



MEZCLA ASFÁLTICA SMA COMO CAPA DE RODADURA EN AUTÓDROMO, UN CASO DE ÉXITO

Rey Omar Adame Hernández ¹, Hugo Ernesto Lara López ², Yosimar Báez Valenzuela ³, Juan Luis Patiño Flores ⁴, Israel Sandoval Navarro ⁵, Carmelo Enrique Villa Huerta ⁶, José Antonio Trujano Ramírez ⁷, Cristóbal Said Silva Robles ⁸.

¹ Zapopan, México, omar.adame.hdez85@gmail.com

² HERMES, Ciudad de México, México, hlara@grupohi.mx

³ HERMES, Ciudad de México, México, ybaez@grupohi.mx

⁴ HERMES, Ciudad de México, México, jlpentino@grupohi.mx

⁵ Grupo Súrfax®, Guadalajara, México, israe@surfex.com.mx

⁶ Lasfalto, Guadalajara, México, evilla@lasfalto.com.mx

⁷ Grupo Trujano, Toluca, México, jtrujanor@gpotru.com

⁸ Grupo Trujano, Toluca, México, csilva@gpotru.com

Resumen

En enero del 2023, en el estado de México se repavimentó un autódromo colocando como capa de rodadura una mezcla asfáltica “SMA”, esta seleccionada por las condiciones de confort y seguridad que esta ofrece como capa superficial, la SMA es una mezcla utilizada comúnmente en autódromos de carreras para premios de Formula 1. Para este proyecto previamente se analizaron y seleccionaron bancos de materiales pétreos que cumplieran con los requerimientos de este tipo de mezcla, además de un asfalto que pudiese soportar y desempeñarse correctamente con los neumáticos utilizados por los vehículos que circulan en este tipo de pistas.

Debido a las condiciones climáticas en la zona, altura y temperaturas bajas. El diseño de la mezcla asfáltica se protegió con el uso de un aditivo auxiliar de compactación para garantizar la densificación de la mezcla en condiciones de disminución de temperatura por condiciones climáticas (viento y temperatura). Se utilizó a la vez un asfalto modificado que garantizara el buen desempeño y durabilidad de la mezcla. Dentro del diseño se consideraron temperaturas de hasta 140°C como temperatura de compactación, además del uso de fibras de celulosa (utilizadas en este tipo de mezclas) que garantizaran la homogeneidad en el tendido, así como el no escurrimiento en la mezcla.

En el proceso constructivo se hicieron algunas adecuaciones para que la calidad superficial y homogeneidad de la mezcla resultaran en una pista cómoda y segura para los pilotos. Además, se trató de impedir el menor número de juntas longitudinales y transversales en frío con la utilización de hasta tres pavimentadoras trabajando de manera simultánea en la ejecución. Durante la pavimentación se tomaron registros de las temperaturas de trabajo (fabricación, tendido y compactación), características de la mezcla, propiedades volumétricas, porcentaje de compactación con densímetro electromagnético, calidad del asfalto recibido, entre otras medidas que garantizaran la calidad de los materiales utilizadas, así como la ejecución de los trabajos. Finalmente, los resultados fueron satisfactorios para la cómoda práctica y competición en la pista con las mediciones de IRI, macro textura y profundidad de rodadura.

Palabras clave: Autódromo, capa de rodadura, Stone Mastic asphalt (SMA).



1 Introducción

En la construcción de pavimentos flexibles la superficie asfáltica (capa de rodadura), determina las características de la pista o superficie, además de su idoneidad para el uso previsto. Autopistas con uso de mezcla asfáltica inadecuada complican la seguridad y comodidad en los usuarios, mientras que, para un circuito puede hacer imposible que una carrera se desarrolle.

La superficie asfáltica es fundamental para la seguridad de todos los usuarios durante un recorrido, práctica o durante una competencia sobre la pista. Por lo tanto, los estándares rigurosos deben ser aplicados a la producción, colocación y compactación de la mezcla asfáltica para que esta brinde a los pilotos la seguridad máxima durante todo el circuito.

En un gran porcentaje de las pistas de “Formula 1” (máxima competición de automovilismo internacional y campeonato del deporte motor más popular y prestigioso del mundo), la capa superficial es una mezcla asfáltica, principalmente una mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt), por la condiciones de seguridad y confort que estas ofrecen.

La producción y colocación de mezcla asfáltica para autódromos es un proceso sofisticado, el trabajo involucra cuidado en la selección de los materiales (asfalto, agregados, filler), plantas de mezclado en excelentes condiciones, al menos dos pavimentadoras del mismo tipo, un número significativo de compactadores y un laboratorio en el sitio de la obra. La pavimentación simultanea requiere de cuidados y habilidad en la operación y coordinación de la maquinaria para poder pavimentar todo el circuito sin juntas frías (principalmente en la capa superficial). Por último, las tolerancias de producción en autódromos son considerablemente reducidas comparadas con las especificadas para autopistas, para estas los tiempos de traslado de los materiales, la logística de la obra, la calidad de los materiales, el equipo y maquinaria adecuado hacen que el trabajo sea de mucho interés para los involucrados en estos tipos de trabajos.

2 Descripción del proyecto

En el estado de México recientemente se colocó una capa de rodadura para un autódromo, este cuenta con una longitud de 3.6 km y un ancho promedio de 20 m, situado a una altura de más de 2600 msnm, esta capa fue colocada durante el mes de enero con temperaturas registradas en el día de entre 12 y 24°C. Con jornadas nocturnas y temperaturas registradas de entre 0 y 10°C. por lo que en el diseño de la mezcla se consideró el uso de un aditivo auxiliar de compactación, de tal forma que ante el enfriamiento de la mezcla en el tendido la densificación pudiese llevarse a cabo.

Datos generales del proyecto:

- Longitud: 3.6 km
- Ancho: 20-25 m
- Altura sobre el nivel del mar: 2622 m
- Espesor de la capa fresada: 3 cm
- Espesor de la carpeta colocada: 3 cm
- Temperatura media durante el día: 17 °C
- Temperatura media durante la noche: 4°C
- Tiempo de ejecución: 10 días

3 Calidad de los materiales pétreos



La calidad de los materiales pétreos es un punto importante, pues en volumen ocupan valores cercanos al 90%, por lo que un agregado que cumpla con todos los estándares especificados aumenta la probabilidad de éxito en el desempeño y durabilidad de una capa asfáltica. El agregado grueso, además, debe tener forma cubica y estar libre de polvo, arcilla y materia orgánica. Los agregados utilizados para este proyecto cumplen con las propiedades de consenso y origen requeridas por el Protocolo AMAAC de capas de rodadura PA-CR 04/16, recomendaciones utilizadas como especificación para este proyecto.

El agregado cumple con las características necesarias para una mezcla asfáltica con tamaño nominal de 3/8". Como filler de aporte se utilizó un carbonato de calcio, mientras que para el asfalto se utilizó un asfalto modificado 76V- 16 de acuerdo con la clasificación PG y MSCR.

4 Diseño de mezcla asfáltica SMA con auxiliar de compactación

El diseño de la mezcla se realizó cumpliendo con los requisitos y recomendaciones descritos en el PA-CR/16 para una mezcla asfáltica SMA con tamaño nominal de 3/8". Algunos de los puntos importantes del diseño de la mezcla asfáltica se enlistan a continuación:

- Granulometría: 71% sello de 3/8", 23% de arena caliza y 6% de carbonato de calcio
- Fibra de celulosa: 0.35 %
- Contenido de asfalto óptimo respecto a la mezcla: 6.4 %
- Contenido de asfalto óptimo respecto al agregado: 6.8 %
- Vacíos de aire: 4.3 %
- Vacíos en el agregado mineral (VAM): 16,65 %
- Vacíos llenos de asfalto (VFA): 73,97 %
- Profundidad de macrotextura medida en losas de laboratorio: 2,03 mm.
- Estabilidad Marshall: 915 Kg
- Flujo Marshall: 3, 44
- Módulo resiliente (tensión indirecta): 2 600
- Ensayo TSR (%): 91,2
- Ensayo de rueda de Hamburgo (mm): 2,66
- % Ensayo de escurrimiento con 6,8 % de asfalto/pétreo y 0,35% Fibra de celulosa/pétreo y acondicionamiento a 180 °C: 0,027
- C.D.R.: 0,915
- Temperatura de mezclado recomendada en diseño: 177-181 °C
- Temperatura de compactación recomendada en diseño: 170-173 °C

La granulometría que se toma como la de diseño es la que se encuentra dentro de los límites granulométricos y que a su vez haya cumplido con los parámetros volumétricos.

Para este proyecto en específico y como medida para garantizar la compactación se decidió usar un aditivo auxiliar de compactación (mezclas tibias), para garantizar las condiciones de lubricidad en la mezcla y a su vez la densificación pueda efectuarse a temperaturas más bajas (hasta 140°C). Para esto, en laboratorio se realizaron una serie de pruebas a diferentes temperaturas de compactación y manteniendo la temperatura de mezclado, se midieron y se verificaron las propiedades volumétricas, comprobando que no fueran afectadas.

Tabla 1. Volumetría para temperaturas de diseño e inferiores



| Temperatura de mezclado-temperatura de compactación (°C) | Contenido de asfalto/agregado (%) | Densidad máxima teórica (gr/cm ³) | Densidad de la mezcla compactada (gr/cm ³) | Vacíos (%) | VAM (%) | Porcentaje de compactación |
|--|-----------------------------------|---|--|---------------|---------|----------------------------|
| 180-170 | 6,8 | 2,409 | 2,305 | 4,3 | 16,65 | 95,7 |
| 180-170 | 6,8 | 2,409 | 2,297 | 4,6 | 16,91 | 95,4 |
| 180-160 | 6,8 | 2,409 | 2,294 | 4,8 | 17,01 | 95,2 |
| 180-150 | 6,8 | 2,409 | 2,289 | 5,0 | 17,21 | 95,0 |
| 180-140 | 6,8 | 2,409 | 2,293 | 4,8 | 17,07 | 95,2 |
| Especificación | 6,4 mín. | N.A. | N.A. | Cercano a 4 % | 16mín. | 94 – 96 en campo |

En la tabla 1, de acuerdo con los datos; la volumetría no se afecta con la disminución de las temperaturas de compactación y el uso de aditivo auxiliar de compactación, por lo que se podría trabajar sin afectaciones incluso con una temperatura de compactación de 140°C (valores cercanos a 4% de vacíos), garantizando la manejabilidad de la mezcla y el porcentaje de vacíos cercano al de diseño. El no uso del aditivo auxiliar de compactación limita la manejabilidad de la mezcla así como su compactación a las temperaturas recomendadas en caliente (mezclado: 180°C y 170°C para la compactación).

5 Fabricación de la mezcla

Para este proyecto, se usó una planta de producción continua con capacidad de 120 Tn/h ubicada dentro de las instalaciones del autódromo. De acuerdo con el diseño, era necesario dosificar el filler de aporte (carbonato de calcio), con un dosificador a través de una tolva de filler, sin embargo, el dosificador no fue capaz de alimentar esa cantidad de filler, por lo que se tomó la decisión de agregarlo al mezclador (pugmill) a través de una de las tolvas de la planta, garantizando así la cantidad y calidad de finos en la mezcla.

La capacidad de la planta (120 Tn/h) fue una limitante para abastecer las dos pavimentadoras que estaban trabajando simultáneamente en el tramo, para las rectas la demanda de mezcla fue alta por lo que se tomó la decisión de tener un acumulado de al menos 8 camiones para evitar los paros en las pavimentadoras por falta de mezcla asfáltica (condición que afecta en la calidad superficial de la pavimentación dejando pequeñas irregularidades o saltos en el terminado), tomando esta medida se pudo garantizar la continuidad en la pavimentación. Adicional se contó con una tolva de dosificación que alimenta el contenido de fibra de celulosa de acuerdo con la velocidad de producción de la planta.



Figura 1. Planta de producción continua utilizada en el proyecto.

6 Temperatura de fabricación y condiciones del asfalto

En este proyecto se utilizó un asfalto clasificado como PG 76V- 16, modificado con terpolímero RET y ácido poli fosfórico como catalizador. El asfalto cumple con los requerimientos de las normativas.

- N-CMT-4-05-004/18
- ASTM D 6521-22
- ASTM D 2872-22
- ASTM D 7405.20

Para definir las temperaturas de trabajo (mezclado y compactación), de la mezcla con asfalto modificado se usó el método de viscosidad a corte cero, método que determina las temperaturas de trabajo para asfaltos modificados, para este caso las temperaturas de trabajo fueron:

- ✓ Temperatura de mezclado: 177-181 °C.
- ✓ Temperatura de compactación: 170-173 °C.

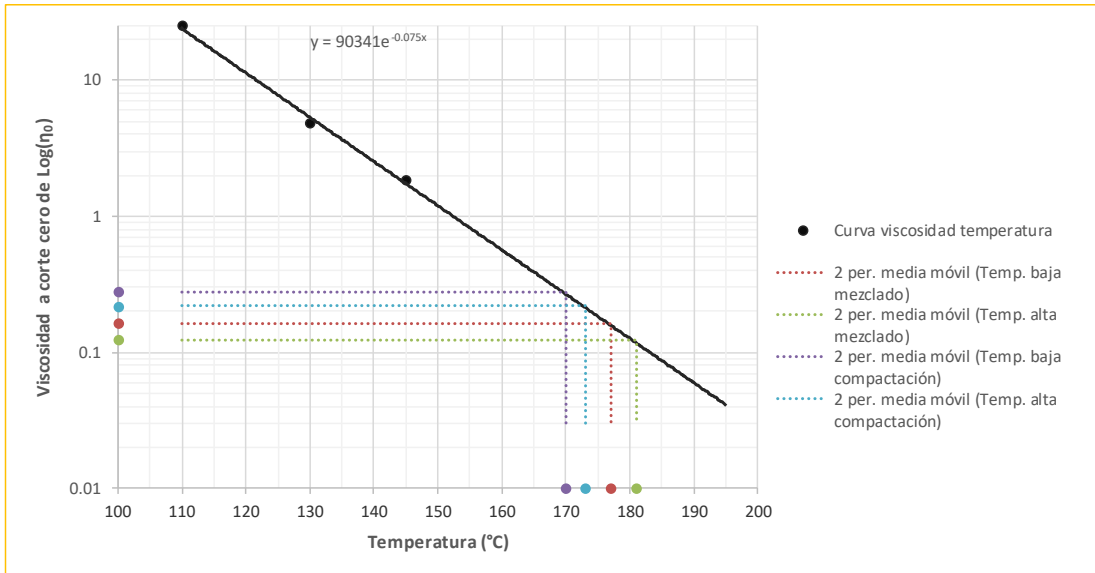


Figura 2. Viscosidad a corte cero vs temperatura.

A continuación, se presentan las temperaturas de mezclado registradas durante una de las jornadas de trabajo. La temperatura promedio está 5°C por encima de lo recomendado en el diseño, esto con el objetivo de que la mezcla llegará con una temperatura más alta y no disminuya demasiado después de pasar por el vehículo de transferencia durante el tendido.

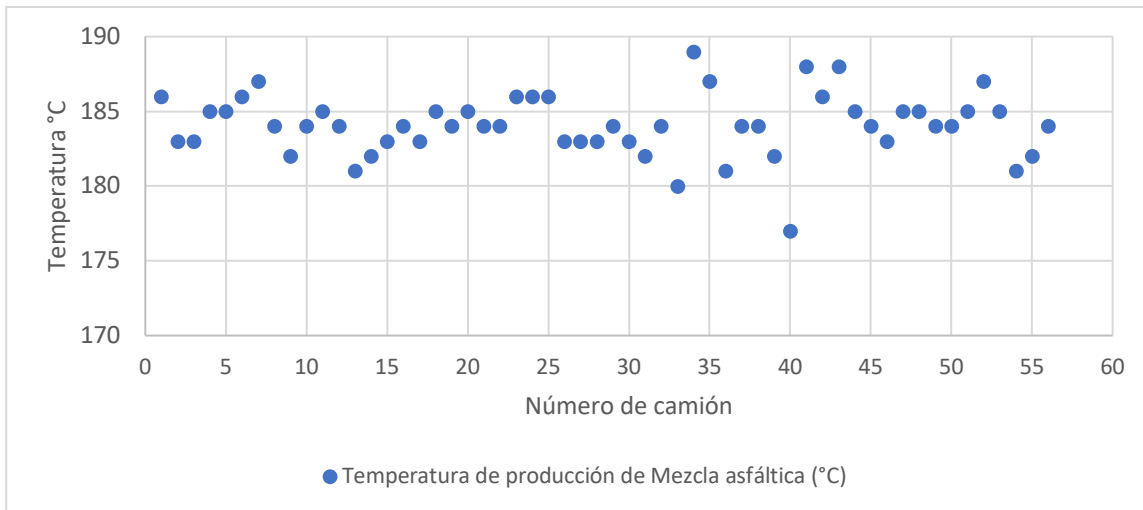


Figura 3. Temperatura de producción registrada en una de las jornadas de trabajo durante la ejecución del proyecto.

7 Transporte, tendido y compactación

Con el objetivo de no tener retrasos y paros continuos en la pavimentación, por parte del contratista se proporcionó un número adecuado de camiones transportadores (de volteo), para transportar la mezcla asfáltica desde la planta de mezclado (ubicado en el autódromo), hasta la pavimentadora. El



uso de vehículos de transferencia también se hizo indispensable para lograr una uniformidad en la colocación de la mezcla asfáltica.

Para fines prácticos, inicialmente se pavimentaron las zonas de detalles en la pista (se entiende por detalles esas zonas como áreas excedentes en los anchos de curvas). Estas zonas demandaron tiempo en la ejecución (hasta 90 minutos por detalle) para finalmente pavimentar la franja central de la pista.

De acuerdo con la experiencia de este proyecto, el uso del Buggy o vehículo de transferencia disminuye la temperatura de la mezcla aproximadamente 20-25°C- en los primeros cuatro camiones, mientras que para los camiones subsecuentes la temperatura baja de entre 15 a 20°C. sin embargo, para esas reducciones de temperatura se cuidó con el uso del aditivo auxiliar de compactación.



Figura 4: Uso de vehículos de transferencia de mezcla asfáltica entre el camión transportador y la pavimentadora.

El proceso de tendido y compactación fue importante debido a que una vez fabricada la mezcla con la formula correcta, de este depende alcanzar las propiedades volumétricas, macro textura y fricción de la mezcla y superficie.



Figura 5. Proceso de compactación, los rodillos trabajando muy cercanos a la pavimentadora. El número de pasadas fue entre dos y tres.

En el proyecto se tuvieron registros de temperatura ambiente en el día de 10 a 22°C sin registrar temperaturas de la mezcla asfáltica que afectaran la operación de los trabajos y desempeño de esta. Durante la noche la temperatura fue de entre los 4 y 10°C. Para esto los camiones fueron cubiertos con lonas térmicas al salir de la planta durante toda la jornada.

En el proceso se utilizaron vehículos de transferencia para homogenizar la mezcla durante el tendido y evitar segregaciones en la superficie. Durante todas las jornadas la mezcla se tendió y compactó por encima de los 140°C.

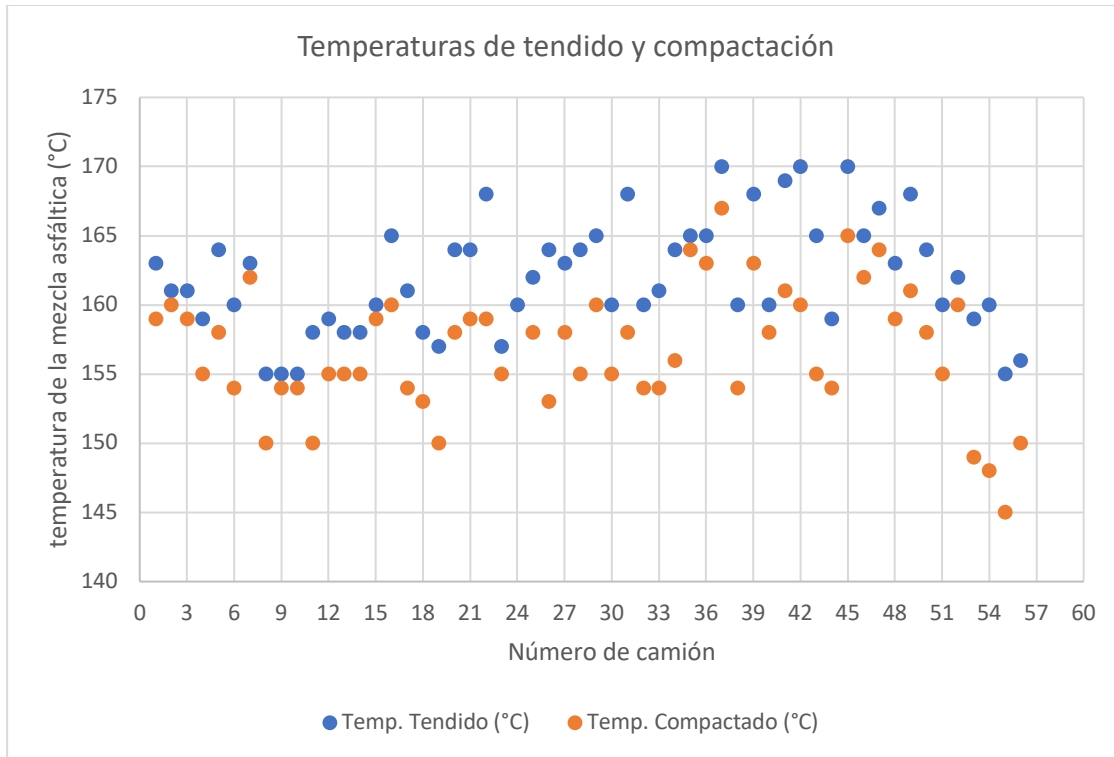


Figura 6. Temperaturas de tendido y compactación vs número de camión registradas en una de las jornadas de pavimentación del autódromo.

8 Control de calidad

Dentro de las actividades del control de calidad se realizaron muestreos previos al inicio de las actividades en el autódromo, tales como:

- ✓ Caracterización del agregado pétreo (muestreo en el banco y en el autódromo).
- ✓ Caracterización del asfalto (muestra enviada por cliente y en tanques en la obra).
- ✓ Verificación del diseño (laboratorio central).
- ✓ Pruebas de desempeño.
- ✓ Macro textura y coeficiente de resistencia al deslizamiento con péndulo inglés.

Después de esto se autorizó la ejecución del tramo de prueba y posteriormente la ejecución de los trabajos.

Una vez comenzados los trabajos en obra se controlaron:

- ✓ Pruebas básicas al asfalto: recuperación elástica por torsión, punto de reblandecimiento y flash point.
- ✓ Pruebas básicas de caracterización del agregado pétreo
- ✓ Pruebas de caracterización de la emulsión (riego de liga)
- ✓ Pruebas a la mezcla asfáltica: contenido de asfalto, granulometría, % vacíos, gmm, gmb, VAM, VFA y presencia de fibra.
- ✓ Reporte de grado de compactación con densímetro electromagnético.
- ✓ Reporte de temperaturas de mezclado, tendido y compactación.



Los resultados de la producción, tendido y compactación de la mezcla fueron en su mayoría ejecutados de manera correcta y con las cantidades recomendadas en el diseño. los incumplimientos fueron notificados al contratista en su momento para su corrección.

Mientras que en laboratorio central se verificaron las siguientes características:

- ✓ Contenido de asfalto, granulometría,
- ✓ Pruebas de desempeño a la mezcla asfáltica, rueda de Hamburgo, TSR, módulo resiliente por tensión indirecta a 20°C. 1 Hz.
- ✓ Caracterización de asfalto grado PG
- ✓ Caracterización completa a la emulsión

9 Pruebas de densímetro electromagnético (determinación del porcentaje de compactación)

Para el control de la compactación se realizaron pruebas a cada 30 metros sobre el ancho del autódromo intercalando en tres franjas (izquierda, centro y derecha), las lecturas se realizaron después de que la temperatura de la superficie de la mezcla estuviese por debajo de los 60°C. El cálculo del porcentaje de compactación se realizó actualizando el valor de la densidad máxima teórica de la mezcla producida por día.

Tabla 2. Porcentajes de compactación y vacíos para algunas de las jornadas de pavimentación.

| Lote de producción | Gmm de referencia (Ton/m ³) | Porcentaje de compactación (%) | Porcentaje de vacíos (%) |
|--------------------|--|--------------------------------|--------------------------|
| Día 1 | 2.366 | 95.7 | 4.3 |
| Día 2 | 2.432 | 95.8 | 4.2 |
| Día 3 | 2.387 | 97.0 | 3.0 |
| Día 4 | 2.405 | 95.9 | 4.1 |
| Día 5 | 2.425 | 96.5 | 3.5 |

De acuerdo con la tabla 2 el porcentaje de compactación estuvo dentro de lo planeado (porcentaje de vacíos cercano a 4%).

10 Pruebas de mancha de arena y péndulo

La prueba de Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (CRD) realizada con el péndulo inglés valora las características antideslizantes de la superficie del pavimento.

Para el caso de la macro textura se realizó la prueba de mancha de arena para determinar su espesor (profundidad).

Para estas dos propiedades en laboratorio se realizaron pruebas a lozas fabricadas con la fórmula de trabajo compactadas en laboratorio.

Tabla 3. Resultados de péndulo inglés de lozas fabricadas y compactadas en laboratorio.

| Ensayo | Resultado | Especificación | Observaciones | Método de prueba |
|-----------------|-----------|----------------|--------------------------|------------------|
| Péndulo inglés | 0.915 | 0.65 mín. | Dentro de especificación | ASTM E 274 |
| Mancha de arena | 2.033 | 0.70 mín. | Dentro de especificación | ASTM E 965 |

11 IRI, Rodera y Macro Textura

Una vez terminada la ejecución de los trabajos de pavimentación a la semana siguiente se realizaron pruebas a la superficie con equipos de alto rendimiento, esto con el objeto de evaluar las condiciones superficiales y que en términos de seguridad se pueda garantizar a los conductores/pilotos un recorrido cómodo y seguro en el autódromo.

Tabla 4. Promedio de mediciones de IRI, Rodera Y macro textura a cada 1000 metros.

| Del km | Al km | IRI promedio (m/km) | Rodera promedio (mm) | Macro textura promedio |
|--------|-------|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 0+000 | 1+000 | 2.00 | 4.00 | 1.22 |
| 1+000 | 2+000 | 1.99 | 3.98 | 1.18 |
| 2+000 | 3+000 | 1.99 | 4.19 | 1.26 |
| 3+000 | 3+500 | 1.91 | 4.53 | 1.39 |

Para el caso del IRI se considera un IRI “bueno” para valores de medición menores a 2.5 m/km, profundidad de rodadura de buena de 2 a 6 mm mientras que la macro textura se consideran valores “buenos” los mayores o iguales a 0.75. de acuerdo con los datos de las mediciones el autódromo cuenta con parámetros buenos para su uso.



Figura 7. Macro textura y calidad superficial del SMA TN 3/8” colocado en autódromo.

12 Bibliografía

<https://tilke.de/en/projects/>

https://www.consultanthart.com/www/seiten_en/referenzen/referenzen.php

[1] PA-CR-04/2015 *Protocolo, Diseño, fabricación y colocación de las diferentes capas de rodadura en caliente.* (AMAAC, 2008).