

**ESTUDIO
COMPARATIVO DE LA
METODOLOGÍA DE
COMPACTACIÓN
GIRATORIA-IMPACTO,
PARTE II**

**MARISOL BARRAL
RAMÓN ROMERA**
ASFALTOS CAMPEZO

**LUCIA MIRANDA
FERNANDO BRAVO**
EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS

**JOSÉ BERBIS
JESUS FELIPO**
PAVASAL

**MARISA CARMONA
SILVIA IZQUIERDO**
INTROMAC

**SANTIAGO GIL
JAVIER SUÁREZ**
DITECPESA

**ROCÍO CERVANTES
JAVIER LOMA**
ASFALTOS Y CONSTRUCCIONES ELSAN

JUAN JOSÉ POTTI
ASEFMA

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA METODOLOGÍA DE COMPACTACIÓN GIRATORIA-IMPACTO, PARTE II

RESUMEN

La serie de normas europeas de mezclas bituminosas UNE-EN 13108 y 12697, de especificaciones y ensayos de laboratorio respectivamente, permiten utilizar diferentes procedimientos para su caracterización. Una de estas normas de ensayo corresponde a la metodología de compactación con la máquina giratoria (UNE-EN 12697-31), empleada en numerosos países.

Hasta la aparición del Mercado CE toda la experiencia en España en la compactación, se basa en los ensayos a partir de probetas fabricadas con el equipo de impacto, antes llamada compactadora Marshall, tanto para la determinación de las densidades, de los huecos como para el estudio de las propiedades mecánicas.

En esta comunicación se presentan los primeros resultados obtenidos en un trabajo experimental realizado por 6 laboratorios de empresas pertenecientes a Asefma para establecer una correlación entre los sistemas de compactación con la máquina de impacto (UNE-EN 12697-30) y la máquina giratoria (UNE-EN 12697-31).

Para ello se han fabricado series de probetas de dos mezclas empleadas habitualmente en nuestro país (AC16D y AC16S) con ambos métodos de compactación:

- Impacto, con las energías señaladas en el PG-3: 75 y 50 golpes.
- Giratoria, con el molde de 100 milímetros de diámetro: una serie para obtener una curva de densidad/energía a 210 giros y varias series de probetas a diferentes giros definidos.

Los resultados de este primer trabajo van a permitir confirmar la posibilidad de establecer distintos niveles de energía en la máquina giratoria para fabricar probetas análogas, en cuanto a densidad, a la que obtenemos con el equipo de impacto.

Durante el año 2011 se tiene previsto continuar con este trabajo para obtener la correlación con todas las mezclas normalizadas en el PG-3.

INTRODUCCIÓN

Mucho se ha hablado y escrito sobre los cambios que se han sucedido con la aparición del Mercado CE de mezclas bituminosas y los nuevos métodos de ensayo descritos en la serie de normas EN 12697. Dichos cambios afectan tanto al sistema de control de producción, como a las metodologías empleadas para el control de las mezclas.

En estas normas se recogen tanto métodos de ensayo como métodos a emplear para la preparación de probetas utilizadas para la caracterización de las

mezclas, con la aplicación de las normas de ensayo correspondientes.

Dentro de las metodologías de preparación de probetas se abre un campo de posibilidades que permite analizar y comprobar, el comportamiento de las mezclas bituminosas y sus características, para diferentes propiedades como resistencia a las cargas, deformaciones plásticas, etc... En líneas generales las características de cada uno de los métodos de compactación se resumen:

- Compactación por impacto (parte 30): proceso que consiste en la aplicación de una serie de impactos sobre una muestra de mezcla bituminosa mediante caída de una maza con un peso y altura determinada.
- Compactación giratoria (parte 31): proceso que consiste en la aplicación de una carga a una presión especificada, mediante un movimiento de giro oblicuo con un ángulo determinado.
- Compactación vibratoria (parte 32): proceso de compactación utilizando un martillo vibratorio.
- Compactación de rodillo (parte 33): proceso que consiste en la aplicación de la carga de con rodillo mediante un movimiento de vaivén realizando un número de pasadas hasta conseguir el grado de compactación correspondiente a una densidad dada o bien hasta alcanzar una altura de la probeta especificada en función del tamaño máximo del árido de la mezcla.

En la actualidad el método de compactación de probetas utilizado en España corresponde a la compactación por impacto, comúnmente llamada compactación Marshall. Sobre estas probetas se determinan propiedades como estabilidad, huecos, deformación, resistencia a tracción indirecta y sobre todo la densidad.

Con la normativa europea de la serie de normas EN 12697 una de las posibilidades que se plantea

para la caracterización de las mezclas bituminosas, es preparar probetas de ensayo para su posterior caracterización a partir de diferentes métodos de compactación.

Teniendo en cuenta la amplia experiencia que existe en España sobre la metodología de compactación por impacto se hace necesario comprobar la correspondencia de este método frente a los demás procesos de compactación sobre todo para el caso del método de compactación giratoria.

El método de compactación por giratoria es ampliamente utilizado en varios países para el diseño de mezclas bituminosas y presenta como ventajas:

- Se trata de un proceso controlado que permite conocer, a medida que se produce la compactación, la densidad geométrica que va alcanzando la probeta.
- Permite la compactación buscando un porcentaje de huecos determinado.
- Permite fabricar probetas con diámetros superiores a los empleados con el equipo de impacto, tal y como se especifica para mezclas con tamaño de árido superior a 22 milímetros.

Dadas las ventajas que este método presenta a la hora de la preparación de las probetas, y combinada con la experiencia que se dispone sobre la compactación por impacto, se pretende en este trabajo analizar la reproducibilidad de ambas metodologías de compactación y poder en un futuro, establecer una correlación entre ambos sistemas de trabajo.

METODOLOGIA DEL TRABAJO

Este trabajo es una continuación del ya iniciado en el año 2010, dentro del Grupo de Trabajo III de Asefma y presentado en la V Jornada de Asefma. El objetivo propuesto es comprobar que el sistema de compactación con la máquina giratoria permite obtener probetas de mezclas bituminosas con similar densidad y propiedades que las que se vienen empleando con el método de compactación por

impacto, determinando la reproducibilidad y trazabilidad entre los dos métodos de compactación.

En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos en el inicio del trabajo en el que participan 6 laboratorios de empresas pertenecientes a Asefma, que disponen de los equipos de compactación por impacto así como compactación por giratoria de diferentes marcas comerciales. Una vez obtenidos los resultados esperados se pretende organizar un ensayo de intercomparación que abarque al mayor número de empresas con el objetivo de evaluar la viabilidad del método de compactación a gran escala.

La planificación de los trabajos se realizó en varias etapas correspondientes a:

1. Evaluación y comprobación de las características de los equipos, impacto y giratoria.
2. Selección de la mezcla bituminosa inicial a analizar.
3. Definición de un protocolo de trabajo estándar en el que se especifican las actuaciones comunes a realizar por todos los participantes.
4. Estudio y análisis de los resultados.

EVALUACIÓN Y COMPROBACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS

Como se ha indicado en este trabajo se cuenta con la participación de seis empresas del sector que disponen de los equipos de compactación giratoria y de impacto (CAMPEZO, DITECPESA, EIFFAGE, EL-SAN, INTROMAC, PAVASAL). Todas disponen de equipos de ensayo de diferentes marcas comerciales y por ello, para asegurar que los equipos se encuentran en condiciones de funcionamiento correctas y evitar posibles dispersiones que puedan producirse como consecuencia de ello, se procedió en una primera etapa a la comprobación de cada uno de los equipos revisando los siguientes puntos necesarios según se establece en las correspondientes normas de ensayo UNE-EN 12697-30 y UNE-EN 12697-31

de compactación por impacto y giratoria, respectivamente:

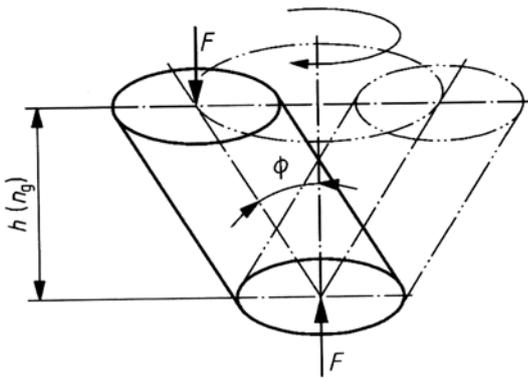
- Compactadora de impacto (pedestal de madera)
 - Martillo compactador
 - Mecanismo de elevación del martillo
 - Dispositivo de conteo de los impactos
- Compactadora giratoria.
 - Angulo de giro
 - Fuerza aplicada



Foto: máquina giratoria.

Foto: equipo de impacto.

Los equipos de compactación giratorios basan su proceso de fabricación de probetas cilíndricas de mezcla bituminosa en laboratorio en la aplicación simultánea de una carga vertical estática y el efecto de corte producido por el movimiento del eje de simetría de la probeta, que genera una superficie cónica de revolución, manteniéndose las bases perpendiculares al eje de la superficie cónica engendrada. Este proceso se realiza sobre una masa conocida de mezcla bituminosa contenida dentro de un molde de 100, 150 o 160 mm de diámetro. La mitad de los equipos utilizados en el trabajo han sido fabricados por Controls y Cooper (suministrado por Mecacisa), de distintos modelos y configuración, algunos de los cuales son denominados científicos por la posibilidad de modificar el valor del ángulo de forma automática.



Durante la compactación la altura de la muestra se mide automáticamente permitiendo al operador elegir si desea compactar la muestra a un determinado número de giros o bien hasta alcanzar una densidad especificada.

SELECCIÓN DE LA MEZCLA BITUMINOSA

Se han seleccionado dos mezclas tipo AC una S y otra D recogidas en el Artículo 542 del PG3, con un tamaño máximo de árido de 16 milímetros, con diferente naturaleza de árido así como tipo y contenido de ligante. En la siguiente tabla se muestra la composición:

Tabla1. Identificación y referencias materiales.

Mezcla	AC16S	AC16D
Referencia	Muestra 1	Muestra 2
Naturaleza del árido	Caliza	Sílice
Tipo de betún	35/50	50/70
Densidad máxima, kg/m ³	2582	2462
Ligante en mezcla, %	4,4	5,13
Relación f/b	1,17	1,24

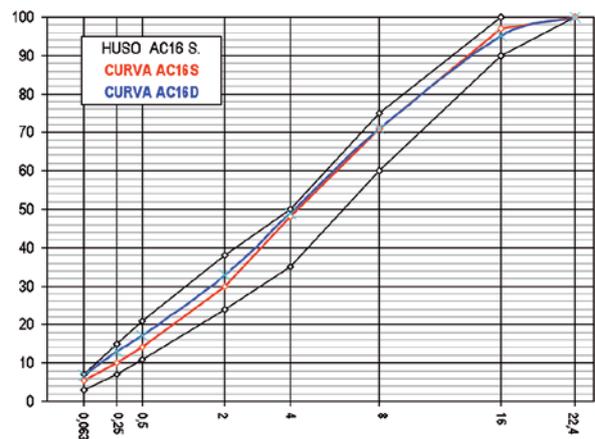


Gráfico 1. Representación de las curvas granulométricas utilizadas tipo AC16S y AC16D comparadas con el huso AC16S:

El empleo de dos tipos de mezclas diferentes permite comprobar si existen diferencias en la reproducibilidad de la compactación cuando se modifican variables relacionadas con las características de los materiales y composición de la mezcla.

La norma de impacto (UNE-EN 12697 parte 30) señala que el tamaño máximo del árido de la mezcla debe ser igual o inferior a 22,4 milímetros empleando en todos los casos un molde de 101 milímetros de diámetro. En cambio en la norma de la máquina giratoria (UNE-EN 12697 parte 31) para mezclas con tamaño de áridos de 22,4 milímetros o superior únicamente permite fabricarlas con moldes con un diámetro superior (150 o 160 milímetros). La selección de mezclas con tamaño máximo de árido de 16 milímetros, radica en poder fabricar todas las probetas con moldes de diámetros parecidos, para este caso 100 milímetros.

DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO DE TRABAJO

Para asegurar la reproducibilidad en el trabajo se estableció un protocolo de trabajo en el que se definieron una serie de operaciones comunes a realizar por todos los participantes y que consistía en:

- Determinación de la composición de la mezcla (curva granulométrica de áridos y contenido de ligante) y densidad máxima de cada tipo de mezcla.
- Definición de las temperaturas de acondicionamiento y compactación de la mezcla.
- Definición de la cantidad de muestra a utilizar en la preparación de probetas compactadas tanto por impacto como por giratoria. La cantidad de muestra se determinó buscando la relación entre la altura mínima y el diámetro interior del molde que debe estar comprendido entre 0,66 a 1,05 teniendo en cuenta la densidad máxima de la mezcla.
- Preparación de probetas aplicando 50 y 75 golpes por impacto calculando las densidades tanto por superficie saturada seca como geométrica, así como el porcentaje de huecos.
- Preparación de probetas por compactación giratoria aplicando diferentes números de giros: 40, 60, 80, 100, 120 y 210, los cinco primeros se encuentran definidos en la tabla C1 de la norma UNE-EN 13108-20 y el valor de 210 giros viene señalado en la norma UNE-EN 12697-10 y que permite obtener el valor de la compactabilidad de la mezcla. Sobre cada una de las probetas se determina la densidad en superficie saturada seca y geométrica, así como el porcentaje de huecos.
- Determinación de la resistencia a tracción indirecta a 15°C en seco de cada una de las probetas, para comprobar los resultados que se obtienen con ambos sistemas de compactación.

ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realiza el estudio de los datos aportados por cada uno de los participantes evaluando la variabilidad de

los resultados para los diferentes laboratorios participantes. Se evalúa el comportamiento de cada una de las mezclas frente a los 210 giros tomados como referencia para la determinación de la compactabilidad, así como el comportamiento para cada uno de los giros especificados en cada caso.

En todas las tablas de resultados los valores de densidad vienen expresados en kg/m³ y los huecos en % sobre el peso de la mezcla.

Los resultados obtenidos en el trabajo realizado se muestran a continuación:

FABRICACIÓN DE PROBETAS CON EL MÉTODO DE IMPACTO, UNE EN 12697-30.

Se han fabricado probetas con el método de impacto aplicando una energía de 50 y 75 golpes, determinando la densidad por el procedimiento geométrico (muestra en caliente y tras su enfriamiento) y con la superficie saturada seca.

Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 2. Resultados de la compactación de la mezcla AC16S por impacto.

MEZCLA 1		AC16S					
Energía: 75 Golpes.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2374	2471	2425	2378	2436	2370
	Frío	2374	2462	2420	2408	2439	2381
	Huecos	8,0	4,7	6,3	6,8	5,5	7,8
Densidad SSD		2434	2510	2474	2453	2480	2445
	Huecos	5,7	2,8	4,2	5,0	4,0	5,3
Energía: 50 Golpes.							
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2350	2416	2392	2366	2380	2351
	Frío	2355	2411	2385	2380	2382	2348
	Huecos	8,8	6,6	7,6	7,8	7,8	9,0
Densidad SSD		2380	2475	2436	2426	2447	2379
	Huecos	7,8	4,2	5,7	6,0	5,2	7,9

Tabla 3. Resultados de la compactación de la mezcla AC16D por impacto.

MEZCLA 2		AC16D					
Energía: 75 Golpes.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2380	2388	2397	2388	2404	2359
	Frío	2373	2386	2396	2405	2405	2357
	Huecos	3,6	3,1	2,7	2,3	2,3	4,3
Densidad SSD		2402	2429	2425	2425	2428	2395
	Huecos	2,4	1,3	1,5	1,5	1,4	2,7
Energía: 50 Golpes.							
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2341	2380	2363	2365	2395	2349
	Frío	2330	2379	2360	2377	2395	2345
	Huecos	5,4	3,4	4,1	3,5	2,7	5,0
Densidad SSD		2379	2420	2415	2405	2417	2378
	Huecos	3,4	1,7	1,9	2,3	1,8	3,4

Promedio de resultados:

Tabla 4. Promedio y desviación estándar de la densidad con la compactación por impacto.

		PROMEDIO VALORES		DESVIACIÓN ESTÁNDAR	
		AC16S	AC16D	AC16S	AC16D
Energía: 75 Golpes.					
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2409	2386		
	Frío	2414	2387		
	Huecos	6,5	3,1		
Densidad SSD		2466	2417	27,7	14,8
	Huecos	4,5	1,8		
Energía: 50 Golpes.					
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2376	2366		
	Frío	2377	2364		
	Huecos	7,9	4,0		
Densidad SSD		2424	2402	38,0	19,1
	Huecos	6,1	2,4		

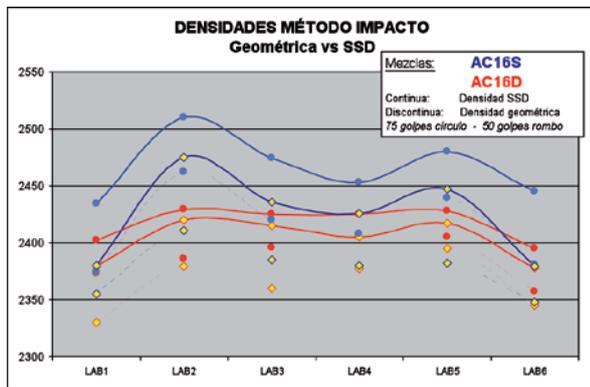


Gráfico 2. Densidades método geométrico y SSD con el equipo de impacto.

FABRICACIÓN DE PROBETAS CON EL MÉTODO DE LA GIRATORIA, UNE EN 12697-31.

Se han fabricado varias series de probetas con la máquina giratoria aplicando distintas energías de compactación: 40, 60, 80, 100, 120 y 210 giros, determinando la densidad siguiendo el procedimiento geométrico (mediciones de la altura y diámetro en caliente y tras su enfriamiento) y por superficie saturada seca.

En todos los casos se han comprobado los resultados reflejados en el ordenador del equipo con distintas lecturas de mediciones reales de cada probeta, verificando así los datos recogidos por el equipo.

La compactación se puede realizar para un número de giros (energía) o densidad (altura) pre-

fijada. En este trabajo se ha elegido únicamente la fabricación de las probetas a un número de giros preestablecido, determinando la densidad y resistencia a tracción indirecta (UNE-EN 12697-23) posteriormente.

Los resultados son los siguientes:

Compactación a 40/60/80/100/120 giros: (Tablas 5, 6 y 7, en siguiente página)

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA COMPACTACIÓN POR IMPACTO Y GIRATORIA

En el gráfico número 3, como es lógico, se observa que al aumentar la energía de compactación (número de giros) se produce un aumento de la densidad de la mezcla, y en mayor medida en los primeros giros de la compactación.

La mezcla tipo AC16S ha precisado un mayor número de giros para alcanzar la densidad de referencia, como puede comprobarse en el gráfico número 3 para todo el rango de medidas, quizás debido a la diferencia en el contenido de ligante.

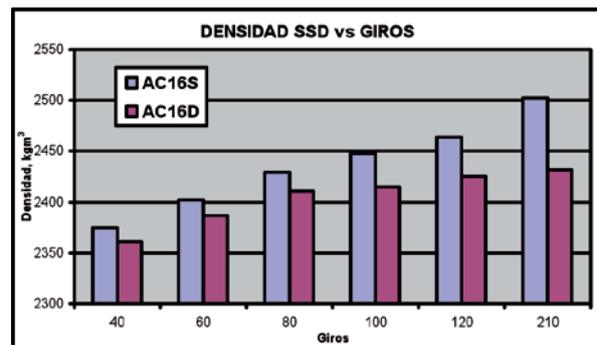


Gráfico 3. Densidades con el método SSD frente a los giros con el equipo giratorio.

Se han analizado los resultados obtenidos para la densidad en SSD de las probetas en los dos tipos de mezclas. Los valores de desviación estándar obtenidos son inferiores para el sistema de compactación con la máquina giratoria, como se puede apreciar en el gráfico número 4, siendo sensiblemente mejores los resultados de desviación para la mezcla AC16D.

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA METODOLOGÍA DE COMPACTACIÓN GIRATORIA-IMPACTO, PARTE II

Tabla 5. Resultados de la compactación de la mezcla AC16S por giratoria.

MEZCLA 1		AC16S					
Energía: 40 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2298	2279	2293	2278	2301	2293
	Frío	2327	2278	2291	2292	2291	2294
	Huecos	9,9	11,8	11,3	11,2	11,3	11,1
Densidad SSD		2389	2370	2377	2373	2392	2349
	Huecos	7,5	8,2	7,9	8,1	7,4	9,0
Energía: 60 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2323	2320	2352	2345	2328	2341
	Frío	2328	2321	2348	2354	2320	2310
	Huecos	9,9	10,1	9,1	8,8	10,2	10,5
Densidad SSD		2398	2397	2411	2406	2411	2391
	Huecos	7,1	7,2	6,6	6,8	6,6	7,4
Energía: 80 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2362	2347	2366	2360	2333	2365
	Frío	2362	2349	2364	2371	2326	2346
	Huecos	8,5	9,0	8,5	8,2	9,9	9,1
Densidad SSD		2436	2441	2426	2426	2421	2425
	Huecos	5,7	5,4	6,0	6,0	6,2	6,1
Energía: 100 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2327	2381	2335	2351	2393	2385
	Frío	2329	2380	2333	2358	2393	2371
	Huecos	9,8	7,8	9,1	8,7	7,3	8,1
Densidad SSD		2447	2467	2448	2432	2458	2437
	Huecos	5,2	4,5	5,1	5,8	4,8	5,6
Energía: 120 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2351	2384	2406	2374	2388	2351
	Frío	2350	2381	2399	2379	2398	2348
	Huecos	9,0	7,8	7,1	7,9	7,1	9,1
Densidad SSD		2478	2494	2456	2441	2472	2441
	Huecos	4,0	3,4	4,9	5,5	4,3	5,4

Tabla 6. Resultados de la compactación de la mezcla AC16D por giratoria.

MEZCLA 2		AC16D					
Energía: 40 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2314	2278	2312	2244	2282	2317
	Frío	2296	2275	2308	2279	2275	2313
	Huecos	6,7	7,6	6,3	7,4	7,6	6,0
Densidad SSD		2361	2365	2386	2341	2350	2363
	Huecos	4,1	3,9	3,1	4,9	4,6	4,0
Energía: 60 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2339	2339	2327	2294	2317	2341
	Frío	2312	2336	2325	2322	2296	2337
	Huecos	6,1	5,1	5,6	5,7	6,7	5,0
Densidad SSD		2369	2411	2406	2385	2366	2382
	Huecos	3,8	2,1	2,3	3,1	3,9	3,2
Energía: 80 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2413	2366	2348	2343	2342	2389
	Frío	2396	2360	2343	2360	2326	2372
	Huecos	2,7	4,1	4,8	4,1	5,5	3,7
Densidad SSD		2427	2426	2405	2411	2393	2402
	Huecos	1,4	1,5	2,3	2,1	2,8	2,5
Energía: 100 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2427	2377	2359	2367	2369	2367
	Frío	2391	2371	2354	2372	2352	2359
	Huecos	2,9	3,7	4,4	3,7	4,5	4,2
Densidad SSD		2430	2426	2413	2419	2399	2404
	Huecos	1,3	1,5	2,0	1,8	2,5	2,3
Energía: 120 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2428	2397	2385	2359	2383	2348
	Frío	2406	2393	2381	2369	2377	2339
	Huecos	2,3	2,8	3,3	3,8	3,5	5,0
Densidad SSD		2433	2440	2422	2419	2422	2417
	Huecos	1,2	0,9	1,6	1,8	1,6	1,8

PROMEDIO DE RESULTADOS. Tabla 7. Promedio y desviación estándar de las probetas compactadas por giratoria.

		PROMEDIO		DESVIACIÓN ESTÁNDAR	
		AC16S	AC16D	AC16S	AC16D
Energía: 40 giros.					
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2290	2291	15,5	15,3
	Frío	2296	2291		
	Huecos	11,1	7,0		
Densidad SSD		2375	2361		
	Huecos	8,0	4,1		
Energía: 60 giros.					
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2335	2326	8,2	18,6
	Frío	2330	2321		
	Huecos	9,8	5,7		
Densidad SSD		2402	2387		
	Huecos	7,0	3,1		
Energía: 80 giros.					
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2356	2367	7,6	13,6
	Frío	2353	2360		
	Huecos	8,9	4,2		
Densidad SSD		2429	2411		
	Huecos	5,9	2,1		
Energía: 100 giros.					
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2362	2378	13,0	12,2
	Frío	2361	2367		
	Huecos	8,5	3,9		
Densidad SSD		2448	2415		
	Huecos	5,2	1,9		
Energía: 120 giros.					
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2376	2383	21,3	9,0
	Frío	2376	2378		
	Huecos	8,0	3,4		
Densidad SSD		2464	2426		
	Huecos	4,6	1,5		

Compactación a 40/60/80/100/120 giros:

Tabla 8. Resultados de la compactación por giratoria a 210 giros.

MUESTRA 1		AC16S					
Energía: 210 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2447,1	2425	2402	2462,6	2410	2440,9
	Frío	2453,2	2424	2401	2472,1	2405	2439,4
	Huecos	4,99	6,1	6,99	4,26	6,8	5,5
Densidad SSD		2506,8	2523	2489	2502,6	2493	2501
	Huecos	2,91	2,28	3,6	3,07	3,45	3,1
MUESTRA 2		AC16D					
Energía: 210 giros.		LAB1	LAB2	LAB3	LAB4	LAB5	LAB6
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2382	2408	2419	2370	2402	2419
	Frío	2364	2406	2415	2407	2401	2409
	Huecos	4,0	2,3	1,9	2,3	2,5	2,2
Densidad SSD		2404	2446	2440	2430	2449	2423
	Huecos	2,4	0,7	0,9	1,3	0,5	1,6

Tabla 9. Promedio y desviación estándar con giratoria a 210 giros.

		PROMEDIO		DESVIACIÓN ESTÁNDAR	
		AC16S	AC16D	AC16S	AC16D
Energía: 210 giros.					
Densidad GEOMETRICA	Caliente	2431	2400	11,9	16,9
	Frío	2432	2400		
	Huecos	5,8	2,5		
Densidad SSD		2503	2432		
	Huecos	3,1	1,2		

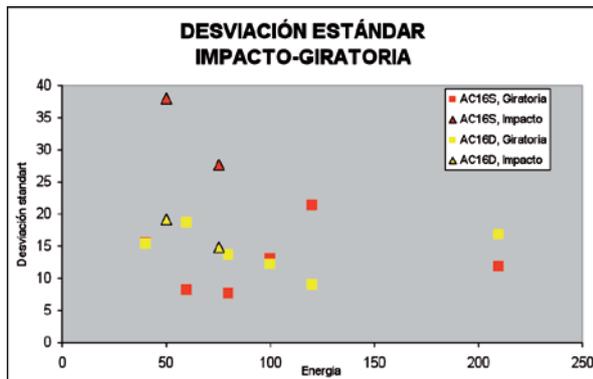


Gráfico 4. Desviación estándar densidades por impacto-giratoria

A partir de los resultados obtenidos de densidad con la máquina giratoria a diferentes grados de energía, es posible determinar la energía necesaria para alcanzar la densidad correspondiente a la compactación con el equipo de impacto con 75 y 50 golpes. En la tabla 9 se indican estos valores para las 2 mezclas ensayadas.

Tabla 10. Equivalencias entre energía por compactación por giratoria frente a compactación por impacto.

Mezcla	1	2
Tipo	AC16S	AC16D
Densidad impacto 50 golpes	80 giros	70 giros
Densidad impacto 75 golpes	120 giros	110 giros

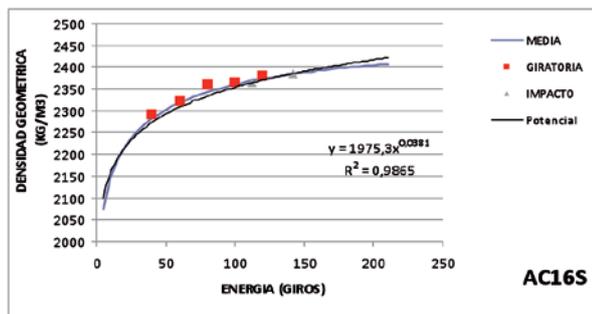


Gráfico 5. Correspondencia energía impacto-giratoria de la mezcla AC16S.

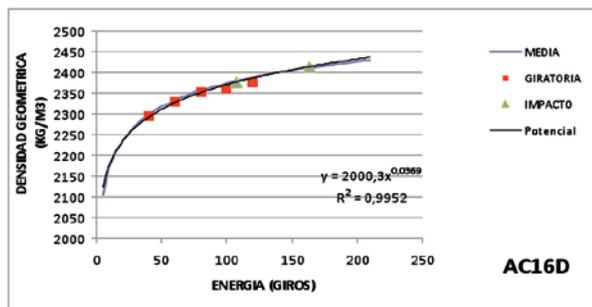


Gráfico 6. Correspondencia energía impacto-giratoria de la mezcla AC16D.

La compactación con la máquina giratoria a un número de giros elevado, generalmente se emplea para obtener una gráfica de compactabilidad de la mezcla, dato que nos permite conocer su capacidad de compactación. Este aspecto es importante para prever los equipos de compactación de obra necesarios en cada caso, pero además es posible conocer los valores de densidad con distinto número de giros, o lo que es lo mismo, la densidad con diferentes grados de energía de compactación. En los gráficos 7 y 8 están representados los resultados obtenidos por todos los laboratorios.

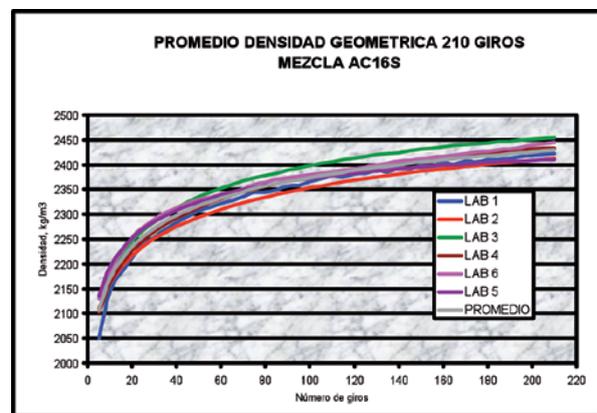


Gráfico 7. Densidad por compactación con giratoria a 210 giros para la mezcla AC16S.

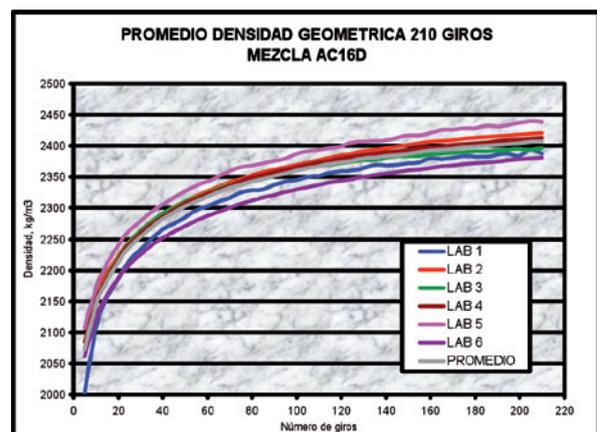


Gráfico 8. Densidad por compactación con giratoria a 210 giros para la mezcla AC16D.

La diferencia en el punto de partida de las curvas de densidad puede deberse a la manipulación de la muestra durante las operaciones de preparación, colocación y asentamiento inicial del material en el molde o también por la aplicación de una energía inicial diferente, aspecto a estudiar en los próximos trabajos.

RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA DE LAS PROBETAS FABRICADAS CON IMPACTO Y GIRATORIA.

Las probetas fabricadas con el compactador de impacto con 75 y 50 golpes se han ensayado para determinar la resistencia a la tracción indirecta (UNE EN 12697-23) a una temperatura de acondicionamiento de 15 °C. Igualmente se han ensayado las probetas fabricadas con la máquina giratoria a las distintas energías. Con esta comprobación se pretende conocer la dispersión de resistencias obtenido con ambos procedimientos de compactación.

Se adjuntan los resultados obtenidos expresados en MPa.

Tabla 11: Resultados ensayos de tracción indirecta. Mezcla AC16S.

MEZCLA AC16S						
ENERGÍA	LAB 1	LAB 2	LAB 3	LAB 4	LAB 5	LAB 6
75 Golpes	2,65	2,88	2,63	2,71	2,59	3,12
50 Golpes	2,58	2,75	2,91	2,56	2,33	2,69
40 Giros	2,00	2,56	2,43	1,81	2,48	2,24
60 Giros	1,86	2,96	2,70	2,45	2,45	2,46
80 Giros	2,15	2,94	2,81	2,98	2,82	2,79
100 Giros	2,43	2,77	2,54	2,82	3,03	3,24
120 Gros	2,58	3,32	2,52	3,02	3,04	3,21
210 Giros	2,79	3,20	3,38	3,27	3,15	3,21

Tabla 12: Resultados ensayos de tracción indirecta. Mezcla AC16D.

MEZCLA AC16D						
ENERGÍA	LAB 1	LAB 2	LAB 3	LAB 4	LAB 5	LAB 6
75 Golpes	2,98	2,67	3,00	2,75	2,80	3,13
50 Golpes	2,75	2,45	2,81	2,25	2,43	3,01
40 Giros	2,70	2,36	2,52	2,10	2,73	2,85
60 Giros	2,96	2,78	2,86	2,16	2,99	3,04
80 Giros	2,83	2,84	2,93	2,22	2,74	2,82
100 Giros	2,76	2,77	2,81	2,37	2,70	2,79
120 Gros	2,72	2,80	2,79	2,88	2,80	2,57
210 Giros	2,92	2,75	2,75	2,56	2,95	3,05

Promedio de la resistencia a tracción indirecta y desviación estándar (Tabla 13) para ambos tipos de mezclas.

Tabla 13: Promedio resistencia y desviación estándar.

ENERGÍA	PROMEDIO		DESVIACIÓN ESTANDAR	
	AC16S	AC16D	AC16S	AC16D
75 GOLP	2,76	2,89	0,20	0,17
50 GOLP	2,64	2,62	0,20	0,28
40 G	2,25	2,54	0,30	0,28
60 G	2,48	2,80	0,36	0,33
80 G	2,75	2,73	0,30	0,26
100 G	2,81	2,70	0,30	0,17
120 G	2,95	2,76	0,33	0,11
210 G	3,17	2,83	0,20	0,28

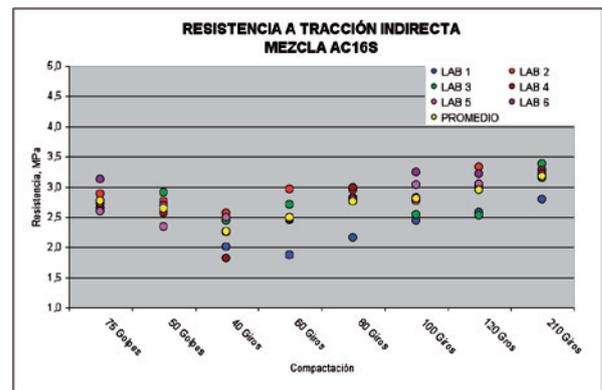


Gráfico 9. Resistencia a tracción indirecta. Mezcla AC16S.

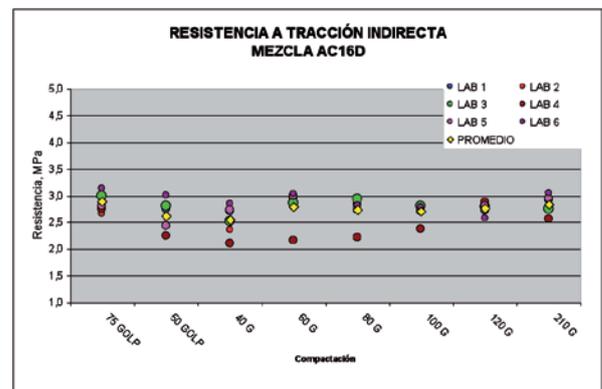


Gráfico 10. Resistencia a tracción indirecta. Mezcla AC16D.

Para la mezcla AC16S los valores de la desviación típica obtenidos en la resistencia a tracción indirecta son más elevados, mejorando considerablemente para la mezcla tipo AC16D.

Para alcanzar la resistencia a tracción alcanzada con las probetas fabricadas por impacto con 50 golpes se debe aplicar un número de 70 giros para la mezcla AC16S y aproximadamente 50 giros para la mezcla AC16D. Para alcanzar la resistencia a tracción indirecta obtenida para las probetas fabricadas con 75 golpes por impacto se debe aplicar una energía aproximada de 80 giros en el caso de la

mezcla AC16S mientras para la mezcla AC16D no se logra el valor de referencia.

CONCLUSIONES

- Las especificaciones de materiales recogidas en los Pliegos españoles tienen únicamente en cuenta el sistema de fabricación de probetas con el compactador de impacto y para alguno de los casos también el compactador vibratorio. En este trabajo se muestra que es factible fabricar probetas de mezcla bituminosa con el sistema de compactación giratoria, obteniendo incluso menores variaciones de los resultados que con el sistema de compactación de impacto.
- La compactación por giratoria permite fabricar con el mismo equipo probetas con diámetro igual o superior al de impacto (100, 150 y 160 milímetros), además se puede obtener información complementaria acerca del comportamiento de la mezcla durante la compactación (compactibilidad).
- En este trabajo se indican las energías obtenidas por giratoria para efectuar la compactación con dos tipos de mezclas, AC16S y AC16D, hasta lograr la densidad alcanzada con distintas energías utilizando el equipo de impacto. Sin olvidar que se debe prestar atención al proceso de fabricación de las probetas en cuanto a las temperaturas, relación altura-diámetro y manipulación durante el proceso.
- A la vista de los resultados obtenidos, en una primera aproximación, la energía necesaria con la máquina giratoria correspondiente a los 75 golpes por impacto está comprendida entre los 100 y 120 giros, siendo para los 50 golpes por impacto un número de giros entre 60 y 80. Estos datos requieren una confirmación con un mayor número de ensayos para ambos tipos de mezclas.
- La máquina giratoria ofrece información de las densidades mediante el cálculo geométrico del volumen de la probeta, aunque también puede determinarse por SSD al concluir el proceso. En la compactación por impacto la densidad, generalmente, se determina por superficie seca saturada (SSD), excepto en las mezclas con un porcentaje de huecos alto en los cua-

les se recubren las probetas de parafina o se determina la densidad por el procedimiento geométrico. Esta cuestión debe ser tenida en cuenta en los resultados para no mezclar ambos métodos: los valores que se obtienen en una misma probeta en la densidad geométrica no corresponde con los obtenidos en la determinación de la misma probeta por superficie saturada seca. Esta diferencia de valores calculados por ambos métodos (ver gráfico 2 de la comunicación) está aproximadamente entre 30 y 40 kg/m³, siempre la densidad geométrica la inferior.

- Todos los equipos deben estar perfectamente verificados o calibrados por los fabricantes para realizar las operaciones que indica cada norma de ensayo, en la máquina giratoria con especial atención a la presión (al inicio y durante todo el ensayo), el ángulo interno y la medida de la altura.

CONTINUACIÓN DE LOS TRABAJOS

En esta comunicación se han presentado los resultados correspondientes a una segunda fase de trabajos sobre el sistema de compactación con el equipo giratorio frente a la compactación con el equipo de impacto. Se pretende continuar desarrollando las siguientes líneas de trabajos:

- Energía de impacto-giratoria para las mezclas convencionales recogidas en el PG-3 en el Artículo 542, así como las mezclas de rodadura BBTMA, BBTMB y PA del Artículo 543. Determinación de la energía de compactación para cada tipo mezcla.
- Estudio de la variación de los valores de densidad para distintos contenidos de ligante (módulo de riqueza).
- Análisis de la influencia de la forma y naturaleza de los áridos en la energía de compactación.
- Comprobación de la energía necesaria para alcanzar las propiedades mecánicas exigidas actualmente en el PG-3 y con la obra.
- Anillo interlaboratorios.
- Propuesta de especificación.