



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS (WMA) VERSUS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (HMA)

Leonardo Ochoa ¹, Raymundo Benítez ², Daniela Bocanegra ³, Álvaro Gutiérrez ⁴

¹ Quimi-Kao S.A de C.V., El Salto, México, lochoa@kao.com

² Quimi-Kao S.A de C.V., El Salto, México, rbenitez@kao.com

³ Quimi-Kao S.A de C.V., El Salto, México, dbocanegra@kao.com

⁴ Quimi-Kao S.A de C.V., El Salto, México, agutierrez@kao.com

RESUMEN: las mezclas asfálticas en caliente (HMA) requieren de elevadas temperaturas durante su proceso de fabricación y compactación (150°-180°C), lo cual contribuye en un importante consumo de combustible y energía que se traduce en mayores emisiones contaminantes al medio ambiente. Para mitigar lo anterior, las tendencias globales de investigación en materia de asfaltos apuntan hacia la reducción de temperaturas de trabajo utilizando tecnologías de mezcla tibia (WMA). En este estudio se comparó el desempeño de mezclas asfálticas en caliente fabricadas con asfaltos PG 64-16, PG 70-16 y PG 76-16 típicamente utilizados en nuestro país versus mezclas asfálticas tibias fabricadas con los mismos asfaltos anteriores, pero en cuya composición se les añadió un paquete de aditivos químicos y orgánicos modificando sus propiedades reológicas y de visco-lubricidad para reducir las temperaturas de trabajo hasta en 40°C. Para obtener los indicadores de comparación en términos de resistencia y durabilidad se efectuaron pruebas de daño por humedad (TSR), susceptibilidad a la deformación permanente en compresión axial cíclica (CAC), pérdida de cohesión (Cántabro) y ensayos de energía de fractura en viga semi circular (I-FIT) y tensión indirecta por compresión diametral (IDEAL-CT). Los especímenes de desempeño de ambas tecnologías fueron fabricados con los mismos agregados pétreos, granulometría, contenido de asfalto y volumen de vacíos de aire variando únicamente el ligante asfáltico y las temperaturas de trabajo utilizadas. En general, los resultados demuestran que las mezclas tibias poseen 25-40% más resistencia ante el agrietamiento en comparación con las mezclas en caliente. También, se encontró en todos los casos una alta resistencia conservada al daño por humedad (>80%). Así mismo, se determinó que el potencial de desprendimiento de partículas en las mezclas tibias es de 2 a 3 veces menor comparado con su versión en caliente. Finalmente, los resultados demuestran comportamientos equivalentes entre ambas tecnologías ante el flujo plástico.

PALABRAS CLAVE: modificadores reológicos, mezcla tibia, desempeño, durabilidad.

1.- INTRODUCCIÓN: Las mezclas asfálticas en caliente (HMA por sus siglas en inglés) son el material de construcción más utilizado en nuestro país para la conformación de capas estructurales y de rodadura en pavimentos flexibles. Sin embargo, las elevadas temperaturas de trabajo de las mezclas asfálticas en caliente habitualmente en el rango de los 150-180°C demandan enormes consumos de energía y combustible al mismo tiempo que liberan al medioambiente grandes cantidades de emisiones contaminantes durante su producción. Para mitigar la problemática anterior, desde hace algunos años el sector carretero y la industria del asfalto han buscado desde una perspectiva económica, ambiental y de durabilidad la implementación de nuevas tecnologías en proyectos de pavimentación siendo una de ellas las mezclas asfálticas tibias (WMA por sus siglas en inglés). En este contexto, las mezclas tibias son aquellas que se producen, tienden y compactan en el rango de los 100-140°C, lo cual se logra a partir de utilizar algún tipo de tecnología que altere las propiedades del cemento asfáltico ya sea de manera temporal o permanente ^[1]. De acuerdo con la Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos (EAPA) las técnicas más comúnmente utilizadas para producir mezclas asfálticas tibias son aditivos orgánicos (modificadores reológicos), aditivos químicos



(modificadores de tensión superficial) y mediante el proceso de espumado^[2]. Hoy en día, a nivel internacional se reconocen numerosos beneficios asociados con la utilización de mezclas asfálticas tibias entre los que destacan^[3,4,5]:

- Reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante su fabricación en planta. En este sentido, prevalecen ahorros económicos asociados con el menor consumo en la quema de combustibles y desgaste de los componentes de la planta por impacto térmico.
- También, se generan condiciones de tendido y compactación más amigables para el trabajador al reducir la inhalación de humo y exposición ante vapores.
- Adicionalmente, disminuir las temperaturas de trabajo contribuye enormemente en mitigar la degradación y envejecimiento del cemento asfáltico, lo cual se traduce en mayor resistencia tanto al agrietamiento por fatiga como por contracción térmica.
- Las mezclas asfálticas tibias ofrecen condiciones de trabajabilidad que facilitan el proceso de compactación alcanzando mayores valores de densidad en campo y, por ende, se logra extender la durabilidad de la carpeta asfáltica.
- Dada la menor tasa de enfriamiento de las mezclas asfálticas tibias es posible llevar a cabo operaciones de pavimentación a distancias más prologadas en comparación con las mezclas asfálticas en caliente o bien extender el tiempo de compactación disponible en sitios con climas fríos, difícil acceso o donde se realicen trabajos nocturnos.
- El decremento en la oxidación y volatilización del cemento asfáltico durante la fabricación de las mezclas tibias confiere menor rigidez al material resultante lo que permite compensar la incorporación de altos contenidos de pavimento asfáltico recuperado (RAP).

No obstante, para lograr los beneficios anteriores y realmente obtener una alternativa sustentable de construcción/rehabilitación de pavimentos flexibles es de suma importancia que las mezclas asfálticas tibias posean las características mecánicas necesarias para desempeñar las mismas funciones que una mezcla asfáltica en caliente dentro de una estructura de pavimento en términos de resistencia a la deformación permanente, agrietamiento, durabilidad, desprendimiento y susceptibilidad al daño por humedad. Bajo la premisa anterior, este trabajo de investigación busca contribuir con un avance en la comprensión del comportamiento de mezclas asfálticas tibias, el cual, hasta ahora, ha sido poco estudiado en nuestro país.

2.- OBJETIVO: Evaluar la influencia de reducir 35-40°C las temperaturas de mezclado y compactación en el desempeño de mezclas asfálticas tibias (WMA) y realizar el análisis comparativo de resistencia frente a mezclas asfálticas equivalentes fabricadas en caliente (HMA).

3.- PLAN EXPERIMENTAL: Para lograr el objetivo del estudio, se llevó a cabo un plan experimental de tres fases. En primera instancia, tres cementos asfálticos con temperaturas de trabajo entre 150 y 180°C fueron utilizados como base para su posterior modificación con un paquete de aditivos químicos y orgánicos con la finalidad de obtener otros tres ligantes tibios con temperaturas de trabajo en el rango de los 100-140°C. Para determinar las temperaturas de mezclado de cada asfalto tibio fue necesario realizar pruebas de viscosidad en el mástico (material pasa tamiz #200 + asfalto) con una relación filler/asfalto rigurosa de 40/60 empleando un Reómetro de Corte Dinámico (DSR) en modo rotatorio. Lo anterior, con el propósito de capturar y discernir de mejor manera el efecto visco-lubricante del paquete de aditivos añadido, el cual, bajo la óptica de pruebas de viscosidad tradicionales evaluadas únicamente en el asfalto, sería imposible observar. También, se estudió el



cambio en las propiedades reológicas conferidas a los asfaltos modificados con el paquete de aditivos. Posteriormente en la segunda fase, las temperaturas de compactación de las mezclas tibias fueron establecidas a partir de los gráficos de densificación (número de giros versus densidad teórica máxima G_{mm} alcanzada) e índices de energía de compactación (ECI) provenientes de los barridos de temperatura en el Compactador Giratorio Superpave (SGC) efectuados en una fórmula de trabajo de mezcla asfáltica con T.N ½” y 6.0% de contenido óptimo de cemento asfáltico que sirvió como referencia para todos los asfaltos evaluados en esta investigación. Una vez definidas las temperaturas de trabajo, se procedió a fabricar los especímenes de desempeño subsecuente a un tratamiento térmico, en donde, por un lado, las probetas sometidas a los ensayos de resistencia al daño por humedad y deformación permanente fueron acondicionadas con un envejecimiento a corto plazo, mientras que, por el otro lado, las mezclas asfálticas utilizadas en las pruebas de durabilidad y agrietamiento fueron acondicionadas a largo plazo. Lo anterior, fue aplicado tanto para la tecnología en tibio como en caliente. Finalmente, la tercera etapa consistió en el análisis y tratamiento de los datos recopilados durante la campaña de experimentos.

4.- MATERIALES Y MÉTODOS: Los materiales pétreos utilizados en este estudio fueron adquiridos de fuentes localizadas en el Estado de Jalisco y cumplen con todas las características físicas y de resistencia especificadas en mezclas asfálticas en caliente de alto desempeño. Por su parte, los asfaltos base provenían de un distribuidor ubicado en el estado de Guanajuato.

4.1- Cemento asfáltico: Los asfaltos base corresponden a un EKBÉ[®], EKBÉ[®]+SBS y EKBÉ[®]+SBS+PPA clasificados por su grado de desempeño como PG 64-16, PG 70-16 y PG 76-16, respectivamente. Sin embargo, diferentes modificadores fueron añadidos (cera + viscolubricante + tensoactivo). La Tabla 1 recopila las temperaturas críticas de falla resultantes con base en la especificación AASHTO M320 más reciente, así como los indicadores de flujo, resistencia a la fatiga y al agrietamiento térmico evaluados con los ensayos MSCR, Glover-Rowe modificado y ΔT_c , respectivamente.

Tabla 1.- Propiedades reológicas de los cementos asfálticos utilizados.

Asfalto:	HMA	WMA	HMA	WMA	HMA	WMA	
	64V-16	64S-22	70E-16	70V-22	76E-16	76V-22	
Alta temp. Crítica de falla, °C	66.4	69.7	80.4	81.6	86.89	87.81	
Baja temp. Crítica de falla, °C	-21.12	-27.76	-19.95	-22.67	-20.75	-22.83	
Ensayos adicionales al grado de desempeño							
Creep repetido multi-esfuerzo MSCR ¹	Temp, °C	64		70		76	
	RE, %	9.31	3.04	65.97	45.65	65.68	37.68
Glover – Rowe ² modificado ² @20°C	Jnr 3.2 1/kPa	0.8919	2.2486	0.1942	0.6236	0.2496	0.9244
	ΔT_c ³	-10.0	-7.4	-13.7	-12.4	-13.2	-10.4

¹Bajo Jnr y alta respuesta elástica (RE) representa mayor resistencia a las deformaciones permanentes.

²Valores bajos de G-R_m indican menor fragilidad y, por ende, más resistencia al agrietamiento por fatiga.

³Valores altos de ΔT_c se relacionan con mejor resistencia al agrietamiento térmico.

4.2 Curvas de viscosidad en mástico: Para definir la reducción en las temperaturas de fabricación de las mezclas tibias se realizaron barridos de temperatura en el reómetro de corte dinámico desde 90 hasta 150°C tomando lecturas de viscosidad absoluta en el mástico (filler + asfalto relación: 40/60%), tal como se observa en la Figura 1.

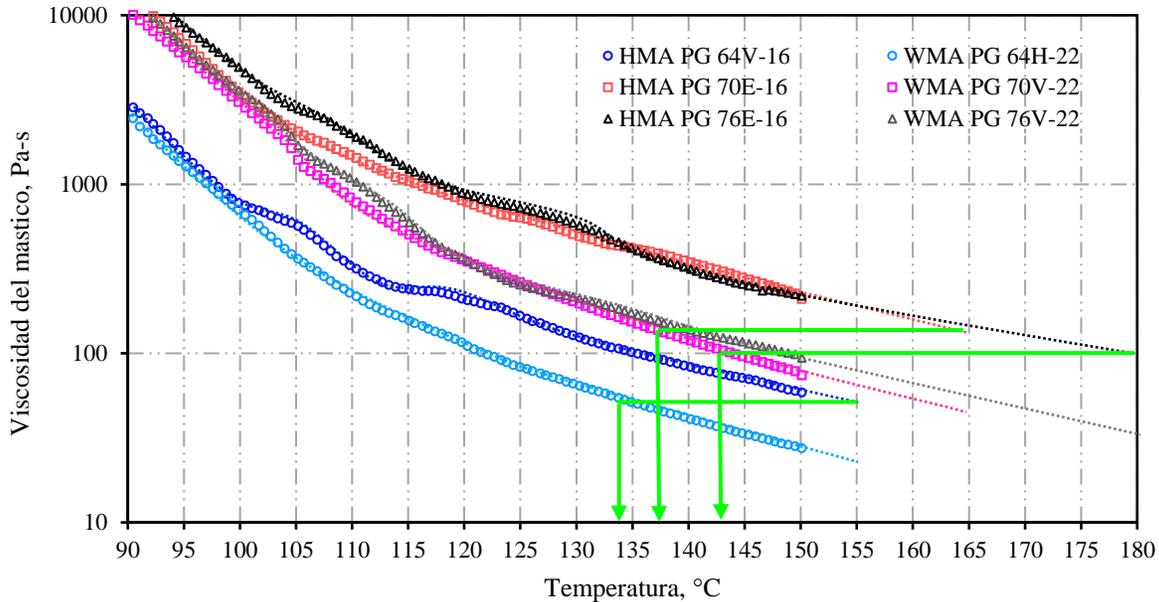


Figura 1.- Análisis de la viscosidad en el mástico empleando rampa de temperatura en el DSR.

Con los datos contenidos en el gráfico superior es posible estimar las viscosidades equivalentes de las mezclas asfálticas tibias y de esta manera establecer las temperaturas de mezclado y curado, las cuales resultaron de 130-135, 135-140 y 140°-145°C para los asfaltos tibios PG 64S-22, PG 70V-22 y PG 76V-22, respectivamente. Lo anterior, tomando como punto de comparación las viscosidades proyectadas en el mástico a las temperaturas de trabajo recomendadas por el proveedor del cemento asfáltico para mezcla en caliente, las cuales fueron de 150-155, 163-168 y 175-180°C para el caso de los asfaltos PG 64V-16, PG 70E-16 y PG 76E-16, respectivamente.

4.3 Diseño de la mezcla asfáltica: El esqueleto mineral se definió mediante métodos gráficos con la finalidad de proyectar una estructura granular que se localizara dentro de los puntos de control para una mezcla SUPERPAVE (AASHTO M323) con tamaño nominal de 12.5 milímetros. Los agregados pétreos utilizados corresponden a roca basáltica 100% triturada. El contenido óptimo de asfalto que cubrió los requerimientos volumétricos fue de 6.0% y se determinó a partir de cuatro/cinco porcentajes de prueba empleando una energía de compactación de 100 giros tomando como punto de partida el asfalto PG 64V-16.

4.4 Curvas de densificación (%G_{mm} vs # Giros) e índices de energía de compactación (CEI): Para establecer las temperaturas adecuadas de compactación de cada mezcla tibia fue necesario llevar a cabo barridos de temperatura densificando al menos dos especímenes de 4500 gramos en el compactador giratorio Superpave en donde se monitoreó la evolución de la Gravedad específica teórica máxima en función del número de giros aplicado. El criterio utilizado consistió en disminuir la temperatura de compactación tanto como fuera posible mantener 4±0.2% de vacíos de aire en la probeta analizada o bien, un valor de índice de energía de compactación (CEI) similar al obtenido en la mezcla asfáltica en caliente equivalente de referencia. El índice de energía de compactación fue calculado como el área bajo la curva entre el giro número 8 y el giro en el cual se alcanzó el 92% de la Gravedad específica teórica máxima o dicho de otro modo el número de giro en donde se logró 8% de vacíos de aire. A continuación, las Figuras 2, 3 y 4 exhiben el comportamiento observado durante la densificación de las mezclas asfálticas.

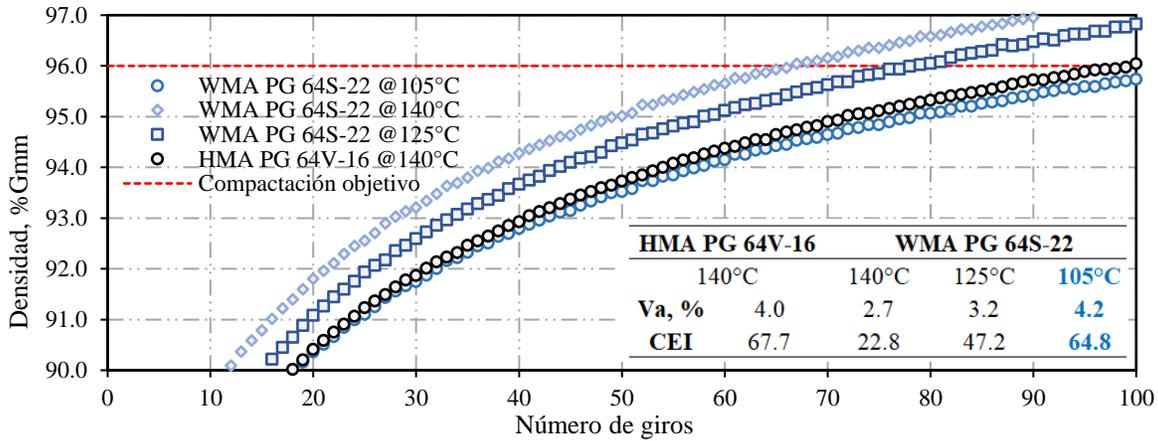


Figura 2.- Curvas de densificación y coeficiente de energía de compactación mezclas PG 64.

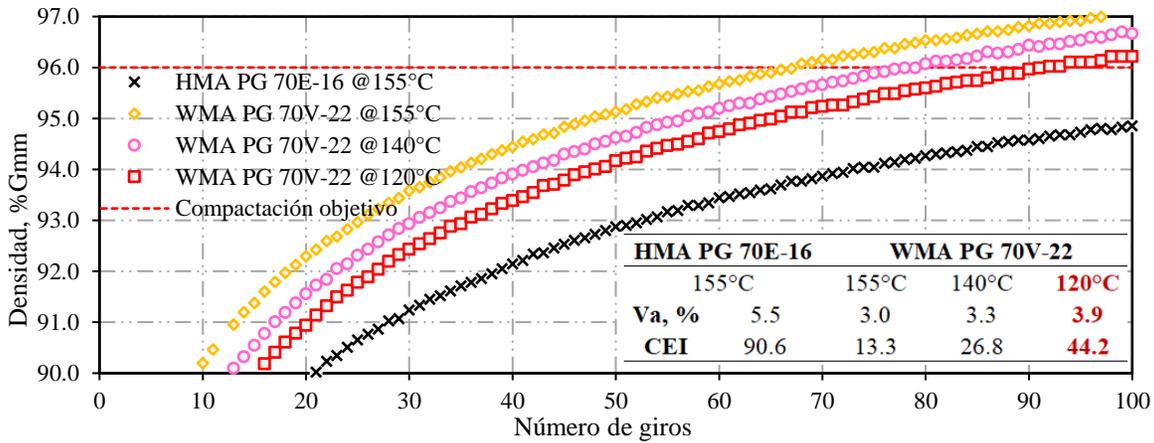


Figura 3.- Curvas de densificación y coeficiente de energía de compactación mezclas PG 70.

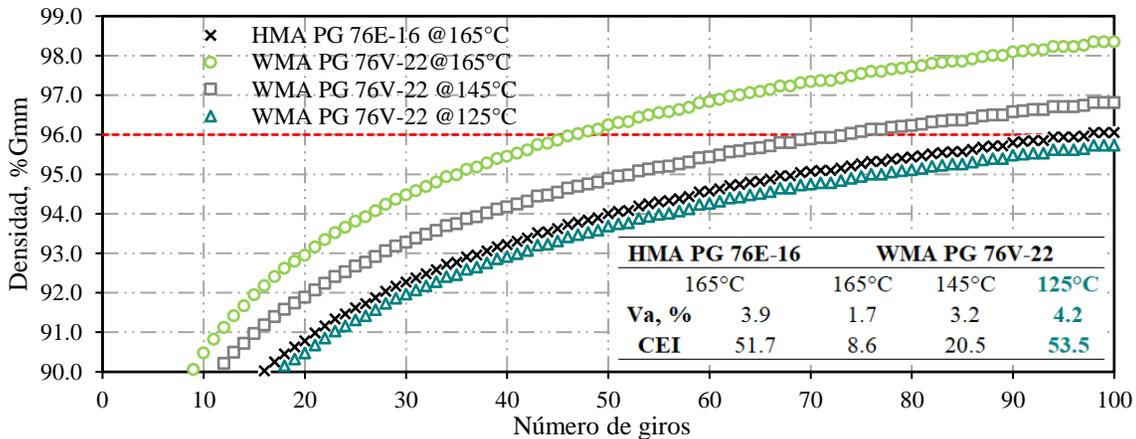


Figura 4.- Curvas de densificación y coeficiente de energía de compactación mezclas PG 76.

Los resultados indican que la mezcla con asfalto tibio PG 64S-22 exhibe a 105°C un comportamiento equivalente a su versión en caliente (140°C) tanto en el volumen de vacíos de aire como en los índices de energía de compactación. Por su parte la mezcla tibia con asfalto PG 70V-22 presenta mejores

propiedades de densificación a 120°C en comparación con la mezcla caliente PG 70E-16 compactada a 155°C, en donde esta última no logró los vacíos de aire de diseño y demanda gran cantidad de energía para su conformación. Por su parte, la mezcla tibia fabricada con asfalto PG 76V-22 presenta índices de energía de compactación y volumen de vacíos de aire ligeramente superiores a su equivalente en caliente, pero a una temperatura 40°C menor y aún dentro de los rangos propuestos.

4.5 Evaluación del desempeño: Las pruebas de desempeño enlistadas en la Tabla 2 fueron seleccionadas con base en capturar la posible respuesta de las mezclas asfálticas ante el efecto destructivo tanto de los vehículos de carga como de las sollicitaciones medioambientales. Lo anterior, relacionado con la resistencia ante la formación de roderas, agrietamiento, desprendimientos y baches en un pavimento asfáltico.

Tabla 2.- Descripción de los ensayos de desempeño utilizados.

Estandar de prueba	Equipo involucrado	Condiciones de prueba		Indicador
AASHTO T283		Congelamiento:	Sí, a -18°C	Relación de esfuerzos a tensión indirecta TSR
Resistencia al daño inducido por humedad		Velocidad de ruptura:	50 mm / minuto	
		Temp. Ensayo:	25°C	
EN12697-25 (Método A-1)		Tipo de onda cíclica:	Haversiana	Porcentaje de deformación permanente acumulada
Compresión axial cíclica modificando esfuerzo, ciclos y tipo de carga aplicado		Esfuerzo aplicado:	600 kPa	
		Ciclos de carga:	10 000	
		Temp. Ensayo:	50°C	
		Duración carga:	0.1 seg	
AASHTO TP108		Temp, °C:	25°C	Porcentaje de partículas desprendidas
Pérdida de partículas Cántabro		Número de ciclos de desgaste:	300	
AASHTO TP124 / ASTM D8225		Temp. Ensayo:	25°C	Energía de fractura, velocidad de propagación de fisura, indicador de agrietamiento FI y CT-I
Índice de flexibilidad de Illinois (IF) / Índice de tolerancia al agrietamiento (CT-I)		Tipo de carga:	Monotónica por compresión diametral	
		Velocidad de ruptura:	50 mm / minuto	

4.6 Elaboración de los especímenes de prueba: Una vez establecida la fórmula de trabajo se fabricaron los especímenes de prueba con un objetivo de 7±0.5% de vacíos de aire con la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico variando únicamente el tipo de asfalto utilizado y las temperaturas de trabajo establecidas para cada tecnología. Es importante mencionar que todas las mezclas asfálticas evaluadas en los ensayos de agrietamiento y durabilidad se sometieron a un envejecimiento a largo plazo en horno durante 8 horas a 135°C previo a su compactación, tal como recomienda el Centro Nacional de Tecnología del Asfalto Estadounidense NCAT [6]. Posterior al tratamiento térmico a largo plazo, las mezclas se mantuvieron una hora adicional en el horno a su temperatura de compactación determinada en las etapas anteriores.

5.- RESULTADOS: En los siguientes apartados se discuten los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño a las que fueron sometidas tanto las mezclas asfálticas en caliente como las mezclas asfálticas tibias. Cabe resaltar que los valores reportados corresponden al promedio de la evaluación de dos, tres o hasta cuatro replicas dependiendo del estándar de prueba empleado.

5.1.-Resistencia al daño por humedad empleando tensión indirecta (TSR)-AASHTO T283: La Figura 5 compara los esfuerzos obtenidos en los concretos asfálticos con y sin presencia de humedad ensayados a tensión indirecta, a partir de los cuales podemos establecer que en ambas tecnologías no existe un detrimento importante en la resistencia aún con la presencia de agua en la interfaz cemento asfáltico-agregado pétreo ya que en todos los casos la resistencia conservada (TSR) supera el umbral de 80%. En todos los escenarios predominó el fallo cohesivo debido a la buena afinidad entre los cementos asfálticos y el agregado mineral basáltico utilizado, así como por la participación del modificador de tensión superficial incluido en el paquete de aditivos incorporado a las mezclas tibias.

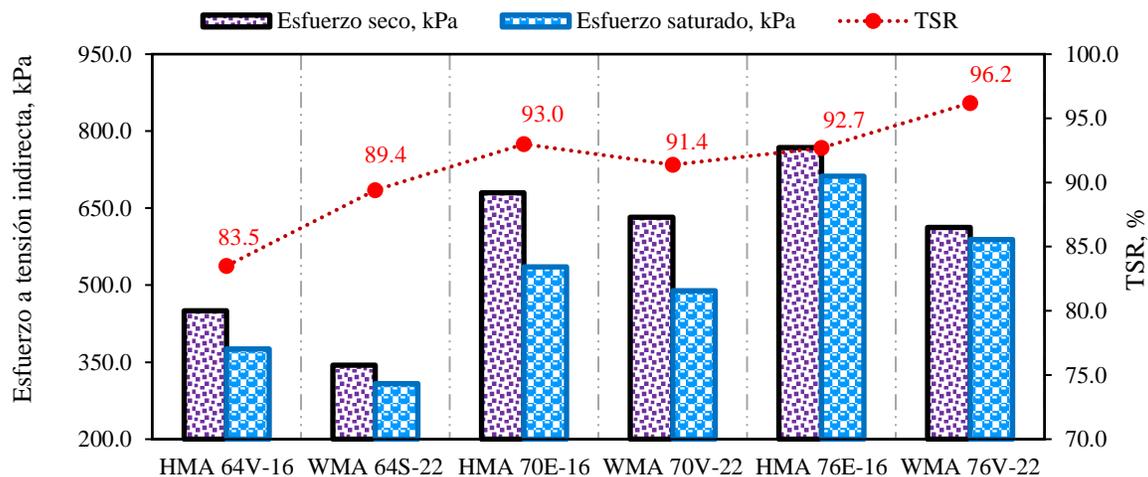


Figura 5.- Evaluación del daño por presencia de humedad.

Basándonos en los resultados anteriores, resulta evidente que; por un lado, los esfuerzos a tensión indirecta aumentaron conforme el grado de desempeño del asfalto también incrementó y, por el otro lado, en todos los casos las mezclas tibias reportan menores esfuerzos a tensión indirecta en comparación con sus equivalentes en caliente debido a la menor rigidización sufrida durante el proceso de mezclado, curado y compactación.

5.2.-Deformación permanente por compresión axial cíclica (CAC): Para establecer el potencial de formación de roderas de las mezclas asfálticas analizadas se utilizó un ensayo de compresión axial cíclica empleando una prensa dinámica, en donde las condiciones de evaluación fijadas corresponden a un pulso de carga vertical repetido (600 kPa esfuerzo de contacto) en forma senoidal con 0.1 segundos de duración (10 Hz) seguido de 0.9 segundos de recuperación/relajación del material. El ensayo se configuró de tal manera que se aplicaran 10 000 ciclos de carga o hasta que se obtuviera 10% de deformación axial acumulada en la probeta dentro de una cámara de temperatura controlada a 50°C. De esta manera se simuló la respuesta de la mezcla asfáltica ante el paso repetido de un eje sencillo equivalente de 8,2 toneladas con neumáticos inflados a una presión de 87 psi y velocidad de circulación aproximada a 60-70 km/h del camión de carga. La Tabla 3 reúne los indicadores de resistencia obtenidos durante el ensayo, mientras que la Figura 6 exhibe el porcentaje de deformación acumulado en función del número de ciclos impuestos.

Tabla 3.- Indicadores de resistencia obtenidos en la prueba de compresión axial cíclica

ID Mezcla asfáltica	Tasa de deformación en fase 2 x Millón de ciclos, %	% Deformación total axial acumulada @10 000 ciclos	Número de ciclos donde ocurre el flujo plástico
HMA 64V-16	0.2050	4.23	5625
WMA 64S-22	0.2281	8.95	7250
HMA 70E-16	0.0970	2.12	No presentó
WMA 70V-22	0.1026	2.19	No presentó
HMA 76E-16	0.0809	1.91	No presentó
WMA 76V-22	0.0832	1.94	No presentó

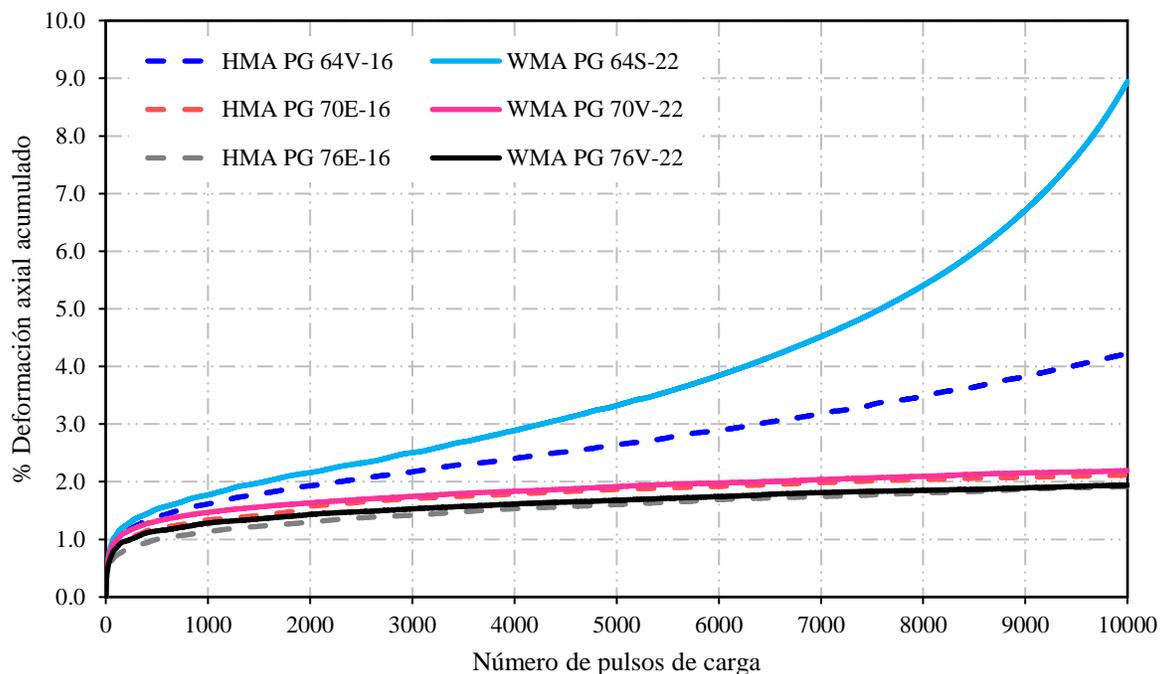


Figura 6.- Deformación permanente acumulada respecto al número de ciclos de carga

A partir de la figura anterior es posible observar las diferentes fases de comportamiento que experimentaron las mezclas asfálticas analizadas, en primera instancia todas presentaron el fenómeno de post-compactación debido a fenómenos de calentamiento, reordenamiento de partículas, consolidación, etc., que ocurre durante los primeros ciclos de carga. Enseguida, comienza la fase de resistencia real donde los agregados y el asfalto trabajan en conjunto para soportar las solicitaciones de carga y, para nuestro caso de estudio, las tecnologías tanto tibias como en caliente fabricadas con los asfaltos PG 70 y PG 76 no presentaron diferencias significativas en su desempeño puesto que exhibieron tasas de deformación muy estables bastante similares entre si tal como destaca la tabla superior. En este sentido, podría inferirse que el paquete de aditivos añadido no afectó la capacidad de recuperación elástica de los asfaltos modificados con elastómero SBS. Para el caso de los asfaltos sin polímero (PG 64) en ambas tecnologías es posible identificar una tercera zona de falla drástica definida por el cambio en la pendiente de la curva de deformación en donde la acumulación del daño

ocurre de manera drástica, la cual se presentó en la mezcla asfáltica en caliente hasta los 7250 ciclos mientras que en la mezcla tibia ocurrió a los 5625 pulsos de carga dada la menor rigidez del material. Lo anterior, se traduce en 22% menos resistencia ante el flujo plástico y el doble de deformación axial acumulada al final de la prueba por parte de la mezcla tibia versus su equivalente en caliente.

5.3 Pérdida de partículas por desgaste mediante ensayo Cántabro-AASHTO TP108: La Figura 7 expresa el porcentaje de partículas desprendidas de las mezclas asfálticas evaluadas en función del ciclo de oxidación impuesto. A partir de los resultados obtenidos en el ensayo Cántabro se puede observar como las mezclas asfálticas tibias al estar fabricadas con un asfalto mucho menos alterado/envejecido por la temperatura durante el proceso de fabricación y compactación poseen mayores habilidades adhesivas y cohesivas en comparación con las mezclas asfálticas en caliente. De este modo, las diferencias observadas en el incremento de la durabilidad oscilan en promedio entre el 40%, 65% y 55% a favor de las mezclas tibias fabricadas con los asfaltos PG 64S-22, PG 70V-22 y PG 76V-22, respectivamente.

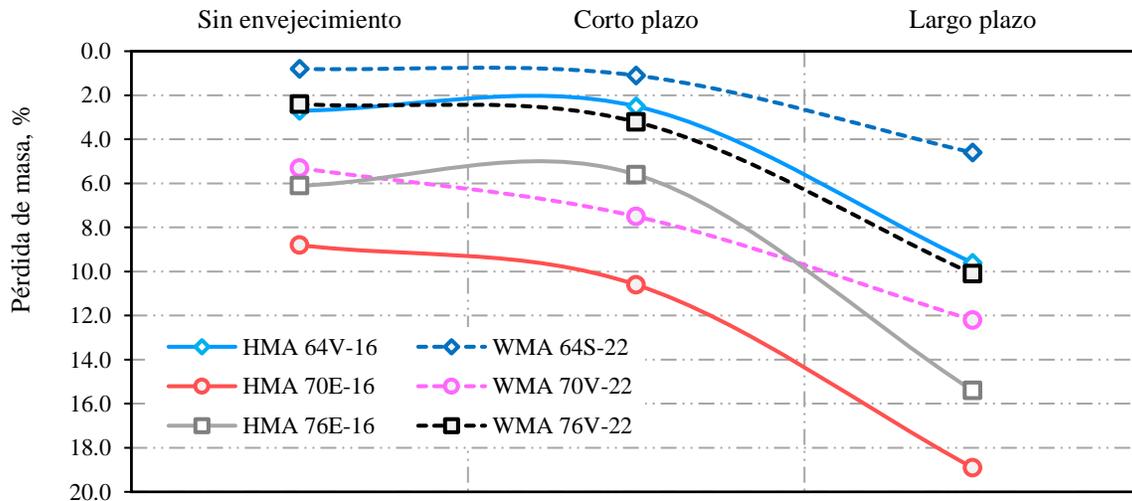


Figura 7.- Curva de desempeño para ensayo de pérdida de masa en función del envejecimiento

Adicionalmente, el ejercicio de evaluar la pérdida de partículas en tres condiciones diferentes de oxidación nos permitió crear la curva de desempeño, la cual nos muestra el avance de la degradación de los cementos asfálticos, siendo en la condición de envejecimiento a largo plazo donde se obtuvieron los resultados que diferencian de mejor manera el comportamiento de mezclas tibias versus mezclas en caliente. Lo anterior, pone de manifiesto la importancia de realizar los ensayos de desempeño en las condiciones apropiadas para realmente observar los beneficios en la durabilidad asociados con los modificadores químicos y orgánicos utilizados.

5.4 Resistencia al agrietamiento-Índice de Flexibilidad (IF) AASHTO TP-124 / Índice de Tolerancia al agrietamiento (IDEAL-CT) ASTM D8225: Posterior a la ejecución de las pruebas de agrietamiento y al análisis de las curvas carga- desplazamiento generadas, se procedió al cálculo de los parámetros más importantes para el estudio del comportamiento mecánico relacionado con el agrietamiento de la serie de probetas fabricadas con las tecnologías en caliente y tibio. En las Figuras 8, 9 y 10 se muestra el avance de la grieta en la longitud total de cada elemento analizado, mientras que en la Tabla 4 se comparan los valores promedios obtenidos en estos ensayos de energía de fractura.

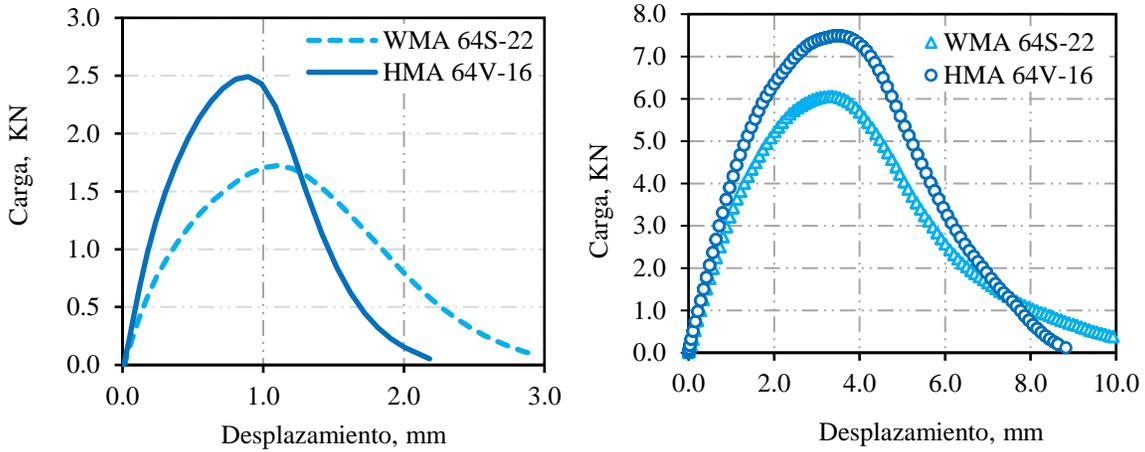


Figura 8.- Ensayos de energía de fractura; Índice de flexibilidad I-FIT (izq) e Ideal CT-I (der)

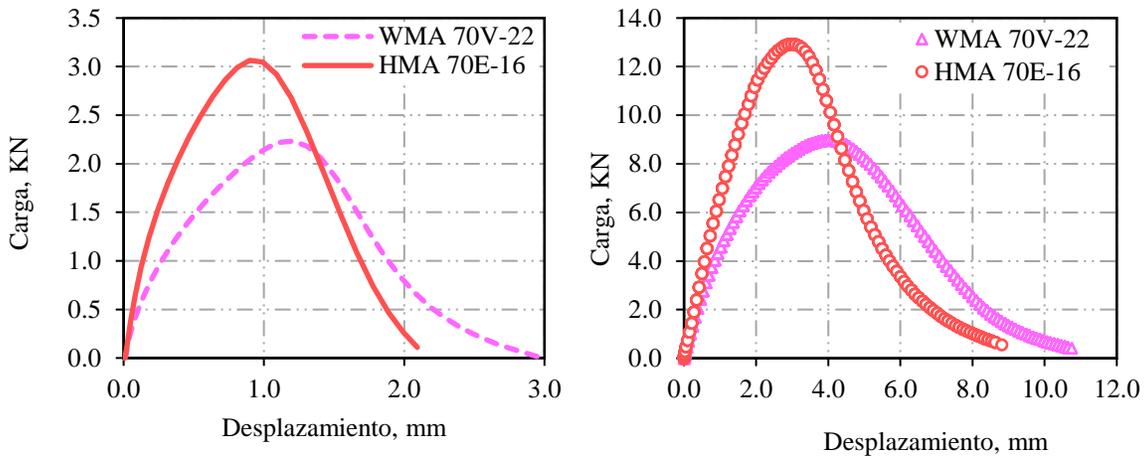


Figura 9.- Ensayos de energía de fractura; Índice de flexibilidad I-FIT (izq) e Ideal CT-I (der)

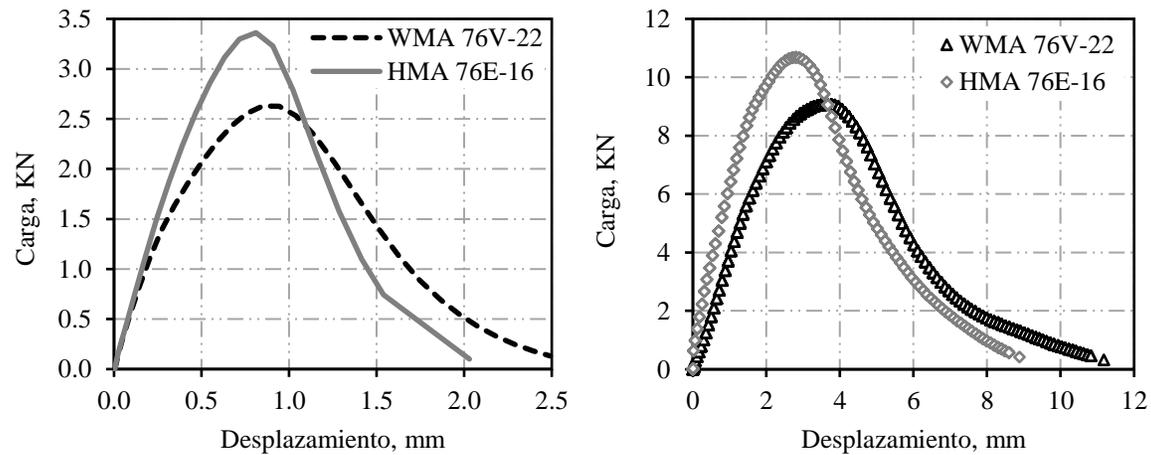


Figura 10.- Ensayos de energía de fractura; Índice de flexibilidad I-FIT (izq) e Ideal CT-I (der)



Tabla 4. Indicadores de resistencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas evaluadas

Índice de Flexibilidad (IF) - AASHTO TP124					
ID	Carga máxima, KN	Módulo secante, KN/mm	Energía de fractura, J/m ²	Pendiente post-pico	Índice de flexibilidad IF
HMA PG 64V-16	2.49	5.24	1012	-3.06	3.4
WMA PG 64S-22	1.72	2.90	831	-1.89	4.7
HMA PG 70E-16	3.06	6.24	1303	-3.95	3.3
WMA PG 70V-22	2.23	3.39	909	-2.24	4.1
HMA PG 76E-16	3.36	6.56	1007	-4.19	2.4
WMA PG 76V-22	2.62	5.13	1016	-3.09	3.3

Índice de Tolerancia al agrietamiento (CT-I) - ASTM D8225					
ID	Carga máxima, KN	Módulo secante, KN/mm	Energía de fractura, J/m ²	Pendiente post-pico	Tolerancia al agrietamiento CT-I
HMA PG 64V-16	7.48	4.11	3972	-2.29	57.0
WMA PG 64S-22	6.05	3.36	3211	-1.34	78.9
HMA PG 70E-16	12.92	6.69	5699	-4.17	54.9
WMA PG 70V-22	8.97	3.91	5410	-2.65	79.1
HMA PG 76E-16	10.68	6.91	4512	-3.49	37.1
WMA PG 76V-22	9.08	4.52	4727	-2.44	59.6

A partir de los gráficos superiores se puede apreciar que las mezclas asfálticas en caliente poseen las cargas pico y los módulos secantes más elevados, los cuales son un indicador notable de un material mucho más rígido. Sin embargo, cuando la carga aplicada excede el punto de falla las mezclas asfálticas en caliente tienden a romperse de manera frágil propiciando una mayor velocidad en la propagación de grietas. Lo anterior, se observa en la fuerte inclinación del valor de la pendiente en la región post-pico. Por el contrario, al analizar las curvas de carga-desplazamiento de las mezclas tibias es notorio el comportamiento dúctil prevaleciente, debido a su mayor capacidad para mantener unidos sus componentes incluso después de alcanzar la carga máxima. Lo anterior, se ve reflejado en el abatimiento de la pendiente en la región post-pico, la cual posee un descenso mucho más suave. Ambos ensayos de agrietamiento muestran tendencias de comportamiento bastante consistentes entre sí y advierten sobre la respuesta de cada tecnología cuando es sometida a esfuerzos de tensión. En este sentido, se puede establecer que las mezclas asfálticas en caliente optan por romperse antes que deformarse que de acuerdo con la técnica de análisis utilizada (mecánica de fractura) indica menor resistencia al agrietamiento, mientras que, por el contrario, las mezclas tibias presentan propiedades asociadas con la tolerancia de grandes deformaciones antes de fallar resultando así en mayores índices tanto de flexibilidad (IF) como de resistencia al agrietamiento (CT-I). Finalmente, los resultados contenidos en la tabla superior demuestran incrementos en la resistencia al agrietamiento entre 25 y 40% a favor de las mezclas tibias comparado con las mezclas asfálticas en caliente.

6.- CONCLUSIONES: A partir de los resultados obtenidos se realizaron numerosas observaciones y, con base en ellas, las siguientes conclusiones: *1)* La incorporación del paquete de aditivos mejoró notablemente las propiedades reológicas de los asfaltos base utilizados, principalmente aquellas asociadas con la relajación y disipación de tensiones, este efecto fue interesante puesto que se lograron mejores resultados aún y cuando en el proceso de caracterización los asfaltos tibios fueron sometidos



durante el envejecimiento a corto plazo en “RTFO” a la temperatura estándar de 163°C, siendo esta última una condición mucho más desfavorable a la real dado que las mezclas tibias nunca fueron expuestas a temperaturas por encima de los 145°C. **2)** Las alteraciones en la visco-lubricidad de las mezclas tibias permitieron reducir la fricción interna de la mezcla asfáltica de tal manera que fue posible disminuir la temperatura de compactación hasta en 40°C obteniendo propiedades volumétricas satisfactorias y, además, la trabajabilidad conferida por los aditivos utilizados ofreció la posibilidad de optimizar el consumo de asfalto específicamente en las mezclas fabricadas con asfalto modificado. **3)** Las pruebas de desempeño ponen de manifiesto que la tecnología de mezcla asfáltica tibia puede ofrecer una resistencia al daño por humedad igual o incluso superior comparado contra las mezclas asfálticas en caliente en términos de la relación de esfuerzos conservados (TSR) y cumplimiento sobradamente con las especificaciones para mezclas de alto desempeño. **4)** Si bien no existe una especificación para las condiciones y configuración en las que se llevó a cabo la prueba de compresión axial cíclica la comparación directa entre la tecnología WMA versus HMA sostiene que no hay diferencias importantes en la susceptibilidad a la formación de roderas particularmente cuando se utilizan como base asfaltos modificados. El ensayo dinámico utilizado de carga-descarga bajo condiciones bastante demandantes (alto nivel de esfuerzo, elevada temperatura y mayor número de ciclos) permitió obtener un panorama más representativo y claro del fenómeno de acumulación de deformación plástica en las mezclas asfálticas analizadas. **5)** Los ensayos de agrietamiento y durabilidad ponen de manifiesto la mayor capacidad de las mezclas tibias para conservar en el tiempo sus propiedades cohesivas y adhesivas, demostrando superior resistencia al agrietamiento, así como el retraso en la aparición de fisuras y desintegración del material. Lo anterior, respaldado por los mayores índices tanto de flexibilidad (IF) como de tolerancia al agrietamiento (CT-I) obtenidos en las pruebas de energía de fractura, así como por la menor cantidad de partículas desprendidas en el ensayo Cántabro. **6)** Finalmente, se comprobó que las mezclas asfálticas tibias poseen las características necesarias para desempeñar las mismas funciones que las mezclas asfálticas en caliente, aunado a los enormes beneficios ambientales que de esta práctica de construcción se deriven.

7.- REFERENCIAS

- [1] Martin Zaubanis. (2014). Warm Mix Asphalt. Chapter 10 in Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements, Green Energy and Technology. Pp. 309-334. DOI: 10.1007/978-3-662-44719-2_10.
- [2] European Asphalt Paving Association. (2014). The use of warm mix asphalt. EAPA-Position Paper.
- [3] Milad, A.; Babalghaith, A.M.; Al-Sabaei, A.M.; Dulaimi, A.; Ali, A.; Reddy, S.S.; Bilema, M.; Yusoff, N.I.M. A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 14863. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214863>
- [4] Barraij, F.; Khatib, J.; Castro, A.; Elkordi, A. Effect of Chemical Warm Mix Additive on the Properties and Mechanical Performance of Recycled Asphalt Mixtures. *Buildings* 2022, 12, 874. <https://doi.org/10.3390/buildings12070874>
- [5] Bhat, F. S., & Mir, M. S. (2022). Study Investigating the Influence of Warm-Mix Asphalt Additives on Rutting and Fatigue Performance of Nano-Modified Asphalt Binders. *Transportation Research Record*, 2676(4), 719–731. <https://doi.org/10.1177/03611981211064995>
- [6] Chen, C., Yin, F., Turner, P., West, R. C., & Tran, N. (2018). Selecting a Laboratory Loose Mix Aging Protocol for the NCAT Top-Down Cracking Experiment. *Transportation Research Record*, 2672(28), 359–371. <https://doi.org/10.1177/0361198118790639>