

FABRICACIÓN DE UNA MEZCLA TEMPLADA CON EMULSIÓN EMPLEANDO ÁRIDOS SIDERÚRGICOS DE HORNO ELÉCTRICO

ABRAHAM GARCÍA PRIETO
PRODUCTOS ASFÁLTICOS S.A (PROAS)

JOSÉ ANTONIO NAVARRO JAUSORO
DIPUTACIÓN FORAL DE GIPUZKOA

MARISOL BARRAL VÁZQUEZ
GRUPO CAMPEZO DE OBRAS Y SERVICIOS S.L.

MIGUEL CEMBRERO MARCEL
GUIPASA S.A.

ANTONIO GARCÍA SILLER
PRODUCTOS ASFÁLTICOS S.A. (PROAS)

FABRICACIÓN DE UNA MEZCLA TEMPLADA CON EMULSIÓN EMPLEANDO ÁRIDOS SIDERÚRGICOS DE HORNO ELÉCTRICO

INTRODUCCIÓN

En esta comunicación abordaremos los diversos aspectos que han permitido la fabricación y puesta en obra de una mezcla templada con emulsión empleando áridos siderúrgicos de horno eléctrico.

La existencia de una preocupación ambiental creciente en todos los sectores de la actividad humana es patente en estos días. Y el sector de la fabricación de mezclas asfálticas no es ajeno a ella.

Entre los distintos aspectos desde los que es posible abordar una concepción más amigable con el medio ambiente, cabe citar la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero y la reutilización de subproductos de otras industrias.

Es precisamente en estos dos factores donde incide la mezcla fabricada objeto de esta comunicación.

Por un lado, mediante la disminución de la temperatura de fabricación y puesta en obra, se logra una bajada significativa en el consumo de combustibles fósiles. De este modo, minimizamos tanto el consumo de un recurso no renovable, como la emisión de los gases de combustión a la atmósfera. En este aspecto, la bibliografía es profusa en trabajos, estudios e investigaciones, pero a nadie se le escapa que el empleo de temperaturas menores que las de fabricación y puesta en obra de mezclas convencionales, conlleva un menor impacto ambiental.

Por otro lado, reutilizamos un subproducto que nos permite disminuir (en este caso eliminar) la necesidad áridos nuevos. Eliminada esta necesidad, se prescinde por tanto del empleo de más recursos naturales, así como las actividades derivadas de la obtención de los mismos.

Es por esto, que el empleo de técnicas como la reseñada nos permite aunar ese doble ahorro ambiental, tanto en materias primas, como en energía.

Antes de continuar, resulta preciso definir que una mezcla bituminosa templada con emulsión es aquella en la que los áridos son calentados a una temperatura de 80 – 90°C, y en la que se emplea como ligante una emulsión catiónica media, fabricada a partir de betún modificado con polímeros.

En este caso, los áridos empleados son, como anteriormente hemos reseñado, escorias de horno eléctrico de acería.

La mezcla que se diseñó, fabricó, y puso en obra viene a corresponder con una GF 12 (del artículo 541 del PG-3/75), extendida en la carretera GI-3481 de Asteasu a Larraul, en unos 1.400 m de longitud con 5 m de anchura y el espesor de la misma fue de 5 cm. Se trataba de una actuación de rehabilitación estructural del firme sobre un antiguo pavimento de mezcla bituminosa en frío. La categoría de tráfico es un T4B y presentaba una IMD máxima de 225.

A continuación pasamos a mostrar el diseño de la mezcla descrita anteriormente, su puesta en obra y las características de la misma en laboratorio y de la unidad terminada.

ESTUDIO DE LABORATORIO

Antes de su fabricación y puesta en obra se llevó a cabo en el Laboratorio la caracterización del árido,

el diseño de una emulsión acorde con el mismo, y la consiguiente propuesta de una fórmula de trabajo que permitiera el empleo de 100% árido proveniente de acería, sin ningún aporte adicional.

Características del árido (escoria) utilizado

El árido siderúrgico utilizado presenta marcado CE, cuyas características se muestran a continuación:

 1292 LABEN CENTRO TECNOLÓGICO		
CORRUGADOS AZPEITIA, SL C/ Enakada 1, Barrio Landala 20730 Azpeitia (Gipuzkoa) CIF: B20879680 10 1292-CPD-0122032		
UNE-EN 12048:2003+AC:2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas AF-0/4-T-A		
Forma de las partículas	Indice de lajas Coeficiente de forma	F ₁₀ S ₁₀
Tamaño de las partículas		0/4 0,4 X 0, G ₁₀ /10
Densidad de partículas		3 Mg/m ³
Impureza	Contenido en finos Calidad de finos	f ₁ NP
Porcentaje de partículas trituradas o fracturadas		C ₁₀₀₀
Resistencia a la fragmentación y machaqueo		LA ₁₀
Resistencia al pulimento		PSV ₁₀
Estabilidad en volumen	Desintegración del silicato diatómico	V ₁₀ CUMPLE
	Desintegración del heno	CUMPLE
Absorción/succión de agua		3,5%
Liberación de metales pesados por lixiviación		NO
Liberación de otras sustancias peligrosas		NO
Durabilidad frente al hielo y deshielo		MS ₁₀

 1292 LABEN CENTRO TECNOLÓGICO		
CORRUGADOS AZPEITIA, SL C/ Enakada 1, Barrio Landala 20730 Azpeitia (Gipuzkoa) CIF: B20879680 10 1292-CPD-0122032		
UNE-EN 12048:2003+AC:2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas AG-12/20-T-A		
Forma de las partículas	Indice de lajas Coeficiente de forma	F ₁₀ S ₁₀
Tamaño de las partículas		12/20 G ₁ : 85/20
Densidad de partículas		3 Mg/m ³
Impureza	Contenido en finos Calidad de finos	f ₁ NP
Porcentaje de partículas trituradas o fracturadas		C ₁₀₀₀
Resistencia a la fragmentación y machaqueo		LA ₁₀
Resistencia al pulimento		PSV ₁₀
Estabilidad en volumen	Desintegración del silicato diatómico	V ₁₀ CUMPLE
	Desintegración del heno	CUMPLE
Absorción/succión de agua		3,5%
Liberación de metales pesados por lixiviación		NO
Liberación de otras sustancias peligrosas		NO
Durabilidad frente al hielo y deshielo		MS ₁₀

 1292 LABEN CENTRO TECNOLÓGICO		
CORRUGADOS AZPEITIA, SL C/ Enakada 1, Barrio Landala 20730 Azpeitia (Gipuzkoa) CIF: B20879680 10 1292-CPD-0122032		
UNE-EN 12048:2003+AC:2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas AG-4/12-T-A		
Forma de las partículas	Indice de lajas Coeficiente de forma	F ₁₀ S ₁₀
Tamaño de las partículas		4/12 G ₁ : 85/20, G ₂₀ /15
Densidad de partículas		> 3 Mg/m ³
Impureza	Contenido en finos Calidad de finos	f ₁ NP
Porcentaje de partículas trituradas o fracturadas		C ₁₀₀₀
Resistencia a la fragmentación y machaqueo		LA ₁₀
Resistencia al pulimento		PSV ₁₀
Estabilidad en volumen	Desintegración del silicato diatómico	V ₁₀ CUMPLE
	Desintegración del heno	CUMPLE
Absorción/succión de agua		< 3,5%
Liberación de metales pesados por lixiviación		NO
Liberación de otras sustancias peligrosas		NO
Durabilidad frente al hielo y deshielo		MS ₁₀

Las características más importantes y diferenciadoras de las escorias de acería utilizadas, con respecto a los áridos naturales, son las que se resumen en la siguiente tabla 1.

	Árido siderúrgico
Densidad (g/cm ³)	3,0
CPA	< 62
Desgaste de LA (%)	< 25

Tabla 1: Características generales de las escorias de acería.

Las granulometrías de las distintas fracciones utilizadas se muestran en las tablas 2 y 3.

Tamaño de los tamices (mm)	8	4	2	0,5	0,25	0,125	0,063
% pasa (0/4)	100	98	66	21	12	5	2,2

Tabla 2: Granulometría de la arena escoria (en masa).

Tamaño de los tamices (mm)	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,25	0,125	0,063
% pasa (4/12)	100	100	100	58	6	2	1	1	1	0,3
% pasa (12/20)	100	98	37	4	1	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2

Tabla 3: Granulometría del árido grueso (en masa).

Podemos concluir, a la vista de las características que presentan las escorias utilizadas, que adecuadamente tratadas, cumplen las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos para mezclas bituminosas en frío y categoría de tráfico superiores o iguales a T3. Además, desde el punto de vista medioambiental, según los resultados de lixiviación obtenidos nos permiten su utilización sin problemas.

Características de la emulsión bituminosa

La emulsión a emplear, es una emulsión catiónica de rotura media fabricada a partir de betún modificado con polímeros. Dicha emulsión presenta unas características como las reseñadas a continuación en la tabla 4:

Característica	Unidad	Norma	mín.	máx.
Emulsión Original				
Viscosidad saybolt Furol a 50 °C	s	NLT-138	20	-
Carga de las partículas	-	NLT-194	positiva	-
Contenido de agua (en volumen)	%	NLT-137	-	35
Betún asfáltico residual	%	NLT-139	59	-
Fluidificante por destilación (en volumen)	%	NLT-139	-	12
Sedimentación (a siete días)	%	NLT-140	-	5
Tanizado	%	NLT-142	-	0.10
Residuo por evaporación a 163 °C (NLT-147)				
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	NLT-124	100	220
Punto de reblandecimiento	°C	NLT-125	40	-
Ductilidad (25 °C; 5 cm/min)	cm	NLT-126	10	-
Recuperación elástica a 25 °C	%	NLT-329	12	-

Tabla 4: Características de la emulsión ECMm utilizada.

El empleo de una emulsión modificada con polímeros, permite dotar de unas mejores prestaciones mecánicas a la mezcla.

Diseño de la mezcla bituminosa

Una vez analizadas las fracciones de árido disponibles, y el huso granulométrico propuesto GF 12 (ver tabla 5), se procede a proponer una composición de dichas fracciones que permitan su encaje en dicho huso.

Tamiz	GF 12	
40	100	100
25	100	100
20	100	100
12,5	75	95
5	30	48
2,5	20	35
0,32	5	14
0,08	1	5

Tabla 5: Huso granulométrico de una mezcla en frío gruesa tipo GF 12.

La curva granulométrica propuesta es la reseñada en la siguiente figura (Fig. 1). Se busca un contenido de arena (pasa por 2,5 mm) que, estando dentro del huso granulométrico, nos permita una adecuada y fácil evaporación de los fluidificantes de la emulsión y que la rotura de la misma no sea excesivamente rápida, permitiendo su adecuada envuelta.

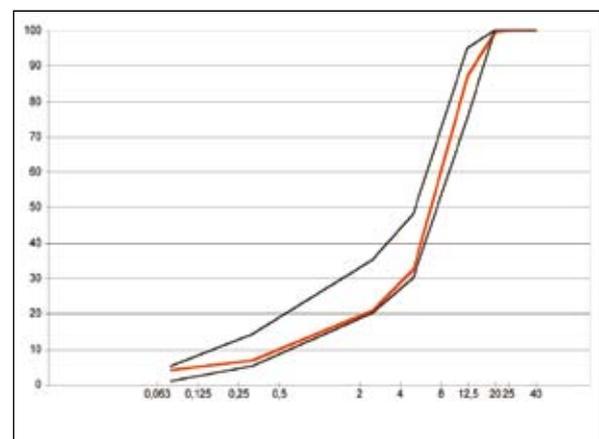


Figura 1. Huso granulométrico vs. Curva granulométrica propuesta.

Una vez se ha logrado el encaje en huso del árido, y disponemos de la emulsión adecuada, se evalúa su envuelta, así como la adhesividad de la misma. Tras ensayos de envuelta previos, se propone para la fórmula de trabajo, una dotación del 7% (s/a) de ECMm (lo que corresponde con un contenido aproximado de un 4,2% de betún sobre áridos). Esto supone en volumen un 23% de emulsión por volumen de árido. Con este contenido de emulsión compensamos la elevada densidad del árido (que nos podría llevar a una sobredosificación) con la también elevada porosidad del mismo (que conduce a mayor superficie específica).



Figura 2. Envuelta.

A la hora de realizar la envuelta, resulta de especial importancia en estas mezclas templadas, ver que no se produzca escurrimiento de la emulsión.

En cuanto a la adhesividad, evaluada por el método PROAS, observamos que la superficie del árido cubierta, tanto a 60°C como a ebullición es del 100%.



Figura 3. Adhesividad PROAS – 60°C y ebullición.

Evaluada la compatibilidad de la emulsión con el árido, el siguiente paso es evaluar las características mecánicas de la mezcla. Para ello se dispone la fabricación de las probetas necesarias para todos los ensayos previstos, sometiéndolas al mismo tipo de curado, tal y como queda reseñado en el Manual de Mezclas Abiertas en Frío elaborado por ATEB, es decir:

- Tras la fabricación de las mismas, recién compactadas, y habiendo deslizado la probeta hasta el borde del molde, se introducen con dicho molde, descansando sobre una base rígida y perforada (malla de 3 – 4 mm) en una estufa de aireación forzada a 75°C, durante 48 horas.
- Transcurrido este tiempo, se observará la presencia o no de escurrimiento de ligante en la base de cada probeta. De no haberse presenciado escurrimiento, se mantendrán durante 5 días más las probetas, a 90°C. De haber existido escurrimiento, deberá modificarse la fórmula de trabajo.
- Tras este periodo de curado, se sacan de la estufa, se dejan enfriar durante dos horas y se procede a su desmoldado. Tras lo cual pueden pasarse a ensayar.

Para determinar el comportamiento mecánico de la mezcla, se procede a realizar el **Ensayo de Sensibilidad al agua** según la UNE EN 12697-12.

Las probetas son compactadas a 90°C y 50 golpes por cara, y las probetas de la serie húmeda, colocadas en un baño a 40°C, más exigente que el solicitado para las realizadas con grados blandos de betún. De este modo, podemos evaluar su comportamiento de una forma más severa.

- Los ensayos arrojaron valores de ITSR del 83%.

Del mismo modo, se realiza el **Ensayo Cántabro** con las probetas compactadas a 90°C, y siguiendo las condiciones especificadas para mezclas en caliente (baño a 60°C en vez de los 45°C especificados para una mezcla en frío) y el resultado fueron unas pérdidas del 31%. No obstante, ensayos hechos durante el control de la obra, en la que sometió a un baño a 45°C fue sensiblemente inferior (21%), como veremos más adelante.

FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

La fabricación y puesta en obra de este tipo de mezclas no requiere adaptaciones adicionales a las plantas de fabricación de mezclas bituminosas convencionales. Tan sólo hay que prestar especial atención a la alimentación de la emulsión al mezclador. El conducto por el que vaya a fluir la emulsión debe evitarse que esté calefactado, de modo que no sea posible el calentamiento y ebullición de la emulsión.

Por otro lado, el procedimiento de fabricación de la mezcla, es el convencional de una mezcla en caliente, con la salvedad de la temperatura de calentamiento de los áridos. En este caso, sobre los 90°C. Tras la mezcla con la emulsión, el producto debe presentar una buena cubrición. Este tipo de material permite acopio del mismo, siempre que la temperatura de compactación no descienda de unos 60°C.

En el caso que nos ocupa, la fabricación se llevó a cabo en una planta discontinua, y no se presentó ningún problema.

El transporte a obra se realizó de forma convencional, así como el extendido de la mezcla. Se extendieron 5 cm de espesor, a todo el ancho de la vía.



Fig. 4: Extendido de una mezcla templada GF12 con árido siderúrgico.

Respecto a la compactación, la única indicación adicional, es, como sucede en las mezclas convencionales, prestar atención a la temperatura a la que se lleva a cabo la misma. En la mayoría de la obra, el extendido e inicio compactación se realizó a unos 85°C, habiendo zonas con temperaturas ligeramente inferiores.



Fig. 5: Compactación de una mezcla templada GF12 con árido siderúrgico.

Por las exigencias de apertura rápida al tráfico ya que la carretera sobre la que se actuaba era el único acceso a la población, tras la compactación se esparcía arena por encima, habilitando de esta forma el paso. Debido a la rápida toma de cohesión de la mezcla, este aspecto no representó ningún problema.



Figura 6: Aspecto de la unidad terminada.

El aspecto de la mezcla era el adecuado una vez transcurrida la compactación, llevada a cabo con rodillo metálico y posteriormente neumático.



Figura 7: Textura de la mezcla GF12 compactada.

CONTROL DE FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

Paralelamente a la fabricación y puesta en obra de la mezcla se lleva a cabo un control de calidad de la mezcla fabricada y puesta en obra, resultando los siguientes valores tipo:

Sensibilidad al agua, UNE-EN 12697-12	
ITSR, a 15 °C, con probetas acondicionadas en un baño de agua a 30 °C, %	93
ITSR, a 15°C, con probetas acondicionadas en un baño de agua a 40 °C, %	81

Ensayo Cántabro, NLT-352	
Pérdida por desgaste en seco, %	16
Pérdida por desgaste en húmedo, con probetas acondicionadas en un baño de agua a 45 °C, %	21

Ensayo Marshall, NLT-159	
Estabilidad Marshall, kN	10.7
Deformación Marshall, mm	2.7

Inmersión-Compresión, NLT- 162	
Índice de Resistencia Conservada, con probetas acondicionadas en un baño de agua a 49 °C, %	94

Módulo dinámico, NLT- 349	
Módulo dinámico, MPa	2815
Ángulo, °	20.7

Seguimiento del tramo de obra

Tras la ejecución de la obra, se ha llevado a cabo un seguimiento de la evolución de la misma, mediante la extracción de testigos.

Se extrajeron un total de 9 testigos de diámetro 100 mm a lo largo de todo el tramo experimental para determinar el grado de compactación, sensibilidad al agua y modulo de rigidez. Todos los testigos una vez extraídos de la obra se curaron según el protocolo anteriormente comentado.

Los resultados obtenidos a partir de estos testigos de 100 mm de diámetro son los siguientes:

GRADO DE COMPACTACIÓN, DENSIDAD GEOMETRICA					
TESTIGO N°/PK/ CARRIL	ALTURA MEDIDA (mm)	DIAMETRO MEDIDO (mm)	ρ referencia dimensiones, (kg/m³)	ρ testigo dimensiones , (kg/m³)	Grado compactación (%)
2/1-400/Izquierdo	40,55	104	2314	2306	99,6
5/1+000/Izquierdo	47,30	104		2334	100
6/1+000/Izquierdo	38,02	104		2264	97,8
7/1+200/Derecho	44,24	104		2274	98,3
8/1+200/Derecho	46,94	104		2240	96,8
9/1+400/Izquierdo	50,90	104		2317	100
10/1+400/Izquierdo	51,73	103,9		2350	101,5
13/1+800/Izquierdo	54,28	103,9		2312	99,9
14/1+800/Izquierdo	47,86	103,9		2298	99,3

Con los testigos 13,10, 9, 14, 5 y 8 se realizaron las medidas de sensibilidad al agua y con los testigos 7, 6 y 2 se realizaron medidas de modulo de rigidez, los resultados se muestran en las siguiente tablas:

Sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12 (a 15°C)	
ITSR (%), con probetas acondicionadas en un baño de agua a 30°C	92
ITS (kPa), densidad media de las probetas 2411 kg/m ³	578
ITSH (kPa), densidad media de las probetas 2219 kg/m ³	534

Modulo de rigidez UNE-EN 12697-26 (a 20°C)	
Modulo de rigidez, MPa	1281
Deformación, mm	0,0095
Tiempo de carga, (ms)	125

Los resultados nos muestran un buen comportamiento de la mezcla aún teniendo en cuenta la falta de referencias es este tipo de mezclas.

Los grados de compactación obtenidos en las mezclas son superiores al 97-98% lo cual nos indica un buen grado de compactación y que la mezcla presenta una buena compactibilidad. A pesar de que las densidades puedan estar ligeramente alteradas por la capa de arena con la que se cubrió la mezcla nada más extenderse y se prevé una mayor densificación en los próximos meses, lo cual al igual que otras características se observará en próximas extracciones de testigos.

En la sensibilidad al agua se observan resultados mecánicos propios de una mezcla tan abierta, y una resistencia conservada muy buena teniendo en cuenta lo anterior, es decir, tenemos una mezcla con una buena cohesión y con una buena adhesividad árido-ligante.

En el módulo de rigidez, teniendo en cuenta la falta de experiencia y resultados con el ensayo según normativa europea, se puede considerar más como un dato para poder valorar la evolución del material en los próximos años, pues no es determinante en una capa de rodadura. El módulo obtenido nos muestra que la mezcla es flexible y muy adecuada para carreteras de poco tráfico.

CONCLUSIONES

Mediante la fabricación y puesta en obra de este tipo de mezclas, y su posterior análisis hemos podido observar que se obtienen unas mezclas de elevada calidad con dos factores claves, que son los buscados:

- permiten una disminución del consumo energético, disminuyendo por lo tanto la emisiones a la atmósfera
- permiten el reaprovechamiento de un subproducto de otra industria
- Permiten una rápida apertura al tráfico.

Además de estos factores clave, nos permite una mejora sustancial en las prestaciones de la mezcla con respecto a las mezclas en frío convencionales, añadiéndole algunas ventajas constructivas como la reducción del tiempo de curado. Aunque hemos observado que la mezcla va evolucionando a mejor según transcurre el tiempo, lo cierto es que la puesta en servicio puede hacerse de forma casi inmediata a su extendido. Esto representa una gran ventaja con respecto a las mezclas en frío.

Del mismo modo, la posibilidad de acopiar, las dota de una importante ventaja con respecto a las mez-



clas en caliente, especialmente en el caso de reparaciones más puntuales. Además de los ya mencionados menores consumos de combustible.

Con lo que pensamos que se trata de una solución fácilmente implementable en una amplia variedad de situaciones, y para unos determinados tipos de tráfico.

A la vista de los resultados obtenidos podemos decir que la mezcla es de calidad y adecuada para la aplicación utilizada debido a que presenta:

- **Buena adhesividad árido-ligante** consiguiéndose valores de resistencia conservada superiores al 90% a temperaturas de 30 °C, es decir, presenta un comportamiento adecuado igual que si se tratase de una mezcla bituminosa en caliente.
- **Compactibilidad adecuada**, en todos los casos se alcanzan porcentajes de compactación superiores o iguales al 97-98%, lo cual nos indica que no existe ninguna dificultad en su compactación.

- **Flexibilidad**, el modulo de rigidez que presentamos indica que se trata de una mezcla flexible y muy adecuada para carreteras de poco tráfico.

En resumen, y a la vista de los resultados, se puede concluir que la utilización de las escorias como árido para mezclas bituminosas en frío en capas de rodadura no ofrecen ninguna dificultad tanto en su fabricación como en su puesta en obra y además las propiedades finales de las mezclas bituminosas analizadas están mejoradas respecto de las de una mezcla en frío equivalente.

REFERENCIAS

- VV.AA. Manual de mezclas en frío - ATEB.
- VV.AA. Manual de Técnicas con Emulsiones - PROAS.
- Normas UNE.
- Normas NLT.
- Artículo 541 del PG-3/75.