Decreto 1383/2002, Real Decreto 1481/2001, II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (2007-2015) así como a la Orden circular 21/2007 publicada por el Ministerio de Fomento y la reciente orden circular 24/2008 donde se incluye el mercado CE.
- Obtener dosificaciones óptimas de ligante y NFU's que proporcionen a la mezcla unas características iguales o mejores que las mezclas convencionales.
- Evaluar el comportamiento y durabilidad de estas nuevas mezclas en un tramo experimental de la red de carretera de nuestra región.

Su metodología se basaba en tomar como referencia una mezcla sin adición del producto reciclado, para ir después añadiendo distintos porcentajes que fueran válidos para su comparación posterior. Esto no quiere decir que dicho mecanismo sea válido para todo tipo de árido y betún, ya que esas variables podrían desestabilizar los resultados. Esta metodología versa una serie marcada de fases:

1.- Estudio y selección del tipo de mezcla y materias primas objeto del proyecto.

Establecen una mezcla modelo respecto de los materiales que se utilizan con asiduidad en su ámbito geográfico, profundizando en las patologías habituales, lo que permite tomar dicha mezcla como tipo de referencia.

2.- Diseño de fórmula de trabajo.

El proceso de diseño será el mismo a utilizar en las mezclas convencionales, salvo la inclusión del caucho una vez comenzado el aglomerado entre árido natural y ligante. Se define granulometría y dosificación, además de los ensayos Marshall, de susceptibilidad al agua y de deformaciones plásticas. Todo ello con un control de tiempo de maceración, vital para la conjunción de toda la mezcla.

3.- Adecuación y ajuste de la planta a la fabricación de la mezcla bituminosa diseñada.

Toda la investigación en el ámbito de las mezclas bituminosas está concebida, para después de dar unos resultados óptimos en laboratorio, pueda ser empleada dentro de las centrales de fabricación donde han de transformar su forma de producción, al mecanismo que la mezcla en investigación requiere.

4.- Ejecución de tramo de prueba.

Último paso, y el que establecerá unos resultados más convincentes, debido a su mayor aproximación a la realidad. En este estudio colabora el CEDEX dentro del proceso de auscultación del firme, ya que poseen mejores herramientas para la evaluación de las características superficiales de la capa a lo largo del tiempo.

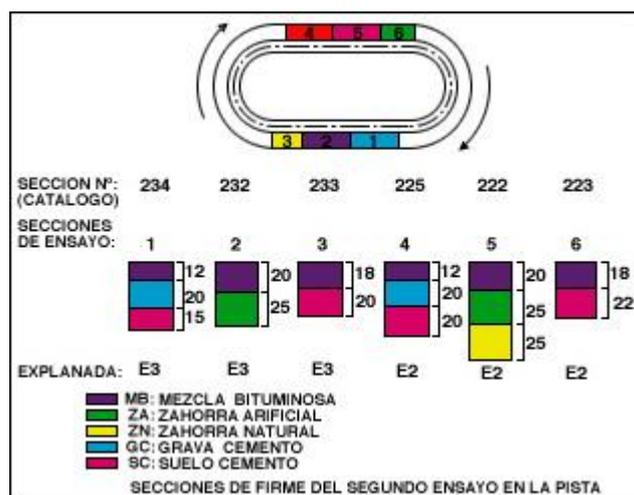


Ilustración 21. Ejemplo tramo de prueba. (CEDEX, Ministerio de Fomento).

Una vez atendido todo este proceso, se pasa al estudio de las características que nos puede aportar esta nueva mezcla, con la adición de los NFU's con una gradación por debajo de 2,5 mm. Esto mejorará la digestión del ligante, que necesita de un tiempo para establecer la densidad adecuada de puesta en obra; además de proveer un mayor volumen de huecos necesario para el acomodo del mismo. De esta manera se suponen, como primera aproximación, unos porcentajes que no pasan del 2% y con distintos tiempos de maceración.

Después de los diferentes ensayos, se demuestra que un porcentaje del 1% se puede concretar como óptimo debido a la pérdida de estabilidad que se produce para mayores adiciones, pasando igual en el caso de gradaciones con tamaño de partícula rondando 2,5 mm, que alargan el tiempo de maceración y apenas dejan los suficientes huecos para la implantación del ligante en ella. La solución llega con un porcentaje de betún del 5,3%, además del sabido 1% de NFU's sobre la mezcla, dejando unos resultados muy cercanos a la mezcla tipo y que consta de los siguientes parámetros:

<i>Resistencia conservada tras tratamiento en agua.</i>			
<i>ENSAYO INMERSIÓN COMPRESIÓN: Normativa NLT</i>			
INDICE DE RESITENCIA CONSERVADA	%		<u>76.06</u>
<i>ENSAYO SENSIBILIDAD AL AGUA: según norma UNE EN 12697-12</i>			
ITSR	%		<u>88.18</u>
<i>ENSAYO DE PISTA según norma UNE EN 12697-22</i>			
TIPO DE MEZCLA	REFERENCIA	1% NFU	
RD (mm)	1.910	0,803	
Inclinación de Rodada Media WTS	0.053	0.033	
Profundidad de rodada PRD (%)	1.146	1.610	

Ilustración 22. Efecto del agua y deformaciones plásticas. (Carmona, 2008).

Toda esta investigación es muy meticulosa en cuanto a cada paso que dar y en qué momento, lo cual crea un escenario fácil de asumir por una planta de fabricación a gran escala. Daremos cuenta de ciertos detalles del proceso de fabricación que serán de gran relevancia a la hora de obtener resultados exitosos, y así a su vez, tener una mezcla de referencia con la que poder comparar los distintos resultados extraídos. Las conclusiones más distintivas de este proceso son estas:

- La composición granulométrica ha de ser en volumen, compensando el bajo peso específico del caucho.
- Uso de caucho como filler de aportación (<0,6 mm), pero sabiendo que necesita un mayor tiempo de envuelta y su dosificación es más lenta.
- La temperatura de aglomerado se ha de situar entre 160-165 °C, permitiendo un calentamiento del árido por encima de 175 °C.
- La mezcla se lleva a cabo con la adición del árido y el polvo de caucho en primera instancia, después el betún, y en último lugar el polvo mineral.
- El coste de la “vía seca” es sensiblemente menor a la inclusión del caucho en el ligante formando los betunes modificados.

Otro estudio, proveniente de una tesis doctoral (Gruas, 2009), nos contempla las dos ideas que se tienen en España de la técnica de la “vía seca”, establecidas por el tamaño máximo del caucho triturado a utilizar: la primera, utilizando como máximo un tamaño de 2 mm; y la otra, como se explicaba anteriormente, utilizando la fracción de caucho como si fuera un polvo de aportación más. La que utiliza mayores tamaños intenta componer una estructura intermedia entre el esqueleto mineral y el ligante, una interfase betún/caucho que mejore la interacción de los materiales habituales de

la mezcla. Por otra parte, dentro de la misma mezcla, se produce la interacción entre las partículas de menor tamaño presentes en el caucho reciclado que acaban actuando dentro del ligante, como si de uno de los modificados se tratara. Pudiera verse esta opción como predominante debido a las diferentes interacciones, y aparentemente satisfactorias para la mezcla; pero no es así porque el tiempo de maduración de la mezcla sería demasiado prolongado, sin promover una mezcla óptima para el uso en carretera. Por esto, el uso mayoritario en España se establece con el polvo de caucho, que modifica el betún una vez que se haya mezclado el polvo del residuo con el árido a utilizar. De esta manera, el hinchamiento que ocurre después de la unión entre betún y caucho es mucho menor, y el proceso de fabricación y transporte se hace más manejable en tiempo y modo.

Otra opción que todavía no hemos manejado y que no existe en el Manual del CEDEX ni en la Orden Circular 21/2007, es la de la “vía mixta”, en la que se unen las dos ideas tratadas tanto para ligante como para árido: uso de betún modificado incluyendo la adición de polvo de neumático dentro del mineral.

Una vez comentado el propósito para utilizar “vía seca” y sus capacidades, veamos de qué modo se han utilizado en mezclas dispuestas en tramos de prueba real. Se conocen algunos tramos en el Levante español, ejecutados para capas de rodadura drenantes, discontinuas densas y semidensas, en zonas por debajo de un nivel de tráfico T2. En ellas se ha introducido un 2% de caucho por debajo de 2mm, principalmente acusado por la granulometría marcada por el tipo de mezcla, junto con el casi 6% de betún sobre la misma. Son mezclas que necesitan de una gran cantidad de cuidados: amplia espera desde la fabricación hasta la compactación (maceración de la mezcla), además de un largo estado de compactación hasta conseguir rebajar la temperatura a 70°C.

También se conocen otros casos en la Meseta, en la que se dispusieron mezclas continuas AC 16 que contaban con menor porcentaje de caucho (1% sobre mezcla) y, también, un menor tamaño, por debajo de 0,5 mm. Con ello se consigue utilizar menos cantidad de betún y, con ello, rebajar los largos tiempos de espera y ejecución antes planteados.

Como recapitulación final sobre esta tecnología, vamos a describir las ventajas y los inconvenientes de su uso, al igual que hemos hecho con el resto de materiales presentados. Sus ventajas radican en la facilidad de su empleo para todas las fábricas de aglomerado bituminoso, el rápido acceso al caucho de desecho en cualquier punto en el que se encuentre la producción, la gran cantidad de residuos que necesita y evita al Medio; y por último, reutiliza un material barato y que no acumula sobrecoste por su uso, como hace el caucho dentro del ligante modificado.

En el apartado de inconvenientes, hay que explicar que necesita de los debidos cuidados en su proceso de producción y puesta, de las personas y empresas capacitadas para llevarlo a cabo con un gran control de calidad y de la falta de homogeneidad que puede aparecer por la posible disgregación de partículas. El sobrecoste no lo apuntamos como inconveniente, ya que son más los beneficios que podría establecer que el aumento poco significativo del material respecto a las mezclas convencionales.

Vidrio

Introducción

La idea de reciclar vidrio se remonta hacia principios de los años 60 y se le atribuye a los países nórdicos y a Alemania. Llegaría unos 20 años después a España, donde a pesar de no tener una conciencia excesivamente implicada en los temas de reciclado, ha conseguido una sensibilización especial. Su industria es potente y abarca, para hacernos una idea, unas 700.000 toneladas al año (15 kg/persona aproximadamente); las cuáles en estos momentos están movilizadas para su uso, nuevamente, en botellas o tarros de comestibles. También se constata que el reciclado del vidrio no provoca la utilización de más energía que la fabricación del material nuevo, sino que la rebaja al necesitar menor temperatura de fusión para su creación. Para acabar con el reciclado puramente dicho, habrá que decir que sus propiedades perdurarán a pesar del tratamiento que experimenta en la planta: selección, limpieza y molido hasta la consecución del calcín. Nuestro estudio irá encaminado a saber si esa pervivencia de propiedades resulta aceptable para su puesta en el firme de carreteras, ya que si no, será mejor mantener el negocio según lo establecido en la actualidad.

Dentro de los residuos de tipo doméstico, el vidrio sería el único que se podría incorporar con un comportamiento similar al de los áridos dentro de la mezcla bituminosa. Su carácter frágil y duro confiere grandes posibilidades de adhesión al resto de materiales y con un punto de fusión tan alto que no entraría en el juego del ligante; además dota al firme de rozamiento tanto superficial como interno.

Investigaciones

Una vez escogido el vidrio para su entrada como árido, el estudio primario se basa en la dosificación que dote de un mejor trabajo y durabilidad a la nueva ejecución. Para autores como G.W. Maupin (1998), el problema se situaba en la resistencia a la extracción del propio material; es decir, creía que la adhesividad se veía limitada respecto a áridos vírgenes, lo cual traería problemas de residuo de vidrio suelto por la calzada. Se vería muy rebajado el coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD) y el material suelto produciría problemas de diversa índole como reflejos o pinchazos de neumático.



Ilustración 23. Imagen de capa superficial de asfalto con vidrio reciclado.

Teniendo estos antecedentes, dispusieron una serie de ensayos de verificación en los que tenían tres referencias de comportamiento: 5, 12 y 20% de inclusión de vidrio en la mezcla; además de ayudarse de una mezcla tipo con árido virgen que sirviera de apoyo a los resultados. Éstos son medidos mediante el TSR, Tensile Strength Ratio (AASHTO T 283), ensayo certificado que refleja si los materiales pueden ser objeto de uso en el pavimento debido a su resistencia a la extracción, y también, como medida para los aditivos incluidos en la propia mezcla. Para tener un orden de magnitud, hay que decir que este TSR se debe encontrar en un intervalo de entre 0,8 a 0,9; siendo este último el buscado para saber si cabe mejoría con la implantación de este material reciclado.

Como se ve con la ayuda de estas gráficas, es que el componente a añadir a la mezcla y con el cual se mejora la adhesividad de todos los materiales, toma una importancia fundamental; y que la dosificación no provee grandes cambios, al menos

en este tipo de ensayo expuesto. Para seguir con la dosificación del vidrio reciclado, otros estudios (Su y Chen, 2002; Arabani 2010), se decantan por inclusiones en menor volumen, que permiten apreciar cambios con una escala menor y con mejor nivel de detalle. Se utilizan porcentajes del 5 al 15% con intervalos menores entre cada uno de ellos, aunque con ciertos puntos de diversidad entre ellos.

Percent Glass	No Additive		Chemical Additive		Hydrated Lime	
	Test #1	Test #2	Test #1	Test #2	Test #1	Test #2
0	0.67	0.78	0.87	0.84	0.83	0.93
5	0.79	0.73	0.84	0.93	0.85	0.86
12	0.75	0.67	0.75	0.96	0.88	0.80
20	0.72	0.71	0.84	0.77	0.85	0.88

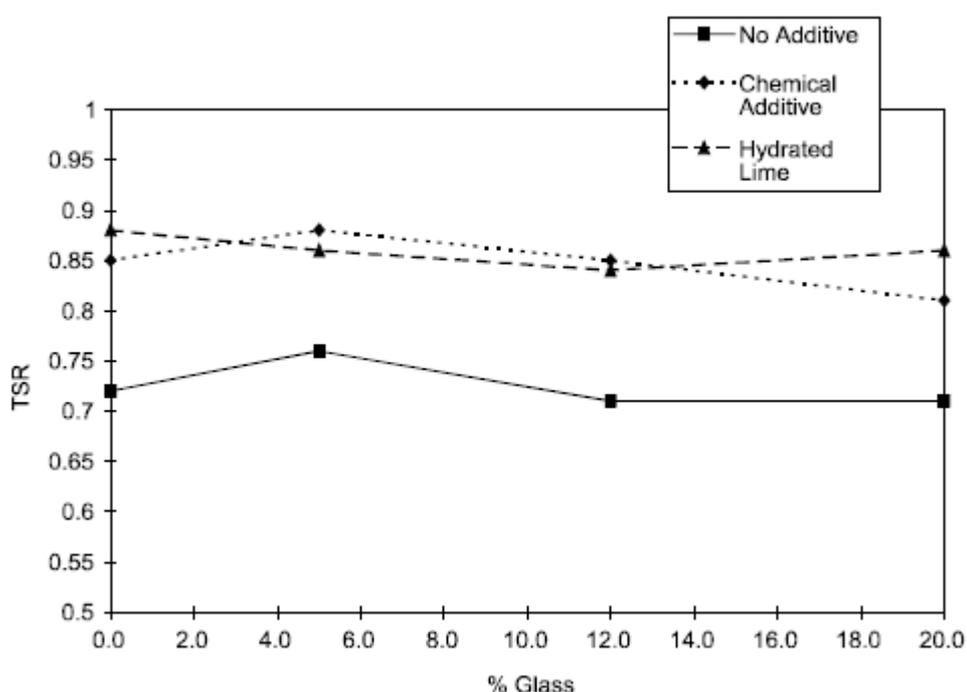


Ilustración 24. Ejemplo de ensayo TSR para probetas Marshall. G.W. Maupin (1998).

Hasta ahora sólo hemos hablado de volumen a imponer a la mezcla, pero caben otras posibilidades que entrañan esas diversidades de las que hablábamos. Para los autores antes mencionados, la granulometría cobraba una gran importancia y establecían al residuo gradaciones específicas, con tratamientos de aplastado y pulverizado inclusive.

Los problemas que podemos detectar en el vidrio son de índole habitual para una materia prima que no es la ideal para el producto a fabricar. Digo no ideal porque estamos intentando reutilizar desechos de materiales que ya tuvieron su primera función y para la que están pensados, pero no quiere decir que no sean aptos para su nuevo uso en la mezcla bituminosa. Estos problemas son: la textura lisa que podemos encontrar en ciertas partículas de vidrio que no han sido suficientemente trituradas, su facilidad para disgregarse por la mezcla sin la ayuda de aditivos; o la dosificación con la que nos viene el propio material. Esto último podría ser solventado en el momento en que la producción fuera lo más voluminosa posible, y así exigir a la compañía que trata el vidrio, una trituración específica que no limitara nuestra fabricación.

A la hora de combatir otro de los mencionados condicionantes como es el de la falta de adhesividad del vidrio al betún, se solventa gracias a la actuación de cemento o cal hidratada, que contribuyendo como fíller de aportación a la mezcla, acentúan la unión entre el vidrio, el resto del árido y el ligante. Mención aparte reciben otros aditivos que aumentan esa unión con un menor uso de fíller y que se llaman surfactantes.

Dichos surfactantes son más utilizados formando parte de una emulsión o un riego que confiera la textura exigida en algún tramo de carretera. Esto se debe a que este aditivo tensoactivo produce una unión singular entre dos fases debido a la tensión superficial entre ellas. Pueden tener un carácter iónico o no iónico, aunque en nuestro caso, serán de mayor utilidad aquellos iónicos que conjuguen de mejor manera las cadenas de hidrocarburos pesados (betún) con el agua de la emulsión, establecido por su característica hidrófila. Su poder también se encuentra en los cambios que produce en los materiales sobre los que actúa: reduce la viscosidad de la mezcla, aumenta las superficies de contacto entre ellos y varía el pH y la salinidad.

Siguiendo con la investigación de Maupin (1998), hay que comentar que sus resultados se refieren a la resistencia conservada (TSR para la AASHTO) y probetas Marshall para conocer la estabilidad y deformación de cada probeta; a los que también nos referiremos nosotros en nuestros propios ensayos con el vidrio reciclado. Respecto a la solución que nos provee el Marshall no cabe discusión: cumplen con cierta regularidad la estabilidad y la deformación, sólo teniendo cierta desventaja para su uso debido al poco volumen de huecos en mezcla, rayando el 4%. Esto no es sorpresa en el trabajo con vidrio, ya que con un tamaño de partícula de entre 2 y 4 mm, el material quiebra en la compactación y rellena los huecos que se esperan de dicha granulometría.



Ilustración 25. Vidrio reciclado procedente de planta. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).

Los ensayos de resistencia conservada los hace con base a la Norma americana AASHTO T 283-89 (sensibilidad al agua), en la que incluye un ciclo de congelación. También considera que el volumen de huecos en estas probetas se sitúa en el 7,5% sobre mezcla, debido al paso de 75 a 50 golpes para la compactación (asemejándolo al test Virginia). Entrando en las conclusiones y los resultados que las derivan, se comenta que existen dos formas de aceptar la inclusión del vidrio en la mezcla: la que no lleva aditivos de ningún tipo y las que contienen cal hidratada o agente químico que provoca la mejor adhesión de partículas.

La que incluyen el desecho de vidrio sin conferirle una mejora tiene buena capacidad de resistencia indirecta en seco, pero demuestra grandes dificultades para mantenerse después del ciclo húmedo. Denota la dificultad del vidrio para ser un componente habitual sin necesidad de ayuda para mejorar las prestaciones de la mezcla.

En el otro caso, existen más semejanzas, aunque también como es comprensible, hay ciertas características que distinguen la cal y el aditivo químico. En el caso de las resistencias en seco, ambas cumplen con facilidad lo esperado, llegando a estar por encima de 1200 kPa. Para las probetas que han pasado por el ciclo húmedo existen diferencias, creando límites a la inclusión de vidrio. Con el uso de cal, se incrementa la posibilidad de asimilar mayor cantidad de vidrio en la mezcla, con buenas aptitudes con hasta un 20% de masa sobre el total de árido. Además se debe decir que tiene un comportamiento más aceptable con dicho 20% que con un 12%, donde se presenta un mínimo para la resistencia. Era de esperar este comportamiento de la cal con el agua, ya que se consigue que las mezclas y los suelos con un tratamiento basado en ello tengan unas características óptimas.

El funcionamiento con el agente químico se establece que cuanto mayor sea la cantidad de vidrio incluido, peores condiciones de funcionamiento poseerá. Llegando al 12% de material de desecho incluido, el ensayo no es válido, por lo que habría que recurrir a una granulometría diferente o un uso de vidrio por debajo del 10%.

Se puede decir que el uso de vidrio se posibilita gracias a una granulometría muy exigente que no pase de 2mm, junto con la utilización de cal hidratada o cemento, que adhieran de la mejor manera posible el vidrio incluido. El uso de estos últimos no cambia un ajuste al centro del uso para mezclas cerradas debido a su carácter de fíller dentro de la misma. La conclusión que puede sacarse de este autor y que veremos refutada en nuestros propios ensayos es que el objetivo se centra en el contenido mínimo de huecos; que la inclusión del vidrio no represente un problema térmico por expansión del betún ante temperaturas altas.

Con el estudio del antes mencionado Arabani (2010), podemos hablar de gradaciones impuestas para un mejor uso del vidrio como componente de la mezcla bituminosa. Distribuye el ensayo de sus probetas en dos granulometrías diferenciadas, para así comprobar para cuál de ellas es más probable su uso futuro: Topeka y binder.

Continuous type gradation for HMA, Topeka and binder layers.

Sieve size	25 mm (1 in.)	19 mm (3/4 in.)	12.5 mm (1/2 in.)	9.5 mm (3/8 in.)	4.75 mm (#4)	2.36 mm (#8)	0.3 mm (#50)	0.075 mm (#200)
Gradation type	Percentage of weight passing (%)							
Topeka	–	100	90–100	–	44–74	28–58	5–21	2–10
Binder	100	90–100	–	56–80	35–65	23–49	5–19	2–8

Ilustración 26. Gradaciones tipo Topeka y binder. (Arabani M., 2010)

Una vez establecida la granulometría a estudiar, habrá que conocer la cantidad de vidrio reciclado a utilizar, es decir, su proporción dentro del árido y su propia gradación. Este autor toma como máximo tamaño de partícula para el reciclado el correspondiente a la luz #4 de la ASTM (4,75 mm). En la gráfica a continuación se describe la adición del hablado material, en la que podremos apreciar que como fíller no deja apenas cantidad del reciclado, ya que lo guarda para la cal hidratada en una proporción del 5%, que hará la doble función: polvo mineral y aditivo anti-stripping del vidrio.

Gradation of the glass cullet aggregates.

Sieve size	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Percentage passing	100	63	42	27	14	9	2

Ilustración 27. Gradación del residuo de vidrio como parte del árido de la mezcla bituminosa. (Arabani M., 2010)

El objetivo de este autor se centra en conocer si existe mejora en cuanto a módulo de rigidez gracias al vidrio reciclado dentro de la mezcla, además de saber si el comportamiento ante esfuerzos dinámico va en el mismo sentido. Para ello utiliza el ensayo ITSM de la AASHTO, que se constituye por cargas y descargas repetidas en un ciclo determinado; sólo comprimiendo la probeta unidireccionalmente, estando coaccionada en el resto de dimensiones.

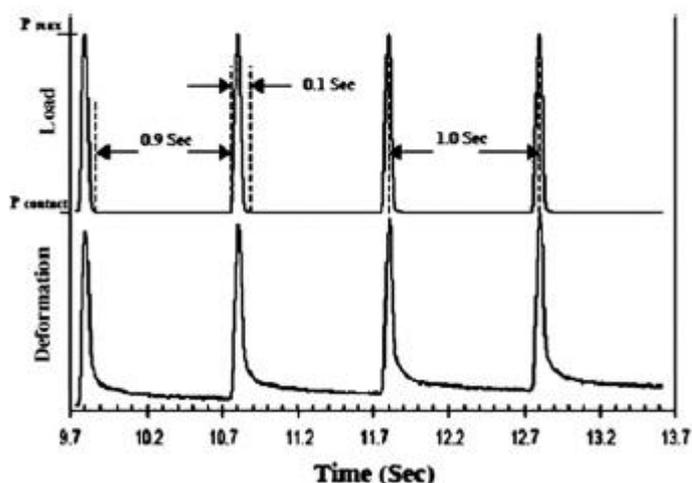


Ilustración 28. Configuración del ensayo ITSM. Variación de carga y deformación para el ensayo dinámico ITSM (Arabani M., 2010).

De gráficos como el anterior, el autor extrae unas afirmaciones que van en este sentido: la utilización de vidrio reciclado en mezcla bituminosa contribuya a mejorar el comportamiento del aglomerado ante esfuerzos dinámicos. Las variables a esta sentencia son la temperatura y el porcentaje de aditivos integrados en la mezcla. Otras conclusiones que salen de este estudio son las siguientes:

- Los resultados obtenidos tanto para ensayo Marshall como para ITSM concuerdan en tomar como porcentaje óptimo de vidrio reciclado sobre el 15% en peso sobre árido.

- Las probetas con el añadido de vidrio y cal hidratada demuestran un incremento respecto al módulo de rigidez tomado como referencia. Las características propias de la cal aumentan la cohesión del material mineral con el vidrio y el propio betún.
- Mayor rozamiento interno propiciado por la angulosidad de las partículas de vidrio triturado. Sin embargo, en las partículas de mayor tamaño su nivel de pulimento impide un mejor agarre con el betún y que redunda en el menor aumento del módulo de rigidez antes mencionado.
- Menor sensibilidad a los cambios térmicos en el aglomerado con vidrio, tanto para la viscosidad como para el módulo de rigidez.

Los gráficos siguientes dejarán una visión más precisa de los resultados resumidos anteriormente:

Results obtained by the Marshall test for samples with binder gradation.

Glass content (%)	Bitumen content (%)	Stability	Flow	Unit weight	Void	VMA	VFA
0	4	828	2.47	2.301	5.98	14.48	58.70
	4.5	993	2.31	2.337	4.74	13.60	65.13
	5	989	3.04	2.34	4.53	13.94	67.50
	5.5	950	3.45	2.326	3.25	14.90	78.19
5	4	858	2.3	2.281	6.31	15.06	58.10
	4.5	1011	2.26	2.323	5.01	13.95	64.08
	5	1026	2.98	2.329	4.6	14.18	67.55
	5.5	1003	3.01	2.326	3.85	14.74	73.88
10	4	823	2.26	2.275	6.29	15.12	58.40
	4.5	963	2.42	2.305	5.33	14.45	63.11
	5	1087	2.63	2.337	4.55	13.71	66.82
	5.5	1027	3.22	2.323	3.64	14.68	75.21
15	4	1044	2.44	2.3	6.87	14.02	50.99
	4.5	1189	2.63	2.331	5.03	13.31	62.22
	5	1131	3.29	2.305	4.02	14.73	72.71
	5.5	995	3.6	2.288	3.31	15.80	79.06
20	4	945	2.06	2.299	6.04	13.89	56.51
	4.5	1107	2.63	2.314	5.4	13.78	60.81
	5	1075	2.87	2.3	4.63	14.75	68.61
	5.5	943	3.23	2.28	3.96	15.93	75.15

Ilustración 29. Resultados del ensayo Marshall para el caso de gradación binder, con mejores niveles de estabilidad y volumen de huecos. (Arabani M., 2010).

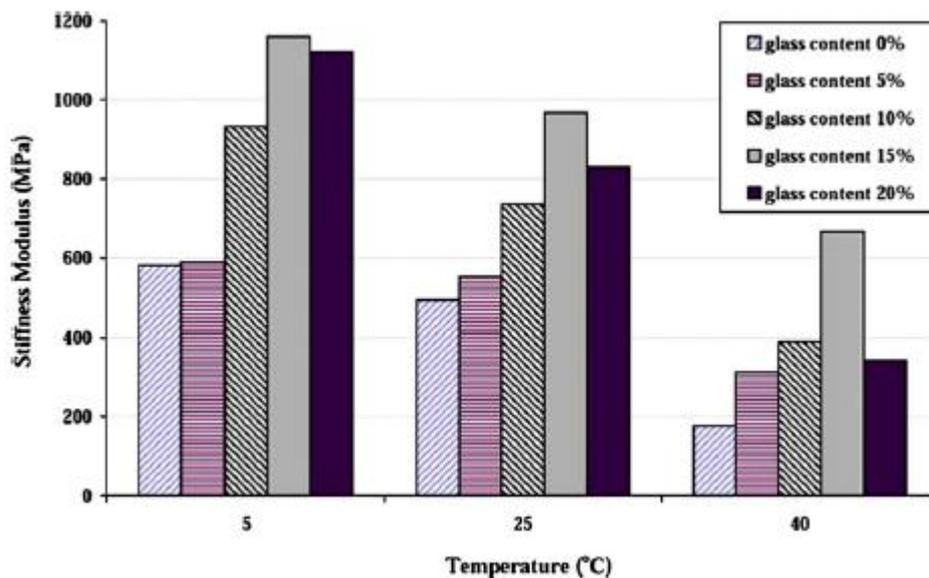


Ilustración 30. Variación de módulo de rigidez de la mezcla bituminosa para diferentes contenidos de vidrio y temperaturas. (Arabani M., 2010)

Respecto a la respuesta a esfuerzos de fatiga y su afección en la mezcla, el mismo autor, Arabani (2013), concluye que teniendo como referencia el modelo de Burgers para el comportamiento viscoelástico del material, la fluencia de la mezcla con el vidrio de desecho como componente adquiere buenas expectativas. Basó su estudio en los hechos para mezclas convencionales, de tal manera que estableció diversos grupos diferenciados por temperatura y por rango de tensión axial. Para las temperaturas escogió 40, 50 y 60 °C; y en el caso de tensión de compresión axial: 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; y 0,3 MPa.

Como explicación al fenómeno de la viscoelasticidad habrá que conjuntar las características de cada palabra que lo forma: viscoso, aptitud de fluir ante un esfuerzo sin romper la uniones intrínsecas del material; y elástico, comportamiento que devuelve a su posición inicial al material que ha sufrido una tensión por debajo de un límite establecido, una vez cesado dicha tensión. Lo único que habrá que añadir para tener en cuenta ante el estudio de fluencia del material viscoelástico, es el tiempo de esfuerzo aceptado. Todo ello es conjugado de tal manera que pueda ser abarcado por una formulación referencia de comportamiento: ecuación de Volterra para viscoelasticidad lineal aplicado al modelo de Burgers para fluencia.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{inst,creep}} + \int_0^t K(t-t')\dot{\sigma}(t')dt'$$

Ilustración 31. Ecuación de Volterra: deformación elástica instantánea más fase de fluencia y relajación. Modelo de Burgers: una en serie un modelo Maxwell y otro Kelvin.

Una vez elegidas las condiciones de contorno para el ensayo, incluyendo la base de datos extraídos de la anterior investigación con el vidrio reciclado, toma las dosificaciones óptimas tanto para vidrio como para cal hidratada. En este caso, no incluye al cemento como aditivo para mejorar la adhesividad de la mezcla, ya que previo al ensayo de probetas, utiliza una dinámica que mejora la cohesión entre la citada cal y el árido de la mezcla. Esta dinámica se basa en experiencias (Little D.N. et al, 2006), que sugieren que después del paso durante dos horas del árido por agua, para luego secar su capa superficial y disponer el óptimo de cal para la mezcla; compondrán una película, dentro de un horno de secado, que aumenta de rango la adhesividad dentro de la futura probeta.

Una vez distribuidas todas las probetas para cada uno de los esfuerzos y las temperaturas que van a disponer, se establecen tres estados de aplicación de esfuerzos, que son los siguientes:

- Etapa de fluencia decelerada, con la velocidad de deformación siendo disminuida.
- Etapa de fluencia a equi-velocidad, con deformaciones aumentando de manera sostenida y una velocidad de deformación constante entre 200 y 1000 segundos.
- Etapa de fluencia acelerada, una vez superados los 1000 segundos, donde la velocidad de deformación establece su mayor ratio.

Sus resultados demuestran la variabilidad que ha de tenerse en cuenta para un rango de temperatura de 20 °C y el intervalo de esfuerzos propuesto. Con la temperatura menor (40 °C), el comportamiento de la mezcla es lineal respecto a la

comprensión inducida, cosa que ya no ocurre para las mayores temperaturas junto con los esfuerzos más exigentes. Los cambios en la velocidad de deformación para los distintos ensayos se denotan en las siguientes gráficas:

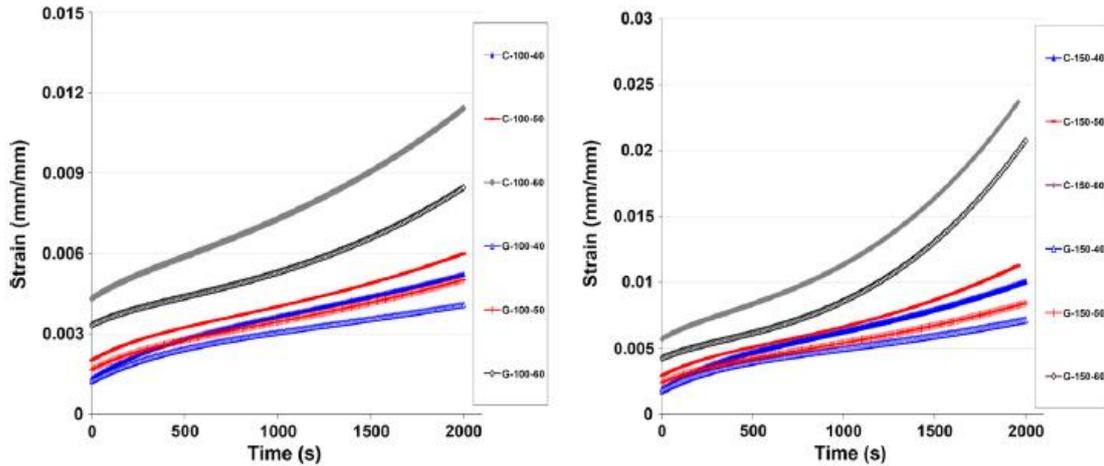


Ilustración 32. Curvas de fluencia para mezcla convencional (superior de cada color) y mezcla de vidrio. Esfuerzos de 0,3 MPa. (Arabani M., 2013).

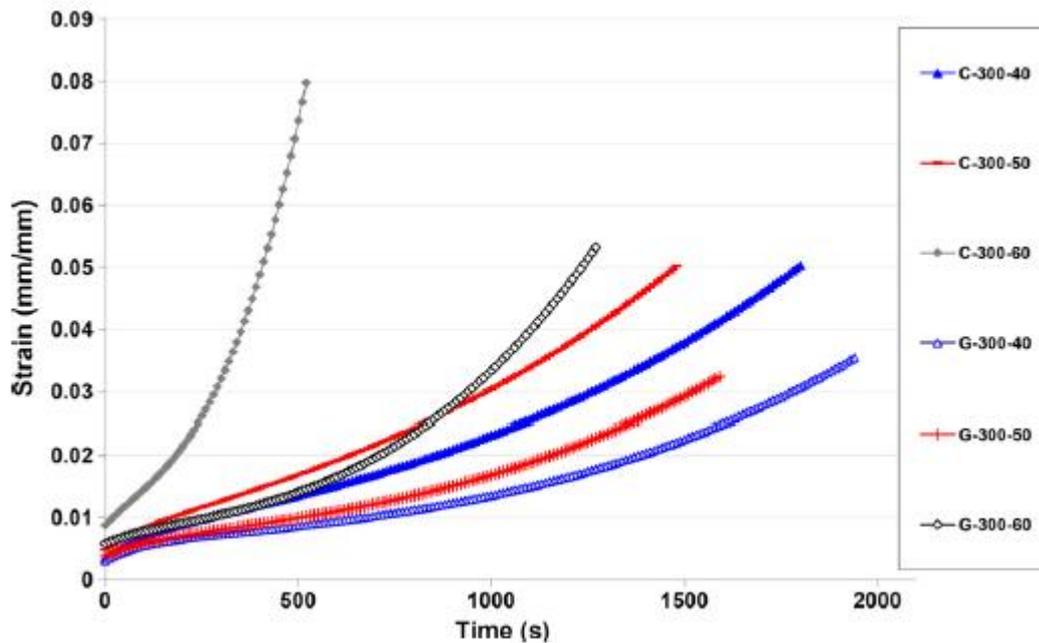


Ilustración 33. Curvas de fluencia para mezcla convencional (superior de cada color) y mezcla de vidrio. Esfuerzos de 0,1 y 0,15 MPa. (Arabani M., 2013).

De la misma forma actuará la temperatura, distanciando el modelo de Burgers, tomado como referencia de comportamiento, de las probetas base de la investigación:

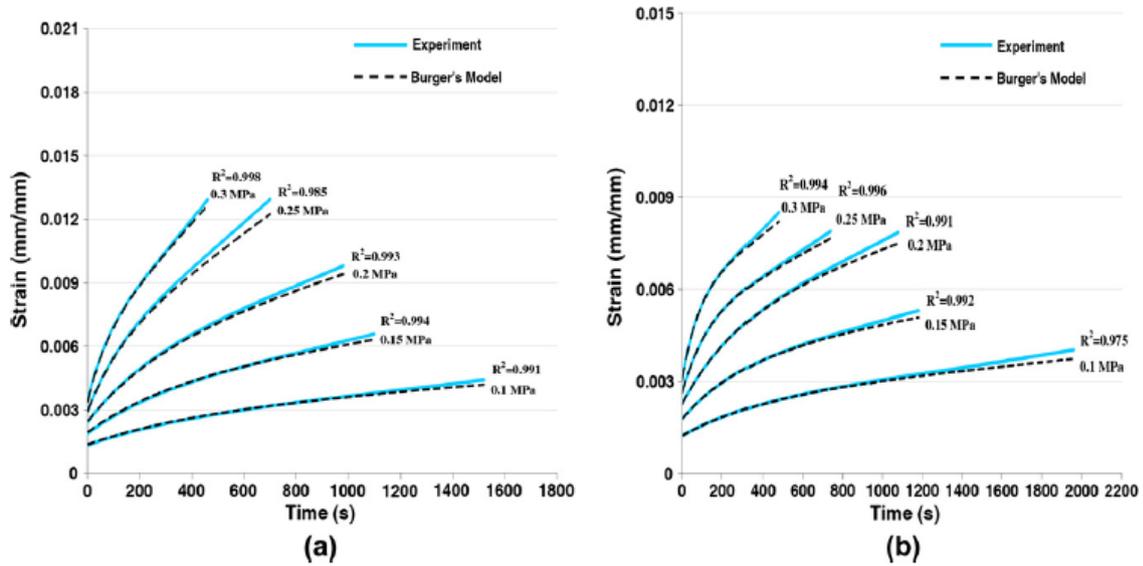


Ilustración 34. Comparación del modelo de Burgers y los resultados de la investigación para cada esfuerzo a 40 °C: (a) mezcla convencional, y (b) mezcla glasphalt (Arabani M., 2013).

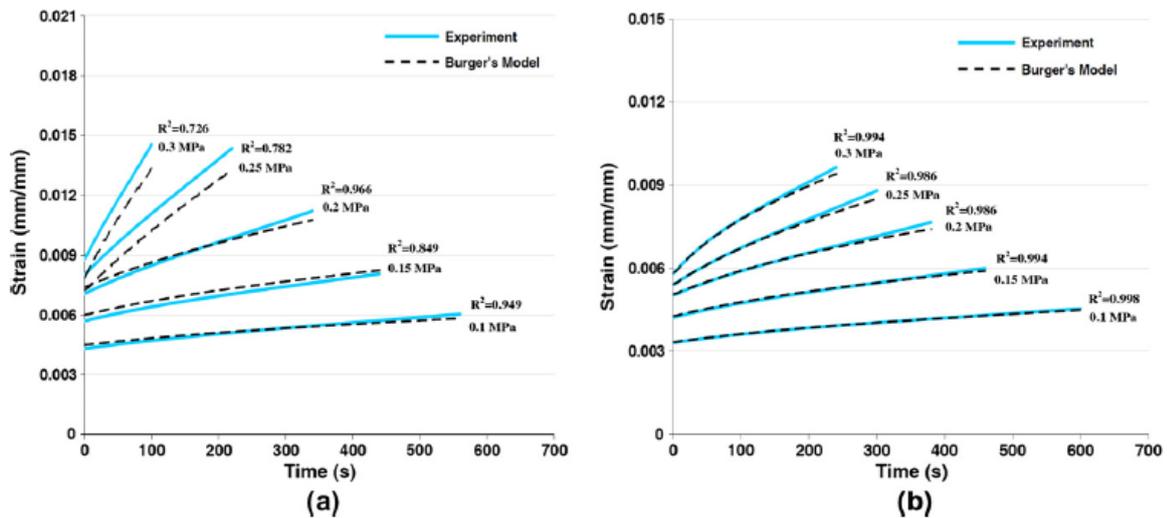


Ilustración 35. Comparación del modelo de Burgers y los resultados de la investigación para cada esfuerzo a 60 °C: (a) mezcla convencional, y (b) mezcla glasphalt (Arabani M., 2013).

Como conclusiones a todo este estudio reológico de la mezcla bituminosa, el autor detecta estas situaciones como fundamentales:

- El modelo experimental sólo es capaz de caracterizar dos de las tres etapas de fluencia del material.
- El modelo de Burgers es un buen punto de inicio como comparación a una investigación en este sentido. Tiene gran cercanía con los resultados obtenidos para la mayoría de temperaturas y esfuerzos.
- Dicha comparación se decanta a favor de las mezclas con vidrio reciclado respecto de las convencionales.

Después de los estudios anteriores, más centrados en los fenómenos que podrían comprometer al material bituminoso, volvemos para conocer más investigaciones que hayan ahondado en la composición de la mezcla con el vidrio reciclado y los resultados obtenidos, ya que de ellos conseguiré una referencia adecuada para los ensayos que se mostrarán más adelante hechos en nuestro propio laboratorio. En el caso de Su y Chen (2001), su trabajo tiene como objetivo el buen funcionamiento de los tramos de prueba que ejecutaron para porcentajes de desecho de vidrio sobre masa total de árido de: 5, 10 y 15%, respectivamente. Ese objetivo se estudiará en base a las siguientes características, básicas en todo trazado de carretera: valor de estabilidad de la mezcla, reflexión de la luz (sparkle), permeabilidad, resistencia conservada y grado de compactación requerido. Dichos tramos de prueba se encontrarán en carreteras de tráficos inferiores a T2 y con superficies entre los 140 y 510 m².

Este estudio se enmarca en una localización determinada, Taiwan, por lo que necesita ensayos característicos de la zona en la que va a ser expuesta la mezcla. Por ello usan el Standard AASHTO T245, que trata de un ensayo Marshall que aporta datos sobre estabilidad y deformación con probetas de 6 pulgadas, y con ciclos distintos al marcado por las normas UNE. Usan dos grupos de probetas: las secas, que aportarán resultados sobre el máximo esfuerzo resistido y la deformación causada; y por otra parte, las húmedas, con un ciclo de 4 días sumergidas más otro, pasado por un horno de secado. La media de los valores aportados por las probetas sumergidas serán los resultados que prueban la fiabilidad del firme de vidrio dentro de un clima tropical y con lluvia intensa.

El objetivo de este estudio, como lo ha sido para el resto, es conocer qué cantidades son las más adecuadas para incluir vidrio en el firme, y también, los aditivos con los que mejoran su prestancia. Con dicho fin, estos autores incluyen una nueva variable que ninguno de los anteriores ha querido aportar porque no estimaría

parámetros necesarios para su tipo de clima. Su y Chen, después de la fabricación de las probetas y sus respectivos ciclos de seco o húmedo, quieren conocer los valores que nos produce el ensayo Marshall para cierto número de días dentro del horno a 60 °C. Con ello, creen que conocerán mejor el comportamiento del material para el establecido clima tropical cálido, dando unos resultados más eficaces para el entorno con el que trabajan. Como resultado de la explicación incluyen los siguientes valores dados por cada grupo de probetas:

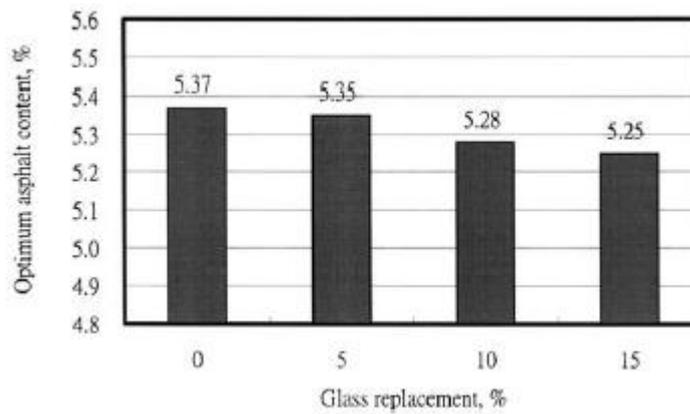


Ilustración 36. Contenido de betún óptimo para cada porcentaje de inclusión de vidrio en la mezcla bituminosa. (Su y Chen, 2001).

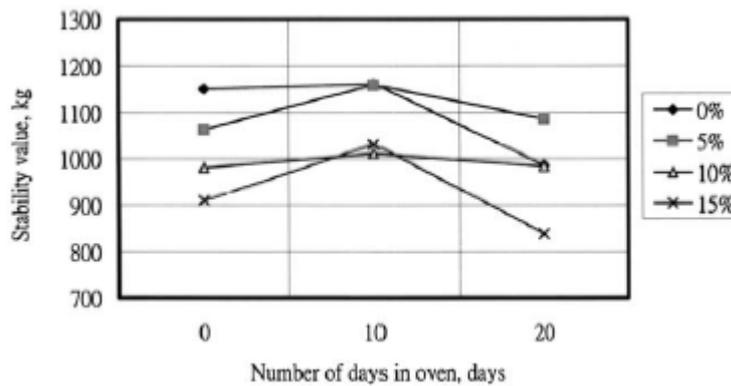


Ilustración 37. Estabilidad Marshall respecto a la cantidad de vidrio incluido y al número de días en horno a 60 °C (ciclo seco). (Su y Chen, 2001).

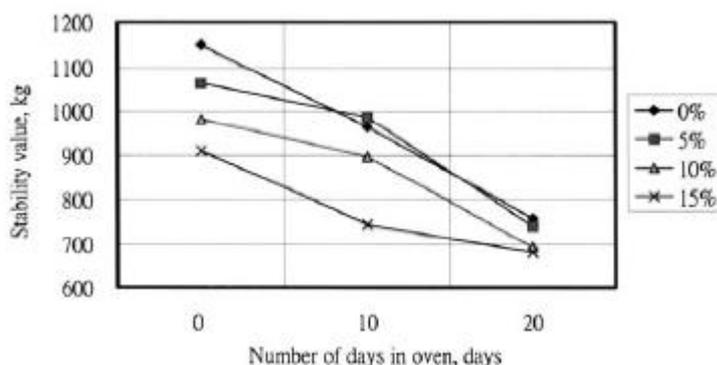


Ilustración 38. Estabilidad Marshall respecto a la cantidad de vidrio incluido y al número de días en horno a 60 °C (ciclo húmedo). (Su y Chen, 2001).

Finalmente, esta investigación da entrada a otros dos factores que pueden ser partícipes de la promoción de esta mezcla. La primera es habitual en la producción actual: utilizar betún modificado en vez del convencional 85/100, de uso para los datos aportados anteriormente. Los resultados de este cambio no podrían ser más alentadores: mejoran la estabilidad del firme en más del 25%.

El otro factor que todavía no habíamos mencionado en los comentarios previos, había sido la incidencia que tiene el uso de vidrio para la mejora de visibilidad en la carretera. Esta variable luminosa (sparkle), redundante en la reflexión de la luz procedente de los faros de los coches respecto del firme. Puede que sea un factor importante a añadir al estudio ya que produce una conducción más segura, sin impedir la visión de las líneas de pintura con una reflexión de 200 mcd/lx/m², por los 14.09–17.84 mcd/lx/m² dados en los tramos de prueba ejecutados. También cabe decir que el progresivo aumento de la reflexión, debido al envejecimiento del firme y su desgaste, conlleva un aumento de los coeficientes de deslizamiento, conllevando una mayor seguridad a la conducción.

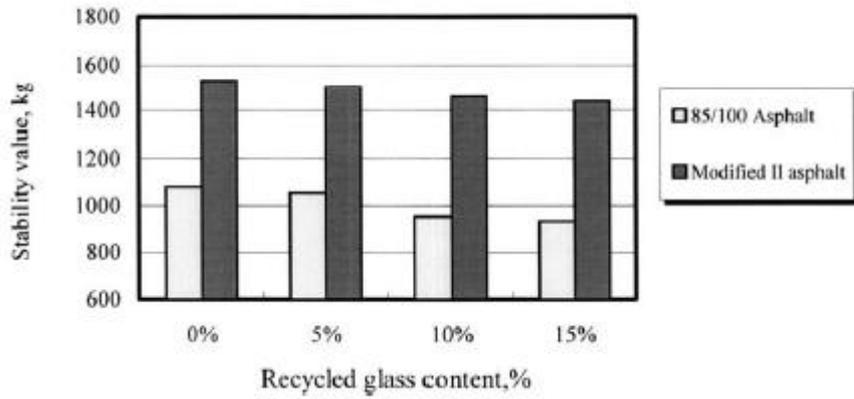


Ilustración 39. Estabilidad Marshall respecto al uso de betún convencional 85/100 o Modificado II. (Su y Chen, 2001).



Ilustración 40. El firme, con vidrio como parte de la mezcla bituminosa, reflejando la luz en uno de los tramos de prueba. (Su y Chen, 2001).

Como conclusión a todo lo conocido procedente de las diferentes investigaciones, queda claro que el uso de vidrio dentro de la mezcla bituminosa puede tener visos de buen comportamiento y con unas aptitudes que se podrían asemejar a las que conocemos en la actualidad con los materiales de origen mineral. Esto supone que podemos contar con él para mantener la calidad de los firmes de carretera, a la vez que ayudamos al reciclaje de un material, que en este caso sí tiene mercado de reutilización, pero al que se le da una nueva salida competitiva.

Para una aproximación para unos futuros ensayos, se puede afirmar que el vidrio ha de estar con una granulometría por debajo de los 4 o 2 mm, ya que en el proceso de compactación, éste rompe y crea dificultades en cuanto al volumen de huecos en mezcla. Respecto a los tamaños, también se puede concretar que el uso de finos de vidrio no implica una mala adhesividad, si no que habrá que tenerse en cuenta que el uso de cal hidratada o cemento puede hacer que no entre en el cupo establecido para cada gradación. Estos aditivos pueden dejarse en torno del 3% sobre el peso del árido; dado que con esas cantidades pueden hacer frente a la cohesión necesaria dentro de la mezcla. Si conjuntamos ambas ideas produciremos un mástic parecido al que se usa en estos momentos formado por el betún, la caliza y el cemento; además de coaccionar lo liso del vidrio en partículas de un tamaño mayor, fuente de problemas de cohesión y de macrotextura en la carretera.

Los distintos ensayos tienen unos resultados más que aceptables para un material nuevo dentro de este ámbito y con ciertos valores que harían mejorar las mezclas del momento. La inclusión de betunes modificados aumentaría dichas prestaciones, además del consabido reciclaje de neumáticos y polímeros dentro de esos ligantes.

Y como finalización, habrá que comentar el posible incremento de coste que supone la utilización de un nuevo material. No supone un sobrecoste excesivo, ya que la producción no cambiaría y sólo se tendría en cuenta el precio del propio material, llegando a ser más bajo que el normalizado para áridos vírgenes. Sólo se podría ver aumentado desde el punto de vista de unos porcentajes de betún en mezcla sobre el 5-5,5%, lo cual se da por amortizado con unas carreteras más durables y un comportamiento óptimo.

2.3. Efectos sobre el Medio Ambiente

Las razones para investigar nuevas formas constructivas pretende, como en todo ámbito, promover dos metas: mejora del producto y minoración de costes. En nuestro caso, haremos que se cumplan ambas situaciones, añadiendo un valor fundamental para nuestra época como es el de reciclar. Ya hablamos en la introducción del trabajo, sobre las posibilidades y buenas perspectivas que tenía la utilización de ciertos materiales que ya pasaron por su uso primario, y que ahora, les daríamos una nueva oportunidad con resultados no muy diferidos.

En este apartado, nos centraremos en el volumen de beneficio que obtenemos al reciclar o reutilizar desechos de materiales, cuyo único final era el vertedero. Investigaciones como las de Huang (2007), sacan a la luz las cantidades reales de desperdicios acumulados hasta la fecha y los posibles objetivos que se podrían abarcar en un corto o medio plazo, para poder disminuir la expansión de los vertederos, muchos de ellos sobreexplotados por la evolución de la cantidad de residuos en la actualidad.

Estiman una producción para el Reino Unido de 26 millones de toneladas (Mt) de mezcla bituminosa en 2004, contando que en ella se incluye un 90% de árido mineral virgen (EAPA, 2004). Mientras tanto, el volumen de material de desecho aumenta hasta los 106 Mt, provenientes de la industria, el comercio y el uso doméstico. Estos datos hacen precipitar la posibilidad de usar algunos de los desechos, que permitan un buen trabajo en la mezcla que fueran a componer, ya que cabría la posibilidad de agotar el terreno para vertedero en cuestión de 5 a 10 años. Por otra parte las agencias concesionarias del control de calidad de carreteras son reacias a la inclusión de ciertos desechos que impliquen una peor constitución de los distintos paquetes de material en el firme, con lo que sólo permiten su uso en bases o subbases, donde la incidencia de un peor comportamiento al esperado no sea de incidencia tan grave como en la rodadura.

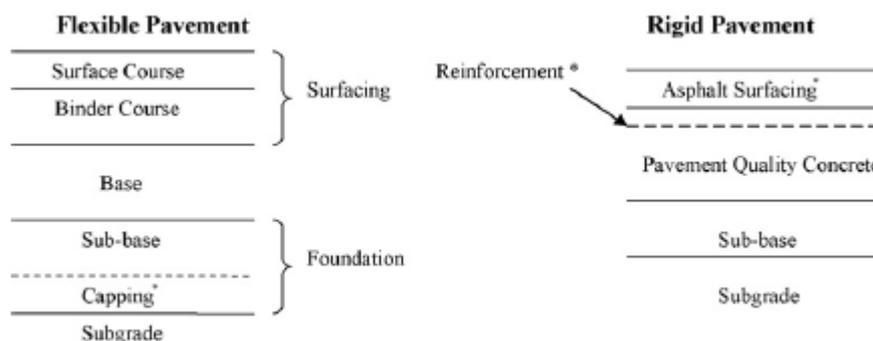


Ilustración 41. Capas estructurales para un pavimento flexible o rígido. Uso de material de desecho en capas de base y cimentación. (Huang et al., 2007).

Para centrar más la atención sobre cada tipo de material, presentaremos los datos sobre cada uno de ellos y las formas en que podrían verse incluidos en proyectos futuros, dentro de la mezcla bituminosa:

- Vidrio

Se contabiliza un total de 3,4 Mt de desecho de este material, teniendo como fuentes principales los recipientes, los cristales de ventanas y otros de cualquier índole. Como reciclado sólo se toman un tercio aproximadamente, queriendo llegar al 60% en menos de 4 años. Ello conllevaría la construcción de más plantas de reciclaje, lo cual no sería una inversión con difícil amortización, ya que compensaríamos rápidamente su coste con el que ya cargamos debido al transporte a vertedero y su puesta en él, sin poder vender lo allí descargado.

Además, el tratamiento de vidrio para reciclado tiene un coste menor en la producción ya que el trabajo inicial con la sílice y el magnesio está constituido, y por ello, el coste energético descenderá enormemente.

- Escoria de acería

Se estima que el 10-15% sobre la producción de acero se convierte en escoria, hasta llegar a los 15 Mt anuales. No es un desecho difícil de usar y ya forma parte de plataformas en muchas carreteras.

También se tiene en cuenta que los puntos en los que se producen son más limitados que en el caso del vidrio, y el transporte y acarreamiento se hace más fácil desde cada una de las plantas hasta la localización de uso posterior.

- Neumáticos usados

La generación de neumático fuera de uso en el reino Unido se sitúa sobre los 0,44 Mt, derivando en estos procesos: rayado y triturado para otros usos, energía de combustión, vertedero, quemado en hornos de cemento. El coste de su transporte oscila sobre 1 libra/km/ton, lo cual lo hace caro para una acción con una pobre valorización como puede ser el caso del vertedero. Su uso en ligante y como áridos queda más que demostrado en lo comentado en este trabajo, por lo que no cabría problema en cambiar sus usos posteriores por el de formar parte de la mezcla bituminosa.

- Plásticos

En el caso de los plásticos, su volumen de desecho está en 2,8 Mt al año, todas ellas procedentes de actividades industriales y domésticas, y con una muy difícil recuperación o reciclaje posterior. Su mejor objetivo sería de mezclarlo con otros materiales para diversos usos o quemarlo, ya que tiene un poder calorífico superior

al del carbón. El caso de plásticos de alta densidad, su reciclado sería más complicado, por lo que su adecuación al pavimento de carretera sería muy beneficiosa.

Waste arising in the UK and application in asphalt pavements

	Waste arising (Mt/year)	Recycling rate (%)	Aggregates use (%)	Use in asphalt pavements			
				Aggregates	Replace rate (%)	Binder	Replace rate (%)
Glass	3.4	33	4.1	✓	10-30	X	
Steel slag	1.0	100	98	✓	30-62	X	
Scrap tyre	0.44	21	N/A	✓	1-3	✓	18-22
Plastics	2.8	5	0.29	✓	15-30	✓	8

✓ indicates an option; X indicates not an option.

Ilustración 42. Incremento de los volúmenes de desecho en el Reino unido y las distintas aplicaciones que se le pueden dar. (Huang et al., 2007).

Para dar otro punto de vista, esta vez más cuantificador de los beneficios de estos usos antes explicados (Peilong y Zhang, 2011), diremos que la utilización de mezclas que incluyan plásticos usados, aglomerado fresado o desecho de neumático, ayudan a la disminución en las emisiones de agentes tóxicos a la atmósfera, lo cual ayuda con el coste de producción además de mejorar el Medio Ambiente. También provoca una mejor valoración desde el punto de vista del contratante y permite el uso de una tecnología con mejores aplicaciones futuras.

Country & region	Year	Reduce the noise level
Belgium	1981	8-10dB
Canada	1981	3-4 dB
France	1984	3-5 dB
Germany	1980	3 dB
Netherlands	1988	2.5 dB
Phoenix, USA	1990	10 dB
Orange, USA	1992	3-5 dB
Los Angeles, USA	1991	3-7 dB

Test item	unit	HM	WM	Reduce rate/%
CO ₂	%	2.6	1	61.5
NO _x	mg/m ³	151	40	73.5
CO	mg/m ³	104	91.3	12.2
SO ₂	104mg/m ³	13	3.3	74.6
Smoke & dust	mg/m ³	5.6	2.59	53.8

Test item	unit	HM	WM	Reduce rate/%
Asphalt smoke	mg/m ³	21.1	1.7	91.9
Benzene soluble	mg/m ³	19.5	0.581	97.0
Benzo(a)pyrene	µg/m ³	0.0944	0.0187	80.2

Ilustración 43. Emisiones y posibles reducciones de ruidos, agentes tóxicos y residuos de producción para mezcla bituminosa con inclusión de neumático fuera de uso (NFU). (Peilong y Zhang, 2011).

Capítulo 3. Materiales empleados en el estudio.

En este capítulo trataremos las condiciones que nos aportan individualmente cada componente en la mezcla bituminosa que queremos diseñar. Más que condiciones que nos aplica el material, se podría hablar de las calidades que necesitamos como principio, para saber que contamos con un material aceptable para emprender con los distintos ensayos una vez dentro de la mezcla.

Reflejaré los materiales que durante mi estancia en el Laboratorio han tenido estudio, entre los que no se encuentra el vidrio. Esto se debe a que la muestra de este vidrio reciclado era tan escasa y con una granulometría tan discontinua que tendría problemas en cuanto a cantidad de material, para los ensayos previstos de antemano. Posteriormente, con los resultados que nos produce ese material en la mezcla, se podrá decir que puede tomarse como un árido compatible para el uso en firmes de carretera.

3.1. Ligantes

Betún convencional

Para los ensayos que vamos a proponer con el vidrio como componente nuevo en una mezcla bituminosa, hemos utilizado un betún convencional procedente de la planta de producción de Emilio Bolado S.L. Dicho betún es del tipo B 50/70, convencional y de uso habitual en la mayoría de firmes hasta la entrada de los modificados o mejorados con caucho, con mejores prestaciones.

Ésta es la hoja técnica del comentado material y las temperaturas de trabajo:

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABAJO:

- Temperatura de mezcla (°C): 150-160
- Temperatura de almacenamiento y uso del ligante (°C): 150-160
- Temperatura de compactación (°C): 145-155
- Temperatura máxima de calentamiento (°C): 170

Característica	Unidad	Norma	mín.	máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C)	0,1 mm	EN 1426	50	70
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	46	54
Punto de rotura Fraass	°C	EN 12593	-	-8
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN ISO 2592	230	-
Resistencia al endurecimiento a 163 °C (EN 12607-1)				
Variación de masa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetración retenida	%	EN 1426	50	-
Δ punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	11

Betún recuperado de fresado

El caso del ligante procedente de aglomerado fresado es bastante distinto al uso de un ligante de primer uso, con todas sus características óptimas para la entrada en la mezcla. Éste ligante tiene los síntomas propios del envejecimiento que produce los esfuerzos a soportar por los años de vida útil. La penetración se sitúa sobre un tercio o un cuarto respecto a un betún nuevo o el anillo y bola supera con creces el tiempo para el que se prevé la fusión del material en agua.

Contaremos, entonces, con un material más rígido y duro, pero con menos posibilidades de deformación y flexibilidad. Toda la deformación que ha ido adquiriendo con los años y el sufrimiento del paso de distintas temperaturas y acciones del agua, le profieren una resistencia aumentada, incluida una posible fragilidad antes los esfuerzos futuros.

La recuperación hecha por parte del laboratorio de la Dirección General de Carreteras de Cantabria, produce estos valores para ensayos propios dentro del Laboratorio de la Universidad:

TEMPERATURA DE ANILLO Y BOLA				1º: Bola 1
1º	2º			2º: Bola 2
75,9	76,3	76,1	CUMPLE	

UNE EN 1426		
Penetración		Unidad
25 °C; 100 g; 5s		0,1 mm
Lecturas	Valor penetración	
11	13	
13		
14		

Viendo estos resultados y comparándolos, con el betún convencional antes mostrado, se reflejan las grandes diferencias entre uno y otro. La penetración debiera situarse entre los 50 y 70, y el anillo y bola llegar a fundir con temperaturas de 71-72 0Cen 14 minutos; y no llegar hasta los 76 °C en 16 minutos.

3.2. Áridos

Caliza

El mineral calizo, muy presente en todo el territorio cántabro, es traído desde la cantera de Piedra Negras y cumple con las especificaciones exigidas para el material destinado a ocupar el tamaño fino de la granulometría. Lo primero que se hace al llegar el material en bruto debe de ser, el conocer la granulometría que posee, si es que no es ya sabida de antemano por información desde la cantera. Nuestro material consta de la siguiente descomposición por tamaños:

TAMIZ UNE m.m.	Peso acumulado	% Retiene	% PASA	Peso acumulado	% Retiene	% PASA	MEDIA
8	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	100,0
4	69,0	7,2	92,8	69,0	7,2	92,8	92,8
2	367,0	38,1	61,9	367,0	38,1	61,9	61,9
0,500	713,1	73,9	26,1	713,1	73,9	26,1	26,1
0,250	791,7	82,1	17,9	791,7	82,1	17,9	17,9
0,063	866,4	89,8	10,2	866,4	89,8	10,2	10,2

Viendo el espectro de la granulometría, vamos a disponer de gran cantidad de material para el que está pensada la caliza, ya que se sitúa sobre el 62% de pasa por debajo del 2 mm. Dejamos de lado el 4/2 mm, que aunque abarque el 30% del material, dicho tamaño se reserva a piedras minerales con un menor desgaste y mayor rigidez frente a tensiones.

Una vez tenemos el material separado, se dispone la medida de su densidad para después tomarla como referencia dentro de lo que sería una dosificación volumétrica. La medida se establece por medio de picnómetros que dan cuenta del volumen desalojado por el árido respecto del agua o el aceite de parafina contenido en él. Su medida es lo más cercana posible a la realidad y establecerá unos cálculos bastante precisos que den como resultado una dosificación lo más realista posible con la mezcla de materiales que tendremos en las futuras probetas. La dosificación volumétrica es más precisa que la basada sólo en los pesos, reflejando un espectro granulométrico consecuente con el peso específico de cada material aportado. En el caso de esta caliza, los resultados de densidad aparente por medio de los picnómetros son los siguientes:

FECHA:	jueves, 28 de febrero de 2013	MUESTRA:	COPSESA	
			ÁRIDO CALIZO TAMAÑO 2 - 0,063 mm Lavado	
Referencia del Picnómetro			1	3
Peso del Picnómetro vacío				
Peso Picnómetro enrasado con agua (gr.)	A		1.685,46	1.690,30
Peso Picnómetro con 400 cc. de agua (gr.)	B		832,37	878,78
Peso Picnómetro con 400 cc. + árido (gr.)	C		1.232,40	1.278,78
Peso Picnómetro enrasado + árido (gr.)	D		1.938,00	1.942,86
Masa de muestra seca (gr.)	$F = C - B$		400,03	400,00
Volúmen ocupado por muestra (cc.)	$V = F + A - D$		147,49	147,44
Temperatura del agua destilada	Grados		19	19
Densidad del agua destilada (gr/cm ³)	ρ_t		0,9985	0,9985
Volúmen real de la muestra (cc.)	$V_{\text{real}} = V/\rho_t$		147,72	147,67
Peso específico del árido (gr/cm ³)	$p.e. = F/V_{\text{real}}$		2,708	2,709

Peso específico en (gr/cm³)

2,708

Para corroborar las especificaciones que se le supone a la caliza que vamos a utilizar, comprobamos el estado de sus finos y la cantidad que integran sus partículas. Para ello se hace el ensayo de equivalente de arena, que es el método referencia para la determinación de la cantidad de finos incluido en la fracción granulométrica 0/2 mm. Se utilizan probetas con agua y floculante, en las que se vierte el árido a ensayar gracias a unos pistones que se sitúan al nivel en que el material resiste su empuje compresor. En nuestro caso, separamos dos muestras del material que debían ir por vías distintas: seca y húmeda. Los valores sacados son los siguientes:

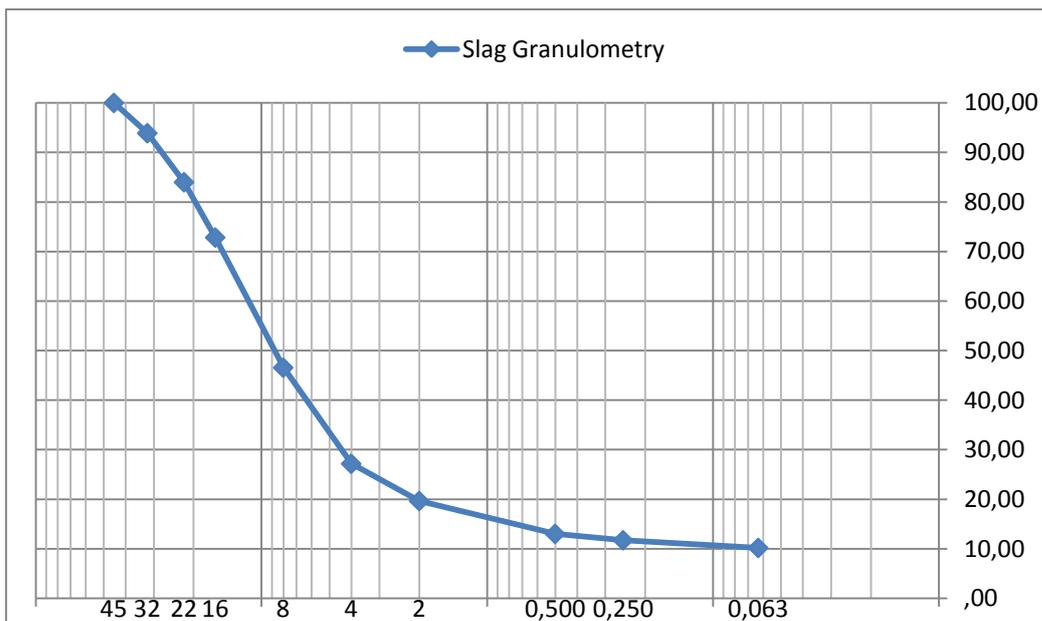
	1ª Submuestra	2ª Submuestra	SE
Masa de la submuestra	564,3	564,3	
h_1 (milímetros)	118	117	
h_2 (milímetros)	94	89	
$100 \times (h_2 / h_1)$ (con una cifra decimal)	80	76	78
NOTA - Los valores de $100 \times (h_2 / h_1)$ de las dos submuestras de ensayo no deben diferir en más de 4.			CUMPLE

Como vemos muestra unos valores que cumplen con la Norma UNE N 933-8, dando fiabilidad a un material que no nos incluya una cantidad de finos que varíe la dosificación diseñada.

Escoria de acería

Aunque no pueda dar valores de los ensayos para áridos que saldrían del estudio de vidrio reciclado, sí puedo dar los de otros materiales ya comentados en el estado del arte, y que componen el árido reciclado utilizado hoy en día. El primero será el de escoria de acería, del que antes de ensayar sabemos que contiene todo tipo de óxidos férricos y de otros metales y que su dureza y rigidez están garantizadas. Se conocen sus buenas prestaciones en el que caso de explanadas y por ello, sólo debería preocuparnos su adhesividad dentro de la mezcla y la dosificación que hay que establecer con ella, ya que como veremos a continuación, su peso específico sobresale del resto de áridos utilizados en firmes de carretera.

Primeramente, mostraremos la granulometría con la que se nos este material, procedente de la acería Global Wire, en la periferia de Santander. Veremos qué cantidad de material será posible utilizar en el caso de un árido que formará el esqueleto mineral y los tamaños máximos dentro de la gradación:



De este detalle podemos entender que más del 50% del material que nos llega puede ser utilizado, debido a que la fracción en la que entra en juego en la dosificación se encuentra entre 16/2 mm. También se puede notar la apreciable cantidad de finos que se encuentran en su interior, explicado por los polvos surgidos de la fabricación del acero y sus residuos.

El siguiente paso será el de valorar el peso específico de este material, que provocará un cambio de mentalidad en la hora de la dosificación. La Norma no establece dosificaciones volumétricas, pero sí da cabida a estos materiales con parámetros de corrección que pueden controlar las mezclas fuera del rango habitual. Estos parámetros de corrección van unidos al peso específico mayoritario hasta la fecha y es $2,65 \text{ gr/cm}^3$, que suele ser la media ponderada de los pesos específicos en áridos de las mezclas con ofita, caliza y cemento. Nuestro método con los picnómetros da el siguiente resultado para la escoria de acería: $3,821 \text{ gr/cm}^3$. Eso conlleva unas densidades aparentes en áridos rondando el 3,5, casi un punto por encima de los niveles usuales antes mencionados.

Al ser un material con poco bagaje dentro del Laboratorio y no tener suficiente información respecto del proveedor, se constituyen los ensayos para el árido grueso de toda mezcla bituminosa: humedad, absorción, lajas y Los Ángeles. Puede que estos test se pudieran complementar con unos valores en cuanto a lixiviados dentro de la escoria, pero se trata de un ensayo complejo que no establecimos como necesario para fabricar las distintas probetas.

Respecto de la humedad y la absorción, la escoria no tiene dificultades para superar los ensayos respectivos, dado que es un material que no acoge gran cantidad de agua y si se guarda en un lugar tapado y seco, no tendrá problema cuando llegue la hora del aglomerado. Los resultados que salieron de ambos controles son irrisorios.

A simple vista, la escoria podría solventar sin problema el ensayo que da el nivel de lajas presente en la muestra. Se trata de un material de buen tamaño y dimensiones regulares y bien diferenciadas entre los diversos tamaños. Aún así hicimos el test para comprobar lo visto a grandes rasgos. El material se pasará por los tamices de malla cuadrada con los diversos tamaños que asignemos a la dosificación, para después comparar con el material que pasa para el mismo tamaño en los tamices de barras (separados entre cada una la mitad del diámetro). Tratando nuestro caso, el valor de las lajas se situaba por debajo del 0,02%, cumpliendo con solvencia el 1% permitido por la Norma UNE N 933-3.

FECHA:	7 de marzo de 2013	PROCEDENCIA DEL MATERIAL:	ESCORIA GLOBAL 16/4 mm	
Masa de la muestra M_0	1.748,4 gramos	Masa retenida por el tamiz de 100 mm =	0,0 gramos	
		Masa que pasar por el tamiz de 4 mm =	11,2 gramos	
		Suma de las masas rechazadas =	11,2 gramos	
Tamizado con tamices de ensayo		Cribado con tamices de barras		
Fración granulométrica d/D_i	Masa (R_i) de la fracción granulométrica retenida en cada tamiz	Anchura nominal de las ranuras de los tamices de barras	Masa que pasa por el tamiz de barras (m_i)	IL_i
mm	gramos	mm	gramos	
80/100		50 ± 0,5		
63/80		40 ± 0,5		
50/63		31,5 ± 0,5		
40/50		25 ± 0,4		
31,5/40		20 ± 0,4		
25/31,5		16 ± 0,4		
20/25		12,5 ± 0,4		
16/20		10 ± 0,2		
12,5/16	246,3	8 ± 0,2	0,0	0,0
10/12,5	377,9	6,3 ± 0,2	3,4	0,9
8/10	367,1	5 ± 0,2	11,3	3,1
6,3/8	350,8	4 ± 0,15	8,7	2,5
5/6,3	251,9	3,15 ± 0,15	6,4	2,5
4/5	143,2	2,5 ± 0,15	3,0	2,1
$M_1 = \sum R_i =$	1.737,2	$M_2 = \sum m_i =$	32,8	1,9
			0,02	
			CUMPLE	< 1 %

El ensayo de Los Ángeles se basa en el rango de material que entrará posteriormente en la mezcla; por lo que en este caso elegimos para la fracción 8/4 mm, que puede dar valores globales para todo el espectro en el que se use la escoria (16/4 mm). Se basa en contabilizar el desgaste que tiene el material debido a las acciones que sufre por parte de unas bolas metálicas dentro de un tambor. Las valoraciones que se sacan de este ensayo son de gran importancia y se tienen muy en cuenta respecto a caracterizar al material como válido para el firme de carretera. El valor que nos sale en Laboratorio es de 18, siendo 20 el dato situado como máximo desgaste para tráfico exigentes tipo T00 y en capa de rodadura.

Fresado

El aglomerado reciclado procede del fresado de la capa de rodadura de un firme, el cual quiere ser renovado mediante otra capa que sustituya a la quitada por el comentado fresado. Como se explicó anteriormente, el betún que va ligado al mineral debe ser recuperado y ensayado para conocer sus características, todas ellas envejecidas por su vida útil en la carretera. De la misma manera, el árido que proviene para ser reciclado dentro de una nueva mezcla debe ser ensayado y controlado para que su puesta no sea traumática en cuanto al trabajo conjunto en mezcla.

El primer paso, como ocurría con el resto de materiales, es el de conocer que granulometría tenemos y si se adapta a lo que proponemos como mezcla final. La dirección General de Carreteras de Cantabria procede con la recuperación y saca los siguientes datos:

CONTENIDO DE LIGANTE			GRANULOMÉTRICO				
TARA + MEZCLA	a		TAMICES	RETENIDO		%	
TARA + ÁRIDOS	b		U.N.E.	PESO	%	PASA	
TARA	c				0	100	
MEZCLA	P1=a-c	3043,0			0	100	ESPECIFICAC
ÁRIDOS	P2=b-c	2566,0	16,0		0	100	100
FILTRO + RESIDUO	d	873,0	8,0	214	7	93	90 - 97
FILTRO	e	527,0	4,0	692	24	76	62 - 83
RESIDUO	P3=d-e	346,0	2,0	1182	41	59	40 - 64
CENIZAS	P4		0,500	2100	72	28	17 - 32
MATERIA MINERAL	B=P2+P3+P4	2912,0	0,250	2323	80	20	10 - 23
LIGANTE	C=P1-B	131,0	0,125	2410	83	17	7 - 14
% LIGANTE MEZCLA	100xC/P1	4,30	0,063	2550	87,6	12,4	5 - 10
% LIGANTE ÁRIDOS	100xC/B	4,50	P. INICIAL	2912,0			

CONTENIDO DE LIGANTE			GRANULOMÉTRICO				
TARA + MEZCLA	a		TAMICES	RETENIDO		%	
TARA + ÁRIDOS	b		U.N.E.	PESO	%	PASA	
TARA	c				0	100	
MEZCLA	P1=a-c	2121,0			0	100	ESPECIFICAC
ÁRIDOS	P2=b-c	1787,0	16,0		0	100	
FILTRO + RESIDUO	d	802,0	8,0	172	8	92	90 - 97
FILTRO	e	551,0	4,0	547	27	73	62 - 83
RESIDUO	P3=d-e	251,0	2,0	889	44	56	40 - 64
CENIZAS	P4		0,500	1477	72	28	17 - 32
MATERIA MINERAL	B=P2+P3+P4	2038,0	0,250	1627	80	20	10 - 23
LIGANTE	C=P1-B	83,0	0,125	1710	84	16	7 - 14
% LIGANTE MEZCLA	100xC/P1	3,91	0,063	1782	87,4	12,6	5 - 10
% LIGANTE ÁRIDOS	100xC/B	4,07	P. INICIAL	2038,0			

Con los datos de ambas muestras, se puede establecer que el fresado sea una partida dentro de la dosificación que abarque todo el espectro, ya que debido a su carácter conjunto sería difícil de asimilar con una sola fracción dentro de la gradación futura. Se podría cribar y disponer sólo en ciertos rangos, pero puede que esa criba no sea más que otro aspecto desviador de un material intrínsecamente heterogéneo, debido a los grumos formados por mineral y betún, que sólo podrían ser separados con una recuperación general de todo el material apilado.

Después de este planteamiento de establecer la granulometría en base a lo que nos provea el fresado, pasamos a caracterizar y ensayar el material como si fuera un árido más. El peso específico estará muy ligado al que tendría una mezcla convencional, conteniendo todos los tipos de árido y el ligante. El resultado que nos procuran los picnómetros es el siguiente:

FECHA:	martes, 26 de febrero de 2013	MUESTRA:	COPSESA	
			ÁRIDO FRESADO	
Referencia del Picnómetro			1	3
Peso del Picnómetro vacío				
Peso Picnómetro enrasado con agua (gr.)	A		1.685,74	1.690,53
Peso Picnómetro con 400 cc. de agua (gr.)	B		864,65	802,93
Peso Picnómetro con 400 cc. + árido (gr.)	C		1.464,73	1.402,93
Peso Picnómetro enrasado + árido (gr.)	D		2.046,72	2.050,63
Masa de muestra seca (gr.)	F = C - B		600,08	600,00
Volúmen ocupado por muestra (cc.)	V = F + A - D		239,10	239,90
Temperatura del agua destilada	Grados		19	19
Densidad del agua destilada (gr/cm ³)	ρ_t		0,9985	0,9985
Volúmen real de la muestra (cc.)	V.real = V/ ρ_t		239,47	240,27
Peso específico del árido (gr/cm ³)	p.e. = F/V.real		2,506	2,497

Peso específico en (gr/cm³)

2,502

Como decíamos el peso específico se sitúa alrededor de $2,5 \text{ gr/cm}^3$, con ciertas similitudes a las densidades Marshall convencionales.

Por otra parte, pasando a los ensayos puramente establecidos, empezamos con el de lajas. Sucederá igual que en el caso de la escoria, y cabe decir que cumplirá de antemano por su simple visión. Esto se debe a la fragmentación que sufre este material para que ser separado de las capas inferiores del firme que formaba. El proceso a seguir es el mismo comentado en el apartado anterior, dando unos valores del 0,11% como índice de lajas.

El ensayo de equivalente de arena tendrá especial relevancia, ya que necesitamos unos datos fidedignos sobre la cantidad de finos incluidos en este material. Estos finos serán de mala calidad para la adhesividad que precisamos y harían una función debilitada, a la que se podría esperar del árido de primer uso.

	1ª Submuestra	2ª Submuestra	SE
Masa de la submuestra	120	120	
h_1 (milímetros)	118	115	
h_2 (milímetros)	108	108	
$100 \times (h_2 / h_1)$ (con una cifra decimal)	92	94	93
NOTA - Los valores de $100 \times (h_2 / h_1)$ de las dos submuestras de ensayo no deben diferir en más de 4.			CUMPLE

Con la muestra de esta tabla, queda claro que la inclusión de árido reciclado del fresado no supone un perjuicio en cuanto a la entrada de finos en mezcla; teniendo un valor más apreciable que el que nos resultaba del estudio del árido calizo procedente de cantera.

Finalmente, a la hora de contabilizar el desgaste del aglomerado fresado, tomamos la misma fracción granulométrica que en el caso del árido calizo, es decir, 4/8 mm. Antes no fue mencionado, pero en el ensayo de Los Ángeles, además de establecer ese rango propuesto, se separan dos muestras dentro de él gracias a un tamiz intermedio: el 6,3 mm en este caso. Esto supone un reparto más homogéneo y con las características propias de una dosificación según especificaciones de Norma.

Este árido tendrá menos expectativas de éxito de cara a ser válido en capa de rodadura porque tiene su estructura mineral muy gastada y acusada de los esfuerzos sufridos en la vida útil; y también teniendo en cuenta la idea de que cierta cantidad del desgaste que contabilizamos pertenece al ligante y no al árido.

Tamaños de árido a ensayar	Tamaño del tamiz intermedio mm	Porcentaje que pasa por el tamiz intermedio %	Número de bolas
PASA 8 mm	6,3	60 a 70	8
RETIENE 4 mm			

TAMIZ			
Pasa por el 6,3		Retiene el 6,3	
60%	70%	30%	40%
2.997,0	3.503,5	1.498,5	2.002,0
CUMPLE		1.688,2	1.678,2
3.316,8		1.683,6	
CUMPLE			
			5.000,4

Nota: El anexo A viene dado por una granulometría distinta de 10/14

m = Es la masa retenida por el tamiz de 1,6 mm, expresada en gramos.

m= 3.778,4

$$LA = 24$$

$$LA = \left(\frac{5.000 - m}{50} \right)$$

ANEXO A

Fracciones granulométricas mm	Tamaño del tamiz intermedio mm	Porcentaje que pasa por el tamiz intermedio %	Número de bolas
4 a 6,3	5	30 a 40	7
4 a 8	6,3	60 a 70	8
6,3 a 10	8	30 a 40	9
8 a 11,2	10	60 a 70	10
11,2 a 16	14	60 a 70	12

TIPO DE CAPA	CATEGORIA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 y T0	T1	T2	T3 y arcenes	T4
RODADURA	≤ 20		≤ 25		
INTERMEDIA	≤ 25			≤ 25 (*)	
BASE	≤ 25		≤ 30		

(*) en vías de servicio

Comprobamos que este material nos valdría en capa de rodadura en el que caso de tráficos no tan exigentes como los T3 y T4, o en capas a intermedias o bases para cualquier tráfico.

Capítulo 4. Ensayos en laboratorio

Tras el estudio de los diferentes materiales reciclados que se podrían disponer dentro de una mezcla bituminosa, se propone incidir, al igual que se ha hecho en el estado del arte, en el uso de vidrio reciclado como árido en el aglomerado del firme de carretera. Se tomarán como referencia las granulometrías y dosificaciones de cada autor, hasta llegar a una mezcla propia que dé unos resultados, con su posterior valoración, que puedan proponerse como punto de partida a proyectos futuros.

El escaso material de vidrio reciclado y la difícil granulometría para un trabajo más detallista, hacen que los ensayos sean poco concluyentes en volumen que no en datos, de los que procederemos a establecer cuotas de posibilidad para su trabajo futuro. Estos obstáculos surgen debido a que este proyecto en cuestión, no se establece para un medio plazo; para el cual sí que se habría dispuesto de mayor rango de material, ya que las plantas de ECOVIDRIO de la zona Norte se pusieron a disposición para convenir las peticiones que se les pudieran hacer.

Sin más que concretar en el inicio de este apartado, sólo me queda argumentar que cada uno de los ensayos propuestos se ajustan a la Norma española establecida tanto en el PG-3 como en las Normas UNE que lo sustentan.

4.1. Metodología

Dosificación

El tipo de mezcla que establecí como patrón fue una mezcla cerrada AC 16S, ya que podría adaptarse mejor a los condicionantes que nos impone la utilización de este reciclado. Para ello utilicé tres tipos de áridos: ofítico, que constituye el tamaño grueso; calizo, que forma los tamaños finos; y el vidrio, que lo situaré en los tamaños por debajo de 4 mm, al igual que hacían los demás investigadores anteriores. En el caso del fíller, se ha utilizado cemento tipo CEM II 32,5, que como veremos proveerá de suficiente cohesión a toda la mezcla.

Como se comentaba en la introducción a este apartado, sólo contábamos con unos 5 kg de vidrio de desecho provenientes de la planta recicladora de Llodio (Álava). De ellos, después de tamizarlos, opté por usar las cantidades que se integraban dentro de estos dos intervalos: 0,5/2 mm y 2/4 mm. La elección de ambos se debe a que no se disponía de suficiente cantidad de material por debajo de 0,5 mm como para contribuir a una mezcla más homogénea en cuanto al uso del vidrio; y en el caso de

tamaños mayores, los estudios comentados les relegan por su excesiva lisura y falta de rozamiento interno.

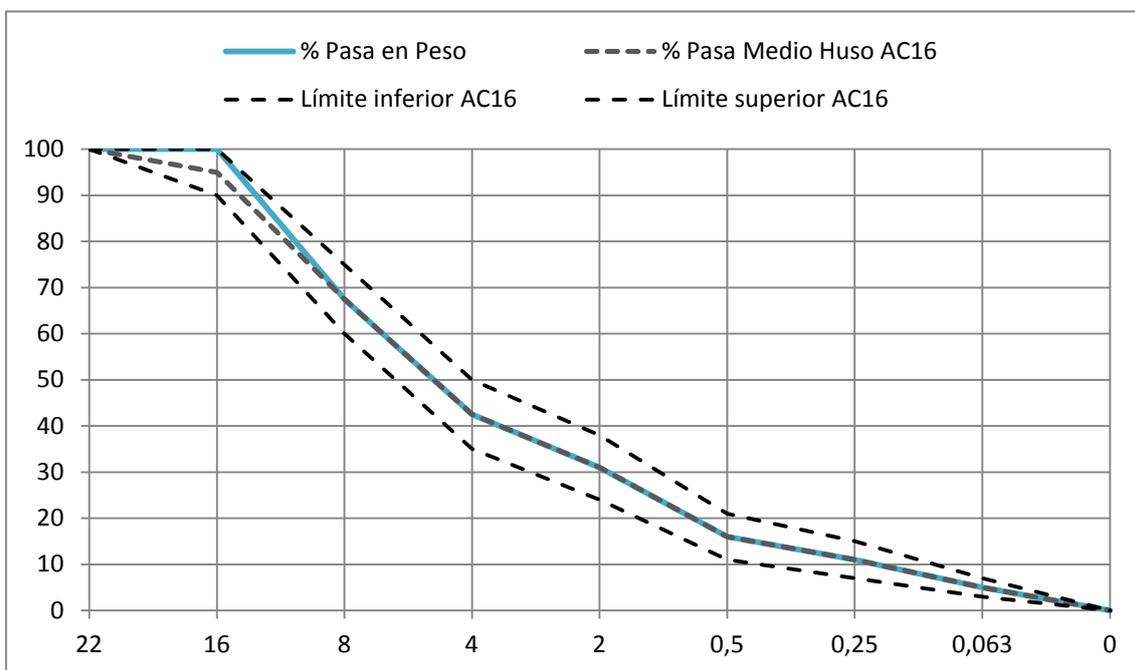


Ilustración 44. Fases de tamizado del material una vez llegado al laboratorio. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).

Una vez obtenido el material con el que podría ensayar las distintas probetas, se propone la granulometría establecida por la Norma para la AC 16S en el centro del uso, trabajando con dos mezclas con diferentes materiales. Una debía ser la que representara la referencia de cada ensayo; con lo cual sólo estaba formada por ofita, caliza y cemento. La que establece el comportamiento de vidrio, tendrá los materiales antes citados y una cantidad de reciclado del 12% del peso sobre árido. Veíamos como en algunos estudios llegaban a porcentajes cercanos al 20%, aunque también existían otros que tomaban como máximo el 15%; por lo que el rango del 12% puede ser aceptable para estas pruebas de inicio.

En cuanto a la dosificación del ligante, se propone la utilización de un betún convencional B 50/70 llegando hasta el 4,65% sobre mezcla. No se probó si dicho porcentaje coincide con el óptimo para estas mezclas, pero es un dato más que aproximado y que suele tener buen comportamiento. Por último, sobre la dosificación, hay que decir que se estudió respecto a los pesos de cada material, y no respecto a

una dosificación más fina basada en el volumen, ya que ninguno de los materiales se situaba en densidades muy distantes entre sí.



AC 16S con vidrio(12% s/a)				
	Ofita	Vidrio	Caliza	Cemento
% Peso	59	12	24	5

AC 16S Referencia			
	Ofita	Caliza	Cemento
% Peso	69	26	5

Peso específico de áridos

El primer paso, incluso anterior al de dosificar nuestra futura mezcla, es el de conocer las densidades de los materiales con los que contamos y hallar su valor conjunto por medio del método de los picnómetros. Este método reglado por la UNE N 1097-6, se basa en conocer el volumen desalojado por cada partícula dentro de un picnómetro lleno de agua o aceite de parafina para después, restar los valores de las respectivas pesadas sin y con árido, que nos darán el valor de la densidad aparente. Se controla la temperatura de la sala para conocer con exactitud el valor de la densidad del líquido que nos ayuda con la medida y, una vez dispuesto el árido en el recipiente, se debe agitar con asiduidad para que todas las burbujas de aire que se quedan incrustadas dentro del mineral salgan y permitan un enrasado más verídico. Las burbujas de aire de las que hablamos, son aquellas que se sitúan en las cavidades de las partículas que tienen contacto con el exterior y podrían ser ocupadas por el betún

en la mezcla o pertenecer al porcentaje de huecos que hemos de permitir dentro de la misma. Aquellos huecos que no pueden ser saturados se contabilizarán como pertenecientes al material y no serán objeto de la medida de densidades.

FECHA:	lunes, 27 de mayo de 2013	MUESTRA:	VIDRIO - JAVIER	
			59 % Ofita - 24 % Caliza - 12 % Vidrio - 5 % Cemento	
Referencia del Picnómetro			1	3
Peso del Picnómetro vacío				
Peso Picnómetro enrasado con agua (gr.)	A		1669,81	1690,95
Peso Picnómetro con 400 cc. de agua (gr.)	B		905,90	846,35
Peso Picnómetro con 400 cc. + árido (gr.)	C		1705,76	1646,12
Peso Picnómetro enrasado + árido (gr.)	D		2186,95	2208,14
Masa de muestra seca (gr.)	$F = C - B$		799,86	799,77
Volúmen ocupado por muestra (cc.)	$V = F + A - D$		282,72	282,58
Temperatura del agua destilada	Grados		20	20
Densidad del agua destilada (gr/cm^3)	ρ_t		0,9983	0,9983
Volúmen real de la muestra (cc.)	$V.\text{real} = V/\rho_t$		283,21	283,07
Peso específico del árido (gr/cm^3)	$p.e. = F/V.\text{real}$		2,824	2,825

Peso específico en (gr/cm^3)

2,825

Densidad de probetas

Una vez analizado el árido con el que se va a trabajar, nos disponemos a fabricar unas probetas Marshall que nos permitan la obtención de diversos parámetros fundamentales para la caracterización de cualquier mezcla. El primero de ellos, surge simplemente por la fabricación y medición de pesos sumergidos, saturados y secos; es el de la densidad aparente de la mezcla en cuestión, que conllevará el conocimiento del contenido de huecos de la mezcla. Estas mediciones se regulan respecto de la UNE N 12697-6, una vez fabricada cada una de las probetas en los moldes Marshall de 101,6 mm de diámetro y 87,3 mm de alto y con una compactación por impacto (75 golpes por cara). Sobre el aglomerado de cada una de las probetas, hay que comentar que cada una de ellas están en la mezcladora durante 3 minutos, los suficientes para una envuelta más que aceptable. El detalle se establece a la hora de la integración del polvo mineral, que entra en la mezcladora 1 minuto después de todo el árido restante y el betún, quedando recubierto el esqueleto mineral de la mezcla.



Ilustración 45. Compactadora y mezcladora para probetas tipo Marshall con molde en posición de compactación. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).

En nuestro caso, el cupo de fabricación lo establecemos con 3 probetas de referencia y otras tantas con el vidrio reciclado. En la comparación se denotará el menor peso específico del vidrio respecto del resto de materiales minerales.

		temp.	17	ρ_w	0,9988	temp.	17	ρ_w	0,9988
	Porcentaje de betún sobre mezcla	4,65				4,65			
	Porcentaje de betún sobre árido %	4,88	% =	58,5	gramos	4,88	% =	58,5	gramos
	Identificación de las probetas	1A	2A	3A		1B	2B	3B	
m_1	Peso seco de la probeta (gr.)	1.222,6	1.285,1	1.347,6		1.250,0	1.251,9	1.347,9	
m_2	Peso saturado sumergido (gr.)	746,1	783,8	815,9		755,8	759,0	809,0	
m_3	Peso saturado super. seca (gr.)	1.224,2	1.285,7	1.348,6		1.250,9	1.252,5	1.348,8	
V	Volumen de la probeta (cm ³)	478,1	501,9	532,7		495,1	493,5	539,8	
ρ_{bssd}	Densidad aparente (gr/cm ³)	2,554	2,558	2,527		2,522	2,534	2,494	
ρ_{bssd}	Media de las densidades aparentes (gr/cm ³)	2,546				2,517			
Las probetas se sumergen un tiempo de 30 minutos		Inicio:		Final:		Inicio:		Final:	

Para el caso de otras 6 probetas fabricadas para su ensayo a resistencia conservada (sensibilidad al agua), el grado de compactación es menor y consta de 50 golpes por cada cara, produciendo unas densidades menores y un mayor contenido de huecos en mezcla.

		temperatura 17 pw 0,9988					
Porcentaje de betún sobre mezcla		6,00					
Porcentaje de betún sobre árido %		6,38 %		76,6 gramos			
Identificación de las probetas		1	2	3	4	5	6
m_1	Peso seco de la probeta (gr.)	1.252,1	1.250,2	1.253,9	1.252,4	1.251,5	1.251,9
m_2	Peso saturado sumergido (gr.)	750,6	750,4	751,6	751,6	751,6	749,2
m_3	Peso saturado super. seca (gr.)	1.253,2	1.250,6	1.254,8	1.253,8	1.252,3	1.253,2
V	Volumen de la probeta (cm ³)	502,6	500,2	503,2	502,2	500,7	504,0
ρ_{bssd}	Densidad aparente (gr/cm ³)	2,488	2,497	2,489	2,491	2,500	2,485
ρ_{bssd}	Media de las densidades aparentes (gr/cm ³)	2,492					
Las probetas se sumergen un tiempo de 30 minutos							

Ensayo de estabilidad y deformación Marshall

Una vez completada la fabricación de las 6 probetas asignadas para ser ensayadas como si de un test Marshall se tratara, sólo dedicamos 4 de ellas para el estudio reflejado en la Norma NLT 159/00, que hable sobre la resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall. A pesar de ser una recomendación técnica, forma parte del PG 3 de debido cumplimiento para todo tipo de mezcla destinado a una carretera española.

Antes de completar la explicación de este ensayo, he de mencionar lo importante de las temperaturas a la hora del aglomerado y la compactación. El betún, al ser convencional, basta con tenerlo sobre los 135 °C, temperatura suficiente para tener dicho material con una viscosidad líquida que permita una envuelta más sencilla, sin tener que provocar algún efecto perjudicioso sobre él. Si superáramos esa temperatura, habría un efecto de envejecimiento sobre el ligante, lo que lo haría inservible para un ensayo de estas características.



Ilustración 46. Embudo, cuello, molde y tapa para fabricación de probetas tipo Marshall. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).

El árido se dispondrá a una temperatura algo mayor, en torno a los 140°C , ya que la inercia térmica del mineral mantiene durante más tiempo la temperatura asignada, y así hacer más fácil la mezcla. En el mismo horno que el árido se mantendrá la varilla mezcladora, que de esta forma repelerá el material que quiera adherirse a su contorno.

Pasando de nuevo al ensayo propiamente llamado, éste trata sobre la determinación de la estabilidad y la deformación que sufre la probeta ante la acción de una carga uniaxial. La probeta estará coaccionada lateralmente por medio de una mordaza que impide su movimiento en dicha dirección. Se emplea en mezcla con partículas de un tamaño máximo inferior a 25 mm en las que el aglomerante sea un betún asfáltico.

Previamente a la rotura de la probeta, ésta es mantenida a 60°C durante 50 minutos, no excediendo los 30 segundos desde su salida del baño hasta la rotura.

Para definir los resultados diremos que la estabilidad es la carga máxima en N, para romper la probeta y multiplicada por un factor de corrección establecido por su altura. La deformación consistirá en la disminución de diámetro vertical en mm, experimentado en la probeta entre el comienzo de ensayo y la rotura del material.



Ilustración 47. Probetas con vidrio reciclado antes y después de ensayo Marshall. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013)

Resistencia conservada (Sensibilidad al agua)

A la par de la fabricación de las otras probetas, ya comentamos en los otros apartados que se tenía la intención de fabricar 6 probetas que determinarán la conservación de las características resistentes de la mezcla ante el paso de agua. No se comentará la forma de aglomerado, ya que es la misma que en los otros casos, con la salvedad de sólo compactarlo con 50 golpes.

Después de su desmoldeo, se procede con las medidas de alturas y pesos que asignen la densidad aparente de cada una de ellas, con gran importancia en este caso, ya que al dividir la muestra en dos grupos, húmedas y secas; el rango de variación de densidades entre probetas del mismo grupo ha de estar por debajo de $0,015 \text{ gr/cm}^3$. Con los grupos determinados, las probetas que forman la sección húmeda de la muestra pasan por un estado de vacío, que conlleva 30 minutos a una presión que ronda los 700 kPa, a la que se le mantiene la siguiente media hora. Luego de esta espera, dicho subconjunto se deja en un baño a 40°C durante 68-72 horas.

Antes de producir la rotura de las distintas probetas pertenecientes a cada grupo, hay que colocar al grupo de secas en una cámara a 15°C ; y a las otras, las húmedas en un baño en el que vean rebajada su temperatura hasta la misma que las secas. Después de este paso, prolongado durante unas dos horas aproximadamente, se procede con la rotura.



Ilustración 48. Cámara de vacío para probetas húmedas. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).

La rotura establecida en este ensayo difiere del Marshall en que no existe ningún tipo de coacción lateral en la probeta, y se limita a una rotura indirecta con una mordaza que veremos a continuación. El esfuerzo uniaxial de compresión, actuará de tal manera que la hablada rotura se pudiera producir por pura descohesión de partículas y betún, como por rotura de las partículas minerales.

Los resultados serán tratados de tal manera que si no existe una descompensación por encima del 15% del esfuerzo de rotura establecido por la probetas secas (referencia de ensayo), dicha mezcla puede ser ejecutada como capa de rodadura en carretera. Si ese porcentaje se sitúa más allá del 15, pero por debajo del 20%, dicha mezcla podría prestar su servicio en otras capas de menos exigencia como las intermedias o bases.



Ilustración 49. Mordaza para ensayo de resistencia conservada. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).



Ilustración 50. Prensa para rotura de probetas Marshall y sensibilidad al agua. (Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, 2013).

Módulos de rigidez

El objetivo de este ensayo es caracterizar la rigidez de las mezclas bituminosas mediante test alternativos de flexión y tracción directa o indirecta. En nuestro caso, se trata de un ensayo con las probetas Marshall no utilizadas para conocer la estabilidad, y que conllevará la aplicación de una carga controlada con el soporte establecido por la Norma UNE N 12697-26.

Este proceso clasifica las distintas mezclas en función de su rigidez, como guía de comportamiento relativo de las mismas en el pavimento, y con el fin de pronosticar su trabajo estructural en la carretera. Contando con sólo dos probetas para definir la rigidez de ambas mezclas (referencia y vidrio), se han dispuesto en dos direcciones distintas habiéndolas girado 90 grados, procurando un tiempo de asimilación del esfuerzo anterior (por norma es de 2 horas; en nuestro caso, 24 horas).

Con este ensayo podríamos sacar conclusiones aproximadas, ya que cuenta con una gran dispersión en sus mediciones; y con la falta del ensayo de pista, no deja demasiado claras las propiedades del material y las diferencias relativas para con la mezcla en la que se incluyó vidrio reciclado. A partir de éste, será mejor sacar una razón sensata para seguir con el estudio de la mezcla diseñada, tomando como valor a tener en cuenta los 6000 MPa.

El proceso enmarcado en este ensayo es el siguiente:

- Adaptación de la temperatura de la sala de ensayo y probetas a 20 °C, que se sitúa sobre 2 horas.
- Colocación de pletinas metálicas sobre las probetas para hacer posible la sujeción del sensor de deformación y producir una medida exacta sobre el diámetro de la dicha probeta.
- Compresiones puntuales (2 milisegundos) de 3,5 kN, contando hasta 16 de ellas; de las cuáles se miden las comprendidas entre la número 11 y la número 15, para así deshacernos de cualquier efecto de borde o descompensación de los esfuerzos por la calibración de la máquina.
- Recopilación de datos.

Ensayo mediante compactador giratorio

Con este ensayo especificamos el método a seguir para la compactación de probetas cilíndricas de la mezcla a diseñar, mediante compactador giratorio. Este proceso se consigue combinando un esfuerzo resultante vertical y una acción de deslizamiento giratorio. Su fin último será el de conocer el contenido de huecos de aire en la mezcla, para un número de giros dado; y conociendo a su vez la curva de densidad y altura de probeta, para el establecido número de giros.

Para este ensayo debemos de establecer la masa requerida por la Norma UNE N 12697-31, extraída de la siguiente fórmula y proporcional a la densidad máxima de la mezcla y a la altura mínima de la probeta compactada, correspondiente al 0% de huecos de aire:

$$M = 10^{-9} \pi \frac{D^2}{4} h_{\min} \rho_{\max}$$

A su vez, este test también nos revelará información sobre el cortante soportado por la probeta en cada momento del mismo. Conseguirá unos datos fiables para conocer el comportamiento de la mezcla sin sufrir la compactación por impacto.

4.2. Resultados

En este apartado quedará reflejado el resumen de los resultados de los ensayos realizados, con las aclaraciones oportunas detallando a cada uno.

Ensayo de estabilidad y deformación Marshall

A partir del ensayo Marshall no sólo conocemos el estado tensional y deformacional de nuestras probetas, sino que también nos complementa la información con la densidad de las probetas y el porcentaje de huecos que tenemos en mezcla.

% BETUN SOBRE MEZCLA :	4,65	PROBETAS VIDRIO				MEDIA
		1	2	3	4	
DENSIDAD	gr/cm ³	2,493	2,522	2,534		2,516
HUECOS EN MEZCLA	%	4,6	3,5	3,0		3,7
HUECOS EN ARIDOS	%	15,9	14,9	14,5		15,1
ESTABILIDAD	kp	1.167	1.102			1.135
DEFORMACIÓN	mm	2,25	1,75			2,00

% BETUN SOBRE MEZCLA :	4,65	PROBETAS REFERENCIA				MEDIA
		1	2	3	4	
DENSIDAD	gr/cm ³	2,526	2,554	2,558		2,546
HUECOS EN MEZCLA	%	5,3	4,2	4,1		4,5
HUECOS EN ARIDOS	%	16,7	15,8	15,6		16,0
ESTABILIDAD	kp	1.463	1.424			1.444
DEFORMACIÓN	mm	1,94	2,05			2,00

Sabiendo que para formar parte de un paquete de firme para tráfico tipo T00 y T0, hay que disponer de una estabilidad mayor a 15 kN y una deformación entre 2 y 3 mm, pasaremos a reflexionar con nuestros resultados.

En el caso de las probetas que incluyen vidrio reciclado al 12% sobre el peso de árido, la deformación no resulta un problema para su puesta en obra en todo tipo de carreteras, ya que está debe encontrarse entre 2 y 3 mm, aproximadamente. Sin embargo, la estabilidad queda un poco en entredicho, sólo pudiendo llegar a 11,4 kN; y mucho más en entredicho queda, como cabía suponer por otra parte, el contenido en huecos en mezcla. Es menos alarmante de lo que se esperaba de un tamaño de partícula de vidrio reciclado entre 4 y 2 mm, pero aún así no podría ser válido en

ningún tipo de capa, salvo capa rodadura en arcenes y con tráficos mínimos. El nivel de huecos en árido es aceptable.

Los resultados de las probetas referencia son de cierta calidad y sólo se les puede poner un pero en cuanto a la estabilidad, ya que no consiguen llegar a los 1500 kp o 15 kN, exigidos por Norma para una capa de rodadura. Otro detalle sería el que estaría bien el subir un poco el contenido de huecos en mezcla, aunque sólo para disponer de un mejor trabajo, ya que se encuentra dentro del rango establecido en la Norma. La variación entre densidades Marshall se sitúa en $0,03 \text{ gr/cm}^3$ en mezcla, mientras entre áridos se establecía en $0,07 \text{ gr/cm}^3$; difuminando el factor que impone el 12% de vidrio bajando el valor de las mismas.

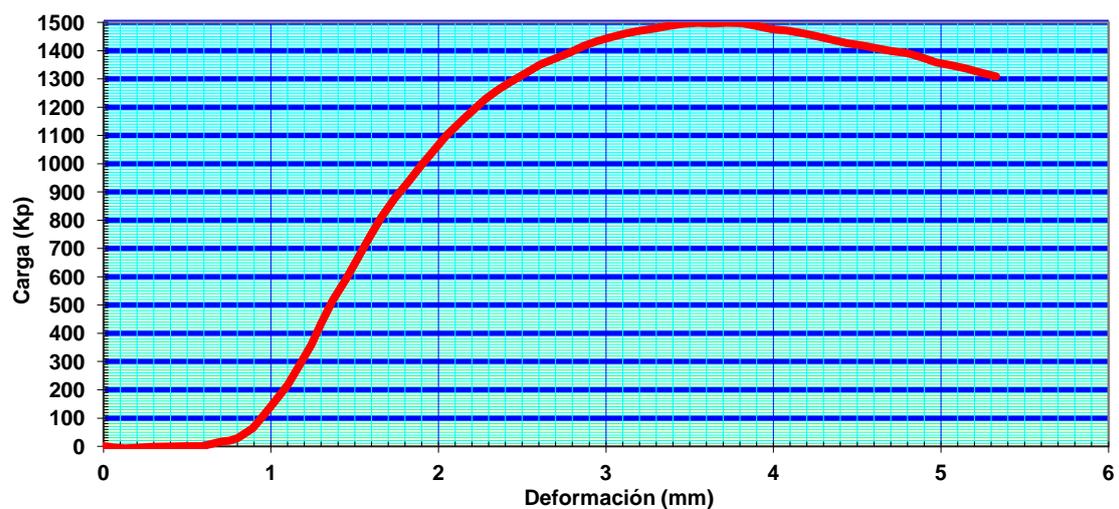
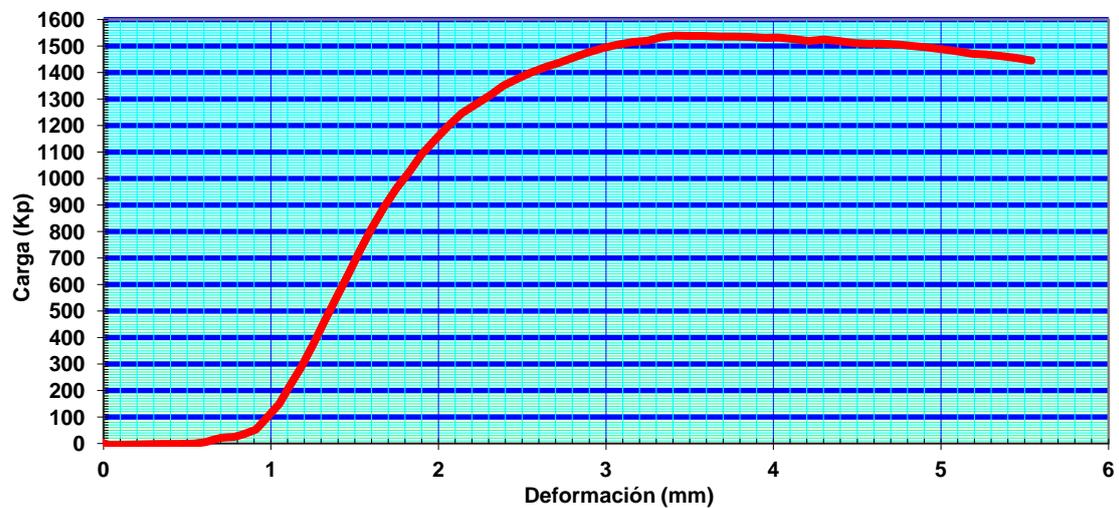


Ilustración 51. Gráficas tensión-deformación para el estudio de estabilidad y deformación sobre probetas Marshall. Probetas de Referencia (Ofita-Caliza-Cemento).

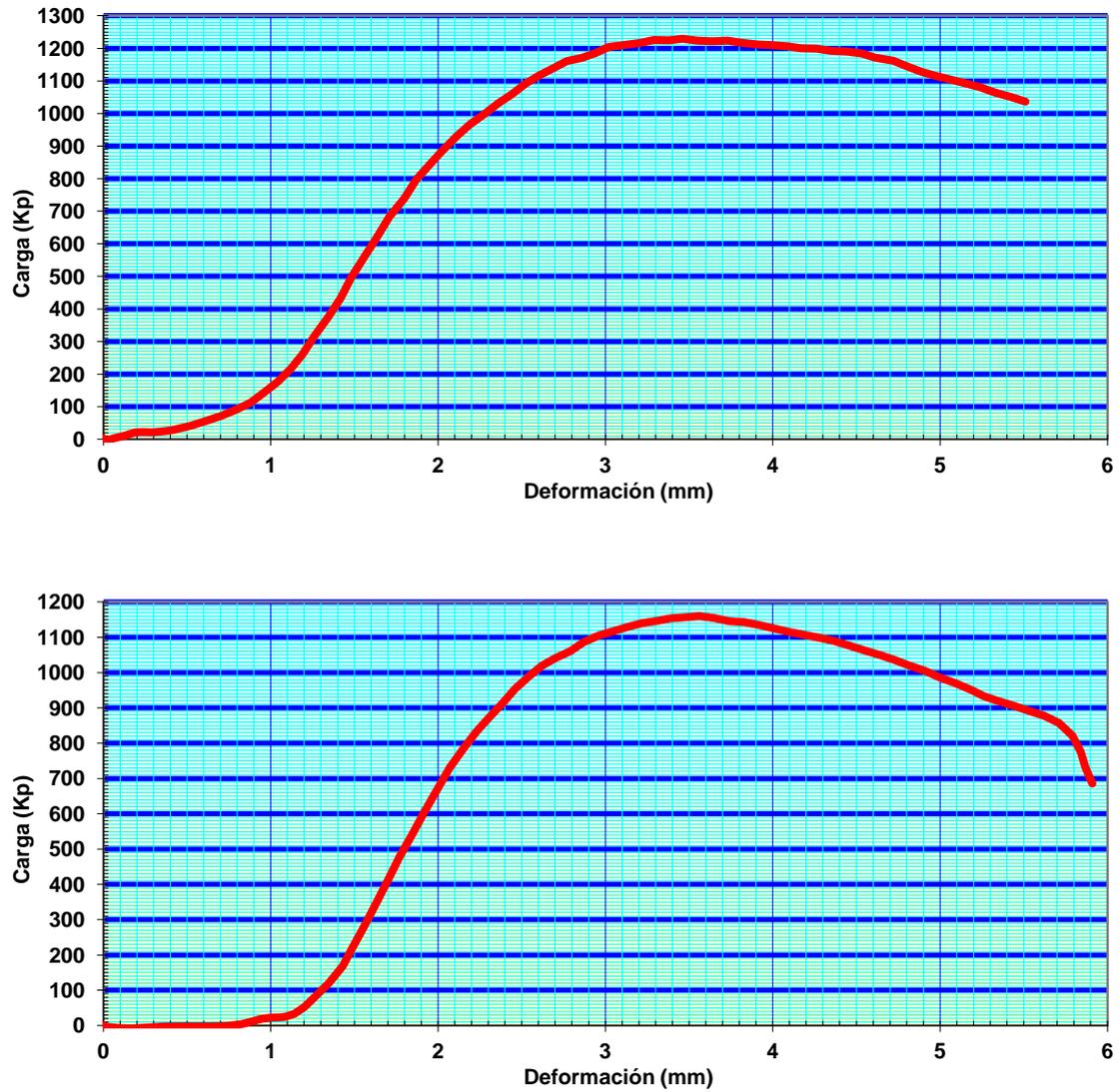


Ilustración 52. Gráficas tensión-deformación para el estudio de estabilidad y deformación sobre probetas Marshall. Probetas con vidrio reciclado (Ofita-Caliza-Vidrio-Cemento).

Ensayo de resistencia conservada (sensibilidad al agua)

En este apartado podremos observar las diferencias entre las probetas secas y húmedas, para poder concluir si son válidas o no respecto al efecto del agua en ellas.

NORMA EN 12697-6:2003+A1:2007 Procedimiento B: Densidad aparente - Superficie saturada seca (SSD)

IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS	1	2	3	4	5	6		
PESO SECO DE LA PROBETA (gr.)	1.252,1	1.250,2	1.253,9	1.252,4	1.251,5	1.251,9		
PESO SATURADO SUMERGIDO (gr.)	750,6	750,4	751,6	751,6	751,6	749,2		
PESO SATURADO SUPERFICIE SECA (gr.)	1.253,2	1.250,6	1.254,8	1.253,8	1.252,3	1.253,2		
VOLUMEN (cm ³)	502,6	500,2	503,2	502,2	500,7	504,0		
DENSIDAD APARENTE (gr/cm ³)	2,488	2,497	2,489	2,491	2,497	2,481		

	SECAS			HÚMEDAS				
IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS	4	5	6		1	2	3	
DENSIDAD PROBETA (gr/cm ³)	2,491	2,497	2,481		2,488	2,497	2,489	
DENSIDAD MEDIA DE CADA GRUPO (gr/cm ³)	2,490				2,491			
DENSIDAD MEDIA DE CADA GRUPO no puede ser superior a 0,015 (gr/cm ³)	CUMPLE							

Una vez hechas las mediciones de pesos y densidades, se intentan agrupar de manera que no existan demasiadas diferencias entre cada uno de los grupos y entre ellas. Luego se pasará al ciclo de vacío en el caso de las húmedas, incluidas de 68 a 72 horas en el baño de 40 °C comentado en la preparación del ensayo. Antes de este baño, se miden diámetros y alturas para comprobar que cumplen con la Norma: no aumentar de volumen en un 2%.

	HÚMEDAS									
IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS	1	2	3				1	2	3	
ALTURA 1 (mm) CON PASTILLAS	90,95	90,16	90,73				DIAMETRO 1 (mm)	101,35	101,50	101,45
ALTURA 2 (mm) CON PASTILLAS	91,06	90,93	90,41				DIAMETRO 2 (mm)	101,52	101,54	101,40
ALTURA 3 (mm) CON PASTILLAS	90,64	90,48	90,24				DIAMETRO 3 (mm)	101,30	101,64	101,80
ALTURA 4 (mm) CON PASTILLAS	91,28	89,90	90,50				DIAMETRO 4 (mm)	101,35	101,64	101,47
							DIAMETRO 5 (mm)	101,35	101,50	101,38
ALTURA 1 (mm) SIN PASTILLAS	63,90	63,11	63,68				DIAMETRO 6 (mm)	101,58	101,50	101,52
ALTURA 2 (mm) SIN PASTILLAS	64,01	63,88	63,36				DIAMETRO MEDIO DE CADA PROBETA (mm)	101,4	101,6	101,5
ALTURA 3 (mm) SIN PASTILLAS	63,59	63,43	63,19							
ALTURA 4 (mm) SIN PASTILLAS	64,23	62,85	63,45							
ALTURA MEDIA (mm)	63,93	63,32	63,42							

Volumen de las probetas húmedas antes del vacío				Volumen de las probetas húmedas después del vacío			
1	2	3		1	2	3	
513,0	509,3	516,0	(cm ³)	516,4	512,9	513,2	(cm ³)
Se rechazan las probetas cuyo volumen aumente más del 2 %				CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	

Por último, se procede con la rotura de todas las probetas después de ponerse a la temperatura de 15 °C; ya sean en una cámara frigorífica para las secas o en un baño a dicha temperatura, para las húmedas. Los resultados salidos de cada una de ellas son los mostrados a continuación:

	SECAS			HÚMEDAS		
IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS	4	5	6	1	2	3
P= CARGA MÁXIMA DE ROTURA (Kgf)	1.925	1.989	1.817	1.659	1.688	1.718
RESISTENCIA TRACCIÓN (Rt) $Rt = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h \cdot D} \frac{Kgf}{cm^2}$	18,85	19,70	17,96	16,29	16,71	16,99
Valor medio de cada subgrupo	18,84			16,66		
Comprobar que los resultados parciales de la tracción indirecta de cada probeta, no difiere del 17 % del valor medio (EN 12697-23:2003)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
ITSR (%)	88					
	CUMPLE NORMATIVA RODADURA					

Para capas de rodadura, el ITSR tendrá un valor mínimo del **85%**

Para capas de base e intermedia, el ITSR tendrá un valor mínimo del **80%**

Como vemos no existe problema para utilizar mezcla con reciclado de vidrio para la situación de efectos perniciosos del agua.

Módulos de rigidez

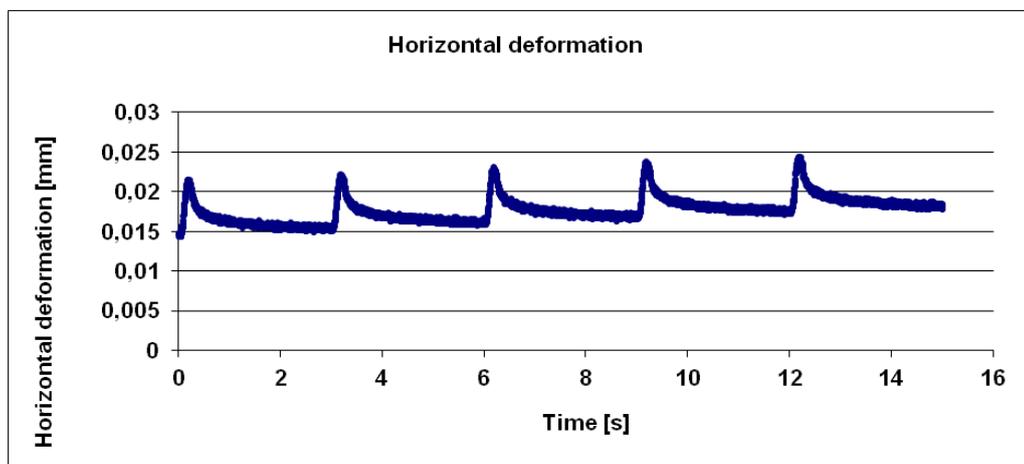
Como decíamos en la explicación de este ensayo, no existirán conclusiones lo suficientemente tajantes como para reflejar en este proyecto, pero si pueden tenerse en cuenta para contemplar qué posibilidades tiene la mezcla con vidrio y sus diferencias relativas con la mezcla de árido virgen.

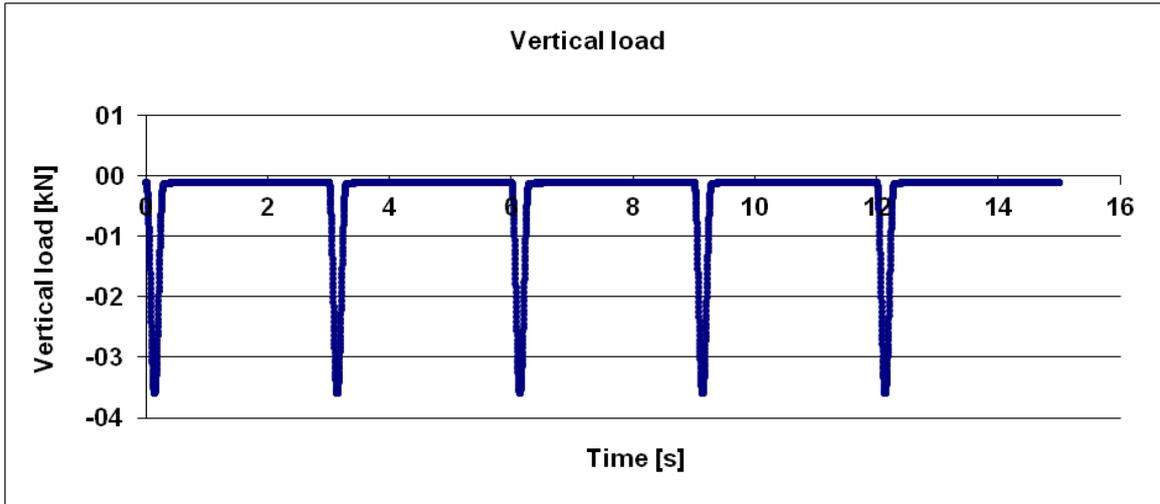
Primeramente, reflejaremos los resultados de nuestra probeta de referencia, la cual obtuvo una desviación algo exagerada; sin embargo habitual en un ensayo como este. Estos fueron los resultados y los valores de las cargas y la deformación sufrida en cada uno de los esfuerzos puntuales:

Code: Árido RM 24-6- T [°C] : 20		
Load [kN]	Deflection [mm]	ITT Stiffness [MPa]
3,484	0,0071	4505
3,482	0,0072	4439
3,489	0,0073	4420
3,490	0,0073	4402
3,488	0,0072	4460
Stiffness S'_m [MPa]		4445
Density [kg/m ³]		2473

Code: Árido RM 25-6- T [°C] : 20		
Load [kN]	Deflection [mm]	ITT Stiffness [MPa]
3,454	0,0044	7227
3,457	0,0045	7070
3,461	0,0045	7074
3,463	0,0045	7076
3,468	0,0046	6955
Stiffness S'_m [MPa]		7080
Density [kg/m ³]		2473

Statistics: Mean values	
T [°C]	20,0
Stiffness S'_m [MPa]	5763
Standard dev. of S' _m [MPa]	1863
Density [kg/m ³]	2473





Como anticipábamos, vemos que la desviación se sitúa en torno a los 1900 MPa de una medida a otra, siendo ésta una diferencia demasiado abultada entre dos direcciones de la misma probeta. No pueden existir planos tan distintos dentro de la mezcla, a pesar de la heterogeneidad con la que trabajamos en mezclas bituminosas.

La media de las medidas se puede presentar como aceptable al tocar casi el rango de los 6000 MPa, que representan el lugar de las mezclas habituales.

Respecto a la mezcla con el vidrio de desecho incluido, estos eran los resultados del ensayo:

Code: Vidrio VM 24-6, T [°C] 20		
Load [kN]	Deflection [mm]	ITT Stiffness [MPa]
3,485	0,0066	4833
3,484	0,0065	4904
3,484	0,0068	4687
3,488	0,0067	4759
3,486	0,0067	4716
Stiffness S'_m [MPa]		4780
Density [kg/m ³]		2446

Code: Vidrio VM 25-6, T [°C] 20		
Load [kN]	Deflection [mm]	ITT Stiffness [MPa]
3,457	0,0057	5524
3,459	0,0057	5501
3,460	0,0057	5503
3,466	0,0059	5321
3,466	0,0058	5411
Stiffness S'_m [MPa]		5452
Density [kg/m ³]		2446

Statistics: Mean values	
T [°C]	20,0
Stiffness S'_m [MPa]	5116
Standard dev. of S' _m [MPa]	475
Density [kg/m ³]	2446

Para la mezcla con vidrio, las medidas son mucho más cercanas entre sí y podrían ser tenidas más en cuenta que las anteriores. También digo que se podrían tomar más en cuenta al ser menores que en el caso del material virgen, que debería de contar, de principio, con una rigidez y cohesión mayor que la mezcla diseñada con el árido reciclado.

Ensayo mediante compactador giratorio

Los resultados provenientes de este ensayo, se enmarcan al igual que los hechos en Marshall, para seguir caracterizando a la mezcla y saber dónde se encuentran las posibilidades de mejora. Uno de los parámetros principales es el nivel de huecos medidos según los giros de la máquina y que han de encontrarse en unos niveles parecidos al de la compactación por impacto. Cabe decir que en el caso de la mezcla con vidrio, esperábamos que el material reciclado (con partículas mayores de 2 mm) pudiera sufrir menos la rotura con esta compactación, pero como veremos a continuación no ha sido así al completar el ciclo entero de ensayo, cifrado en 512 vueltas.

Para la probeta 1, éstas han sido las mediciones:

Test results (corrected)

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	V %	VMA %	VFB %	Shear kN/m ²	%Gmm
4	81,0	2122	17,6	26,9	34,6	259	82,4
5	80,3	2141	16,9	26,3	35,7	271	83,1
6	79,7	2157	16,3	25,7	36,7	279	83,7
8	78,7	2184	15,2	24,8	38,6	290	84,8
10	78,0	2205	14,4	24,0	40,2	293	85,6
12	77,4	2222	13,7	23,4	41,5	298	86,3
16	76,4	2252	12,6	22,4	43,9	305	87,4
20	75,6	2274	11,7	21,7	45,9	311	88,3
25	74,9	2297	10,8	20,9	48,1	317	89,2
32	74,1	2320	9,9	20,1	50,6	333	90,1
40	73,4	2342	9,1	19,3	53,1	338	90,9
50	72,8	2363	8,3	18,6	55,6	338	91,7
64	72,1	2386	7,4	17,8	58,6	351	92,6
80	71,5	2406	6,6	17,1	61,5	352	93,4
100	70,9	2425	5,9	16,5	64,4	360	94,1
128	70,3	2445	5,1	15,8	67,9	362	94,9
160	69,9	2461	4,4	15,2	70,8	367	95,6
200	69,4	2477	3,8	14,7	73,9	368	96,2
256	69,0	2493	3,2	14,1	77,3	369	96,8
320	68,6	2506	2,7	13,7	80,2	371	97,3
400	68,3	2517	2,3	13,3	82,9	358	97,7
Final: 0	68,0	2528	1,8	12,9	85,7	346	98,2

Vemos que la densidad al final de todo el ciclo se puede asemejar a las anteriores ensayadas en otras compactaciones, y que de igual manera en el caso del volumen de huecos, muy inferior a lo que se necesita en la realidad. Ese porcentaje de 1,8 en huecos está lejos del 5%, óptimo para mezclas en capa de rodadura o del 6% en otras capas. Diríamos que la mezcla se debería situar en los valores que nos revela en los 128 giros, donde los valores en todos los parámetros podrían ser aceptables.

Pasaremos a la probeta 2, en la que sucederá algo parecido al de la primera, aunque con un porcentaje algo mejor en huecos:

Test results (corrected)

ICT Cycles	Height mm	Density kg/m ³	V %	VMA %	VFB %	Shear kN/m ²	%Gmm
4	81,7	2102	18,4	27,6	33,4	250	81,6
5	81,0	2120	17,7	27,0	34,4	259	82,3
6	80,4	2138	17,0	26,4	35,5	270	83,0
8	79,5	2162	16,1	25,5	37,1	287	83,9
10	78,7	2182	15,3	24,8	38,5	301	84,7
12	78,1	2199	14,6	24,2	39,7	311	85,4
16	77,2	2225	13,6	23,4	41,7	323	86,4
20	76,5	2247	12,8	22,6	43,5	330	87,2
25	75,8	2267	12,0	21,9	45,3	333	88,0
32	75,0	2292	11,0	21,1	47,6	352	89,0
40	74,3	2313	10,2	20,3	49,8	350	89,8
50	73,6	2335	9,3	19,6	52,3	351	90,7
64	72,9	2358	8,5	18,8	54,9	361	91,5
80	72,3	2377	7,7	18,1	57,5	345	92,3
100	71,7	2397	6,9	17,4	60,2	350	93,1
128	71,1	2417	6,1	16,7	63,3	354	93,9
160	70,5	2436	5,4	16,1	66,3	355	94,6
200	70,0	2454	4,7	15,5	69,4	346	95,3
256	69,6	2469	4,1	14,9	72,4	340	95,9
320	69,2	2484	3,6	14,4	75,3	340	96,4
400	68,8	2498	3,0	13,9	78,5	326	97,0
Final: 0	68,4	2511	2,5	13,5	81,4	325	97,5

Capítulo 5. Conclusiones

El epílogo de todo trabajo de investigación que conlleva ensayos sobre materiales o técnicas nuevas, debe contener una serie de conclusiones que reflejen por dónde se cree que seguiría la evolución del trabajo. No he tenido ni el tiempo suficiente ni el material necesario para esclarecer, en mayor medida, la posibilidad de incluir el vidrio reciclado como árido en la mezcla bituminosa; pero aún sin datos concluyentes, parece haber una esperanza que invitaría a modificar lo ya ensayado. Expongo los puntos que creo, debieran ser el punto de partida de nuevos trabajos al respecto y en los que, también, incluiré las ideas de todos los autores leídos para el Estado del Arte comentado:

- El vidrio es un material capaz de formar parte de la mezcla bituminosa en forma de partículas menores a 2 mm. Las partículas mayores a ese tamaño tienden a quebrar en la compactación y crean los problemas de huecos, que impiden su paso a la obra real.
- El porcentaje de vidrio sobre árido puede estar bastante acertado en torno al 15%. En este caso, usamos un criterio más conservador con el 12%, que ha dado sus frutos, ya que tiene más importancia la fracción granulométrica que la cantidad aportada; siempre que no suba de ese dato del 15%.
- La cantidad de ligante se sitúa alrededor de los porcentajes habitualmente utilizados en mezclas convencionales.
- Para mezclas cerradas, la cantidad de cemento o cal hidratada necesaria para la adhesión de todos los componentes (incluido el vidrio), no ha de ser mayor a la cantidad establecida por la granulometría de la Norma, para el fíller de aportación. En los ensayos antes esgrimidos no existe indicio de que con una cantidad mayor al 5% aplicado en las mezclas, mejore la cohesión.
- El uso de un ligante modificado podría mejorar el comportamiento de la estabilidad Marshall y la resistencia conservada, esta última dentro de las especificaciones requeridas.
- Aparentemente no debiera existir sobrecoste en la utilización de vidrio como componente del árido de la mezcla, ya que no cambiaría la forma de producción dentro de una planta y produciría un material más barato y con condiciones aceptables de utilización.
- Los efectos favorables en el Medio Ambiente se aumentarían con el uso de escorias como árido grueso en esta mezcla. En otros casos, ha funcionado con grandes resultados y sin la contraprestación de hinchamiento, tan habitual en este tipo de material.

Capítulo 6. Resumen fotográfico de los ensayos

En este apartado he querido reflejar todas las imágenes recopiladas en el tiempo que he estado colaborando en el Laboratorio de Caminos, incluyendo instrumental que caracteriza áridos y mezclas, utilizados para el estudio de otros proyectos y que en éste se han quedado en el tintero, ante la imposibilidad de obtener más material de vidrio en el poco tiempo para la presentación del Proyecto Fin de Carrera.

- **Máquina para desgaste de Los Ángeles y ensayo cántabro de mezclas porosas.**



- **Compactadora de probetas de pista.**



- **Máquina de ensayo de pista. (Wheel Tracking)**



- **Mordaza con coacción lateral para ensayo Marshall.**



- Máquina de compactación giratoria.



- Roturas de probetas con vidrio en ensayo de resistencia conservada.



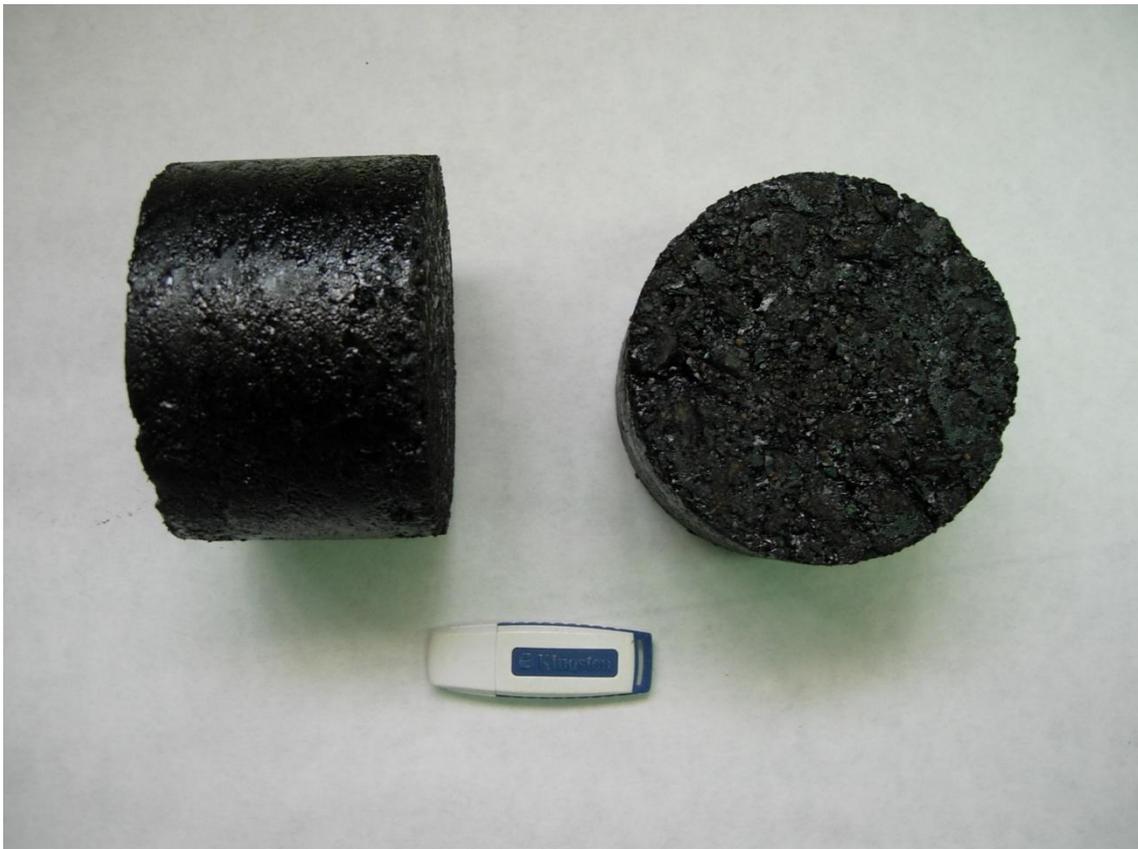
En la rotura de la foto se denotan los diversos cristales de vidrio de colores (verde y pardo), en los que se podría concluir que el hablado material no quiebra sino que produce un despegue respecto del resto de la mezcla. Esto demuestra la falta de adhesividad que tiene el vidrio dentro de la mezcla bituminosa, que no se involucra en ella de la manera que lo hace la caliza que, en ciertos casos, quebraría antes su estructura interna que deshacer la cohesión con el resto del ligante. Para sopesar esta afirmación hay que fijarse en que la rotura no es simétrica, y no aparecen materiales verdes o pardos, a uno y otro lado respecto de la línea imaginaria entre las distintas mitades.

- **Rotura de mezcla convencional en ensayo de resistencia conservada.**



En este caso, se produce una situación parecida a la del caso anterior; sólo que esta vez el causante es el árido de ofita, que claramente en la zona superior de la mitad derecha, deja ver el tamaño de árido agregado a la mezcla. Esto sucede por dos razones: el tipo de árido, el ofítico no es de estilo adherente con el ligante, y el tamaño de partícula, al ser mayor, tendrá menor área superficial que en el caso de partículas menores.

- **Probetas compactadas con máquina giratoria.**



- **Ensayo módulos de rigidez.**



Agradecimientos

Cerrando este trabajo, debo de mostrar mi afecto por las personas que han ayudado y trabajado, para que lo comentado tuviera un sentido fidedigno y responsable con la investigación. Primeramente, mencionaré al Director de este Proyecto, Miguel Ángel Calzada, que siempre ha encontrado un hueco en su atareado cupo de trabajo, y mostró confianza por mí desde el día en que solicité trabajar con el Laboratorio de Caminos para mi Proyecto Fin de Carrera. De igual manera, Ángel Vega, que ha sabido dar dirección a las posible inclusiones en este trabajo.

Por otra parte, tengo que hablar de aquellos con que más tiempo he pasado y los que me han acogido de una manera perfecta y con un respeto máximo, desde el día de mi llegada: Miguel e Iván. Miguel me ha enseñado que el trabajo debe ser ajustado y fiable, que no se debe dejar nada al azar y que el esfuerzo es el principio básico de cualquier trabajador. Iván me ayudó a acelerar el progreso de las fabricaciones con vidrio y el almacenamiento de los distintos materiales, además de charlar sobre la vida mientras se aglomeraba a 150 °C.

También debo de completar mis agradecimientos con dos personas que se han preocupado por mi trabajo y situación en todo momento, y de los cuáles he recibido una ayuda constante. Pedro Lastra e Irene González-Torre, investigadores del GITECO, han sido capaces de completar sus sendos proyectos con una mirada sobre lo que yo estaba haciendo y en lo que me podían ayudar, tomándoles en estos momentos, como auténticos amigos en los que confiar en el futuro.

Por último, y esperando no dejar a nadie en el tintero, decir que Jaime Carpio, investigador del LAGUC, ha sido indispensable en el comienzo y en el final de mi andadura en el Laboratorio, aprendiendo de él los mecanismos que envuelven cualquier Laboratorio, y en especial, el de Geosintéticos y Geomembranas.

Mencionaré en último lugar a mis seres más cercanos, tanto familia, novia, amigos y compañeros de estudios, a los cuáles el agradecimiento se da al hablar y con los actos de uno mismo.

Muchas gracias a todos.

Referencias

- [1] CELAURO B. et al. 2012. *Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber.*
- [2] MAGALHÃES J.R. – BARBOSA J. 2003. *The effect of crumb rubber gradation and binder-rubber interaction time on the mechanical properties of asphalt-rubber mixtures (dry process).*
- [3] NAVARRO F. J. et al. 2004. *Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens.*
- [4] FUENTES-AUDÉN C. et al. 2011. *Formulation of New Synthetic Binders: Thermomechanical Properties of Resin/Recycled Blends.*
- [5] CASEY D. et al. 2008. *Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt.*
- [6] HUANG Y., BIRD R., HEIDRICH O. 2007. *A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements.*
- [7] VIDAL R. et al. 2013. *Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement.*
- [8] DONY A. et al. 2012. *Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent.*
- [9] UNE-EN 12607-1:2007. *Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la resistencia al envejecimiento por efecto del calor y del aire. Parte 1: Método RTFOT (película fina y rotatoria).*
- [10] UNE-EN 14769:2006. *Betunes y ligantes bituminosos. Acondicionamiento por envejecimiento a largo plazo acelerado usando un recipiente de envejecimiento a presión (PAV).*
- [11] BECSA CONSTRUCCIONES Y POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2012. *Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente.*
- [12] CEDEX. MINISTERIO DE FOMENTO Y MEDIO AMBIENTE. *Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.*
- [13] STATE OF CALIFORNIA OF TRANSPORTATION, 2005. *Feasibility of recycling rubber-modified paving materials.*
- [14] RAMÓN TOMÁS RAZ, JORNADAS RMD 2008. *Panorama general de la utilización de NFU's en carreteras.*
- [15] MCGRAW J. et al., 2005. *Recycled Asphalt Shingles in Hot Mix Asphalt.*
- [16] ABDULSHAFI O. et al., 1997. *Evaluation of the benefits of adding fiberglass roofing shingles to hot-mix asphalt.*

- [17] CEDEX, MINISTERIO DE FOMENTO, 2011. *Ficha técnica de materiales: escorias de acería de horno de arco eléctrico.*
- [18] COSTA A., JORNADAS TÉCNICAS ELSAN S.A., 2011. *Mezclas en caliente: capas finas y ultrafinas.*
- [19] BEHNOOD A. Y AMERI M., 2012. *Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag.*
- [20] ARABANI M. Y AZARHOOSH A. R., 2012. *The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures.*
- [21] KRAYUSHKINA K., 2012. *Use of steel slags in automobile road construction.*
- [22] UNIVERSIDAD DE HUELVA, 2011-2013. *Reutilización de residuos de plásticos agrícolas en la fabricación por vía seca de mezcla bituminosa (Plastic Road).*
- [23] VERMA S. S., 2008. *Roads from plastic waste.*
- [24] CARMONA M. L. et al., 2008. *Diseño y desarrollo de mezclas bituminosas con polvo de neumáticos atendiendo a la nueva normativa europea.*
- [25] GRUAS J., 2009. *Efecto de la utilización de mezclas bituminosas con polvo de neumático sobre las características funcionales del pavimento.*
- [26] CALIFORNIA TRANSPORTATION DEPARTMENT, 2003. *Asphalt rubber usage guide.*
- [27] GALLEGO MEDINA J., 2008. *Mezclas bituminosas con alto contenido de caucho de neumáticos: tecnología, fabricación y comportamiento.*
- [28] MÁRQUEZ G. ET AL., 2009. *Efecto de surfactantes sintéticos, salinidad y alcalinidad sobre las propiedades de las emulsiones asfálticas para impermeabilización.*
- [29] ARABANI M., 2010. *Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete.*
- [30] MAUPIN G., 1998. *Effect of glass concentration on stripping of asphalt.*
- [31] ARABANI M. y KAMBOOZIA N., 2013. *The linear visco-elastic behaviour of asphalt mixture under dynamic loading conditions.*
- [32] LITTLE D.N., EPPS J.A., SEBAALY P.E., 2006. *The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. National Lime Association.*
- [33] SU N. y CHEN J.S., 2001. *Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass.*
- [34] EAPA (European Asphalt Pavement Association), 2004. *Industry statement on the recycling of asphalt mixes and use of waste of asphalt pavement.*

[35] PEILONG L. y ZHANG D., 2011. *Analysis of Environmental and Ecological Effects on New Techniques for Asphalt Pavement Materials.*