

ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS (POLYMER MODIFIED ASPHALT - PMA) CARRETERAS DE ALTO RENDIMIENTO

Blanca Durand¹, Luca Baccellieri²

¹ Iterchimica S.r.l., Suisio (IT), blanca.durand@iterchimica.it

² Iterchimica S.r.l., Suisio (IT), luca.baccellieri@iterchimica.it

Resumen

La vida de un pavimento de Carretera está correlacionada a las cargas de servicio, agua, temperatura y excursiones térmicas, etc. Estos factores, son decisivos para el diseño y para el comportamiento de los pavimentos. Se han realizado pavimentos utilizando la tecnología Polymer modified asphalt (PMA) con el objetivo de contruir pavimentos perpetuos. El producto utilizado es un compuesto polimérico que permite realizar directamente en la planta (con el método dry) mezclas modificadas (con 4-6% sobre el peso del betún) y mezclas de alto módulo (con 6-10% sobre el peso del betún). A continuación se tratarán dos casos de investigación específicos: en el primer caso, pruebas dinámicas de laboratorio con referencia a la rigidez (aumento de +5 a + 40%, dependiendo de la temperatura de prueba y la frecuencia de 2Hz), a la resistencia al ahuellamiento (comparación entre las curvas HWT a 60°C) y a la resistencia a la fatiga (aumento del 50-100% a 12°C, en control de carga y una frecuencia de 2Hz); en el segundo caso, los efectos del polímero a bajas temperaturas, determinado por la prueba TSRST en la que se destacan resultados comparables a la mezcla con betún modificado.

Palabras Clave: PMA, alto módulo, polímero

1 Introducción

A lo largo de los años, los criterios que se han ido adoptando para el diseño de un pavimento de carretera se han basado en sistemas de cálculo y dimensionamiento relacionados con los ensayos realizados con el método Marshall y en las propiedades mecánicas obtenidas de los mismos. Sin embargo, a partir de los métodos de diseño estándar, a través de campañas de investigación realizadas en Estados Unidos, se desarrolló una actualización de la metodología de diseño que identifica una caracterización adecuada del conglomerado bituminoso mediante pruebas específicas destinadas a prevenir ciertas inestabilidades viales.

Hasta la fecha, ya no es suficiente determinar los parámetros estándar como vacíos, estabilidad Marshall, flujo y resistencia a la tracción indirecta, que brindan información general sobre el correcto diseño de la mezcla, sino que es necesario realizar los llamados "ensayos avanzados". En la Guía AASHTO del 2008 [1], se define un procedimiento de diseño esquemático que, a partir de la caracterización del conglomerado bituminoso Hot Mix Asphalt (HMA), es posible determinar el espesor del pavimento y su análisis de fallas mediante el método "Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide" (MEPDG).

Estos ensayos tienen como objetivo predecir en pequeña escala (laboratorio) el comportamiento del material y su futuro deterioro, el cual se simplifica en tres macrogrupos: ensayo de fatiga para determinar el número de ciclos al alcanzar el 50% del módulo inicial en una función de la carga aplicada, que generalmente se genera a temperaturas intermedias; ensayo de ahuellamiento para determinar la resistencia al paso de cargas pesadas, que se presenta a altas temperaturas; Ensayos de Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) para la determinación de la temperatura baja en la cual se forma un agrietamiento, de esta manera se puede evaluar el comportamiento, no solo del componente "betún" (prueba de Bending Beam Rehometer-BBR), si no también de la mezcla en la cual se hace la modificación. Esta prueba permite comprender si una mezcla bituminosa modificada con cualquier aditivo puede ser utilizada en áreas geográficas específicas.

Los ensayos de módulo caracterizan el material a diferentes temperaturas y frecuencias y en consecuencia proporcionan la respuesta del material in situ con el que se dimensiona el pavimento, que representa los datos de entrada de los softwares de dimensionamiento actualmente en uso.

A partir de los análisis de laboratorio, es posible optimizar el diseño introduciendo tecnologías innovadoras que garantizan, según la dosificación utilizada, el aumento de los distintos parámetros para crear pavimentos de alto rendimiento. Por este motivo, se han introducido en el mercado tecnologías alternativas que permiten modificar los parámetros prestacionales que se mencionarán a continuación: tecnología PMA (Polymer Modified Asphalt) y PMB (Polymer Modified Bitumen).

2 PMA (Polymer Modified Asphalt)

La estructura básica de una mezcla bituminosa está compuesta por el esqueleto lítico suministrado por agregados y el filler, al que se le agrega betún como aglutinante. Sin embargo, con el fin de mejorar las características de rendimiento de la mezcla producida y responder a las necesidades relacionadas con:

- Cargas vehiculares
- Comportamiento elastoplástico del betún
- Etc.

La tecnología PMA, se utiliza con un betún convencional y es una tecnología específica destinada a mitigar posibles problemas relacionados con la mezcla, se basa en el uso de un compuesto polimérico plastomérico que modifica la mezcla bituminosa. La composición del polímero es tal que crea una mezcla en la que hay:

- Modificación de las características físicas del betún (Punto de ablandamiento, Penetración, Performance Grade, etc.): este efecto se debe a la dispersión del polímero en el betún, gracias a la temperatura y a la fricción creada por los agregados durante el mezclado, de esta manera es posible disolver el polímero modificando el ligante.
- Modificaciones de las características de desempeño de la mezcla (ITS, Marshall, Modulo, Fatiga, Ahuellamiento, etc): esta modificación es consecuencia del punto anterior con la iteración entre la matriz agregado-polímero-betún, que en conjunto aumentan la resiliencia de la estructura.

El compuesto polimérico para la producción de la mezcla PMA (Figura 1.) se presenta en forma de gránulos que permiten un fácil uso en la planta, la dosificación y características físicas se reportan en la Ficha Técnica.



Figura 1. Tecnología PMA – Compuesto polimérico (Iterchimica)

Los principales parámetros que caracterizan al Compuesto polimérico utilizado para la tecnología PMA son:

- Aspecto: gránulos
- Tamaño: 2-4mm
- Color: gris
- Densidad aparente a 25°C: 0,4-0,6 g/cm³
- Punto de ablandamiento: 160-180°C

3 Del laboratorio a la planta en pocos pasos

La tecnología PMA permite simplificar el proceso de modificación en comparación con la tecnología PMB estándar, sin perder rendimiento y calidad. El proceso de producción consiste en introducir el polímero antes del betún y después del agregado, como se muestra en la Figura 2. En los dos casos de estudio que se presentarán a continuación, el conglomerado fue aditivado tanto en la planta (caso 1) como en laboratorio (caso 2). Las temperaturas de producción deben estar entre 170-180°C y temperaturas de compactación superiores a 150°C.

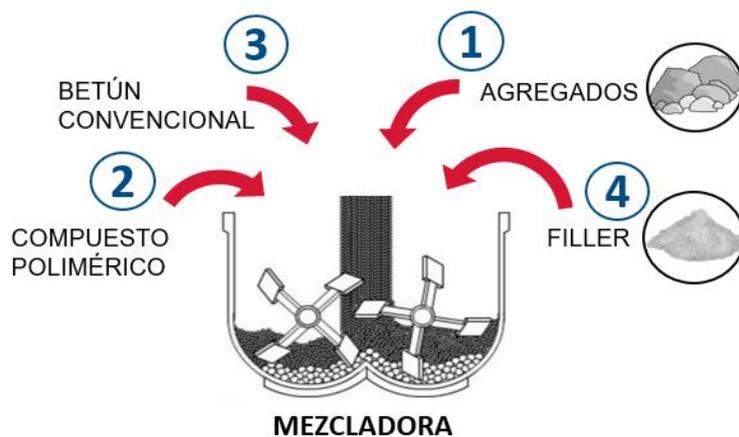


Figura 2. Esquema de entrada de materiales

En comparación con la tecnología PMB, como se muestra en la Figura 3., el sistema operativo a nivel de gestión de materias primas y de modificación es más ágil y ventajoso en términos de energía y manejo del proceso.

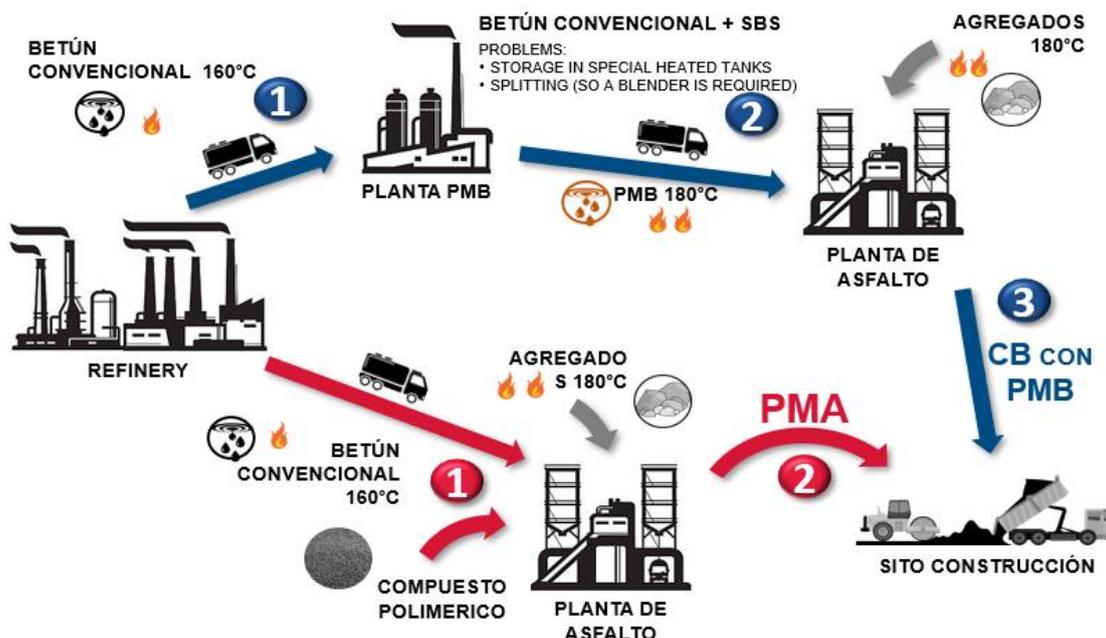


Figura 3. Comparación de tecnología PMA y PMB

4 Descripción de los casos de estudio

Se tratan de dos estudios de casos diferentes. El objetivo para ambos casos es identificar el comportamiento de los materiales en diferentes condiciones de prueba.

Caso Estudio 1 (Estudio Definitivo del Saldo de Obra: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Lima - Canta - La Viuda- Unish, Tramo Canta - Huayllay -Perú): el primer estudio, como se muestra en la Figura 4., se basa en una comparación entre dos tecnologías diferentes; el tradicional y el modificado con tecnología PMA. Las mezclas se hicieron en la planta después de una precalificación de Marshall. En ambos casos, el betún convencional se clasifica como PEN 85-100 y la modificación se realizó en planta con el uso de un polímero plastomérico dosificado al 5% sobre el peso del betún. Los ensayos realizados para la clasificación del Conglomerado Bituminoso a través de pruebas dinámicas estándar: módulo de rigidez, fatiga y ahuellamiento. Estas pruebas nos permiten investigar el comportamiento del conglomerado bituminoso a temperaturas altas, intermedias y bajas.

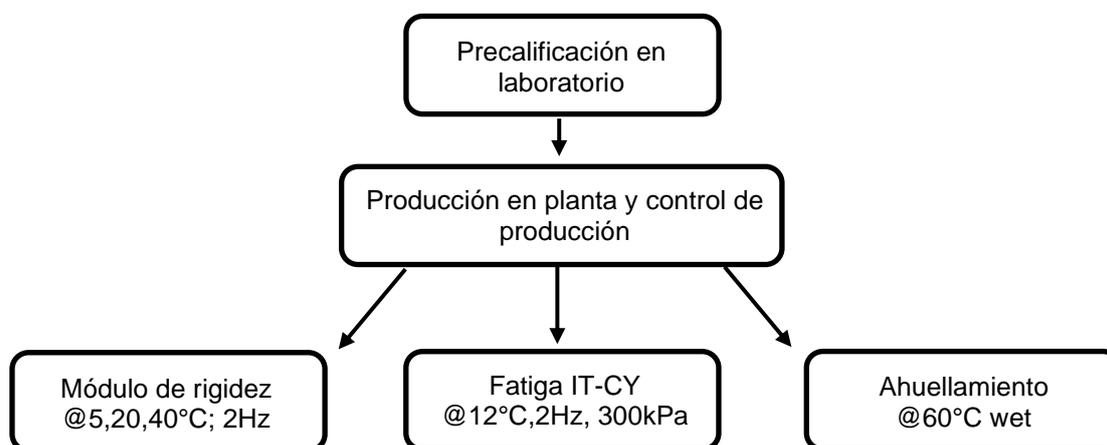


Figura 4. Diagrama de las pruebas en laboratorio – Caso Estudio 1

Caso Estudio 2: el segundo caso de estudio, como se muestra en la Figura 5., se basa en una comparación entre dos tecnologías diferentes, la modificada con tecnología PMB más una fibra y la modificada con la tecnología PMA más una fibra; las mezclas se hicieron en el laboratorio después de una precalificación con metodología Marshall y Superpave. El tipo de fibra que se agregó a la mezcla fue una composición de materiales de diferente naturaleza: celulosa y vidrio. La prueba que se llevó a cabo sobre estas mezclas se denomina TSRST y permite determinar la temperatura que determina el inicio de la formación de una grieta antes de la rotura. A través de estos ensayos es posible constatar cómo el comportamiento de la tecnología PMA con respecto a la otra tecnología es comparable y en consecuencia el comportamiento del polímero plastomérico a bajas temperaturas es comparable o mejor según la dosificación utilizada.

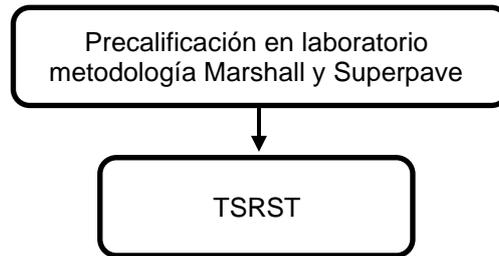


Figura 5. Diagrama de las pruebas en laboratorio – Caso Estudio 2

5 Prueba de módulo de rigidez - Caso estudio 1 (ITCY- EN 12697-26C)

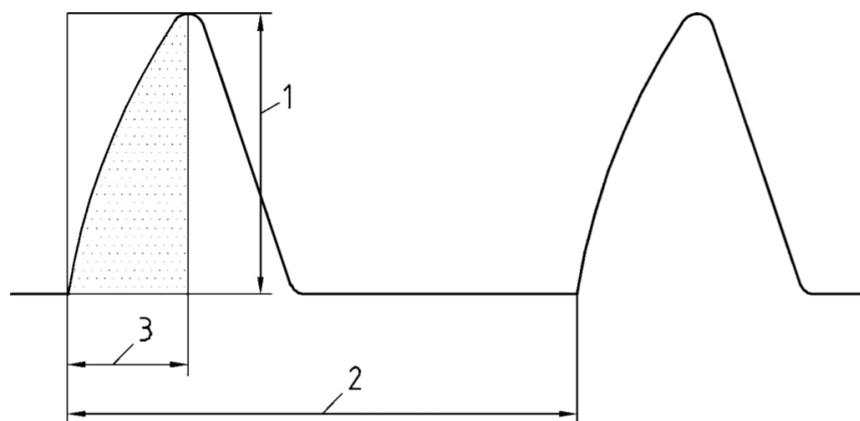
El dimensionamiento de los pavimentos de carreteras se realiza mediante el uso del módulo resiliente o el módulo de rigidez.

En Europa, el parámetro descriptivo utilizado para definir el comportamiento del material y para el posterior dimensionamiento del pavimento es el módulo de rigidez (EN 12697-26C). La rigidez del conglomerado está influenciada por diversos factores, algunos internos, como agregados, betún y características volumétricas, y otros externos, como cargas de tráfico y temperatura. Por este motivo, se realizaron pruebas de comparación entre las dos tecnologías: Conglomerado Bituminoso convencional y Conglomerado Bituminoso modificado con la tecnología PMA.

La prueba se realiza en régimen oscilatorio, las pruebas consisten en la aplicación de un esfuerzo o una deformación que varía en el tiempo según una ley armónica y con una determinada frecuencia (Figura 6.).

Los parámetros que se utilizan e imponen para las pruebas que se han realizado son:

- Rise time (periodo de carga): 124ms
- Relación de Poisson: 0,35: 0,35
- Temperatura: 5,20,40°C
- Desplazamiento: 5 μ strain



Key

- 1 Peak load
- 2 Pulse repetition period
- 3 Rise-time

Figura 6. Régimen impulsivo (izquierda) y régimen oscilatorio (derecha) – extracto de la normativa EN 12697-26

Las probetas se realizaron mediante compactación impulsiva (método Marshall) 75 golpes por cara, a una temperatura de 150°C y una repetibilidad de 3 muestras por cada mezcla. Como se informó anteriormente, la comparación se realizó en mezclas producidas en la planta con betún clasificado PEN 85-100.

Las pruebas muestran un aumento en el número de ciclos de la mezcla C (PMA), en comparación con la mezcla D (Convencional). Este último muestra un número de ciclos de fatiga de aproximadamente la mitad en comparación con la mezcla modificada. La Tabla 1 muestra los valores para cada muestra analizada y los valores medios.

En particular, se puede observar cómo el uso de la tecnología PMA en comparación con la mezcla tradicional permite aumentar el módulo de rigidez a diferentes temperaturas con particular ventaja a altas temperaturas donde el aumento es más significativo llegando hasta el 40%.

Tabla 1. Módulos de Rigidez

Parámetros	Unidad	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Densidad aparente	kg/mc	2314	2309	2319	2318	2312	2324
Vacíos	%	5,5	5,8	5,3	5,4	5,6	5,1
Vacíos valor promedio	%	5,5			5,4		
Rigidez @2Hz;5°C	MPa	9021,0	8195,0	8721,0	8304,0	7984,0	8205,0
Rigidez Valor promedio @2Hz;5°C	MPa	8646			8164		
Rigidez @2Hz;25°C	MPa	2042,0	2043,0	2056,0	1689,0	1837,0	1683,0
Rigidez Valor promedio @2Hz;25°C	MPa	2047			1736		
Rigidez @2Hz;40°C	MPa	745,7	772,4	764,4	557,7	643,4	580,6
Rigidez Valor promedio @2Hz;40°C	MPa	761			594		

Como se muestra en la Figura 7. en el gráfico debajo, además de poder apreciar un aumento en el rendimiento mecánico, se puede ver como la variación del resultado es baja y por lo tanto se tiene una homogeneidad de la propia producción con ambas tecnologías.

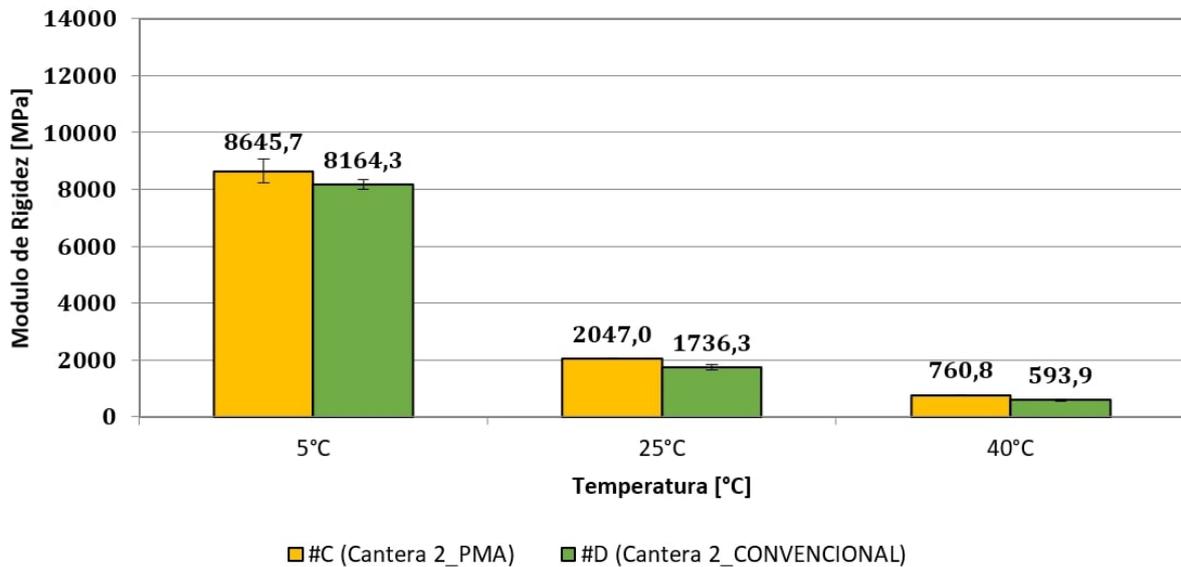


Figura 7. Comparación de las prestaciones mecánicas con la tecnología PMA vs la tecnología convencional

6 Prueba de fatiga - Caso de estudio 1 (ITCY- EN 12697-24C)

Los ensayos de fatiga se realizaron según la norma En 12697-24C en configuración de tracción indirecta.

El método de compactación de las muestras mediante el método impulsivo ha definido un porcentaje de los vacíos en las dos mezclas de aproximadamente el 3% y, en consecuencia, los resultados se pueden comparar entre los dos tipos de mezclas.

La prueba se realizó bajo control de carga y las condiciones de prueba que se utilizaron son:

- Temperatura: 12°C
- Forma de la carga: Haversine
- Amplitud de la carga: 300 kPa
- Rise time: 124ms
- Condición final de la prueba: La rigidez se redujo al 50% del valor inicial

La temperatura de prueba normalmente utilizada es de alrededor 20°C, en este caso específico, dadas las condiciones del área de aplicación, se eligió la temperatura promedio del año que es de 12 ° C.

El tipo de ensayo elegido, configuración de tracción indirecta, permite mostrar el comportamiento del material bajo carga constante simulando lo que ocurre in situ o en el diseño donde la carga es constante y las deformaciones que siguen a los ciclos de carga y descarga varían. Como se informa en el documento [2], el comportamiento a la fatiga está influenciado por la naturaleza del propio material y los materiales con baja rigidez se desempeñan bien en el control de la deformación mientras que los materiales con alta rigidez se desempeñan mejor en el control de la carga.

Las probetas se realizaron mediante compactación impulsiva (método Marshall) 75 golpes por cara, a una temperatura de 150 ° C y una repetibilidad de 3 muestras por cada mezcla. Como se informó anteriormente, la comparación se realizó en mezclas producidas en la planta con betún clasificado PEN 85-100.

Las pruebas muestran un aumento en el número de ciclos de la mezcla C (PMA), en comparación con la mezcla D (Convencional). Este último muestra un número de ciclos de fatiga de aproximadamente la mitad en comparación con la mezcla modificada. La Tabla 2 muestra los valores de cada muestra analizada y los valores medios.

Tabla 2. Resistencia a Fatiga

Parámetros	Unidad	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Densidad aparente	kg/mc	2314	2309	2319	2318	2312	2324
Vacíos	%	5,5	5,8	5,3	5,4	5,6	5,1
Vacíos valor promedio	%	5,5			5,4		
Ciclos a rotura	-	2925,0	3177,0	3728,0	1524,0	1468,0	2061,0
Ciclos a rotura Valor promedio	-	3277			1684		

En particular, se puede observar cómo el uso de la tecnología PMA en comparación con la mezcla tradicional permite aumentar la vida a fatiga hasta en un 100%.

7 Prueba de Ahuellamiento- Caso de estudio 1 (AASHTO T324-14)

Las pruebas de ahuellamiento se realizaron de acuerdo con la norma AASHTO T324-14. Las muestras se compactaron mediante una prensa giratoria a una altura establecida de 60 mm y un porcentaje de huecos entre el 6-8%.

Las características geométricas de las muestras se pueden ver en la siguiente tabla, que muestra cómo los vacíos cumplen con las especificaciones (Tabla 3.).

Tabla 3. Parámetros de densidad y vacíos de las mezclas por rueda de Hamburgo

ID	Hm mm	Dm mm	M1 kg	M2 kg	M3 kg	Gmb kg/mc	Gmm kg/mc	Vacios %	Gmm kg/mc	Vacios %
C1	60,0	150	2301	1311	2312	2305	2450	5,9%	2305	5,9%
C2	60,0	150	2300	1308	2309	2304	2450	5,9%		
D1	60,0	150	2295	1300	2300	2299	2450	6,2%	2299	6,2%
D1	60,0	150	2295	1300	2300	2299	2450	6,2%		

Las curvas de ahuellamiento muestran cómo la mezcla C (PMA) tiene una marca final a 20.000 ciclos de menos de 4 mm (Figura 8.).

Por otro lado, la mezcla D (Convencional) tiene una marca final a 20.000 ciclos mayor a 4 mm y se identifica un problema de adherencia (Figura 9.).

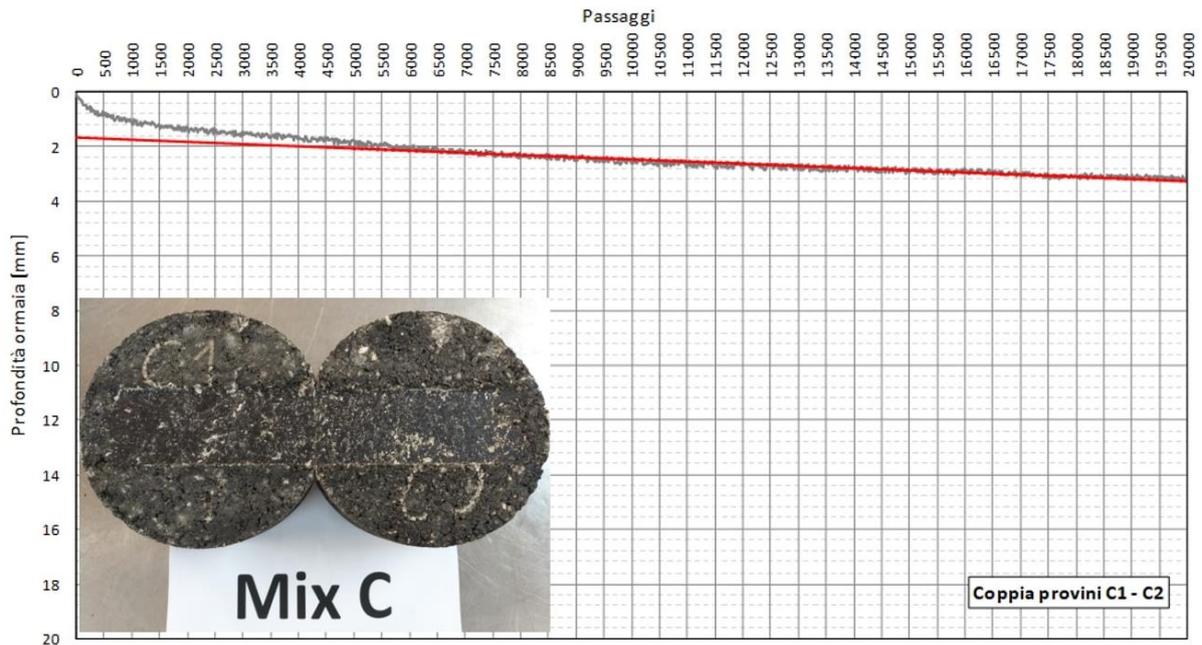


Figura 8. Resultados de rueda de Hamburgo por la mezcla PMA - Mezcla C – Extracto del informe oficial.

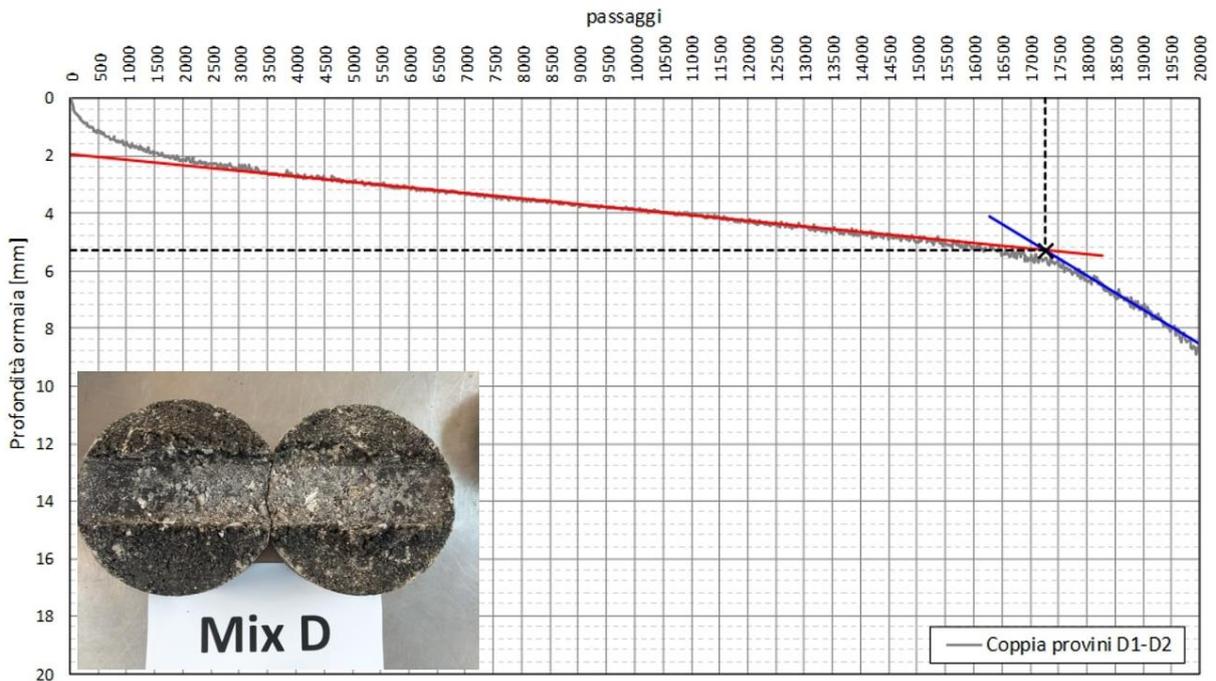


Figura 9. Resultados de rueda de Hamburgo por la mezcla Convencional - Mezcla D – Extracto del informe oficial

En particular, se puede observar cómo el uso de la tecnología PMA en comparación con la mezcla tradicional permite reducir el fenómeno de la formación de surcos, sin la presencia de una inflexión causada por un problema de adherencia.

8 Prueba de Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) - Caso de estudio 2 (EN 12697-46)

En varios artículos hay informaciones sobre los parámetros que pueden influir el resultado final de esta prueba, como la geometría, los materiales, los aditivos que se utilizan y la velocidad de enfriamiento. De hecho, algunas informaciones sobre el comportamiento son:

- No hay mucha diferencia en el comportamiento de una mezcla de tipo SMA y una mezcla densa convencional [3];
- La rigidez del betón a las bajas temperaturas tiene mucha importancia en el comportamiento de la mezcla a las bajas temperaturas [4] y la dosificación de los aditivos influyen el comportamiento;
- Por otro lado, la presencia de la fibra en la mezcla no cambia el comportamiento de la mezcla a las bajas temperatura [5];

Entonces el comportamiento en una mezcla SMA con fibra está relacionado al betón y a los aditivos modificadores que se utilizan en la mezcla.

El tipo de prueba TSRST es muy común en los laboratorios donde se quiere verificar el comportamiento a las bajas temperaturas, la velocidad con la que se bajó la temperatura es de 10°C/h. La modalidad de prueba se basa en tener fijas las partes extremas y en esta manera el espécimen es sometido a un esfuerzo de tracción (criogénico). La grieta o fisura se presenta a la temperatura de falla de la prueba (T_{crack}) como se muestra en la Figura se puede mirar el comportamiento del esfuerzo al bajar de la temperatura. El tamaño del espécimen de prueba es 5x5x25 cm, como se puede ver en la Figura 10. [6].

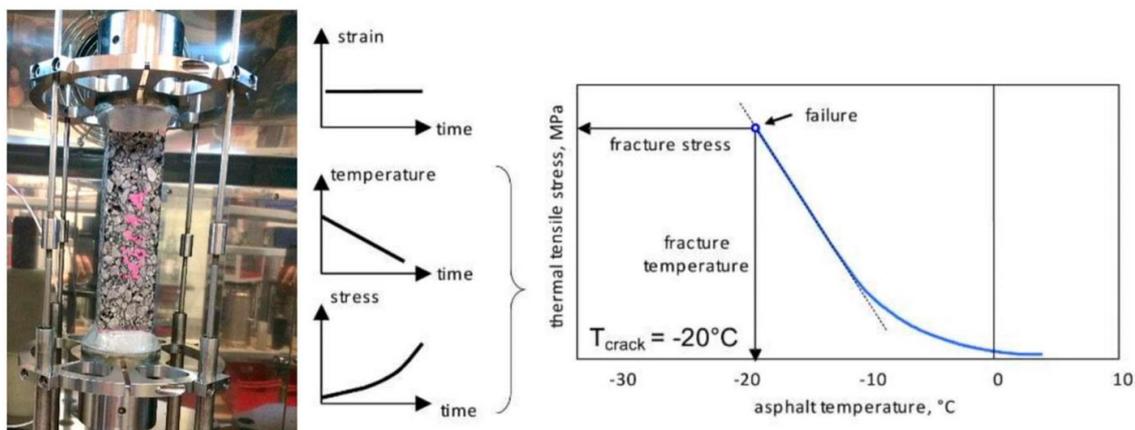


Figura 10. Variación del esfuerzo en relación a la variación de la temperatura – Extracto de la bibliografía [7]

Los ensayos se realizaron sobre a una mezcla densa para una carpeta de rodadura (SMA), cuya curva granulométrica es conforme a los límites, como en la Tabla 4 y como en la Figura 11.

Tabla 4. Gradación granulométrica para carpeta de rodadura tipo SMA [6]

Parámetros	Distribution granulometrica							
Tamiz	12	10	8	4	2	1	0,5	0,063
Limites	100/100	81/100	60/80	30/52	22/34	16/26	11/21	8/14

La comparación entre la tecnología PMB y PMA se analizó para conglomerados bituminosos con contenido óptimo de betún en la mezcla del 5,8% y con una dosificación de la fibra del 0,3% sobre el peso de los agregados.

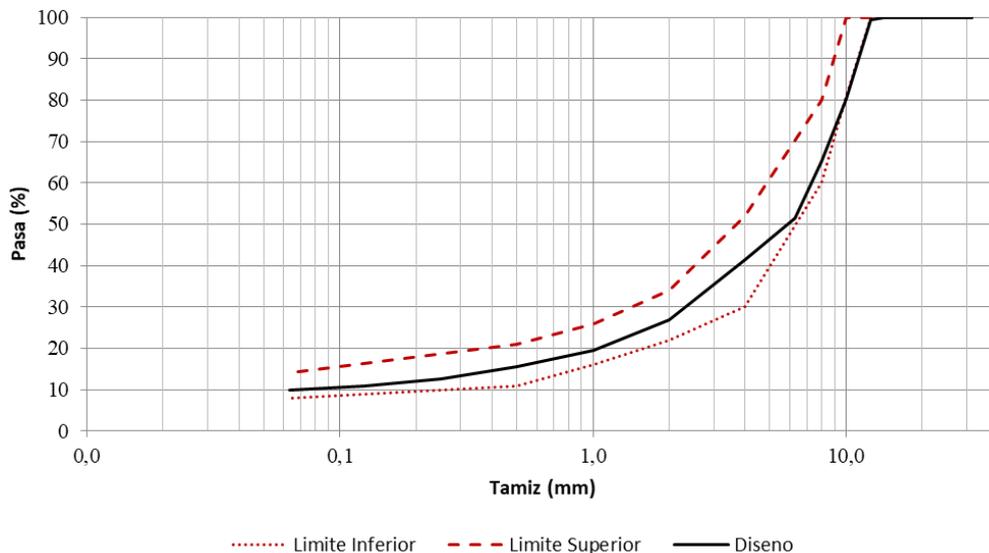


Figura 11. Curva granulométrica [6]

Los betunes utilizados son:

- La mezcla con tecnología PMB se realizó utilizando un betún indicado como 10/40-70 (Betún Modificado con Polímero SBS), el cual se caracteriza, en relación a la especificación EN 12591, por una penetración entre 10-40dmm, un punto de ablandamiento mayor de 70°C y una viscosidad dinámica a 160°C mayor de 0,4 Pa*s;
- La mezcla con la tecnología PMA se realizó utilizando un betún convencional indicado como 50/70, el cual se caracteriza con la especificación EN 14023, con una penetración de 50-70 dmm, un punto de ablandamiento de 46-54°C y una viscosidad dinámica a 60°C mayor de 160 Pa*s;

Las pruebas realizadas a la mezcla, arrojaron los resultados que se muestran en la Figura 12.

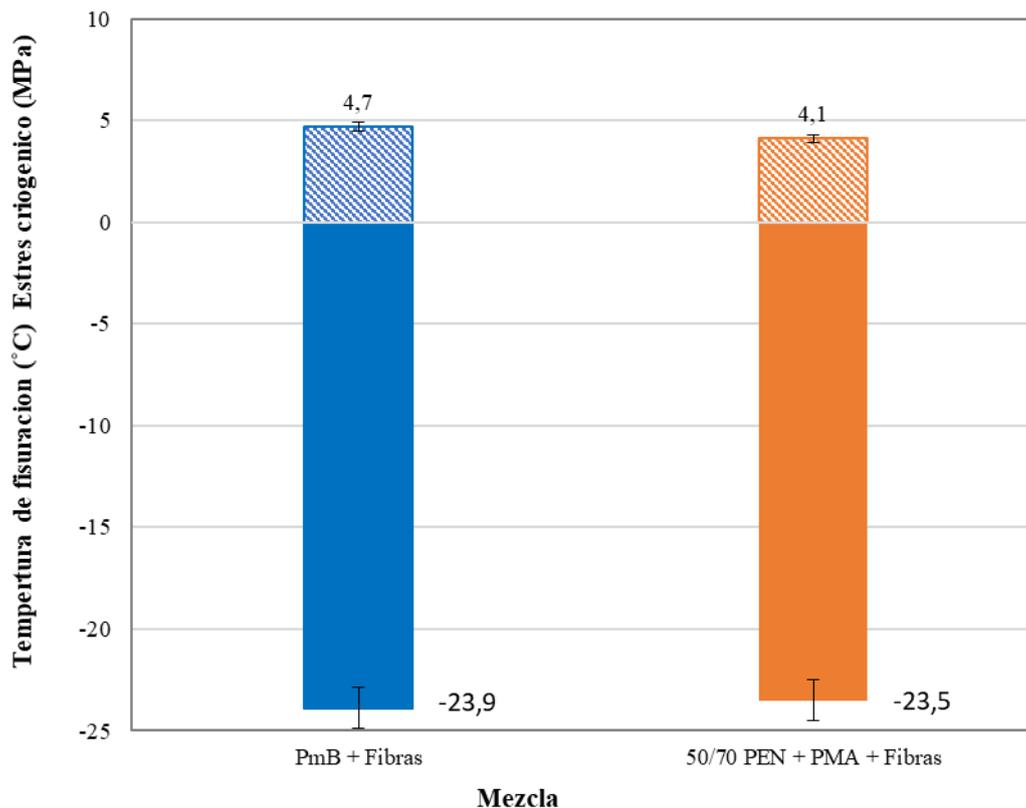


Figura 12. Comparación de los resultados de mezcla PMB y PMA a bajas temperaturas-TSRST. Reproducido de [6]

Los resultados muestran la temperatura de falla al agrietamiento, el parámetro de esfuerzo criogénico y la repetibilidad de los resultados es de 3. Gracias a esta prueba se puede verificar como no hay diferencias entre las dos tecnologías, porque la diferencia es menor de 3,5%.

9 Conclusiones

Las mezclas producidas con la tecnología PMA frente a la tecnología convencional o PMB permiten incrementar las prestaciones técnicas permitiendo una optimización del dimensionamiento del pavimento o una ventaja en cuanto a vida útil. Al mismo tiempo es posible contar con una tecnología que ofrece ventajas logísticas:

- con el uso de la tecnología PMA no es necesario el almacenamiento del PMB en las plantas de producción de asfalto, en algunos casos si se evitan las altas inversiones que representan los tanques de almacenamiento para varios betunes;
- los costos energéticos elevados para el almacenamiento en caliente de bitumen modificado se evitan o se reducen significativamente;
- la producción de la mezcla asfáltica modificada (PMA) es muy flexible: puede llevarse a cabo en cualquier momento dado al grado de modificación requerido. esto permite al productor de asfalto organizar materias primas de la manera más eficiente posible;

En particular, se puede notar que se aplica a una carpeta de rodadura (Caso 1) o se aplica a una capa intermedia (o Binder) y las ventajas obtenidas son:

- altas propiedades mecánicas como: módulo de rigidez con un aumento de hasta el 40%;
 - alta resistencia al ahuellamiento y a la deformación a temperaturas elevadas del pavimento, con una reducción del ahuellamiento de hasta el 50%;
 - aumento de la resistencia al agrietamiento a la fatiga y a la fisuración, con un incremento de la vida útil a fatiga más del 80%;
 - durabilidad en condiciones climáticas extremas, especialmente en ambientes con altas temperaturas;
 - Aumento de la resistencia a la fisuración y a la propagación de las fisuras;
 - El mismo comportamiento a las bajas temperatura con una temperatura de inicio fisuración iguales para las dos tecnologías;
- En consecuencia, la tecnología PMA, gracias a las ventajas técnicas encontradas a nivel de laboratorio y a escala real, aporta diversas ventajas y es posible aplicarlas en los siguientes tipos de pavimentos viales:
- Capas asfálticas de alto módulo (HiMA);
 - Carpetas de rodadura resistentes al ahuellamiento y a las grietas para pavimentos duraderos de bajo mantenimiento.

10 Bibliografía

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide, "Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)", 2008.
- [2] Rao Tangella, J. Craus, J.A. Deacon, C.L. Monismith, SHRP, "Summery report on fatigue of Asphalt Mixtures", 1990.
- [3] Isacson, U. and Zeng, "Low temperature cracking of polymer modified asphalt", Materials and structures Vol.31, 2018.
- [4] Kallas, B.F., "Loew temperature mechanical properties of asphalt concrete", Asphalt Institute, Research report 82-31982.
- [5] Stuart, K.D. and Malmquist, "Evaluation of using different stabilizers in the U.S. route 15 (Maryland) stone matrix asphalt", Transportation Research Record, no.1454, National Research Council, Washington, 1994.
- [6] Shahin Eskandarsefat, Bernhard Hofko, Cesare Sangiorgi, "A comparison study on low-temperature properties of Stone Mastic Asphalts modified with PMBs or modified Fibres", 2018.
- [7] Blab, Eberhardsteiner, "Methoden der Strukturoptimierung flexibler Strabenbefestigungen", 2009.