

Diseño de mezclas bituminosas en caliente en tiempos de crisis

Las limitaciones presupuestarias en tiempos de crisis acentúan, sin lugar a dudas, la búsqueda de la eficiencia. En el ámbito del diseño de mezclas bituminosas podemos referirnos con este término a aquellas soluciones útiles para obtener firmes con un satisfactorio comportamiento en servicio, durante toda su vida útil, al menor coste. Entre las eficiencias que se proponen, algunas tienen que ver con diversas posibilidades de mejorar la precisión del diseño, disminuir las temperaturas de fabricación o limitar las distancias de transporte. Otras valoran las opciones para reducir consumos energéticos y de materias primas, generar menos residuos, reutilizar y reciclar. También se defiende la conveniencia de basar el diseño de mezclas en ensayos fundamentales y evolucionar hacia especificaciones más relacionadas con las propiedades funcionales de las mezclas bituminosas.

Palabras clave: Mezclas bituminosas, diseño, eficiencia, especificaciones, ensayos

Budget constraints in times of crisis emphasize, without doubt, the search for efficiency. In the field of bituminous mixes design, we can refer by this term to those solutions useful for pavement construction with a satisfactory performance in service throughout its entire service life, at least cost. Among the proposed efficiencies, some are related to various possibilities to improve the accuracy of mix design, decreasing of processing temperatures, or setting limits on transportation distances. Other efficiencies can be achieved taking into account the options for reducing energy consumption and raw materials, generate less waste, reusing and recycling. It is also defended the convenience of basing mix design in fundamental tests and move towards performance related specifications.

Keywords: Bituminous mixes, design, efficiency, specifications, tests

Jorge Ortiz Ripoll, jorge.ortiz@inviam.es

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
IN VIAM, Ingeniería Viaria y Ambiental

1. Introducción: ajustes en tiempos de crisis

Vaya por delante la consideración de que el propio título de este texto sea, seguramente, el primero de sus numerosos defectos. No está claro que las mezclas bituminosas deban diseñarse de diferente modo en tiempos de crisis que de abundancia, pero mentar la actual crisis económica puede servir para destacar el interés de eficiencias que en otras coyunturas serían menos valoradas. A fin de cuentas, también se organizan jornadas sobre racionalización de inversiones en

infraestructuras en tiempos de crisis, como si nuestros gestores públicos no debieran sujetar sus decisiones de inversión a criterios racionales en todo momento. Por nuestra parte, sugerimos que la referencia a los tiempos de crisis se entienda como un modo de subrayar una particular preocupación por la gestión eficiente, en este caso, por un diseño de mezclas bituminosas especialmente eficiente.

Pretenderemos, pues, señalar ciertas mejoras de eficiencias técnicas, económicas y ambientales que podrían alcanzarse gracias a un cuidadoso diseño de mezclas. Varias de las propuestas para este tratar de *hacer más con menos*, tienen que ver con ajustar con precisión los criterios de diseño a los usos y destinos concretos de la mezcla bituminosa proyectada. Los ajustes que se indican no requieren, sin embargo, prescripciones orientadas a ámbitos geográficos reducidos, aunque sea ésta una tendencia hoy muy en boga. Por el con-

Diseño de mezclas bituminosas en caliente en tiempos de crisis

trario, en más de una ocasión apuntaremos la necesidad de recuperar criterios y prácticas de los que hoy se acostumbra a prescindir con una llamativa ligereza. Otras propuestas son de índole más general, o se refieren a aspectos ambientales que, en nuestra opinión, merecen ser tenidos muy en cuenta para diseñar mezclas bituminosas en caliente con eficiencia.

2. Racionalismo frente a empirismo en el diseño de mezclas

En esta aproximación al diseño eficiente de mezclas consideramos necesario comenzar por fijarnos en la capacidad de los distintos tipos de ensayos para predecir correctamente el comportamiento en servicio de las mezclas bituminosas en caliente. Tomaremos como punto de partida la clasificación efectuada por *Bonnot*, que distingue entre ensayos empíricos, de simulación y de determinación, de acuerdo con las siguientes definiciones:

- Ensayos empíricos (o arbitrarios, según otros autores) son aquellos en que las solicitaciones utilizadas en laboratorio son muy distintas de las existentes en el pavimento, y no permiten medir una propiedad intrínseca del material. El comportamiento de la mezcla no puede predecirse de acuerdo con un modelo teórico y sólo recurriendo a la experiencia pueden relacionarse propiedades funcionales de las mezclas con resultados de los ensayos. Ejemplos de ensayos empíricos son Marshall, cántabro, compresión diametral... Estos ensayos sólo deben considerarse válidos cuando se ha podido asegurar que la ordenación que proporcionan es la misma que se produce en la calzada bajo solicitaciones reales.
- Los ensayos de simulación pretenden mejorar la representatividad de los ensayos empíricos. En este caso las solicitaciones de laboratorio son similares a las reales, si bien a escala reducida. El ensayo en pista es un buen ejemplo. Este tipo de ensayos conserva elevadas dosis de empirismo porque las distintas condiciones de contorno y el factor de escala hacen imposible deducir de modo teórico la respuesta de la mezcla ante solicitaciones reales.
- La tercera categoría, completamente diferente de las anteriores, es la de los ensayos de determinación. Estos pretenden conocer propiedades intrínsecas del material, in-

dependientes del estado de carga o de las condiciones de contorno. Mediante el oportuno modelo teórico es posible deducir, de solicitaciones simples y perfectamente definidas, el comportamiento o la respuesta en cuanto a cierta propiedad, bajo solicitaciones reales. Ejemplos de este tipo de ensayo son los de cálculo del módulo dinámico o la resistencia a fatiga de una mezcla bituminosa. Suelen ser ensayos notablemente más complicados y costosos, y su representatividad depende ahora de lo ajustado del modelo analítico utilizado (1).

Si admitimos con *Harvey, Vallerga y Monismith* que los ensayos de diseño de mezclas *deben proporcionar predicciones, en cuanto a su comportamiento, de carácter fundamental y verídicas en todos los casos, sin excepciones que puedan dar lugar a pérdidas de confianza en el método...* (2) habremos de aceptar la conveniencia de tender hacia ensayos de determinación o fundamentales. En los Estados Unidos, ya hace casi veinte años, SUPERPAVE se concibió con esa idea. En Europa, la normativa de marcado CE de mezclas vigente desde 2008, recomienda también seguir esa vía, aunque hasta hoy en España apenas se haya hecho avance alguno en ese sentido.

Trataremos de mostrar que un exceso de empirismo puede dificultar la selección de los diseños más eficientes, encareciendo innecesariamente determinados tipos de mezcla o causando el rechazo de formulaciones correctas.

3. Siete propuestas para un diseño eficiente

A continuación presentamos algunas propuestas que pensamos pueden contribuir a mejorar la eficiencia con que se diseñan habitualmente las mezclas bituminosas en España. Son, ciertamente, heterogéneas, pues incluyen desde recordatorios de prácticas muy concretas que convendría no dejar de tener muy presentes, hasta sugerencias de índole más genérica, que requieren modificaciones de cierta relevancia en cuanto a nuestro modo de entender el papel que deben jugar los ensayos y las especificaciones sobre las mezclas.

3.1. Mezcla de laboratorio y mezcla de central

La verificación de que la mezcla producida en laboratorio y la mezcla de central se aproximan correctamente es una nor-

ma de buena práctica bien conocida, si bien hoy relegada con alguna frecuencia. Esta verificación debe servir para cerciorarse de que las mezclas de laboratorio y de central son suficientemente parecidas y, por tanto, que el diseño efectuado es viable. Cuando esta aproximación no se da es imprescindible efectuar ajustes (hasta que la mezcla de laboratorio reproduzca correctamente la producida en la central), o bien realizar los ensayos de diseño sobre mezcla de central.

Recordemos que hay muchos aspectos que pueden dar lugar a diferencias significativas entre ambos tipos de mezclas, aún después de haber empleado las mismas temperaturas de envuelta y compactación, y reproducido con exactitud su composición volumétrica: básicamente tienen que ver con diferencias en los procesos, energías y tiempos de mezclado empleados en las amasadoras de central y de laboratorio que pueden dar lugar a envueltas de ligante más o menos efectivas y uniformes, pero no sólo con estas circunstancias:

- Las diferentes condiciones en que se produce la envuelta y los distintos tiempos de permanencia a temperaturas elevadas afectan distintamente al envejecimiento del betún y, en consecuencia, a las propiedades de mezclas elaboradas según esos dos procedimientos tan diferentes,
- El tiempo durante el que la mezcla permanece caliente puede afectar, además, a la absorción de betún por los áridos, influyendo decisivamente en las propiedades de la mezcla bituminosa,
- El comportamiento reológico no-newtoniano de determinados ligantes (en particular los betunes modificados) implica que, a temperaturas iguales, las viscosidades medidas en laboratorio y las que se manifiestan en la central durante su amasado (o en obra, durante el extendido y la compactación), pueden ser muy distintas.

Determinar con precisión las temperaturas de amasado y compactación idóneas en laboratorio, y en condiciones reales es, sin duda, una parte importante del diseño de mezclas. Ya se ha mencionado que los betunes modificados presentan dificultades especiales en la determinación de temperaturas de equiviscosidad: se comportan como fluidos no-newtonianos pseudoplásticos, cuya viscosidad depende de la velocidad de deformación. La relación entre ambas magnitudes suele representarse según la ley potencial propuesta por Ostwald-de Waele:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$$

donde K y n son constantes que miden, respectivamente, la consistencia y la pseudoplasticidad del fluido. En fluidos pseudoplásticos, como la mayoría de los betunes modificados en los que n es inferior a la unidad, la viscosidad se reduce apreciablemente con la velocidad de deformación.

Las viscosidades típicamente utilizadas para fijar en laboratorio las temperaturas de amasado (170 ± 20 cSt) y compactación (280 ± 30 cSt), acostumbran a medirse a velocidades de deformación del orden de $6,8 \text{ s}^{-1}$ (típicas del viscosímetro Brookfield). La velocidad de deformación en las condiciones reales de amasado y compactación es muy superior, hasta 490 s^{-1} . Según Yildirim et al., para la mayoría de los betunes modificados la temperatura real de envuelta debe ser de 14 a 38 °C menor que la que se deduce de la viscosidad Brookfield, y la temperatura real de compactación de 10 a 27 °C inferior (3).

Nuestra primera recomendación consiste, pues, en insistir en la importancia de verificar en la central de fabricación el diseño de mezclas efectuado en laboratorio. Esta verificación no es, en absoluto irrelevante ni trivial: debe hacerse, para cada fórmula y central, y debería fijarse, ade-

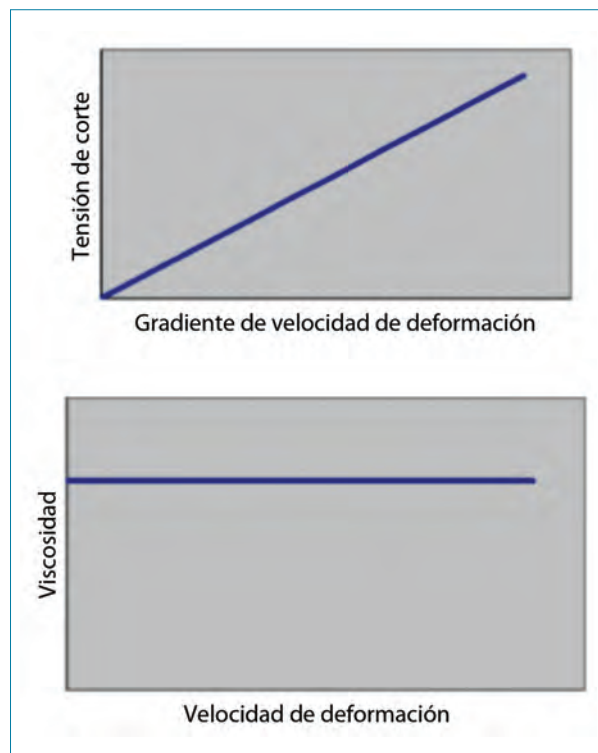


Figura 1: Viscosidad de un fluido newtoniano.

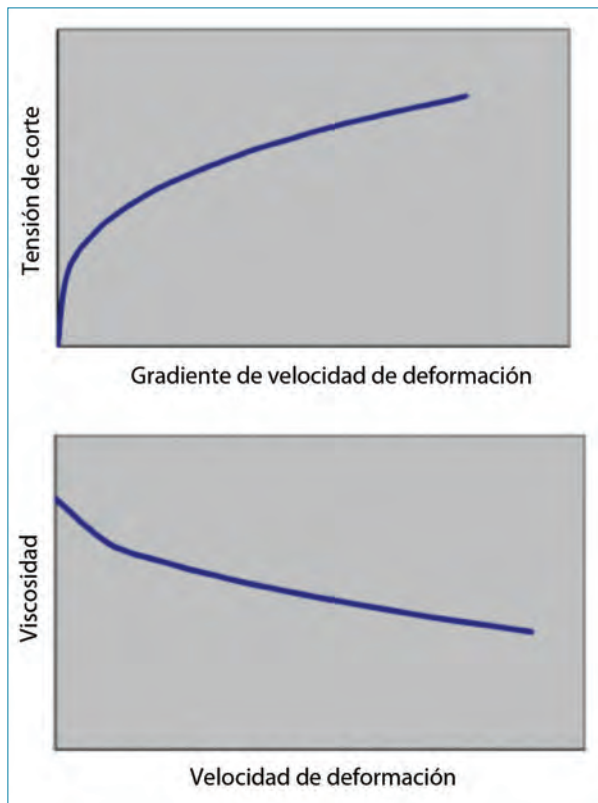


Figura 2: Viscosidad de un fluido no-newtoniano (tipo pseudoplástico).

más de en la composición volumétrica de la mezcla, en la absorción y envejecimiento del betún, y en las temperaturas idóneas de envuelta y compactación. Prescindir de ella puede equivaler a desconocer las propiedades reales de la mezcla que va a ponerse en obra, además de conducir a establecer temperaturas de fabricación y compactación excesivamente elevadas.

3.2. Compactación de laboratorio y compactación *in situ*

Nuestro segundo recordatorio se refiere la densidad *in situ* de las mezclas bituminosas, y a la compactación de laboratorio utilizada para establecer la densidad de referencia: aunque en ocasiones parece entenderse lo contrario, nunca debería perderse de vista que es la compactación de laboratorio la que se ha de seleccionar tratando de reproducir la densidad de la mezcla en servicio, y no la compactación de obra la que debe aproximarse a la densidad de la mezcla de laboratorio. Las compactaciones de laboratorio son adecuadas cuando llevan los huecos en mezcla a valores comparables a los que

van a encontrarse en servicio (después de la post-compactación por el tráfico), así que verificar que esta correspondencia existe siempre es conveniente. De lo contrario podemos hallarnos diseñando, comprobando y verificando mezclas de propiedades distintas a las que realmente constituirán el firme construido.

Naturalmente, el alcance de la post-compactación depende del tráfico (también de las condiciones climáticas y del espesor de capa), y por esta razón la compactación de laboratorio, sea mediante maza Marshall o con prensa giratoria, se relaciona con el tipo de vía. Habida cuenta de que en una misma vía pueden encontrarse zonas solicitadas por tráficos muy diferentes, o una misma mezcla colocarse con espesores diversos, un diseño de mezclas especialmente cuidadoso podría prever, en función de esas variables, distintos niveles de compactación en laboratorio y hasta distintos grados de compactación en obra, siempre que sea constructivamente posible. Por ejemplo, además de reducir la energía de compactación en laboratorio, elevar la exigencia de compactación en obra hasta el 100% de la densidad de referencia (nada recomendable en general), puede ser adecuado en arceles u otras superficies en las que no haya que esperar post-compactación por causa del tráfico.

En definitiva, ajustar con precisión tanto la energía de compactación en laboratorio como las exigencias sobre el grado de compactación en obra, puede contribuir a la eficiencia en el diseño de mezclas, mejorando la correspondencia entre la composición volumétrica de las mezclas diseñadas y las existentes en el firme durante la mayor parte de su vida útil.

3.3. Estabilidad Marshall y otros criterios empíricos

Aunque los límites inferiores sobre la estabilidad Marshall han desaparecido como criterio de diseño en la última revisión del PG3 (OC 24/2008), todavía hoy se ejecutan obras cuyos proyectos se redactaron con anterioridad a esa revisión y donde se siguen exigiendo los valores mínimos especificados hasta entonces. No parece, sin embargo, que deba adoptarse prevención alguna en cuanto a la retroactividad de la nueva normativa: si la estabilidad Marshall ha dejado de ser una propiedad de interés (sin necesidad de introducir prescripciones sustitutivas) su importancia no puede depender de la fecha de redacción del proyecto. Aunque sea a título anecdótico, recordemos el origen de la especificación, según lo explica

Foster, que participó activamente en el desarrollo original del método Marshall:

Una parte de mi trabajo era determinar el valor mínimo de estabilidad Marshall que aseguraría una mezcla satisfactoria. —Según los resultados obtenidos de multitud de ensayos efectuados sobre un gran número de mezclas— reporté a mi supervisor que la estabilidad Marshall no era una herramienta adecuada para evaluar cuándo una mezcla ofrecía un comportamiento satisfactorio o cuándo presentaba riesgos de resultar plástica. Como suelo recordar, él me dijo entonces que había invertido mucho tiempo y esfuerzo en la medida de la estabilidad Marshall y que se había comprometido con su director a presentar un valor mínimo. Me dijo que regresara al trabajo y le diera un valor. Así hice (4).

La evolución desde las 500 lb inicialmente establecidas como estabilidad mínima (valor satisfecho por todas las mezclas ensayadas entonces) a las sucesivas 750, 1.000, 1.800 ó

2.000 lb, en carreteras, puertos o aeropuertos, tuvo parecidos fundamentos técnicos, como puede concluirse de la lectura de la misma referencia. Sin embargo, la tendencia a exigir estabilidades cada vez mayores persistió, pese a reiteradas advertencias de Foster, que siguió defendiendo lo innecesario de esa especificación. Como dijimos, a este lado del Atlántico han seguido exigiéndose estabilidades elevadas hasta fechas muy recientes, por más que algunos de los más renombrados laboratorios de investigación europeos insistieran en la poca capacidad de predicción del ensayo (5).

La evolución de la estabilidad Marshall como especificación es un buen ejemplo para ilustrar la precaución con que deben establecerse límites basados en resultados de ensayos empíricos o elevarse esos límites con el fin de mejorar las propiedades de las mezclas bituminosas, ya se trate de estabilidad, resistencia a compresión diametral, equivalentes de arena o cualquier otro. En muchos casos no se obtendrá ninguna mejora, en otros puede resultar incluso perjudicial. Con Foster, nuestra tercera recomendación para un diseño eficiente es *no gaste dinero en elevar la estabilidad Marshall de las mez-*

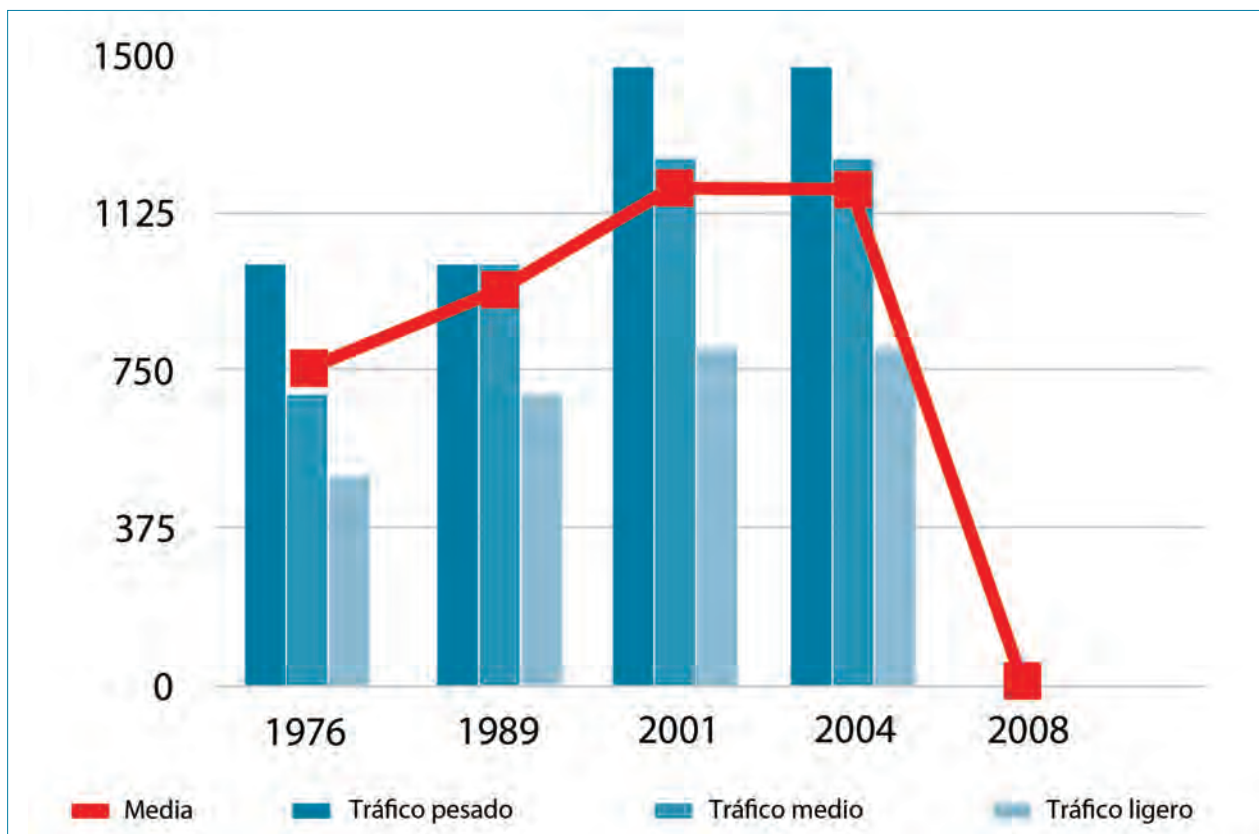


Figura 3: Auge y caída de la estabilidad Marshall en España.

Diseño de mezclas bituminosas en caliente en tiempos de crisis

clas bituminosas (ni en mejorar cualquier otro resultado de ensayos empíricos) sin haber comprobado cuidadosamente la utilidad de adoptar esas medidas, y muy especialmente si se ha perdido cualquier referencia con el origen de la especificación o la génesis del ensayo.

3.4. Mezclas templadas, semicalientes, calientes y muy calientes

La reducción de las temperaturas de fabricación se halla hoy entre los principales objetivos del nuevo diseño de mezclas. En España se ha dado en denominar mezclas semicalientes a las producidas entre 120 y 140 °C (20 a 40 °C por debajo de las temperatura de fabricación convencional) y templadas a las que se fabrican a temperaturas inferiores a 100 °C, ya sea con betunes o con emulsiones asfálticas. Su producción se basa en el recurso a procedimientos de fabricación específicos o bien en el uso de aditivos o ligantes especiales. Constituyen, sin duda, tecnologías de futuro, que apuestan por reducir los impactos ambientales de las mezclas bituminosas afectando mínimamente a su comportamiento en servicio.

Sin embargo, también la producción convencional de mezclas bituminosas permite proponerse reducciones suficientemente significativas de la temperatura de fabricación como para que ciertos aspectos sean tenidos en cuenta ya el diseño de las mezclas en caliente más habituales: tipo de betún, aditivos, y tiempos y distancias de transporte, por ejemplo, influyen decisivamente en esa temperatura. Pero también lo hacen, en ocasiones, la dirección de obra o el *confort del encargado* (tratando de asegurar que no va a producirse falta de trabajabilidad de la mezcla cualesquiera que sean los tiempos de transporte o incidencias en el extendido). Situaciones extremas pueden suponer temperaturas de fabricación de 20 a 40 °C superiores a las mínimas necesarias, es decir, diferencias del mismo orden que la reducción de temperaturas ofrecida por las mezclas semicalientes en comparación con mezclas bituminosas en caliente diseñadas y producidas eficientemente.

De modo que un primer paso para reducir la temperatura de fabricación, sin necesidad de emplear nuevas tecnologías consistiría en dejar de fabricar mezclas bituminosas **muy calientes**. Si se nos permite definir como tales las que se producen a temperaturas superiores a 160-165 °C, habrá que

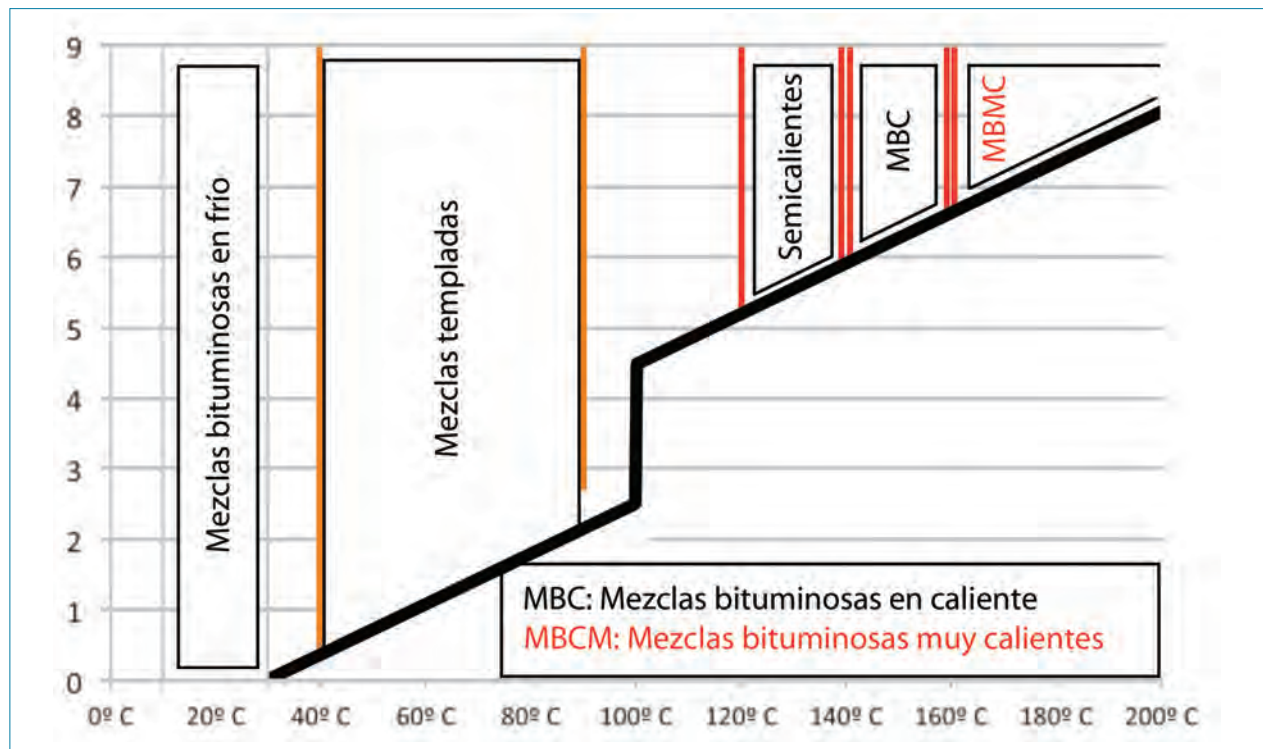


Figura 4: Mezclas templadas, semicalientes, calientes y muy calientes. Una elevada proporción de la producción actual de mezclas bituminosas corresponde a la última categoría (en ordenadas, consumo estimado de combustible en k/t de mezcla).

convenir que una gran parte de las mezclas bituminosas actualmente producidas en España corresponden a esa innecesaria y perjudicial categoría. Su sustitución por mezclas producidas a temperaturas más moderadas ofrece un conjunto de potenciales mejoras técnicas y ambientales que, globalmente, se hallan hoy fuera del alcance de las tecnologías de mezclas templadas o semicalientes.

En vista de las ventajas ambientales (reducción de emisiones), técnicas (menor absorción, menor envejecimiento del betún) y económicas (menor consumo de combustibles), nuestra cuarta recomendación es preferir aquellos diseños, instalaciones, ubicaciones y equipos que faciliten la producción de mezclas bituminosas en caliente a temperatura moderadas.

3.5. Materias primas y distancias de transporte

El transporte a grandes distancias de los importantes volúmenes de materiales propios de la obra pública supone elevados costes económicos y ambientales. En la Tabla 1 puede verse cómo distancias de transporte 50 km superiores a las consideradas en la mezcla tomada como referencia, bastan para causar emisiones de CO₂ superiores a las evitadas reduciendo en 35 °C la temperatura de fabricación (Tabla 2). Naturalmente, los costes del transporte son proporcionales a las emisiones asignadas, puesto que la relación entre consumo de combustible y emisiones de CO₂ es

prácticamente lineal. Ya se mencionaron anteriormente algunas ventajas ambientales, técnicas y económicas que aconsejan reducir las distancias y tiempos de transporte de las mezclas bituminosas. La Tabla 1 muestra cuánto interesa reducir todas las distancias de transporte, también las correspondientes a los áridos utilizados en la producción de mezclas bituminosas, aunque estos transportes de materias primas no influyan en las propiedades de la mezcla fabricada y puesta en obra (6).

Recuperar la noción ancestral de construir aprovechando materiales próximos (al menos no muy distantes), además de ofrecer ventajas ambientales y económicas hoy irrenunciables nos reconcilia con nuestra condición de ingenieros, intrínsecamente relacionada con la capacidad de elegir acertadamente entre las alternativas de menor coste. Así pues, nuestra recomendación en este punto consiste en diseñar mezclas que, ofreciendo comportamientos en servicio suficientemente correctos, no requieran exageradas distancias de transporte de materias primas y ofrezcan relaciones coste/beneficio satisfactorias.

3.6. Reducir, reutilizar, reciclar

La regla de las tres erres, que pretende desarrollar hábitos de consumo responsable, es perfectamente aplicable en el diseño de mezclas bituminosas, conservando todo su sentido tan profundamente ecológico. Adicionalmente, las reducciones

Tabla 1: Emisiones de CO₂ en función de las distancias de transporte de los áridos a la central de fabricación y de ésta a obra.

Mezcla	Distancias (trayecto de ida)		Emisiones	Δ
	Áridos	Mezcla	CO ₂ eq	CO ₂ eq
	Km	Km	Kg/t mbc	s/ref.
MBC de referencia	15	40	35,0	0,0 %
Alternativa 1	0	25	33,1	-5,2 %
Alternativa 2	15	80	37,4	7,0 %
Alternativa 3	15	120	39,9	14,0 %
Alternativa 4	50	120	42,0	20,1 %
Alternativa 5	100	120	45,0	28,8 %

Diseño de mezclas bituminosas en caliente en tiempos de crisis

Tabla 2: Emisiones de CO₂ en función de la temperatura de fabricación

Mezcla	Temperatura de fabricación (°C)	Emisiones CO ₂ eq Kg/t mbc	Δ CO ₂ eq s/ref.
MBC de referencia	155	35,0	0,0 %
Alternativa 1	120	32,2	-8,0 %
Alternativa 2	140	33,8	-3,4 %
Alternativa 3	150	34,6	-1,1 %
Alternativa 4	165	35,8	2,3 %
Alternativa 5	175	36,6	4,6 %

de costes que cabe esperar, hacen de las prácticas correspondientes un requisito fundamental cuando se pretenda un diseño eficiente de mezclas.

- El diseño de mezclas debe hacer mínima la generación de residuos y los consumos energéticos y de materias primas. Potencialmente, el mayor residuo generado por la producción de mezclas bituminosas es el filler de recuperación de los áridos, que puede suponer de un 2 a un 4% de la producción total. En consecuencia, diseñar mezclas (y utilizar áridos adecuados) de tal modo que se minimice la generación de este residuo y lo reutilicen hasta prescindir de filler de aportación, supone la primera apuesta por la reducción de residuos y consumos de materias primas alternativas. Obviar exigencias en cuanto a desfillerización mínima de las centrales de fabricación, por otra parte, además de facilitar el control de producción cuando el filler es reutilizado permite, a su vez, mejorar la eficiencia de la combustión en el quemador del tambor secador y reducir su consumo de combustible.
- Con la reutilización del filler de recuperación de los áridos ya mencionada, la de materiales obtenidos por fresado de pavimentos envejecidos debe constituir otro de los principales objetivos de un diseño eficiente de mezclas. Aunque solemos referirnos a esta técnica como reciclado de mezclas en central en caliente, estrictamente debe entenderse que se trata de una reutilización, puesto que los materiales fresados consisten en mezcla bituminosa apta para su nuevo uso como mezcla bituminosa. Proyectar

para el reciclado, y teniendo en cuenta la posibilidad de reutilizar los materiales fresados disponibles, idealmente en la propia obra en la que se originan, es una de las mejores estrategias posibles.

- Diseñar mezclas bituminosas para el reciclado de residuos y subproductos de otras industrias es, sin duda un loable objetivo. Polvo de NFU o aceites usados, por ejemplo, han sido reciclados con éxito, incorporándose como modificadores o sustitutivos de parte del betún asfáltico. Se trata de nuevo, de buenas prácticas ambientales, siempre que no comprometan reducciones o reutilizaciones como las mencionadas anteriormente, cuya prioridad debe reconocerse. El reciclado de otros subproductos como áridos artificiales puede apreciarse como especialmente interesante, pues participa simultáneamente de la primera de las tres erres haciendo posible reducciones significativas en el consumo de áridos naturales.

Un diseño de mezclas eficiente debe, en definitiva, considerar todas las posibilidades apuntadas, según la secuencia mencionada: reducir en primer lugar, reutilizar siempre que sea posible y reciclar sin comprometer las oportunidades de reducir y reutilizar.

3.7. Diseño de mezclas y oportunidades a la innovación

Nuestra última recomendación es, sin duda, la más genérica. Nos devuelve a la clasificación y preferencias de Bonnot en



Figura 5: Riesgo y responsabilidad del constructor en función del tipo de especificación utilizado.

cuanto a los tipos de ensayos de diseño y caracterización, y guarda relación con la apertura de oportunidades a la innovación. Diseñar las mezclas bituminosas y juzgar la bondad de su comportamiento en servicio mediante ensayos de determinación o fundamentales supone, sin ninguna duda, facilitar la incorporación de los materiales, procesos y equipos más innovadores.

Para obtener frutos de estos nuevos ensayos, se requieren, sin embargo, especificaciones vinculadas al comportamiento real de las mezclas bituminosas. Unas especificaciones orientadas según los principios de las Normas UNE-EN-ISO 9001 y las comprometidas con el mercado CE, pueden promover la mejora continua de la calidad delegando la responsabilidad del control de calidad en el constructor, sin necesidad de exhaustivas prescripciones sobre materiales, procesos, instalaciones o equipos. Evolucionar hacia especificaciones de comportamiento equivale a reconocer oportunidades a la innovación, obtener provecho de los sistemas de gestión de la calidad y marcado CE de las empresas, y reducir los costes del control de calidad para la administración (7, 8, 9).

En la figura 5 se han tratado de representar las diferentes asignaciones de riesgos y responsabilidades que corresponden a distintos tipos de especificaciones. Según se asciende la escalera dibujada, la asunción de mayores riesgos y

responsabilidades por el constructor supone contar con más grados de libertad en la elección de materiales, diseños o procedimientos, lo que favorece el uso de las mejores técnicas disponibles y la innovación. Avanzando en el mismo sentido, el cliente reduce el coste de su control de calidad y dispone de mayores garantías sobre la calidad de los trabajos efectuados, lo que compensa la supresión de controles de proceso o de base empírica (10).

Para ampliar la descripción del alcance de este cambio de paradigma normativo presentamos tres ilustraciones, tomadas de Benson, que tratan de mostrar cómo se ve afectado el control de calidad de la administración o el cliente, según el tipo de especificación utilizado:

- La figura 6 es un diagrama de flujo que corresponde a las especificaciones más avanzadas, que hacen uso de los certificados de producto y de los sistemas de aseguramiento de la calidad propios de las empresas. Los controles de aceptación basados en propiedades relacionadas con el comportamiento permiten notables simplificaciones y reducen el coste del control de calidad.
- En la figura 7 se ha presentado un diagrama de flujo correspondiente a las tradicionales especificaciones de producto terminado. El constructor sigue gozando de libertad

Diseño de mezclas bituminosas en caliente en tiempos de crisis

para proponer sus propios diseños y procedimientos constructivos, pero el coste del control de calidad de la administración es superior al del modelo anterior.

- La figura 8 es un diagrama de flujo correspondiente a unas especificaciones de control de proceso. Todos los controles señalados son llevados a cabo por el cliente, lo que encarece el coste del control de calidad, en relación con las anteriores alternativas, introduce barreras a la innovación y lleva a una indeseable dilución de responsabilidades entre administración y contratista (11, 12, 13, 14).

Nuestra última recomendación consiste, en definitiva, en favorecer el diseño eficiente de mezclas avanzando hacia el uso de ensayos de carácter fundamental y mediante especificaciones más orientadas a las propiedades funcionales de las mezclas bituminosas.

4. Consideraciones finales

Para terminar, no queremos dejar de mencionar que cuando se diseña con eficiencia no siempre se obtienen costes iniciales mínimos. Por ejemplo, reducir la energía de compactación en laboratorio, como sugeríamos en alguna de nuestras propuestas, conduce a diseñar mezclas más ricas en betún, y por tanto, inicialmente más costosas. El contenido de betún de las mezclas bituminosas es, sin embargo, el factor más directamente relacionado con su durabilidad, de modo que puede

suponerse que diseñar con más betún equivale a prolongar la vida en servicio de la capa construida.

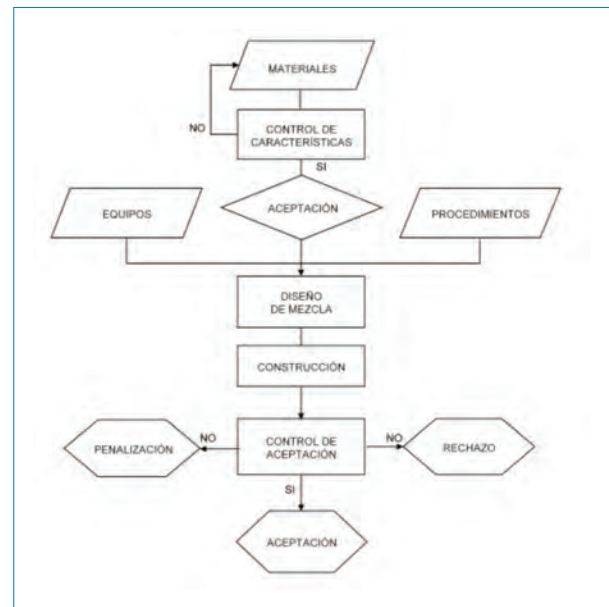


Figura 7: Control de calidad del cliente para especificaciones de producto terminado.

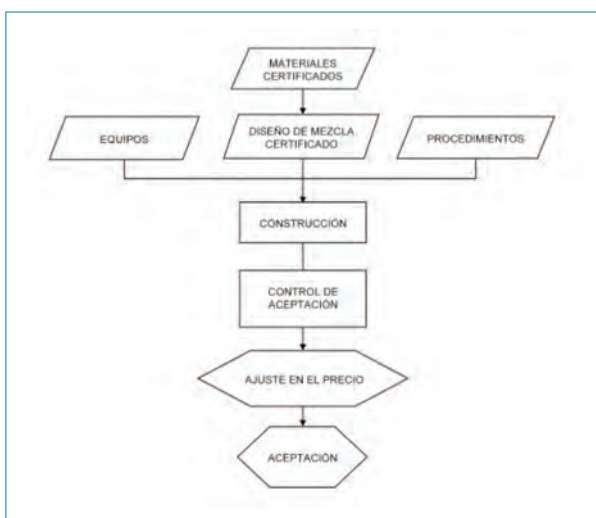


Figura 6: Control de calidad del cliente para especificaciones de comportamiento y que hacen uso de certificados de producto.

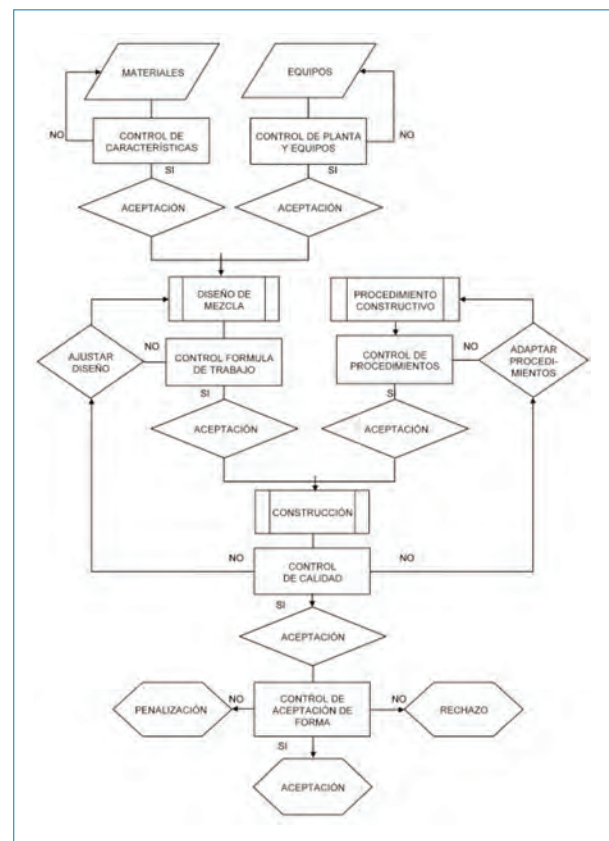


Figura 8: Control de calidad del cliente para especificaciones de proceso.

En cualquier caso, del mismo modo que los balances económicos deberían basarse en Análisis del Coste de Ciclo de Vida (ACCV), los ambientales han de hacerlo en Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Al contrario de lo que sucede en el primer caso, para este último sí se dispone de una metodología estándar desarrollada en la serie 14.040 de la normativa ISO. También a diferencia del ACCV, y pese a una denominación que puede inducir a confusión, el ACV no necesariamente debe extenderse al ciclo de vida completo de un producto: el análisis parcial (hasta la fabricación o entrega de un producto, por ejemplo) es útil para comparar procedimientos de los que se obtienen materiales para los que se espera una misma vida y comportamiento en servicio. Es el caso de los valores mostrados en las Tablas 1 y 2, deducidos para la mezcla bituminosa recién puesta en obra. Como puede verse en la correspondiente referencia, el análisis de la influencia de la temperatura de fabricación no consideró los impactos ambientales causados por el eventual uso de aditivos reductores de viscosidad. El uso de aditivos, del mismo modo que prever diferencias funcionales entre las alternativas comparadas, daría lugar a distintos resultados **numéricos**, aunque pensamos que esta circunstancia **no resta validez alguna a cualquiera de nuestras anteriores propuestas**.

En definitiva, hemos tratado de mostrar algunas interesantes eficiencias que pueden alcanzarse mediante un diseño de mezclas especialmente cuidadoso. Pensamos que sus ventajas técnicas, económicas y ambientales, en relación con algunos usos muy generalizados, justifican que se les preste tanta atención como la que se dirige a técnicas y materiales innovadores que, en muchos casos, persiguen similares objetivos.

5. Referencias

1. Bonnot, J. (1983): Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux. RILEM, Rapport General. BLLPC 132.
2. Harvey, J.T., Vallerger, B.A. y Monismith, C.L. (1995): Use of SHRP-developed testing in QC/QA programs on asphalt concrete for highway and airfield pavements. Quality management of hot mix asphalt. ASTM, STP 1299.
3. Yildirim, Y., Solaimanian, M. y Kennedy, T. W. (2000): Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt concrete. Technical Report 1250-5. Center for Transportation Research. The University of Texas at Austin.
4. Foster C.R. (1993): Development of Marshall Procedures for Designing Asphalt Paving Mixtures. National Asphalt Pavement Association. NAPA IS 84.
5. NC (1990): The Shell Bitumen Handbook. Thomas Telford Ltd. Shell Bitumen.
6. Ortiz, J. y Moncunill, C. (2008): Valuation of greenhouse gases emissions from asphalt mixtures production. 4th Euroasphalt & Eurobitumen Congress. Copenhagen (Denmark), 21st a 23rd May 2008.
7. Newcomb, D.E. (2001): Performance related Specifications. An industry perspective. Journals of AAPT, Vol. 70.
8. Sholz, T. V., Seeds, S.B., Monismith, C.L., Epps, J.A. (2001): Development of a prototype Performance-Related Specification for Hot Mix asphalt pavement construction. Journals of AAPT, Vol. 70.
9. Harm, E. (2001): How to specify performance effectively and efficiently. Journals of AAPT, Vol. 70.
10. Ortiz Ripoll, J. (2004): Los nuevos Pliegos para mezclas bituminosas en caliente y la innovación tecnológica desde el punto de vista del constructor. VI Congreso Nacional de Firms. León, Mayo de 2004.
11. Benson, P.E. (1996): Specifications of asphalt concrete using total quality management principles. Transportation Research Board. 75 th annual meeting.
12. NC (1997): Field Management of Hot Mix Asphalt. National Asphalt Pavement Association. NAPA IS 124.
13. NC (1998): Quality Control for hot mix asphalt operations. NAPA, National, Asphalt Pavement Association, NAPA QIS 9.
14. Cominsky, R.J., Killingsworth, B.M., Anderson, R.M., Anderson, D.A. y Crockford, W.W. (1998): Quality Control and Acceptance of Superpave-Designed Hot Mix asphalt. National Cooperative Highway Research Program. Report 409 Transportation Research Board.