

Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente

Reutilizar materiales residuales industriales como materia prima en la construcción de carreteras constituye un cimiento sustancial para lograr un desarrollo sostenible. La investigación realizada evalúa la viabilidad técnica de la sustitución parcial de áridos naturales por áridos cerámicos reciclados, procedentes de residuos de la industria cerámica y, concretamente, tipo gres y porcelánico, en mezclas bituminosas en caliente de tipo intermedia y rodadura. El estudio ha permitido concluir que resulta técnicamente viable su reutilización en mezclas bituminosas en caliente, con un 30% de áridos cerámicos reciclados en sustitución de los naturales, reuniendo éstas las prestaciones necesarias para proporcionar un adecuado nivel de adherencia y seguridad vial en la carretera. Dicha viabilidad queda supeditada a la evaluación de su ciclo de vida en tramos experimentales con tráficos reales.

Palabras clave: Mezclas bituminosas en caliente, áridos cerámicos reciclados, reutilización residuos, gres, porcelánico

Re-using industrial waste materials as raw material in road construction is a key factor for sustainable development. This research evaluates the technical feasibility of partial replacement of natural aggregates by recycled ceramic aggregates from ceramic tile industry wastes. Specifically, stoneware and porcelain tile wastes are used in hot asphalt mixes for binder and surface courses. The study has concluded that it is technically feasible to reuse recycled ceramic aggregates in hot mix asphalt, replacing 30% of natural aggregates with recycled ceramic aggregates. The mixtures keep an adequate grip level and safety in the road. This viability would depend on tests during their life cycle in experimental sections with real traffic conditions.

Keywords: Hot bituminous mixtures, recycled ceramic aggregates, porcelain waste, stoneware waste

Francisco José Vea Folch, fjvea@becsa.es
José Navas Gómez, jnavas@becsa.es

BECSA

Ramón Silvestre Martínez, rasilmar@cam.upv.es
Esther Medel Colmenar, emedel@caatvalencia.es
Alfredo García García, agarciag@tra.upv.es

Universitat Politècnica de València

1. Introducción

En la Comunidad Valenciana, el sector de la construcción convive con un fuerte y potente sector cerámico, generador de un gran volumen de residuos cerámicos procedentes tanto de sus stocks como de productos defectuosos. A tal respecto, los residuos gestionados y verificados por la Conselleria de Medio Ambiente de la Comunidad Valenciana ascendieron a

85.279 toneladas en 2007, de acuerdo con los datos facilitados por la Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos (ASCER).

La revalorización de este residuo cerámico, creando un nuevo producto con un menor impacto medioambiental, permitiría su empleo en el diseño de mezclas, potenciando la reducción de costes de fabricación y de gestión de residuos.

Con esta hipótesis, se plantea su empleo en capas de base, intermedias y rodadura tipo AC y capas delgadas de rodadura tipo BBTM, para tipologías de tráfico T-1 a T-4.

2. Antecedentes

En España, las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de materiales en mezclas bituminosas en caliente (MBC) se recogen en los artículos 542, "Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso" (OC 24/2008), y

Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente

543, "Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas" (OC 24/2008), del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). En dichos apartados se especifica que "los áridos a emplear en las MBC podrán ser naturales o artificiales siempre que cumplan las especificaciones recogidas en estos artículos", pudiendo "el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares (PPTP), o en su defecto el Director de las Obras" "exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese".

A nivel internacional, las investigaciones realizadas respecto al uso de los áridos reciclados para la construcción de carreteras indican la posibilidad de su utilización para diversas funciones, como en terraplenes, capas granulares o formando parte de las mezclas asfálticas del firme, ya sea en forma de grava, arena o filler. Los materiales documentados en la literatura existente como susceptibles de ser reciclados para su incorporación en mezclas bituminosas son cuantiosos, siendo algunos de ellos las escorias de alto horno, arcillas y arenas chinas, cenizas volante de carbón, cenizas de combustible pulverizado, residuos sólidos urbanos, arenas de fundición, cenizas de fondo de incineración, escorias fosfóricas, material granular reciclado, asfaltos reciclados, hormigón reciclado, vidrio reciclado, áridos de pizarra y escorias de acero (FHWA, 1997; Hassan et al., 2004; Van de Ven et al., 2011).

Respecto a la utilización de materiales de la industria cerámica como áridos reciclados para firmes bituminosos en caliente, si bien existen diversas investigaciones que establecen la posibilidad del uso de áridos reciclados a partir de residuos de la industria cerámica en la construcción de rellenos, capas de sub-base en carreteras secundarias y bloques de hormigón (Koyuncu et al., 2004), así como en la fabricación de hormigón (Baoshan et al., 2009; Pacheco-Torgal et al., 2010), las investigaciones para su uso aplicado a mezclas bituminosas son muy reducidas.

La mayor parte de las mismas se encaminan al uso de materiales cerámicos de diferentes industrias como filler de la mezcla bituminosa en caliente (Baoshan et al., 2009), concluyéndose en su potencial viabilidad de uso. Estudios posteriores realizados por Gahlot (2011) concluyeron que las propiedades de los áridos reciclados a partir de aislantes eléctricos de cerámica son adecuadas para su utilización en mezclas bi-

tuminosas como áridos finos. La investigación concluyó que es posible reemplazar hasta un 15% de árido fino por árido cerámico reciclado, caracterizando la mezcla mediante la prueba de estabilidad Marshall, no apreciándose diferencias significativas en cuanto a las propiedades de la mezcla en comparación con el uso de áridos convencionales.

Sin embargo, existen muy pocas investigaciones sobre el uso de residuos cerámicos como árido de mayor granulometría. En este ámbito, Krüger et al. (2008) investigaron la reutilización de los residuos reciclados de cerámica sanitaria en pavimentos bituminosos. La utilización de estos áridos reciclados, caracterizados por altos grados de blancura y dureza, resultaban muy adecuados para su integración en la capa de asfalto de carreteras principales, mejorando la reflexión de la luz solar y aumentando la estabilidad de la superficie de la carretera. El uso de este tipo de áridos de alta reflexión evitó el calentamiento de la superficie durante los meses de verano, así como la deformación y pérdida de estabilidad asociadas, mejorando además el contraste en la calzada.

Van de Ven et al. (2011) estudió la incorporación de áridos cerámicos reciclados, obtenidos a partir de la trituración de aisladores eléctricos cerámicos, en una mezcla bituminosa para capas de base con el fin de caracterizar tanto sus propiedades mecánicas como la producción de lixiviados en la mezcla. En la mezcla bituminosa modificada se sustituyó el 15% de los áridos naturales por áridos reciclados, resultando buenas propiedades mecánicas en el ensayo de estabilidad, tensión indirecta y sin incrementos de la sensibilidad al agua.

Recientemente, Feng et al. (2013) evaluaron el comportamiento mecánico y la conductividad térmica de mezclas asfálticas con distintos porcentajes de residuo cerámico triturado, procedente de la industria sanitaria, como sustitutivo parcial de los áridos naturales. La capa de rodadura de referencia consistió en una capa de hormigón asfáltico (SAC-10), diseñada de acuerdo a las prescripciones técnicas chinas a partir de áridos basálticos y filler de carbonato cálcico, betún asfáltico 80/100 y betún modificado con polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno). La adición de pequeñas cantidades de árido cerámico reciclado, de fracción granulométrica comprendida entre 4,75-9,50 mm, redujo la conductividad térmica y la deformación potencial por roderas. Sin embargo, un alto contenido en áridos cerámicos producía la acumulación térmica, una mala resistencia y tendencia a formar roderas. Como conclusión, las mezclas bituminosas en calien-

te con hasta un 40% de áridos cerámicos reciclados podían presentar las características adecuadas para funcionar como capas de rodadura en pavimentos.

Respecto a la reutilización de los áridos de la industria azulejera, la empresa Beca S.A. presentó en el año 2009 el estudio "Investigación aplicada al diseño y caracterización de mezcla bituminosa en caliente con material cerámico como árido fino y grueso", financiado con una ayuda del IMPIVA (nº de expediente IMIDTF/2009/22), caracterizando el residuo cerámico de azulejo como árido sintético para el uso en una mezcla bituminosa en caliente, con un porcentaje de hasta el 50% de árido natural calizo, para su inclusión en una capa intermedia de una sección de firme. La mezcla bituminosa desarrollada se aplicó a la construcción del pavimento del parking de las nuevas instalaciones deportivas del campus de la Universitat Jaume I de Castellón. Desde el punto de vista técnico, el empleo del azulejo como un porcentaje del árido total de las mezclas proporcionaría a las mezclas bituminosas prestaciones similares al árido procedente de cantera. Posteriormente, en abril de 2010 se ejecutó en la carretera CV-170 a la altura de la población de Atzeneta, un tramo experimental con mezclas bituminosas en caliente con contenido de áridos cerámicos reciclados como capa de rodadura. La mezcla utilizada para la realización del tramo fue de tipo AC 16 surf 35/50, con hasta un 30% de árido cerámico de tipo gres y porcelánico, procedente de la industria azulejera.

Posteriores estudios realizados por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) del Instituto de Transporte y Territorio (ITRAT) de la UPV han demostrado que estos nuevos materiales, mezcla de árido natural-árido cerámico, además de eliminar los excedentes industriales y atenuar el consumo de áridos naturales, con la correspondiente mejora medioambiental, presentan parámetros de comportamiento de las mezclas bituminosas muy similares a los obtenidos con áridos naturales.

3. Objetivos

El objeto de la investigación es la caracterización de mezclas bituminosas tipo base e intermedia y rodadura (AC), así como en mezclas discontinuas tipo rodadura (BBTM), con diferentes porcentajes de árido sintético en sustitución de árido natural, analizando sus prestaciones mecánicas y durabilidad. De

esta forma se pretende obtener un producto nuevo con materiales de residuos cerámicos que sustituyan a los áridos naturales, tanto de tipo silíceo empleados en la capa de rodadura y que escasean en la Comunidad Valenciana, como de tipo calizo en capas de base e intermedias, evitando la sobreexplotación de yacimientos.

4. Metodología

La metodología diseñada para el desarrollo de la investigación se ha estructurado en dos etapas.

En una primera etapa se llevó a cabo la revisión del Estado del Arte respecto al uso de materiales cerámicos reciclados en las mezclas bituminosas en caliente. Posteriormente, se realizó el estudio de los áridos naturales y áridos cerámicos reciclados a partir de residuos de tipo gres y porcelánico, para proceder al estudio de las mezclas bituminosas, realizándose el diseño en laboratorio de las mismas.

En una segunda etapa, pendiente de realización, se establece el desarrollo experimental mediante tramos de prueba, así como la recopilación y análisis de los datos. El seguimiento de las propiedades mecánicas de los tramos experimentales a lo largo del tiempo permitiría determinar las condiciones de durabilidad y comportamiento de las capas de firme, de acuerdo con la categoría de tráfico y la situación de cada capa en el firme.

En última instancia, el análisis de los datos resultantes permitirá la evaluación definitiva del aprovechamiento de los áridos cerámicos reciclados para su uso en mezclas bituminosas en caliente.

El esquema metodológico propuesto para la investigación se muestra en la Figura 1.

4.1 Tratamiento de los residuos cerámicos

Las dimensiones de los residuos industriales de material cerámico tipo gres y porcelánico (RICGP) no permiten su incorporación directa a la mezcla, por lo que deben someterse a un tratamiento previo (Figura 2), en un proceso 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.

Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente



Figura 1. Esquema metodológico del estudio del aprovechamiento de residuos cerámicos en mezclas bituminosas en caliente.

4.2. Caracterización de áridos cerámicos reciclados

La tipología básica y procedencia de los materiales utilizados, así como los principales resultados obtenidos de los ensayos efectuados en frío sobre las muestras en estudio se recogen en la Tabla 1.

El árido cerámico presenta una menor limpieza y una mayor humedad natural que los áridos naturales, caracterizándose además por un menor peso específico. Este déficit de densidad aparente del árido cerámico respecto al calizo condiciona el incremento de contenido de huecos de la mezcla y, por tanto, más puntos de fatiga, defectos de inicio de rotura y menor cohesión de la mezcla.

Por otro lado, el coeficiente de desgaste de Los Ángeles muestra valores sensiblemente más reducidos para los áridos de procedencia cerámica que para los áridos calizos, considerando tamaños granulométricos similares, siendo el árido cuarcítico el que presenta los menores coeficientes de desgaste.

El material cerámico se caracteriza por presentar dos dimensiones semejantes, quedando la tercera dimensión desproporcionada con respecto a las anteriores, lo que favorece la aparición de lascas. En particular, el azulejo de tipo gres presenta una compacidad menor que el porcelánico, por lo que al someterlo a machaqueo las tensiones internas son bajas y resulta una fractura más cúbica. Por el contrario, la alta compacidad del material porcelánico condiciona elevadas tensiones internas en el momento de rotura, favoreciendo la aparición de lascas.

4.2.1 Estudio experimental

Para determinar la influencia de los áridos cerámicos reciclados en las características superficiales de las mezclas bituminosas en caliente (MBC) para capas de rodadura, se ha llevado a cabo un estudio del comportamiento de mezclas con áridos reciclados en un tramo experimental existente mediante ensayos de coeficiente de rozamiento transversal (CRT).



Figura 2. (a) Residuo cerámico: a.1) Tipo gres, a.2) Tipo porcelánico; (b). Árido cerámico tratado: b.1) Fracción fina 0-4 mm, b.2) Fracción gruesa 4-11 mm

El tramo experimental fue ejecutado en abril de 2010 en la carretera CV-170, en las proximidades a la población de Atzeneta, tratándose de un tramo con una intensidad media diaria de vehículos muy baja, contando con una sección de calzada de aproximadamente 6,30 m de anchura, de doble sentido y sin arcenes.

Para la ejecución del tramo, de 1.200 m de longitud, se emplearon mezclas bituminosas en caliente de tipo AC 16 surf, con una dotación de 4,70% de betún convencional 35/50, un contenido en árido cerámico de tipo gres y porcelánico reciclado del 30% en el carril A de sentido CV-15 a Atzeneta y del 20% en el carril B de sentido Atzeneta a CV-15. Tras once meses de la apertura al tráfico, la auscultación de la capa de rodadura proporcionó buenos valores de coeficiente de rozamiento transversal ($CRT_A = 77,55\%$, $CRT_B = 68,23\%$), superiores al 65% establecidos por el PG-3. El va-

lor de macrotextura (Macrotextura $A = 0,66$ mm, Macrotextura $B = 0,67$ mm) resultó ligeramente insuficiente a los requerimientos del PG-3 (0,70 mm).

4.2.2 Estudio en laboratorio

A partir de estos datos, se realiza un estudio de resistencia al pulimento de capas de rodadura con material cerámico reciclado, relacionando el porcentaje de áridos reciclados, los valores de coeficiente de pulimento acelerado (CPA) y el número de caras esmaltadas ($N^{\circ}CE$) visibles en superficie.

Los áridos utilizados para la formulación de las probetas de dicho estudio fueron áridos duros de Cuarcita, procedentes de canteras de Riudecols (Tarragona), y áridos cerámicos reciclados a partir de materiales tipo gres y porcelánico, procedentes de las empresas Saloni-Becsa (Castellón).

Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente

Tabla 1. Cuadro resumen de ensayos realizados en frío sobre las muestras de áridos.

Temperatura, °C	Granulometría	Limpieza de áridos (% # 0,063 mm)	Tamaño mínimo (mm)	Tamaño máximo (mm)	Humedad natural (%)	Peso específico y % absorción	Filler (0,063 mm)	Equivalente de arena SEz	Densidad aparente en tolueno	Índice de lajas (%)	Los ángeles (%)
Árido 0/4 cerámico ⁽¹⁾	Sí	-	0	4	2,34%	2,577 / 14,10	9,00%	EA- 78	0,769	-	-
Árido 4/10 cerámico ⁽¹⁾	Sí	1,14	4	11,2	1,27%	2,425 / 3,96	1,10%	-	-	9,0 %	21 %
Árido 6/12 cuarcita ⁽³⁾	Sí	0,72	6	12	0,58%	2,762 / 0,93	0,72%	-	-	12,6 %	13 %
Árido 12/20 cuarcita ⁽³⁾	Sí	0,69	12	20	0,40%	2,749 / 0,67	0,69%	-	-	7,2 %	13 %
Árido 16/32 cuarcita ⁽⁴⁾	Sí	0,07	16	32	0,40%	2,747 / 0,67	0,10%	-	-	9,6 %	13 %
Árido 0/2 calizo ⁽²⁾	Sí	-	0	2	0,16%	2,793 / 2,73	20,30%	EA-60	0,714	-	-
Árido 0/4 calizo ⁽²⁾	Sí	-	0	4	1,66%	2,793 / 2,73	13,70%	EA- 53	0,833 ⁽⁵⁾	-	-
Árido 4/12 calizo ⁽²⁾	Sí	0,56	4	12	0,96%	2,751 / 1,14	2,48%	-	-	5,4 %	29 %
Árido 12/20 calizo ⁽²⁾	Sí		12	20	0,64%	2,743 / 0,94	0,84%			6,0 %	29 %
Árido 20/32 calizo ⁽²⁾	Sí	0,28	20	32	0,10%	2,798 / 0,78	0,45%	-	-	2,0 %	-

⁽¹⁾ Áridos machacados cerámicos de acopios planta La Torreta (Castellón)

⁽²⁾ Áridos machacados calizos de acopios planta La Torreta (Castellón)

⁽³⁾ Áridos machacados cuarcitas de cantera Riudecols en planta La Torreta (Castellón)

⁽⁴⁾ Áridos machacados cuarcitas de cantera Riudecols en planta Masdenverge (Tarragona)

⁽⁵⁾ Ensayos de C.P.A. externos, combinando árido cerámico y cuarcitas Riudecols

Los resultados mostraron que las mezclas de áridos con presencia de materiales cerámicos reciclados obtuvieron valores de CPA sensiblemente inferiores a los límites establecidos por el PG-3 para tráfico de tipo T1 a T31. Respecto de los tráfico de tipo T32 a T4 y arcenes, las mezclas ensayadas con un contenido de árido cerámico del 15%, 31% y 56% presentaron valores de CPA superiores al límite establecido por las prescripciones, por lo que resultan viables técnicamente para su uso en estos niveles de tráfico (Figura 3).

En general, la mayor proporción de árido cerámico respecto del árido natural disminuye el valor CPA y aumenta la presencia de caras esmaltadas en la superficie de rodadura.

La mezcla de áridos tipo 3 con un 31% de material cerámico presenta un valor de CPA de 47%, por debajo del 50% requerido en el PG-3 para tráfico desde T1 a T31. Sin embargo, se ha contrastado en el estudio experimental que me-

dante la utilización de un porcentaje de material cerámico reciclado similar se pueden formular y producir mezclas bituminosas que en la práctica obtienen unos buenos resultados superficiales iniciales en cuanto a macrotextura y CRT.

Por tanto, se plantea la hipótesis de que los áridos cerámicos reciclados pueden resultar viables para la fabricación de mezclas bituminosas en capas de rodadura, en un porcentaje de utilización de hasta el 30% sobre el total de los áridos en peso y para tráfico desde T1 a T31, pese al defecto de CPA en la mezcla de áridos. Esta hipótesis se confirma para tráfico tipo T32 y T4, así como en arcenes, dado que en este caso se cumplen las especificaciones de CPA requeridas en la mezcla de áridos.

En todo caso, la validación definitiva de la viabilidad técnica de esta mezcla queda supeditada tanto al cumplimiento de las especificaciones del PG-3 para mezclas bituminosas

en caliente en capas de rodadura, como a la ejecución y análisis de tramos experimentales que permitan validar la hipótesis de adecuadas prestaciones y durabilidad de las mezclas sometidas a distintas categorías de tráfico de pesados.

4.3 Diseño de mezclas bituminosas

El proceso de diseño de mezclas se fundamenta en la selección de los tipos de mezcla a estudiar (Tabla 2), el diseño de cada fórmula de trabajo, la fabricación de cada una de ellas en laboratorio para su caracterización y la fabricación de las mismas en planta para su validación. En todo caso, se trata de un proceso iterativo y retroalimentado por los resultados obtenidos en gran parte de sus fases, por lo que el presente artículo pretende ser la síntesis de todo el proceso destacando los resultados más representativos.

Los principales factores de diseño considerados en el estudio concreto de las mezclas son las tipologías y granulometrías de los áridos, así como la tipología y dosificación de ligantes.

Respecto a los áridos en estudio, una vez caracterizados se realiza el encaje granulométrico de los mismos, tanto en frío como en caliente, según los husos correspondientes establecidos en el PG-3, teniendo en cuenta las características

de los áridos industriales cerámicos respecto a su resistencia al desgaste por pulimento en el caso de capas de rodadura.

Asimismo, se establece la dotación óptima del ligante, teniendo en cuenta los criterios de dosificación mínimos establecidos por el PG-3 y los propios de las mezclas, mediante un estudio pormenorizado en laboratorio, obteniéndose la fórmula de trabajo óptima.

Dentro del proceso de diseño de cada mezcla bituminosa, se ha desarrollado una metodología para el estudio pormenorizado de las mezclas en diferentes etapas, según se relacionan a continuación:

- Estudio inicial de las mezclas patrón convencionales: la caracterización de las mezclas convencionales constituye una referencia para la posterior comparación con las mezclas que contienen áridos cerámicos reciclados RICGP.
- Estudios preliminares en laboratorio: mediante un intenso estudio preliminar en laboratorio, tanto en cuanto a las fórmulas de trabajo y el contenido en áridos cerámicos reciclados (RICGP), como al estudio de dotación del ligante, se obtiene una primera aproximación al diseño de mezclas. Del mismo se concluye que un elevado porcentaje de áridos reciclados induce, en el proceso de fabrica-

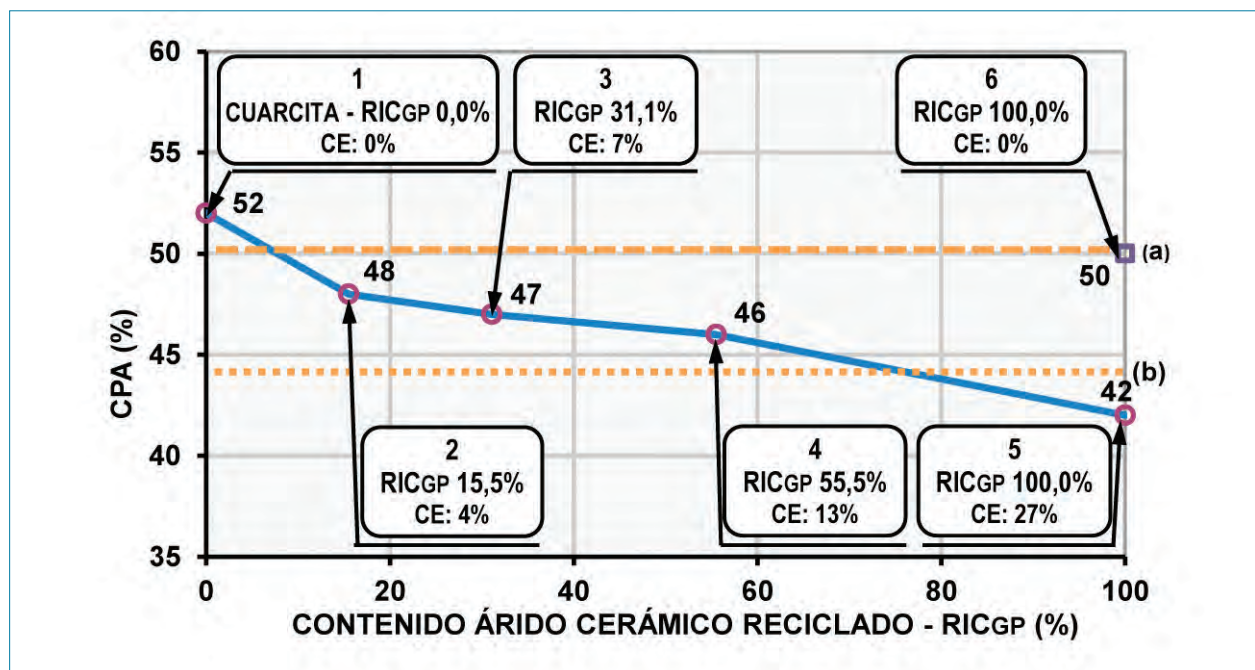


Figura 3. Evolución de los valores CPA en función del % de áridos reciclados. NOTA: CE=nº caras esmaltadas en superficie; (a) Prescripciones PG-3: CPA≥50%, tráfico T1 a T31; (b) Prescripciones PG-3: CPA≥44%, tráfico T3, T4 y arcenes.

Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente

Tabla 2. Mezclas bituminosas en caliente seleccionadas.

	ID	Tipo	Capa	Denominación	Áridos
M. patrón	1	C	B / I	AC 22-BIN - 35/50 S CALIZO	árido grueso calizo ⁽¹⁾ / arena caliza 0-4 ⁽¹⁾ mm
	2	C	R	AC 22 SURF 35/50 S CUARCÍTICO	árido cuarcítico ⁽³⁾ / arena caliza 0-4 ⁽¹⁾ mm
	3	C	R	BBTM 11B – SURF BM3c M CUARCÍTICO	árido cuarcítico ⁽³⁾ / arena caliza 0-2 ⁽¹⁾ mm
M. con áridos cerámicos	4	AR	B / I	AC 22-BIN -35/50 S CALIZO + RICGP ⁽²⁾	arena caliza 0-4 ⁽¹⁾ mm / arena cerámica 0-4 mm árido 4-11 mm RICGP ⁽²⁾ / árido grueso calizo ⁽¹⁾
	5	AR	R	AC 22-SURF - 35/50 S CUARCÍTICO ⁽³⁾ + RICGP ⁽²⁾	arena caliza 0-4 ⁽¹⁾ mm / arena cerámico 0-4 mm árido 4-11 mm RICGP ⁽²⁾ / árido cuarcítico ⁽³⁾
	6	AR	R	BBTM 11B - SURF BM3c M CUARCÍTICO ⁽³⁾ + RICGP ⁽²⁾	arena cerámica 0-4 mm / árido 4-11 mm RICGP ⁽²⁾ árido cuarcítico ⁽³⁾ / arena caliza 0-2 mm

Tipo: C; Convencional o patrón
AR; Áridos Cerámicos Reciclados
Capa: B; Base / I; Intermedia / R;
Rodadura

⁽¹⁾ Árido calizo procedente de la Cantera La Torreta (Castellón).

⁽²⁾ Árido cerámico reciclado a partir de residuos tipo gres y porcelánico de la industria azulejera.

⁽³⁾ Árido cuarcítico de tamaño superior a 3 mm, procedente de la Cantera de Riudecolls (Tarragona).

ción de las mezclas, una mayor absorción de las fases más ligeras de los ligantes a las temperaturas de trabajo, debido principalmente a la mayor porosidad de los áridos de RICGP. Los efectos directos sobre las características de las mezclas son la disminución de la cohesión, el aumento del índice de huecos y el favorecimiento de un comportamiento viscoso en la misma. Por tanto, a tenor de los resultados obtenidos, tanto en la caracterización superficial como en la caracterización mecánica, se establece un contenido de áridos cerámicos reciclados procedentes de RICGP en las mezclas de estudio del 30% sobre la masa total de los áridos en las mezclas seleccionadas como criterio de diseño para el resto de la investigación.

- Estudio específico de mezclas fabricadas en laboratorio: se realiza un estudio en laboratorio de las mezclas patrón convencionales seleccionadas con áridos naturales, así como las mezclas con áridos cerámicos, realizándose su completa caracterización según los ensayos dispuestos en el marco de referencia del Pliego General de Carreteras (PG-3) vigente, que incluye el marcado CE, a excepción del ensayo de pista o rodadura que se realizará únicamente sobre las mezclas fabricadas en planta. Además,

estos se completaron con ensayos de estabilidad y deformación Marshall, inmersión-compresión y cántabro como complemento para su caracterización.

- Estudio de mezclas fabricadas en planta: para evaluar la influencia de variables reales de producción y factores de escala, así como validar la caracterización realizada a partir de mezclas producidas en laboratorio, se realiza el estudio de las mezclas tipo AC22 SURF y AC22 BIN producidas en la planta asfáltica de "La Torreta" (Castellón) y las mezclas tipo BBTM 11B producidas en la planta de Masdenverge (Tarragona), determinando las propiedades de las mismas bajo criterios de fabricación reales. Dichas mezclas son caracterizadas mediante una campaña de ensayos de contraste realizada en laboratorio, que consta, entre otros, de ensayos de granulometría, pista o rodadura y sensibilidad al agua.

5. Resultados y análisis

5.1. Análisis individual de mezclas

Los resultados obtenidos para cada tipo de mezcla convencional y con adición de áridos cerámicos reciclados, en un

porcentaje del 30% respecto la masa total de áridos, se presentan en la Tabla 3, indicando asimismo las prescripciones establecidas en el PG-3 y para el complemento de caracterización en cada tipo de mezcla.

La mezcla AC22 BIN fabricada en planta con un 30% de áridos cerámicos reciclados requiere una dotación ligeramente mayor de ligante y de filler que la mezcla patrón para lograr una densidad similar. El índice de huecos resulta ligeramente mayor en la mezcla con áridos reciclados, con valores ligeramente superiores a los establecidos en el PG-3 para tráfico T1-T4. La adición de áridos cerámicos en esta mezcla aumenta la resistencia a deformaciones plásticas de la misma, resultando una deformación de rodadura menor, y de la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, mejorando el comportamiento de la mezcla patrón y presentando valores que cumplen las prescripciones

del PG-3. El porcentaje de pérdida de resistencia del ensayo inmersión-compresión resulta mayor que en la mezcla patrón, disminuyendo sensiblemente la estabilidad máxima de la mezcla. La deformación Marshall de la mezcla con áridos reciclados es similar a la obtenida en la mezcla patrón.

Respecto la mezcla AC22 SURF patrón fabricada en planta, es destacable que la dotación de ligante en planta resulta muy superior a la establecida en el estudio de diseño en laboratorio, debido a variables reales de producción. Por tanto, la evaluación final de la misma queda supeditada a la verificación del diseño de las mezclas, respecto los valores de diseño en laboratorio, a realizar en estudios posteriores de tramos experimentales. La mezcla AC22 SURF con un 30% de áridos cerámicos de RICGP refleja una dotación menor de ligante que la mezcla patrón. El índice de huecos es mayor en la mezcla con áridos reciclados, con valores por encima de

Tabla 3. Comparativa mezclas patrón, mezclas con 30% de áridos reciclados RICGP y prescripciones PG-3.

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) (% pérdida) (NLT-162)	Estabilidad máxima(1) (KN) (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 ⁽²⁾	≥ 12,50 ⁽²⁾	2,00-3,50 ⁽²⁾	-	-
	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 ⁽²⁾	≥ 12,50 ⁽²⁾	2,00-3,50 ⁽²⁾	-	-
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 ⁽²⁾	≤ 15,0

⁽¹⁾ Complemento de caracterización Marshall

⁽²⁾ Prescripción no vigente

- Dato no aplicable

Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente

los establecidos en el PG-3 para tráfico T1-T4. La adición de áridos cerámicos en mezclas de tipo AC22 SURF produce un aumento del índice de huecos considerable, disminuyendo la resistencia a deformaciones plásticas en pista de la misma y la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión respecto de la mezcla patrón. Esta pérdida de prestaciones se relaciona en parte con la diferencia de dotación de ligante en la mezcla patrón producida en planta. No obstante, la mezcla con áridos cerámicos presenta características que, si bien no cumplen de manera estricta las prescripciones del PG-3 para los tráfico más exigentes, se ajustan de manera aceptable a los umbrales establecidos. Por tanto, se considera que la mezcla AC22 SURF podría resultar adecuada para un rango de tráfico inferior, supeditando su validación a posteriores análisis en tramos experimentales. Respecto de los parámetros calculados en el complemento de caracterización Marshall e inmersión-compresión para las mezclas tipo AC22 SURF, el porcentaje de pérdida de resistencia del ensayo inmersión-compresión es mucho menor en la mezcla con áridos cerámicos que en la mezcla patrón, mejorando ligeramente la estabilidad máxima Marshall. Por otro lado, la deformación Marshall aumenta ligeramente en la mezcla con áridos cerámicos respecto la mezcla patrón.

Por último, la mezcla BBTM 11B fabricada en planta con un 30% de áridos cerámicos de RICGP requiere una dotación mayor de ligante que la mezcla patrón para lograr unas prestaciones similares. La adición de áridos cerámicos en mezclas de tipo BBTM 11B produce un aumento del índice de huecos, manteniendo buenas prestaciones en cuanto a la deformación plástica en pista. Sin embargo, la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión disminuye notablemente respecto de la mezcla patrón, aportando valores muy por debajo de los establecidos en las prescripciones del PG-3. La pérdida de partículas en seco aumenta ligeramente en mezclas con áridos cerámicos respecto la mezcla patrón, cumpliendo no obstante las prescripciones vigentes del PG-3. De la evaluación del comportamiento de la mezcla BBTM 11B respecto a la sensibilidad al agua, cuyas prestaciones resultan insuficientes según las prescripciones, se considera la necesidad del estudio en profundidad en tramos experimentales con condiciones de tráfico y climatológicas reales. La pérdida de partículas en ensayo cántabro se mantiene en un rango similar en las mezclas con áridos cerámicos respecto la mezcla patrón.

5.2 Análisis global de mezclas

Se han evaluado las mezclas bituminosas en estudio fabricadas en planta para determinar los efectos de la adición de áridos cerámicos reciclados.

En general, la adición de áridos cerámicos aumenta el índice de huecos en las mezclas y la dotación de ligante, disminuyendo la densidad aparente (Figura 4). La resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión de las mezclas con áridos cerámicos (ITSr) aumenta en el caso de la mezcla tipo AC 22 BIN, proporcionando una mejor respuesta frente a la sensibilidad al agua. Sin embargo, dicha resistencia disminuye para las mezclas de rodadura tipo AC 22 SURF y BBTM (Figura 4).

La resistencia a deformaciones plásticas en pista mejora para todas las tipologías de mezclas estudiadas al adicionar áridos cerámicos reciclados (Figura 4).

Respecto de las características analizadas mediante el complemento de caracterización, la variación de estabilidad y deformación Marshall en las mezclas AC22SURF al introducir áridos cerámicos es pequeña (2,8%, 6,4%). Respecto de la mezcla AC22 BIN, la deformación varía escasamente (-0,7%), si bien la estabilidad máxima se ve reducida sensiblemente (-12,4%). En las mezclas BBTM con adición de áridos cerámicos la pérdida de partículas en ensayo húmedo disminuye ligeramente (-6,7%), mientras que la pérdida de partículas en seco aumenta levemente (18,9%).

6. Conclusiones

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.

La resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión resulta con menor pérdida en mezclas intermedias con áridos reciclados tipo AC 22 BIN. Sin embargo, dicha resistencia disminuye en capas de rodadura tras incorporar áridos cerámicos.

Por otro lado, la adición de áridos reciclados mejora el comportamiento de la mezcla AC 22 SURF frente al agua, aumentando la cohesión y disminuyendo el porcentaje de

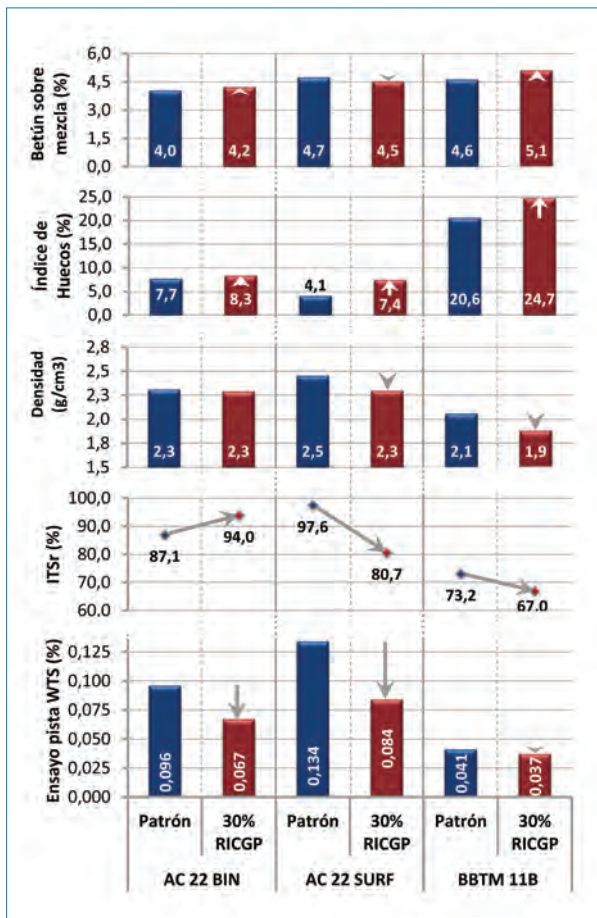


Figura 4. Comparativo mezclas patrón y con adición de áridos cerámicos producidas en planta.

pérdida de resistencia a compresión. La deformación de mezclas con áridos cerámicos se mantiene en un rango similar a la de mezclas convencionales.

En general, las mezclas bituminosas en estudio cumplen las prescripciones establecidas por el PG-3 para tráficos de tipo T1 a T4 pese a que la mezcla de áridos no cumple las especificaciones de CPA para tráficos entre T1 y T31, con excepciones puntuales donde los valores no cumplen de forma estricta pero se aproximan notablemente.

En particular, la mezcla para capas intermedias tipo AC22 BIN con un 30% de áridos cerámicos cumple las prescripciones del PG-3 establecidas para mezclas bituminosas en categorías de tráfico T1 a T4.

La mezcla para capas de rodadura tipo AC22 SURF con un 30% de áridos cerámicos cumple las prescripciones del PG-3 establecidas para categorías de tráfico T1 a T4 en cuanto a dotación de betún, filler e índice de huecos. Sin embargo,

el valor de resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión (ITSr) de las mezclas con áridos cerámicos resulta ligeramente inferior al establecido ($ITSr_{AC22SURF} = 80,7\% < ITSr_{PG-3} = 85,0\%$). Además, la deformación por rodadura (pista) obtenida resulta ligeramente insuficiente para categorías de tráfico de tipo T00 a T2, cumpliendo únicamente para categorías de tipo T3 a T4 ($WTS_{PG-3, T00-T2} = 0,07\% < WTS_{AC22SURF} = 0,08\% < WTS_{PG-3, T3-T4} = 0,10\%$).

La mezcla para capas delgadas de altas prestaciones de tipo BBTM 11B con un 30% de áridos cerámicos cumple las prescripciones del PG-3 establecidas para categorías de tráfico T1 a T4 en cuanto a dotación de betún, relación filler/betún e índice de huecos. Sin embargo, el valor de resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión (ITSr) de las mezclas con áridos cerámicos resulta considerablemente inferior al establecido ($ITSr_{AC22SURF} = 67,0\% < ITSr_{PG-3} = 90,0\%$). La deformación por rodadura (pista) obtenida es muy reducida ($WTS_{BBTM} = 0,037\% \ll WTS_{PG-3, T00-T2} = 0,07\%$), presentando un comportamiento excelente para todo tipo de tráfico.

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. Esta viabilidad es mayor en la mezcla de tipo AC22BIN, puesto que cumple las prescripciones mecánicas establecidas en el PG-3 para las mezclas bituminosas, a excepción del defecto de CPA en la mezcla de áridos. Para las capas de rodadura AC22SURF y BBTM 11B, la viabilidad técnica queda condicionada al estudio experimental, de forma que permita establecer el comportamiento real de las mezclas y determinar las categorías de tráfico para las que las prestaciones de las mismas resultan adecuadas.

7. Agradecimientos

La presente investigación no habría sido posible sin la subvención del Instituto de la Mediana y Pequeña Industria Valenciana (IMPIVA), dentro de su programa Investigación y Desarrollo Tecnológico, cofinanciada por la Unión Europea

Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente

dentro del Programa Operativo del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), concedida a la empresa BECSA, S.A (nº de expediente IMIDTF/2011/56).

8. Referencias bibliográficas

1. Baoshan Huang, Qiao Dong, Edwin G. Burdette (2009). "Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete". *Construction and Building Materials* 23 (2009) 3451–3456.
2. Federal Highway Administration (FHWA) (1997). User guidelines for waste and by product materials in pavement construction. FHWA-RD-97-148.
3. Feng, D., Yi, J., Wang, D. (2013). Performance and Thermal Evaluation of Incorporating Waste Ceramic Aggregates in Wearing Layer of Asphalt Pavement. *J Mater Civil Eng* (publicado antes de impresión).
4. Gahlot, V. (2011). "Ceramic Waste as a pavement construction material". Lecturer, Govt. Polytechnic College, Bikaner, Rajasthan (India) (No publicado).
5. Hassan, K.E., Elghali, L., Sowerby, C. (2004). Development of new materials for secondary and recycled aggregates in highway infrastructure. Transport Research Laboratory (TRL); Unpublished Project Report PR CPS/30/03.
6. Koyuncu, H., Guney, Y., Yilmaz, G., Koyuncu, S., Bakis, R. (2004). "Utilization of Ceramic Wastes in the Construction Sector". Anadolu University, Department of Civil Engineering, Eskisehir 26555, Turkey.
7. Krüger, G., Solas, H. (2008). Einsatz von Sanitärkeramikkrezyklat. Aufhellungsmaterial für Asphaltdeckschichten. Zeitschrift: BR Baustoff Recycling + Deponietechnik. ISSN: 0934-683X. Vol.: 24, Nr.2, 2008. pp- 30-38 (8).
8. Ministerio de Fomento (2008). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes de la Dirección General de Carreteras (PG-3).
9. Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2010). "Reusing ceramic wastes in concrete". *University of Minho, Portugal. Construction and Building Materials* 24 (2010) 832–838.
10. Van de Ven, M.F.C., Molenaar, A.A.A., Poot, M.R. (2011). Asphalt mixtures with waste materials: possibilities and constraints. 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa Proceedings.