

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

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

**MARISOL BARRAL
Y RAMÓN ROMERA**
ASFALTOS CAMPEZO

**MARÍA ELENA HIDALGO,
FRANCISCO SERRANO
Y FERNANDO BRAVO**
EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS

**JOSÉ BERBIS
Y JESÚS FELIPO**
PAVASAL

ELENA SAEZ
ACCIONA

MARISA CARMONA
INTROMAC

**SANTIAGO GIL
Y FRANCISCO JAVIER SUÁREZ**
DITECPESA

JOSÉ MANUEL BERENGUER
LOS SERRANO

ANTONIO GARCÍA
PROAS

EMILIO MORENO
REPSOL

**DANIEL ANDALUZ
Y FERNANDO VALOR**
CIESM-INTEVIA

**JOSÉ ANTONIO SOTO,
XAVIER AGULLO
Y PEDRO VERGEL**
SORIGUE

JOSÉ LUIS LÚCIA
SACYR

CARLOS ROYO
MECACISA

**JOSE LUIS PEÑA
Y JUAN JOSÉ POTTI**
ASEFMA

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

RESUMEN

Con la aparición de las nuevas normas de ensayo de la serie UNE-EN 12697, disponemos de diferentes procedimientos para la fabricación de probetas de mezclas bituminosas: con el equipo de impacto, con la máquina giratoria, con el compactador vibratorio y con el equipo de rodillo, las tres primeras de probetas cilíndricas.

Toda la experiencia acumulada en España para la compactación de las probetas cilíndricas de mezclas bituminosas se ha desarrollado con el equipo de impacto (antigua compactadora Marshall), ya sea para determinar su densidad y los huecos como para realizar otros ensayos de caracterización, como son la rotura Marshall, rotura por tracción indirecta o determinación de la rigidez.

Dentro de la Agrupación de Laboratorios de Asefma, ALEAS, se está trabajando para determinar una energía (giros o golpes) equivalente entre ambos sistemas de compactación. En las Jornadas de Asefma de 2010 y 2011 se presentaron comunicaciones libres con los resultados obtenidos en los estudios realizados con las mezclas tipo AC16, AC22 y AC32. En la comunicación que se presenta en esta jornada se muestran los resultados obtenidos en el estudio para las mezclas tipo BBTM11B y SMA11.

Todos los resultados que se han venido obteniendo se han comprobado en diferentes laboratorios durante el control de producción en planta.

En esta comunicación se indican los resultados que se han obtenido hasta la fecha en este trabajo.

INTRODUCCIÓN

La normativa de ensayos europea para mezclas bituminosas, serie UNE-EN 12697, permite compactar las probetas con 4 procedimientos diferentes. Uno de estos procedimientos es la compactación con rodillo (UNE-EN12697-33) para fabricar probetas prismáticas y los otros tres procedimientos se utilizan para fabricar probetas cilíndricas: compactación por impacto (UNE-EN 12697-30), máquina giratoria (UNE-EN 12697-31) y equipo vibratorio (UNE-EN 12697-32).

En uno de los grupos de trabajo de Asefma se inició un estudio para establecer las energías equivalentes entre la compactación con el equipo de impacto, de uso generalizado en España, y la compactación con la máquina giratoria, con la finalidad de determinar las energías equivalentes para alcanzar la misma densidad y poder introducir esta metodología en el desarrollo de los trabajos de laboratorio en los laboratorios en España.

Se ha estudiado la equivalencia para la familia de mezclas tipo AC, pertenecientes a la norma UNE-EN 13108-1, resultados que han sido presentados en anteriores jornadas nacionales de Asefma (años 2010 y 2011). El trabajo descrito en esta comunicación se ha centrado en dos familias de

mezclas diferentes, tipo BBTM y SMA, ambas empleadas como capas de rodadura.

Han participado 14 laboratorios, utilizando equipos de compactación de diferente marca y modelo, lo que ha requerido previamente un ensayo de intercomparación anillo inicial para la verificación de los compactadores.

OBJETIVO

El principal objetivo del trabajo es determinar la equivalencia entre las energías de compactación de impacto y giratoria para las mezclas tipo BBTM11B y/o SMA11. Se efectúan ensayos con diferentes grados de energía y se mide su resistencia a tracción indirecta, valorando también sus propiedades con ambos sistemas de compactación.

Para corroborar los resultados que se vienen obteniendo en este trabajo, se realizan comprobaciones con mezcla fabricada a escala industrial en diferentes laboratorios y plantas de fabricación de mezclas bituminosas con distinta ubicación en el territorio nacional y con materiales de diferente naturaleza y tipo.

METODOLOGIA DEL TRABAJO

La sistemática empleada en este trabajo es similar a la utilizada en los estudios anteriores. Se realiza un primer ensayo de referencia con el compactador de impacto, que para las mezclas BBTM y SMA le corresponden 50 golpes por cara, y con el compactador giratorio aplicando 210 giros. De esta manera se han seleccionado los grados de energía adecuados con el compactador giratorio para alcanzar una densidad similar a la obtenida por impacto y comprobando estos datos con varias series de probetas.

Al aumentar el número de participantes, respecto a los estudios efectuados anteriormente, antes de comenzar con los trabajos de compactación se realiza un ensayo de verificación de los equipos utilizados en todos los laboratorios, requiriendo en algunos casos efectuar ajustes en los equipos.

La metodología del estudio es la siguiente:

i. Estudio intercomparativo de contraste de equipos.

Para asegurar el correcto estado de funcionamiento de los equipos empleados en el trabajo por todos los laboratorios.

ii. Definición y selección de las mezclas objeto de estudio

iii. Definición de un protocolo de trabajo:

Establecer las pautas a seguir por todos los laboratorios participantes, pudiendo tener condiciones de reproducibilidad en los resultados obtenidos.

iv. Trabajos de laboratorio:

Ejecución de los ensayos atendiendo a las condiciones establecidas en las fases anteriores.

v. Análisis y estudio de resultados:

Los resultados obtenidos por cada uno de los laboratorios se compilaron y analizaron con objeto de establecer correlaciones entre los diferentes métodos, así como estudios complementarios.

ESTUDIO INTERCOMPARATIVO DE CONTRASTE DE LOS EQUIPOS

Este apartado tiene como objeto verificar el correcto estado de todos los equipos empleados por todos los participantes mediante el ensayo de un mismo tipo de mezcla y analizando los resultados obtenidos.

El número de laboratorios participantes en este trabajo es de 14, utilizando 4 modelos distintos de compactadores de impacto y 5 de compactadores giratorios.

Se fabrican 2 series de probetas con ambos compactadores con una energía de 75 golpes por cada cara (impacto) y 100 giros (giratoria), determinando la densidad por el procedimiento geométrico y por superficie seca saturada.

Para este ensayo intercomparativo se ha tomado como referencia una muestra tipo AC16D fabri-

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

cada en la planta de EIFFAGE con árido de naturaleza pórfido y ligante B50/70. Los datos de composición son los siguientes:

Tabla 1: Datos de la mezcla AC16D para contraste de los equipos.

Mezcla	AC16D
Fabricante	Eiffage (Madrid)
Naturaleza del árido	Pórfido
Tipo de betún	B50/70
Densidad máxima	2505 kg/m ³
Ligante en mezcla	4,80 %
Relación f/b	1,34

Los resultados obtenidos para la densidad geométrica y por superficie saturada seca (kg/m³) obtenidos son los siguientes:

Tabla 2: Resultados densidades del contraste impacto (75go)-giratoria (100 gi)mezcla AC16D.

Laboratorio	IMPACTO,75 golpes/cara		GIRATORIA, 100 giros	
	Geométrica	S.S.D.	Geométrica	S.S.D.
1	2364	2400	2397	2448
2	2461	2486	2435	2482
3	2409	2467	2436	2497
4	2384	2389	2387	2413
5	2425	2456	2392	2437
6	2459	2467	2432	2457
7	2432	2472	2386	2459
8	2454	2465	2430	2466
9	2410	2458	2399	2458
10	2408	2464	2420	2466
11	2435	2454	2410	2461
12	2436	2478	2332	2425
13	2436	2452	2364	2486
14	2471	2481	2430	2478

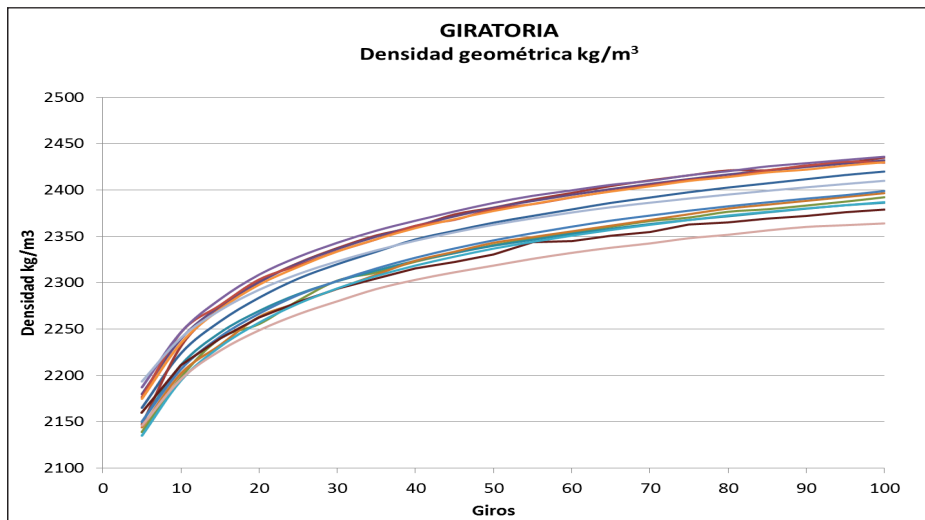


Gráfico 1: Curvas de compactación de la mezcla AC16D con 201 giros.

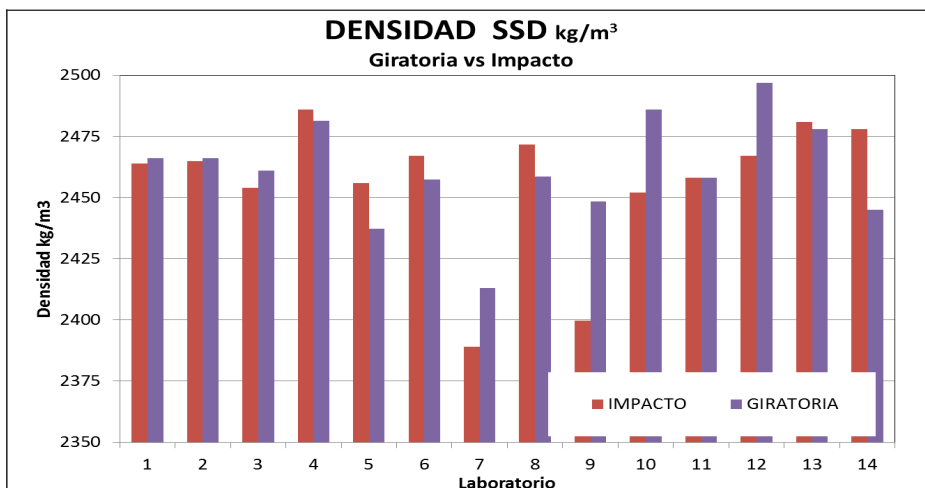


Gráfico 2: Gráfico comparativo densidades SSD impacto-giratoria.

Tabla 3: Resumen de resultados impacto-giratoria para la mezcla AC16D.

Compactador	Método medida	Promedio	Max.	Min.	Diferencia	Desv. Est.
Impacto	Geométrico	2427	2471	2364	108	30,3
	S. seca saturada	2456	2486	2389	97	28,2
Giratoria	Geométrico	2407	2436	2364	72	23,7
	S. seca saturada	2461	2497	2413	84	21,5

El cuadro final de resultados de la densidad en kg/m³ es el reflejado en la tabla 3.

DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE LAS MEZCLAS

Se han seleccionado dos tipos de mezclas empleadas como capas de rodadura con granulometría de áridos de tipo discontinuo y diferente contenido de huecos. Una de estas mezclas corresponde a la denominación BBTM11B, según la norma UNE-EN 13108-2, siendo la mezcla con el contenido de huecos mayor (en torno al 14 %). La otra mezcla ensa-

yada corresponde a la denominación SMA11 según la norma UNE-EN 13108-5, para un contenido de huecos inferior, comprendido entre el 4 y el 6 %.

La composición y características de cada una de las mezclas ensayadas se indican en la tabla 4 y en el gráfico 3.

La mezcla BBTM11B se ajusta a los requisitos señalados en el Artículo 543 del Pliego General de Condiciones PG-3. La mezcla SMA11 no se encuentra en la actualidad recogida en los Artículos de mezclas bituminosas del PG-3 por lo que ha sido diseñada de acuerdo con los requisitos que aparecen en la normativa europea UNE-EN 13108-5.

Tabla 4: Composición y características de las mezclas BBTM11B y SMA11.

Mezcla	SMA11	BBTM11B
Fabricante	Elsan (Madrid)	Pavasal (Valencia)
Naturaleza del árido	Milonita-caliza	Cuarcita-caliza
Tipo de betún	PMB45/80-65	PMB45/80-65
Densidad máxima, kg/m ³	2469	2465
Ligante en mezcla, %	6,10	5,20
Relación f/b	1,23	1,07

DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO DE TRABAJO

Previamente a la realización de los ensayos en el laboratorio se confeccionó un protocolo de trabajos para todos los laboratorios, indicando las condiciones de acondicionamiento de la mezcla, com-

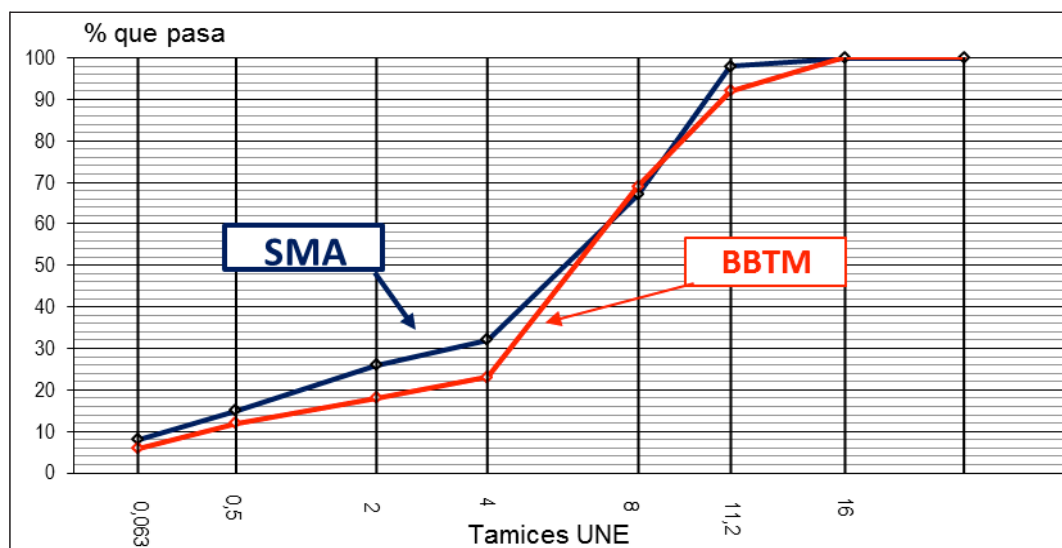


Gráfico 3: Curvas granulométricas de las mezclas BBTM11B y SMA11 estudiadas.

pactación, ensayo de las probetas y registro de los resultados, con el siguiente contenido:

- 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 operaciones de fabricación de las probetas en cuanto a tiempos y temperaturas de trabajo.
- Definición de la cantidad de muestra a utilizar en la preparación de probetas compactadas tanto por impacto como por giratoria. Para el caso de la compactación con la máquina giratoria, la cantidad de muestra se determinó para una relación entre la altura mínima y el diámetro interior del molde comprendida entre 0,66 a 1,05 teniendo en cuenta la densidad máxima de la mezcla, siendo la misma cantidad en todos los laboratorios para cada tipo de mezcla.
- Preparación de probetas aplicando 50 golpes por impacto calculando las densidades tanto por el método geométrico para la mezcla BBTM11B y por superficie saturada seca y geométrico para la mezcla SMA11, así como el cálculo del porcentaje de huecos.
- Preparación de probetas por compactación giratoria aplicando diferentes números de giros: barrido inicial de densidades para una energía de 210 giros y posterior fabricación de series de probetas de comprobación a diferente número de giros: SMA11 a 80, 100 y 120 giros y BBTM11B a 100, 120 y 160 giros. Ambos tipos de mezclas se fabrican en moldes con diámetro de 100.
- Determinación de la resistencia a tracción indirecta a 15°C en seco (UNE-EN 12697-23) de cada una de las probetas, para comprobar los resultados que se obtienen con ambos sistemas de compactación.

TRABAJOS DE LABORATORIO

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

Se fabrican probetas de cada tipo de mezcla con el método de compactación por impacto aplicando una energía de 50 golpes por cada cara, determi-

nando la densidad por el procedimiento geométrico y por superficie seca saturada (este último método solamente para la mezcla SMA11).

Los resultados de las densidades (kg/m³) obtenidas en los ensayos son los siguientes:

Tabla 5: Resultados densidades con el compactador de impacto 50 golpes/cara.

TIPO LABORATORIO	MEZCLA SMA 11		MEZCLA BBTM 11B
	GEOMÉTRICA	SSD	GEOMÉTRICA
1	2325	2403	
2	2386	2382	2162
3	2325	2404	2186
4	2368	2426	2206
5	2254	2360	2079
6	2344	2412	2173
7	2244	2348	2070
8	2317	2407	2154
9	2279	2399	2057
10	2277	2363	2202
11	2332	2407	2094
12	2340	2421	2085
13	2322	2408	2183
14	2335	2418	2108

El promedio de las densidades calculadas con todas las probetas fabricadas para cada tipo de mezcla es la que aparece en la siguiente tabla.

Tabla 6: Promedios densidades impacto para las mezclas BBTM11B y SMA11 estudiadas.

Tipo de mezcla	Promedio densidad, kg/m ³	
	Geométrica	Superficie seca saturada
BBTM11B	2135	--
SMA11	2318	2397

FABRICACIÓN DE PROBETAS CON EL COMPACTADOR GIRATORIO, UNE-EN 12697-31

En una primera fase del trabajo se fabrican probetas con 210 giros para obtener las curvas de densidad en todos los laboratorios participantes en el trabajo y establecer los niveles adecuados para alcanzar la energía de referencia obtenida con las probetas fabricadas con impacto.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 7: Densidades de la mezcla SMA11 con el compactador giratorio a 210 giros (1).

RESULTADOS MEZCLA SMA11.

LABORATORIO	1	2	3	4	5	6	7
GIROS	DENSIDAD GEOMÉTRICA, kg/m³						
5	1997	2041	2005	2025	1964	2077	2037
10	2068	2106	2062	2108	2026	2138	2096
20	2144	2165	2125	2183	2092	2207	2159
30	2189	2201	2162	2223	2135	2248	2197
40	2220	2229	2189	2250	2155	2277	2224
50	2242	2252	2209	2271	2174	2299	2244
60	2260	2267	2225	2285	2193	2315	2260
70	2276	2280	2239	2299	2202	2329	2272
80	2289	2290	2249	2310	2211	2341	2283
90	2302	2299	2259	2320	2219	2351	2292
100	2313	2307	2269	2327	2228	2359	2301
110	2322	2315	2276	2335	2235	2366	2307
120	2330	2320	2282	2339	2242	2373	2313
130	2336	2326	2288	2346	2248	2379	2319
140	2342	2330	2294	2348	2252	2384	2324
150	2346	2335	2298	2353	2256	2388	2329
160	2350	2339	2303	2358	2261	2392	2333
170	2353	2342	2307	2360	2263	2396	2337
180	2357	2346	2310	2365	2266	2400	2340
190	2360	2350	2314	2367	2269	2403	2344
200	2364	2353	2317	2372	2272	2406	2347
210	2368	2356	2319	2374	2274	2408	2350
D. GEOMETRICA	2368	2356	2319	2374	2274	2408	2350
D. SSD	2438	2406	2415	2442	2376	2435	2412

Tabla 8: Densidades de la mezcla SMA11 con el compactador giratorio a 210 giros (2).

LABORATORIO	8	9	10	11	12	13	14
GIROS	DENSIDAD GEOMETRICA, kg/m³						
5	2027	2028	2080	1981	2084	2024	2064
10	2088	2099	2149	2051	2146	2090	2113
20	2152	2174	2215	2120	2213	2162	2181
30	2188	2210	2254	2166	2255	2199	2205
40	2213	2246	2280	2193	2282	2233	2229
50	2232	2269	2300	2217	2302	2254	2247
60	2247	2284	2317	2234	2317	2267	2262
70	2259	2299	2331	2249	2329	2282	2275
80	2269	2314	2341	2265	2338	2300	2284
90	2279	2324	2351	2278	2348	2306	2293
100	2286	2334	2359	2286	2355	2320	2301
110	2293	2339	2366	2289	2361	2325	2305
120	2299	2345	2373	2300	2365	2334	2309
130	2305	2351	2379	2305	2371	2341	2317
140	2310	2357	2384	2311	2374	2349	2323
150	2315	2362	2389	2316	2378	2355	2328
160	2319	2368	2394	2325	2381	2358	2327
170	2323	2372	2397	2329	2385	2367	2337
180	2327	2376	2401	2332	2388	2373	2339
190	2329	2379	2403	2336	2388	2374	2342
200	2333	2383	2407	2341	2392	2375	2345
210	2336	2385	2409	2345	2393	2376	2348
D. GEOMETRICA	2336	2385	2409	2345	2393	2376	2348
D. SSD	2433	2444	2448	2414	2431	2441	2426

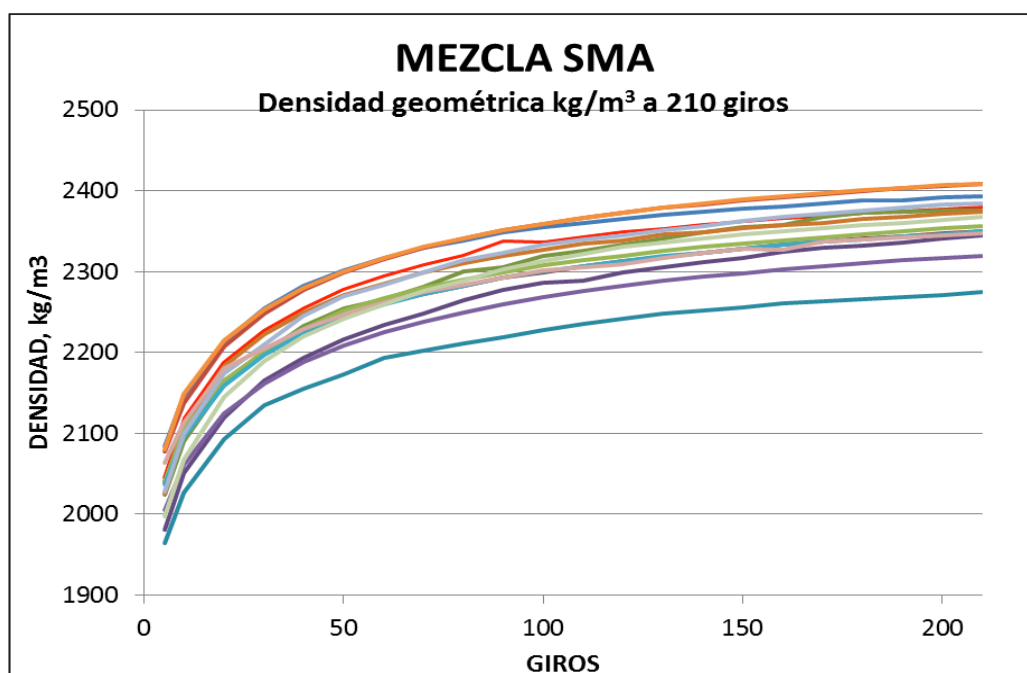


Gráfico 4. Curvas de compactación de la mezcla SMA11 a 210 giros.

Tabla 9: Densidades de la mezcla BBTM11B con el compactador giratorio a 210 giros (1).

LABORATORIO	2	3	4	6	7	8
GIROS	DENSIDAD GEOMETRICA, kg/m ³					
5	1842	1876	1875	1914	1868	1872
10	1897	1923	1945	1966	1913	1930
20	1955	1977	2008	2023	1962	1990
30	1990	2009	2043	2057	1992	2024
40	2013	2031	2069	2081	2014	2048
50	2032	2048	2086	2100	2030	2066
60	2048	2063	2100	2114	2044	2080
70	2060	2075	2110	2125	2055	2091
80	2071	2085	2122	2135	2064	2100
90	2080	2094	2129	2144	2072	2109
100	2088	2102	2138	2151	2078	2116
110	2095	2108	2143	2157	2084	2122
120	2101	2114	2149	2163	2089	2127
130	2107	2119	2154	2168	2094	2132
140	2112	2124	2158	2173	2098	2136
150	2117	2129	2163	2177	2103	2140
160	2121	2133	2167	2181	2107	2144
170	2124	2136	2171	2185	2110	2147
180	2128	2139	2173	2188	2113	2150
190	2131	2142	2177	2191	2115	2153
200	2134	2145	2179	2195	2118	2156
210	2137	2148	2182	2197	2121	2158
D. GEOMETRICA	2137	2148	2182	2197	2121	2158

Tabla 10: Densidades de la mezcla BBTM11B con el compactador giratorio a 210 giros (2).

LABORATORIO	9	10	11	12	13	14
GIROS	DENSIDAD GEOMÉTRICA, kg/m³					
5	1800	1916	1850	1889	1890	1855
10	1856	1967	1895	1942	1945	1894
20	1918	2022	1942	1999	2006	1947
30	1949	2056	1974	2033	2038	1964
40	1980	2078	1989	2056	2066	1987
50	2000	2094	2003	2073	2085	2003
60	2014	2109	2019	2085	2094	2014
70	2027	2119	2026	2096	2107	2022
80	2041	2128	2033	2107	2123	2031
90	2050	2136	2045	2114	2127	2037
100	2060	2142	2046	2121	2140	2045
110	2066	2148	2056	2127	2144	2047
120	2072	2153	2061	2132	2151	2050
130	2078	2156	2063	2137	2157	2053
140	2084	2162	2067	2142	2163	2060
150	2090	2165	2073	2145	2169	2065
160	2096	2168	2071	2149	2170	2068
170	2100	2171	2079	2151	2179	2071
180	2103	2175	2083	2155	2184	2073
190	2107	2178	2086	2158	2186	2076
200	2111	2180	2082	2161	2186	2079
210	2115	2183	2084	2163	2187	2081
D. GEOMETRICA	2115	2183	2084	2163	2187	2081

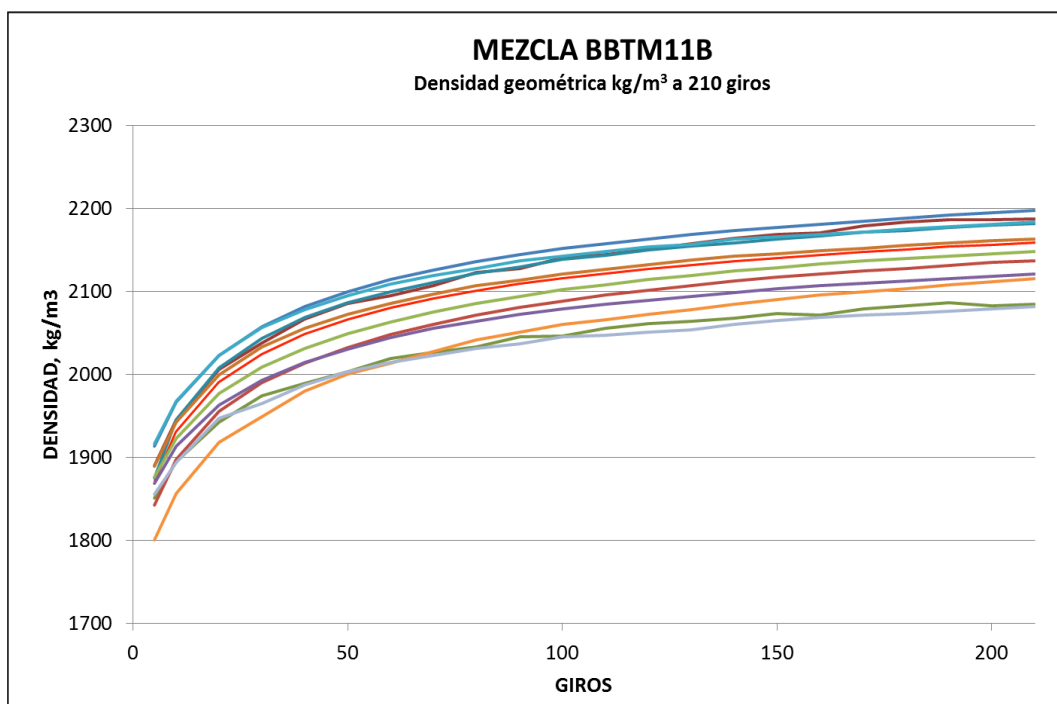


Gráfico 5. Curvas de compactación de la mezcla BBTM11B a 210 giros.

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

A continuación se muestran dos tablas comparativas con los valores obtenidos en las densidades por impacto con 50 golpes por cada cara y los obtenidos con la giratoria para 210 giros.

Tabla 11: Resultados mezcla SMA11 impacto (50 golpes/cara) y giratoria (210 giros).

Mezcla SMA11.

Compactador	Método medida	Promedio	Max.	Min.	Diferencia	Desviación Estándar
Impacto	Geométrico	2318	2386	2244	142	44,6
	Superficie seca saturada	2397	2426	2348	78	26
Giratoria	Geométrico	2360	2409	2274	135	36,2
	Superficie seca saturada	2426	2448	2376	72	19,5

Tabla 12: Resultados mezcla BBTM11B impacto (50 golpes/cara) y giratoria (210 giros).

Mezcla BBTM11B.

Compactador	Método medida	Promedio	Max.	Min.	Diferencia	Desviación Estándar
Impacto	Geométrico	2134	2206	2057	150	55,8
Giratoria	Geométrico	2145	2197	2081	116	39,45

A partir de estos resultados se establecen los rangos de niveles de energía teóricos con la compactadora giratoria necesarios para alcanzar la densidad obtenida por el sistema de impacto, y que son los siguientes:

Mezcla SMA11B: entre 70 y 120 giros.

Mezcla BBTM11B: entre 100 y 170 giros

De cada una de las mezclas se fabrican nuevas series de probetas para confirmar los giros ne-

cesarios en cada caso, dentro del rango establecido anteriormente y teniendo en cuenta los resultados obtenidos así como las categorías definidas en la norma UNE-EN 13108-20. Para la mezcla SMA11 se fabrican 3 series de probetas a 80, 100 y 120 giros y de la mezcla BBTM11B se fabrican 3 series de probetas con 100, 120 y 160 giros. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 13: Resultados mezcla SMA11 con giratoria a 80-100-120 giros.

Mezcla SMA11.

Laboratorio	80 giros		100 giros		120 giros	
	Geométrica	SSD	Geométrica	SSD	Geométrica	SSD
1	2296	2419	2302	2425	2335	2435
2	2325	2422	2329	2425	2337	2430
3	2272	2409	2273	2405	2280	2408
4	2338	2428	2329	2425	2337	2430
5	2294	2399	2300	2398	2324	2409
6	2345	2424	2332	2422	2334	2425
7	2267	2375	2314	2390	2327	2389
8	2333	2429	2345	2429	2339	2430
9	2399	2431	2279	2399	2279	2399
10	2313	2420	2310	2401	2339	2417
11	2277	2387	2318	2415	2334	2420
12	2338	2416	2372	2422	2388	2420
13	2292	2408	2326	2428	2337	2436
14	2287	2405	2316	2408	2309	2408
Promedio	2313	2412	2317	2414	2329	2418

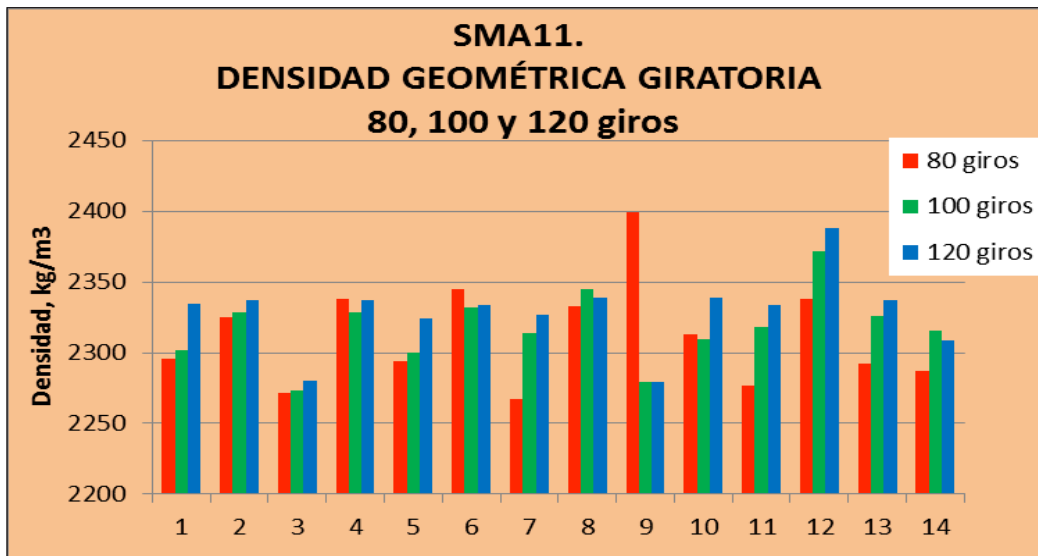


Gráfico 6. Densidades mezcla SMA11 compactador giratorio 80-100-120 giros.

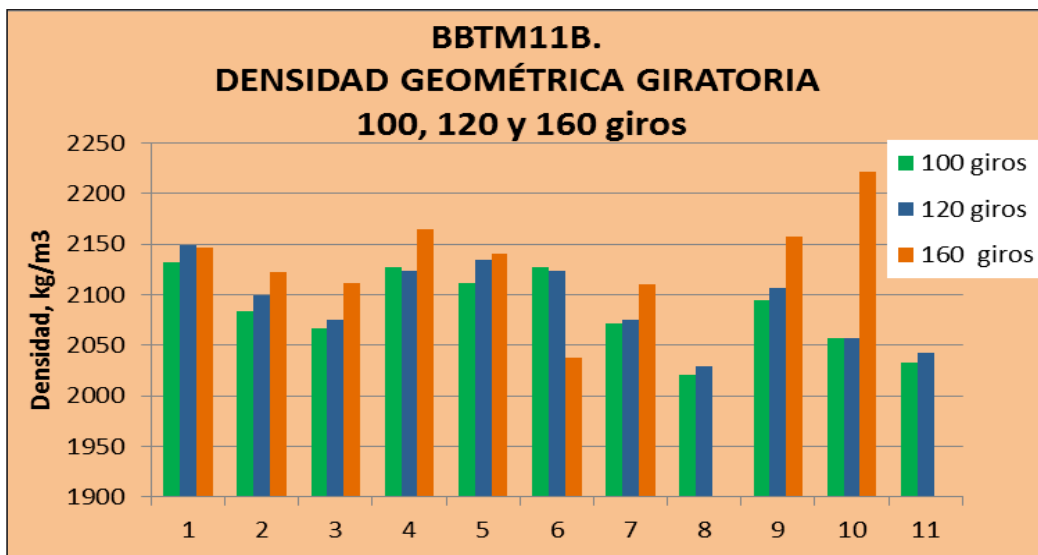


Gráfico 7. Densidades mezcla BBTM11B compactador giratorio 100-120-160 giros.

Tabla 14: Resultados mezcla BBTM11B con giratoria a 100-120-160 giros.

Mezcla BBTM11B.

Laboratorio	100 giros	120 giros	160 giros
Densidad geométrica			
2	2127	2124	2038
3	2071	2075	2110
4	2127	2124	2165
7	2020	2029	-
8	2132	2149	2147
9	2057	2057	2221
10	2094	2107	2158
11	2067	2075	2112
12	2111	2135	2141
13	2084	2100	2122
14	2033	2043	-
Promedio	2084	2092	2135

A partir de los resultados obtenidos la energía equivalente entre el compactador de impacto para 50 golpes/cara y el compactador giratorio en las mezclas SMA11 y BBTM11B son los reflejados en la tabla siguiente:

Tabla 15: Resultados impacto 50 giros y giros.

	SMA11	BBTM11B
Energía impacto	50 golpes/cara	50 golpes/cara
Energía giratoria	100 giros	160 giros

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

Los resultados de los ensayos de rotura a tracción indirecta (UNE-EN 12697-23) a una temperatura de 15 °C y efectuados sobre probetas con el método de impacto con 50 golpes y las probetas fabricadas con la máquina giratoria, con distintos niveles de energía, son los que se muestran en la siguiente tabla de resultados:

Tabla 16: Resultados tracción indirecta impacto y giratoria.

MEZCLA SMA11, resistencia a tracción indirecta en MPa.

Laboratorio	Impacto	Giratoria			
	50 golpes	210 giros	80 giros	100 giros	120 giros
1	2,230	2,420	2,510	2,630	2,690
2	2,260	2,250	2,380	3,100	3,320
3	2,240	2,460	2,140	2,040	2,020
4	2,968	2,368	2,543	2,752	3,098
5	2,110	2,177	2,553	2,589	2,756
6	2,321	2,351	2,238	2,230	2,346
7	2,050	2,180	2,117	2,100	2,177
8	2,400	2,600	2,500	2,390	2,550
9	2,301	2,866	2,214	2,160	2,407
10	2,354	2,614	2,408	2,840	3,023
11	2,151	2,118	2,410		
12			2,380	2,450	2,470
13	2,445	2,659	2,740	2,394	2,564
14	2,537	2,719	2,379	2,476	2,636
Promedio	2,319	2,422	2,395	2,473	2,618

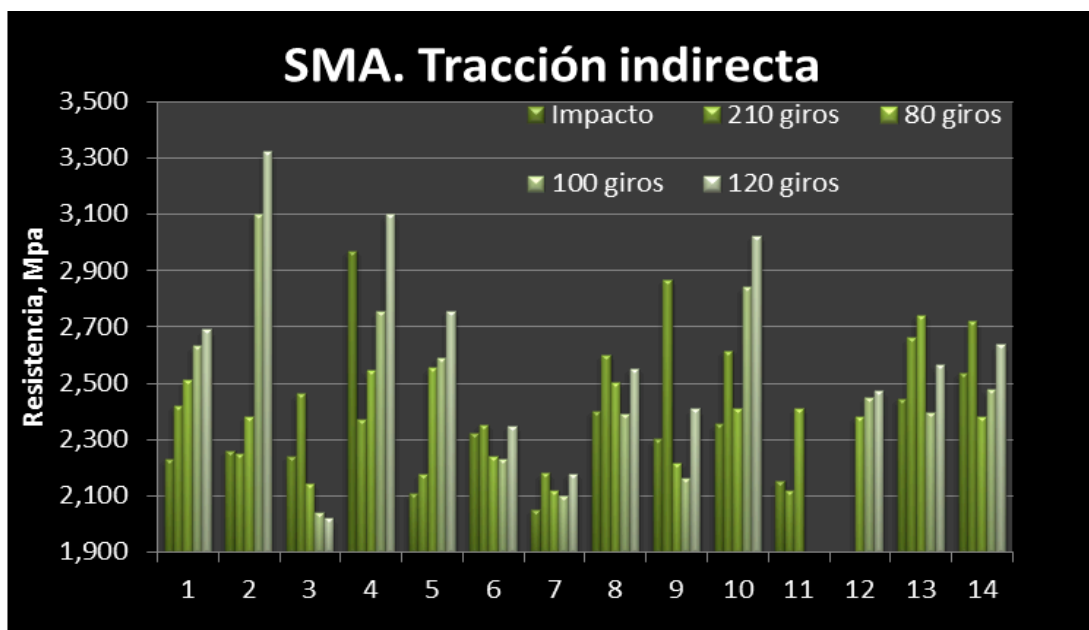


Gráfico 8. Tracción indirecta SMA11.

Tabla 17: Resultados tracción indirecta impacto y giratoria.

MEZCLA BBTM11B, resistencia a tracción indirecta en MPa.

Laboratorio	Impacto	Giratoria			
	50 golpes	210 giros	100 giros	120 giros	160 giros
1					
2	1,410	2,020	1,740	1,880	1,140
3	1,360	1,550	1,100	1,070	1,360
4	2,324	2,053	1,869	1,863	1,814
5	1,210	1,231			
6	1,710	1,599			
7	1,590	1,440	1,271	1,233	
8	1,900	1,600	1,430	1,420	1,468
9	1,741	1,795	1,544	1,648	1,822
10	1,884	1,636	1,431	1,386	1,519
11	1,326	1,298			1,630
12			1,410	1,510	1,700
13	1,796	1,759	1,464	1,441	1,710
14		1,562	1,613	1,473	
Promedio	1,659	1,629	1,487	1,492	1,574

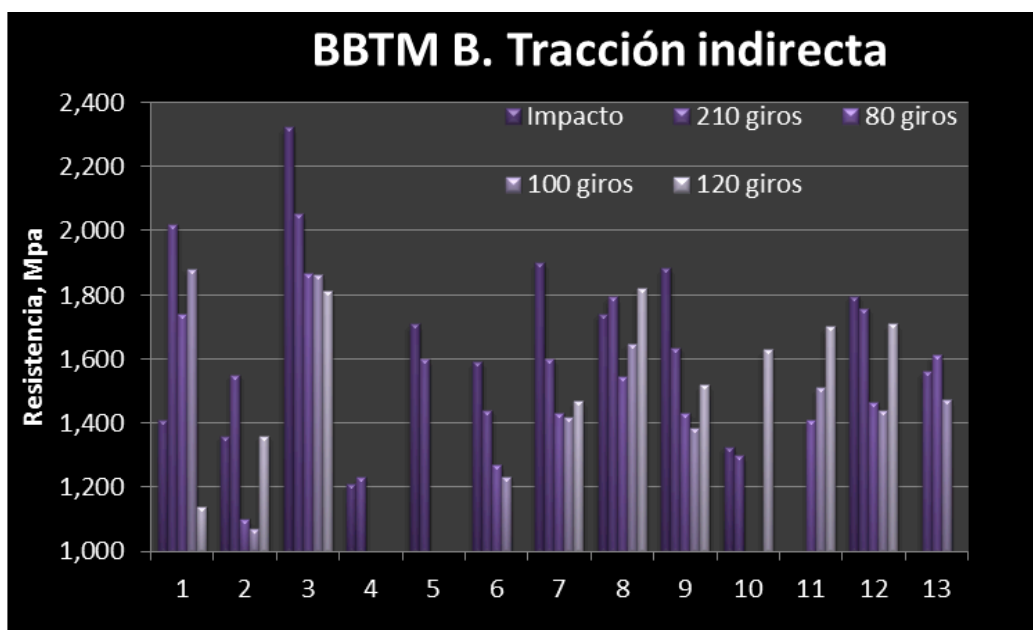


Gráfico 9. Tracción indirecta BBTM11B.

ANÁLISIS Y ESTUDIO DE RESULTADOS

Una vez concluida la fase de laboratorio, se efectúan otros análisis de los resultados obtenidos durante todo el estudio, como por ejemplo el cálculo de la compactibilidad de cada tipo de mezcla, que nos permitirá confirmar los valores de energía recomendados.

ESTUDIO DE LA COMPACTIBILIDAD

Como ya se hiciera en estudios previos se procedió al estudio de la compactibilidad en las mezclas SMA11 y BBTM11B según apartado 7.2 de la Norma UNE-EN 12697-10 teniendo como referencia la densidad máxima (para el cálculo del % de contenido de huecos) la establecida en el apartado de

definición y selección de la mezcla bituminosa. Se calcularon los parámetros de la ecuación descrita en la norma para un número de giros igual o superior a 20 para cada una de las probetas fabricadas por cada laboratorio, realizándose posteriormente la media de cada serie. Se realizó también una corrección de las curvas obtenidas directamente de los equipos atendiendo a la medida final de altura tomada por el laboratorio.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 18: Compactibilidad mezclas SMA11 y BBTM11B.

Laboratorio	SMA11		BBTM11B	
	k	v(1)	k	v(1)
1	3.85	24.4	3.86	24.2
2	3.24	21.7	3.24	30.6
3	3.33	23.6	2.95	28.5
4	3.19	20.6	2.94	27.0
5	3.04	23.9	2.44	34.8
6	3.38	20.2	2.94	26.4
7	3.21	21.7	2.76	28.5
8	3.19	21.7	2.82	27.3
9	3.63	22.5	3.37	32.1
10	3.33	19.9	2.71	25.7
11	3.72	24.5	2.46	28.3
12	2.99	18.7	2.77	26.9
13	3.77	23.6	3.18	28.0
14	2.93	20.5	2.35	28.1
Promedio	3.33	22.0	2.91	28.3

Con estos promedios se calcularon los giros en los que se alcanzaría el porcentaje de huecos equivalente a la compactación por impacto a 50 golpes según la ecuación descrita en norma:

$$v(ng) = v(1) - (K * \ln ng)$$

donde:

- v(ng) contenido de huecos para un número de giros, ng, expresado en tanto por ciento.
- ng es el número de giros.

Los valores obtenidos fueron:

Tabla 19: Giros teóricos mezclas SMA11 y BBTM11B.

Golpes	SMA11 (Giros teóricos)	BBTM11B (Giros teóricos)
50	116	166

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

El análisis estadístico de resultados se realizó según las normas UNE 82009-2 y UNE 82009-6 (equivalentes a ISO 5725-2 e ISO 5725-6 respectivamente), referentes al método básico para la determinación de la repetibilidad (resultados de ensayos independientes realizados con el mismo método de ensayo, sobre muestras idénticas en el mismo laboratorio, por el mismo operario utilizando el mismo equipo en un corto periodo de tiempo) y reproducibilidad (resultados de ensayos independientes realizados con el mismo método de ensayo, sobre muestras idénticas en laboratorios diferentes, operarios distintos utilizando un equipo diferente) de un método de medición normalizado. Este análisis de los resultados se inicia con un estudio estadístico de los datos aportados por todos los participantes, para determinar si existen valores aberrantes y, en su caso, eliminarlos.

Los ensayos que se han utilizado para la detección de resultados numéricos aberrantes han sido:

- Ensayo de Cochran. Permite detectar laboratorios que presentan resultados con excesiva variabilidad con respecto del conjunto.
- Ensayo de Grubbs (simple y doble). Permite detectar laboratorios que presentan resultados que difieren excesivamente de la media.

El criterio para tratar los resultados de los tests es el siguiente:

- Si el estadístico del ensayo es menor o igual al 5 % de su valor crítico (o mayor o igual en el caso de Grubbs doble), el valor verificado es aceptado como *correcto*.
- Si el estadístico del ensayo es mayor o igual al 5 % de su valor crítico (o menor o igual en el caso de Grubbs doble), y menor o igual al 1 % de su valor crítico (o mayor o igual en el caso de Grubbs doble), el valor verificado es considerado *anómalo*, pero no se elimina para la estimación de la media general y las varianzas.

- Si el estadístico del ensayo es mayor o igual al 1 % de su valor crítico (o menor o igual en el caso de Grubbs doble, el valor verificado es considerado estadísticamente *incompatible*, y se elimina para la estimación de la media general y las varianzas.

Con los valores considerados aceptables se calculan las varianzas de reproducibilidad inter-laboratorios y la reproducibilidad total asociada al método. Los cálculos utilizados son los descritos en la UNE-EN 82009-2.

El estudio estadístico se ha llevado a cabo sobre los siguientes ensayos:

Densidad geométrica y densidad superficie saturada seca obtenida por compactación por impacto y por compactación mediante giratoria para la energía de referencia para las mezclas SMA y AC16S.

Densidad geométrica obtenida mediante la compactación por impacto y por la giratoria para la energía de referencia para la mezcla BBTM 11B.

De la aplicación del test de Cochran y Grubbs se extraen los siguientes resultados:

- Mezcla AC16S: El laboratorio 7 presenta valores anómalos en la densidad geométrica por impacto y en la giratoria a 100 giros. Así mismo este laboratorio presenta resultados aberrantes en las densidades superficie saturada seca tanto por impacto como por giratoria. Éstos últimos han sido eliminados para el análisis posterior de la precisión del ensayo.
- Mezcla BBTM 11B, se ha detectado un valor anómalo correspondiente al laboratorio 5 en cuanto a la densidad geométrica por impacto.
- Mezcla SMA 11: Se ha detectado un valor aberrante correspondiente al laboratorio 9 en la medida de la densidad geométrica mediante la compactación giratoria a 100 giros que ha sido eliminado en el posterior análisis de la precisión del ensayo.

En la siguiente tabla se presentan los valores de la desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad para las distintas densidades y para cada tipo de mezcla obtenidos en este ejercicio.

Tabla 20: Resultados de desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad AC16S.

Mezcla AC16		
	S_r	S_R
Densidad geométrica (75x)	9.9	32
Densidad geométrica (100g)	12.5	26.14
Densidad sss (75x)	5.12	22.4
Densidad sss (100g)	6.4	17.5

Tabla 21: Resultados de desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad SMA11.

Mezcla SMA11		
	S_r	S_R
Densidad geométrica (50x)	17.8	47.08
Densidad geométrica (100g)	17.7	26.2
Densidad sss (50x)	8.07	31.1
Densidad sss (100g)	9.2	15.1

Tabla 22: Resultados de desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad BBTM11B.

Mezcla BBTM11B		
	S_r	S_R
Densidad geométrica (50x)	15	77
Densidad geométrica (160g)	30	59

COMPROBACIÓN DE RESULTADOS EN CONTROL DE PRODUCCIÓN EN DIFERENTES INSTALACIONES DE FABRICACIÓN

Se han realizado comprobaciones con mezclas tomadas en el control de producción en fábrica en varias instalaciones para verificar las energías de compactación obtenidas en los estudios efectuados para las mezclas tipo AC. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Mezclas tipo AC 16 fabricadas con impacto a 75 golpes y con giratoria a 100 giros, con molde de 100 milímetros y con distinto tipo de ligante.

En los siguientes gráficos vienen representados los resultados obtenidos durante el control de producción en fábrica para la densidad por superficie seca saturada con los distintos métodos de compactación y la diferencia existente entre los mismos.

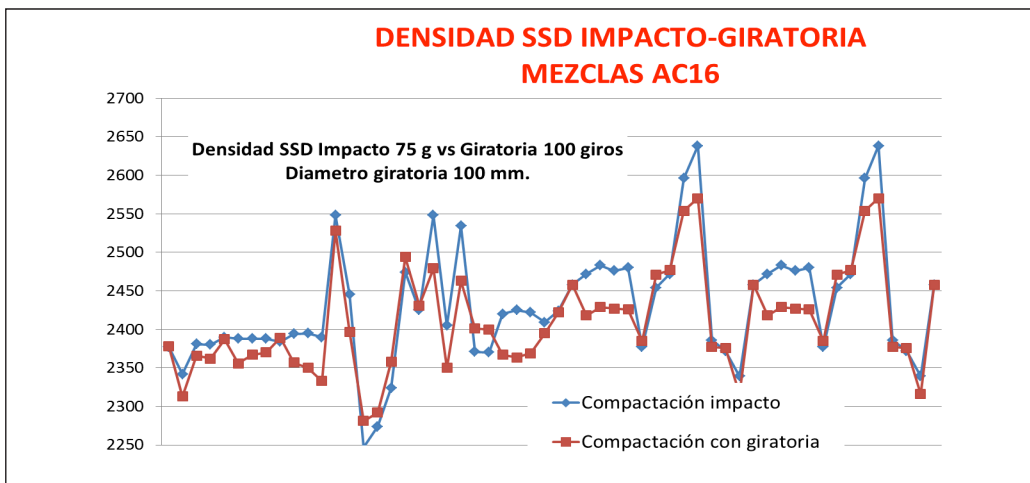


Gráfico 10. Densidad impacto-giratoria en CPF de la mezcla AC16.

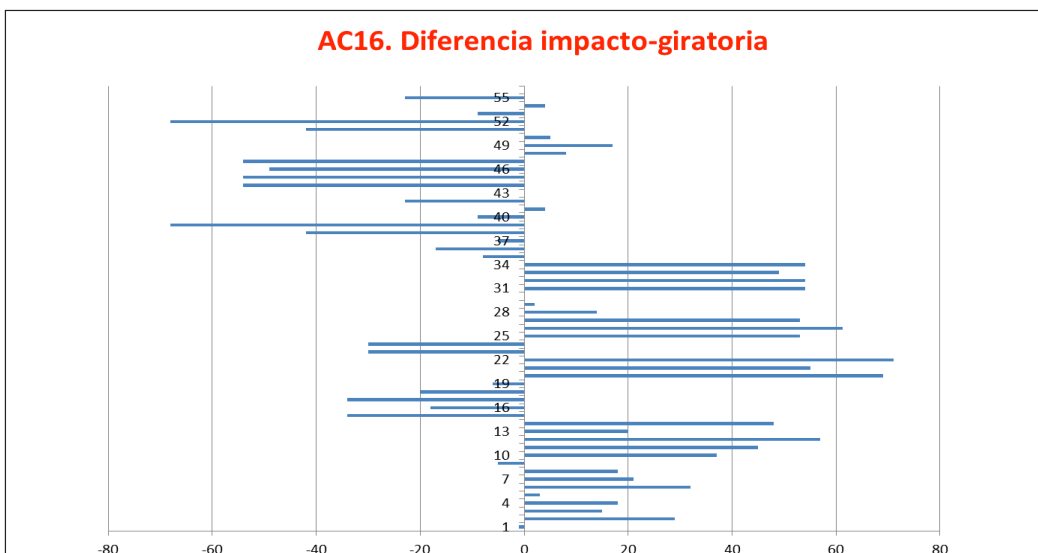


Gráfico 11. Diferencias densidad impacto-giratoria en CPF de la mezcla AC16.

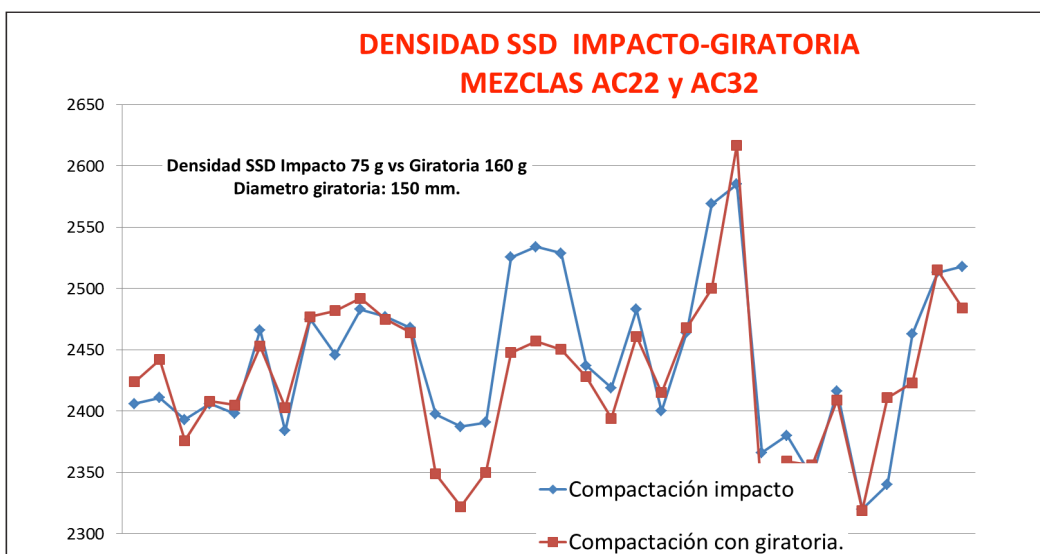


Gráfico 12. Densidad impacto-giratoria en CPF de las mezclas AC22 y AC32.

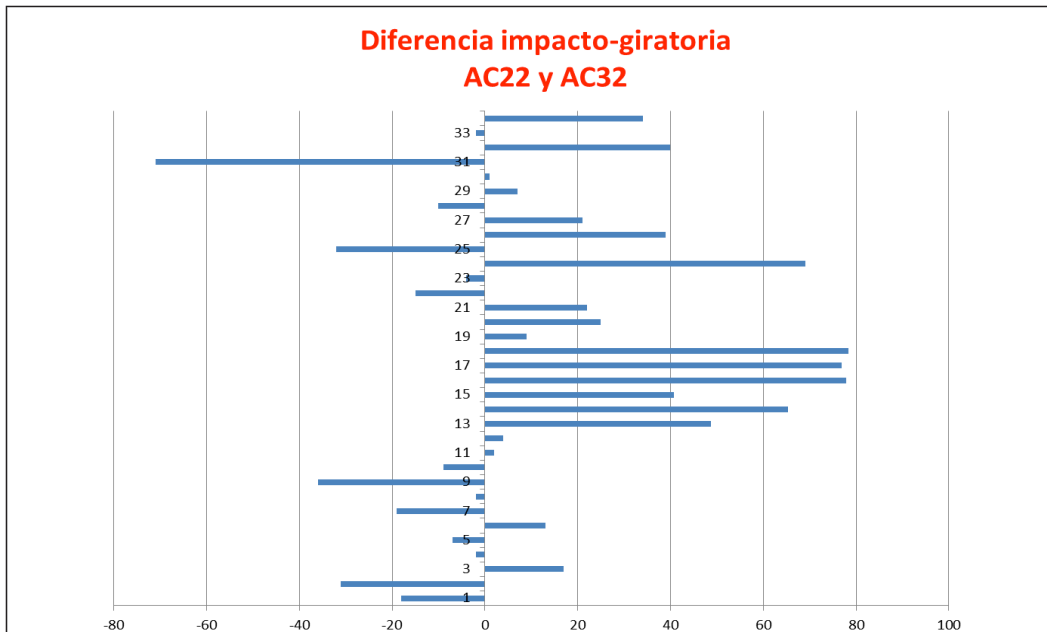


Gráfico 13. Diferencias densidad impacto-giratoria en CPF de las mezclas AC22 y AC32.

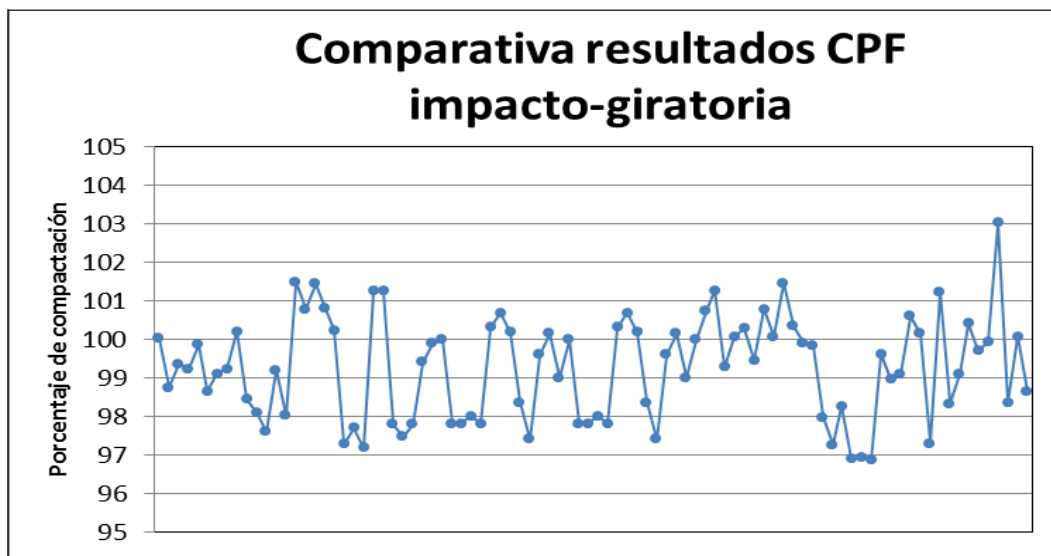


Gráfico 14. Comparativa en porcentaje entre impacto y giratoria en el CPF en varias instalaciones.

Para las mezclas tipo AC 22 y AC32 fabricadas con impacto a 75 golpes y con giratoria a 160 giros, con molde de 150 milímetros y distinto tipo de ligante. En ambos casos los valores representados en los gráficos 12 y 13 corresponden a la densidad por superficie seca saturada en kg/m³.

Si se toma para cada caso el 100 % de compactación el valor de referencia obtenido con el compactador de impacto, la mayor parte de los valores obtenidos con el compactador giratorio en todos los ensayos aportados en el estudio (90) corresponden a un por-

centaje de compactación entre un 97 y 102%, tal y como puede comprobarse en el gráfico 14.

CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas por los participantes en este trabajo son las siguientes:

- Como en las anteriores fases, el principal objetivo del trabajo es determinar la energía equivalente con la máquina giratoria para alcanzar la densidad

que se obtiene con el equipo de impacto con 50 golpes para las mezclas tipo BBTM11B y SMA11. En este cuadro se muestran los resultados para todos los distintos tipos de mezclas estudiadas en las cuatro fases del trabajo:

Tabla 23: Cuadro resumen de las energías recomendadas para las mezclas AC16, AC22, AC32, SMA11 y BBTM11B.

MEZCLAS	Giros equivalente a 75 golpes	Giros equivalentes a 50 golpes
AC32	160	80
AC22	160	100
AC16	100	80
BBTM11B	--	100
SMA11	--	160

NOTA: En las mezclas tipo AC16, BBTM11 y SMA11 se ha empleado un molde de 100 milímetros de diámetro mientras que para las mezclas tipo AC22 y AC32 se ha utilizado un molde de 150 milímetros de diámetro.

En todos los casos se ha tenido en cuenta los niveles permitidos en la tabla C.1 de la Norma UNE-EN 13108-20.

- Es necesario continuar realizando el trabajo de control de producción en planta para analizar un mayor número de resultados. Hasta la fecha los valores obtenidos en los controles efectuados parecen confirmar los valores de energía recomendados para estos tipos de mezclas.
- Para los tres tipos de mezclas ensayadas, AC16, SMA11 y BBTM11B, se obtienen resultados de reproducibilidad mejores para las probetas fabricadas con el compactador giratorio, es decir menor dispersión (menores valores de SR), de igual forma que los resultados obtenidos en los anteriores estudios para las mezclas tipo AC16S, AC16D, AC22 y AC32. Esta dispersión es también menor para los valores de la densidad por superficie saturada seca en lugar de la densidad geométrica.
- Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción indirecta para ambos tipos de mezclas no aportan una información clara sobre su tendencia entre ambos sistemas de compactación. Si se

compara el resultado obtenido de las probetas fabricadas con el compactador de impacto con el resultado obtenido en las probetas fabricadas con el compactador giratorio, en el caso de la mezcla SMA11 los resultados con el compactador giratorio son superiores a los de impacto mientras que para la mezcla BBTM11B los resultados obtenidos con el compactador giratorio son inferiores a los que se han obtenido con el compactador de impacto.

- Los resultados obtenidos en el estudio de la compactabilidad de las mezclas SMA11 y BBTM11B confirman los valores de energía recomendados en el trabajo.

El estudio sobre la compactación giratoria continúa dentro de un Grupo de trabajo coordinado en ALEAS (Agrupación de Laboratorios de Asefma).

AGRADECIMIENTOS

La realización de un trabajo de esta magnitud requiere de la colaboración de un numeroso grupo de participantes para que los resultados puedan considerarse estadísticamente relevantes.

Por ello los autores de esta comunicación quieren agradecer a los numerosos integrantes de los laboratorios de las organizaciones participantes (ACCIONA, ASEFMA, CIESM-INTEVIA, CAMPEZO, DITECPESA, EIFFAGE -Laboratorios de Madrid y Sevilla-, ELSAN, INTROMAC, LOS SERRANO, MECACISA, PAVASAL, PROAS, REPSOL, SACYR y SORIGUE) el ingente esfuerzo realizado.

BIBLIOGRAFÍA

V Jornada Nacional de Asefma (2010) Comunicación libre: Estudio de un ensayo de anillo de las características de una mezcla bituminosa a partir de la compactación de probetas por impacto y por giratoria.

VI Jornada Nacional de Asefma (2011) Comunicación libre: Estudio comparativo de la metodología de compactación giratoria-impacto, parte II.



VII Jornada Nacional de Asefma (2012) Comunicación libre: Estudio comparativo de la metodología de compactación giratoria-impacto, parte II.

Norma UNE-EN 12697-6. Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático.

Norma UNE-EN 12697-23. Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.

Norma UNE-EN 12697-30. Preparación de probetas con el compactador de impacto.

Norma UNE-EN 12697-31. Preparación de probetas con el compactador giratorio.