



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

EL ÍNDICE DE DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DEL TIPO DE AGREGADO PÉTREO Y TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO

Carlos Humberto Fonseca Rodríguez¹, Rodolfo Villalobos Dávila², Ernesto Monsiváis Contreras³,
Iván Emilio Pérez Delgado⁴, Juan Carlos Prieto Cadena⁵

¹ Maestro Emérito Tecnológico de Monterrey, carlos.fonseca@tec.mx

² Empresa PETROTEKNO, S.A. de C.V., rvd@petrotekno.com.mx

³ ECN Laboratorio, S.A. de C.V., ernesto.monsivais@ecn11.com.mx

⁴ Profesor de Tiempo Parcial Tecnológico de Monterrey, ivanemiliop@gmail.com

⁵ Empresa PETROTEKNO, S.A. de C.V., prietomec@hotmail.com

Resumen

Desde muchos años atrás y por muchos investigadores, se ha estudiado el fenómeno de la adhesividad entre los materiales que integran una mezcla asfáltica, la cual se ve afectada por la acción del agua provocando deterioros que pueden ser previstos mediante el Índice de Daño por Humedad. Por un lado, el cemento asfáltico tiene la propiedad de envolver al agregado pétreo, de manera activa, en función de su viscosidad; y de manera pasiva, mantenerse adherido al agregado pétreo, en función de la afinidad iónica entre ambos materiales, potenciando la cohesión de la mezcla asfáltica. Mejorar la adhesividad tiene como resultado una excelente cohesión, mayor durabilidad y menor envejecimiento. Es conocido que la mayoría de los agregados pétreos son hidrofílicos, que el agua se puede transportar internamente en la mezcla asfáltica, lo cual puede ser en estado sólido, líquido y gaseoso, dependiendo de las condiciones climatológica, y dañar la estructura de la mezcla asfáltica. Los agregados pétreos en el Estado de Nuevo León, México, normalmente empleados en mezclas asfálticas, son de mineralogía calizo, granítico y dolomítico, los dos últimos en menor frecuencia. En el Estado vecino Coahuila, existen canteras con rocas basáltica de muy buena calidad. Esta investigación bibliográfica y experimental, empleando cementos asfálticos convencional PG64-22 y modificados con polímero PG76-22; tres tipos de agregados pétreos, calizo, basalto y granito; y evaluando el daño por humedad mediante el procedimiento de prueba Tensile Strength Ratio, TSR, (AASHTO T 283, ASTM D 4867), Hamburg Wheel Tracking Test, HWTT, (AASHTO T 324), y el Método Universal de Caracterización de Ligantes, UCL, permitió analizar resultados para estudiar la susceptibilidad al daño inducido por humedad en las mezclas asfálticas.

Palabras clave: Adhesividad Activa y Pasiva. Cohesión en Mezclas Asfálticas. Daño Inducido por Humedad. Resistencia a Tensión Indirecta. Conservación de la Resistencia a Tensión Indirecta, TSR. Deformación Plástica Permanente. Método UCL.

1 Introducción

Desde hace muchos años, la inquietud de buscar respuestas ante los fenómenos físicos que potencian el daño del agua en las mezclas asfálticas para pavimentos flexible, se ha tornado un tema de actualidad que ha estudiado muchos investigadores. Las soluciones no son claras hoy en día, lo cual genera la constante búsqueda hasta el día de hoy, y se continúa buscando cómo es que interactúan diferentes fenómenos y en qué tiempo provocan el daño que afecta la durabilidad de las mezclas asfálticas.

Hay varios fenómenos físicos identificados y son muchas investigaciones las que se han centrado sus estudios en la infiltración del agua en la estructura de la mezcla asfáltica afectando su durabilidad durante su vida útil. Se ha demostrado que una buena adhesividad entre los dos



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

principales componentes, agregado pétreo y cemento asfáltico, da como consecuencia una excelente cohesión en la mezcla asfáltica, que consiste en mantener unidos a ambos componentes y mantenerlos en su posición relativa durante el mayor tiempo posible.

Estos fenómenos descritos por las condiciones físicas-mecánicas de los dos componentes, cambiantes en el tiempo, puede afectar su adhesividad, y por ende la durabilidad de la mezcla asfáltica. Conocemos que la mayoría de los agregados pétreos tienen una característica hidrofílica y que el cemento asfáltico experimenta en el tiempo un proceso de envejecimiento. Estas condiciones potencian la pérdida de cohesión, ya que se puede ver afectada mediante la pérdida de adhesividad provocada por el daño inducido por humedad.

El deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como “*stripping*” o “*pérdida del recubrimiento*” de cemento asfáltico de la superficie de los agregados. [1]. El segundo tipo de deterioro muy común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico (conocido internacionalmente como “*raveling*”). [1].

Según Omar Hend Ali et al., [2], existen cinco bien conocidos mecanismos que provocan la pérdida de adhesión y/o cohesión que son: desprendimiento del cemento asfáltico de la superficie del agregado pétreo por la presencia de agua; ruptura de la película de cemento asfáltico; emulsificación espontánea del cemento asfáltico; presión de poro del agua atrapada y cargas del tránsito; y bombeo hidráulico debido a la presión del agua por el paso de vehículos.

Uno de los agentes mejoradores de la adhesividad entre el agregado pétreo y cemento asfáltico, son los polímeros, ya que su tendencia es proveer al cemento asfáltico de mayor adhesividad, tanto activa (tendencia a mojar y envolver los áridos), como pasiva (resistencia a desplazarse por la acción del agua). [3, 4].

Existen estudios enfocados en el daño por humedad en mezclas asfálticas en función de las propiedades fundamentales de los materiales y del porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica, V_a , dentro de la estructura volumétrica de la misma, [5]. Se han desarrollado modelos que describen de un punto de vista micro mecánico el deterioro de daño por humedad en mezclas asfálticas, [6].

En los procesos de construcción, para lograr una mejor cobertura del cemento asfáltico (mojar, envolver), y sobre todo modificados, es muy importante lograr que su viscosidad en la producción de la mezcla asfáltica que permita una rápida y total envoltura. Esto mejora la adhesividad activa. Por otro lado, la buena selección del binomio agregado pétreo y cemento asfáltico, o sea emplear materiales que sean lo más compatible iónicamente, permitirá que el fenómeno de desnudar el agregado pétreo sea menor. Esto mejora la adhesividad pasiva.

Al darse todos estos fenómenos en la masa asfáltica compacta, como ya se mencionó, la durabilidad de la mezcla asfáltica se ve comprometida, debido a que los deterioros típicos como desenvuelta y pérdida de agregado pétreo, formación de baches, etc., se acelera, se presentan en un tiempo bastante menor, perdiendo capacidad funcional de las capas de rodadura y disminuyendo la vida útil del pavimento. Todo esto trae como consecuencia costos de mantenimiento mayores.

2 Antecedentes

Este estudio de caracterización de agregados pétreos, se realizó con los típicos materiales que se emplean en la manufactura de mezclas asfálticas en la zona noreste de México, específicamente en el Estado de Nuevo León y el vecino Estado de Coahuila de Zaragoza. Figura 1.

De acuerdo al estudio parcial de caracterización y clasificación de agregados pétreos realizado recientemente en solamente 16 de los 32 estados del país, [7], los bancos de materiales ubicados en el estado de Nuevo León presentan algunas deficiencias para ser usados en capas de rodadura de pavimentos flexibles. Se evaluaron propiedades como la naturaleza petrológica, forma y angularidad de la partícula, resistencia al intemperismo, dureza y resistencia al pulimento. Si bien es cierto que, en el caso de los seis bancos evaluados en el estado de Nuevo León, el agregado es



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

de excelente calidad, los de procedencia de roca caliza presentan una resistencia al pulimento acelerado baja, condición que los ubica en agregados pétreos no apto para emplearse en capas de rodadura. En Nuevo León también existe un banco de roca granito el cual produce un material de excelente calidad y más resistente al pulimento acelerado, propiedad que lo hace viable para su empleo en capas de rodadura, aunque presenta el limitante de ser la única oferta para tan alta demanda local.

Con la aprobación de la Ley de Construcción y Rehabilitación de Pavimentos del Estado de Nuevo León, [8], es mandatorio proveer a las capas de agregados resistentes al pulimento acelerado, y cumplir con valores de microtextura y macrotextura que aporten a la superficie de rodamiento valores de fricción importantes. Es importante mencionar que el estado de Nuevo León, conserva el poco honroso primer lugar en el número de accidentes vehiculares anuales de todo el país, y mencionar también, que, en los casi 15 años de contar con la Ley, no se tienen al día de hoy mejoras sustanciales, se conserva el primer lugar.

El estado de Nuevo León cuenta con cordilleras con formación geológica donde predominan las rocas calizas, con una dureza en la escala de Mohs alrededor de 3. Al ser los agregados pétreos calizos pocos resistentes al pulimento acelerado, en el estado existe una opción de emplear agregados pétreos de roca granito y en ambos estados vecinos, Nuevo León y Coahuila de Zaragoza, se cuenta con la mayor producción de la industria acerera del país, la cual produce crecientemente escorias de acería, la cual es clasificado como un agregado industrial. Adicionalmente, en Coahuila de Zaragoza se cuenta con bancos de agregados pétreos productos de trituración total de roca basalto. Como se aprecia en la Figura 1 se tienen tres bancos de material pétreos, dos de ellos, calizo y granito, en el estado de Nuevo León, y el tercer banco, basalto, en el estado de Coahuila de Zaragoza.



Figura 1. Ubicación de los estados de Nuevo León y Coahuila de Zaragoza en el noreste mexicano.

De esta situación actual, se desprende la necesidad de emplear agregados pétreos de los cuatro tipos, sin embargo, conociendo las excelentes propiedades físicas y mecánicas de los cuatro materiales, solamente se emplearon en este estudio de investigación los agregados pétreos: calizo, basalto y granito. De los tres agregados, el calizo es de mayor existencia y más cercanos a la zona metropolitana de Monterrey, ZMM, y es utilizado como material base en la granulometría de las mezclas asfálticas, a la cual se le adiciona material en su fracción gruesa un porcentaje de agregado basáltico o granítico, con el fin de elevar el nivel de fricción en la capa de rodadura.

Otra situación en la ZMM es que, se encuentran diseños de mezclas asfálticas donde se emplea en toda su granulometría, fracciones finas y gruesas de agregado basáltico o agregado granítico, sin realizarse estudios que indiquen que tanta adhesividad existe entre estos agregados y el cemento asfáltico a utilizarse. Este es el fundamento del estudio de investigación, caracterizar las mezclas asfálticas en cuanto a su comportamiento bajo la acción del agua, cuando se ven estos materiales involucrados en el 100% de su granulometría.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

3 Objetivo

Evaluar el comportamiento del daño inducido por humedad de mezclas asfálticas cuando son manufacturadas con materiales pétreos obtenidos de rocas caliza, basáltica o granítica, y cada una de ellas se emplean en un 100% en las fracciones finas y gruesas de sus granulometrías. En las evaluaciones se emplearon cementos asfálticos convencional, PG64-22, y modificados con polímero, PG76-22. El daño por humedad se evaluó mediante el Método Universal de Caracterización de Ligantes, UCL, Indirect Tensile Strength, IDT, (ASTM D 6931), y el ensaye de Hamburg Wheel Tracking Test, HWTT, (AASHTO T 324).

4 Metodología y plan de trabajo

El plan de trabajo consiste en evaluar mediante los tres ensayos citados el daño inducido en una mezcla asfáltica diseñada mediante la metodología de Protocolo AMAAC, (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.), de acuerdo a lo que a continuación se describe. En este estudio se emplearon dos tipos de cementos asfálticos, uno convencional con grado PG64-22 y el otro modificado con grado PG76-22. Empleando el cemento asfáltico modificado se diseñó la mezcla asfáltica.

4.1 Consideraciones para el diseño de la mezcla asfáltica.

La mezcla asfáltica se diseñó de acuerdo a las especificaciones definidas en el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013, [9], y para un número de ejes equivalentes de diseño entre 3.0 y 30.0 millones. Para este nivel de tránsito la mezcla asfáltica se compacta a un número de giros de diseño de 100 giros, en el Compactador Giratorio Superpave, CGS. Ver Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones Protocolo AMAAC.

ESALs de diseño (millones)	Densidad de Mezcla Asfáltica, G_{mb} , como porcentaje de G_{mm}			Tamaño Máximo Nominal de Agregado	% VAM Mínimo	ESALs de diseño (millones)	Porcentaje de Vacío Llenos de Asfalto VAF
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$				
< 0.3	≤ 91.5			9.5 mm	15.0	< 0.3	70 - 80
de 0.3 a 3.0	≤ 90.5			12.5 mm	14.0	de 0.3 a 3.0	65 - 78
de 3.0 a 30.0	≤ 89.0	96	98	25.0 mm	12.0	de 3.0 a 30.0	65 - 75
> 30.0	≤ 89.0			37.5 mm	11.0	> 30.0	

Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013

Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013

Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013

La densificación de la mezcla asfáltica, empleando el CGS, fue a una presión de 600 ± 18 kPa perpendicular al eje del molde cilíndrico de 150 mm de diámetro, un ángulo de giro externo de $1.25^\circ \pm 0.02^\circ$ con respecto al plano horizontal y una velocidad rotacional de 30 ± 0.5 revoluciones por minuto.

Los agregados pétreos empleados en el diseño de la mezcla asfáltica, son de procedencia mineralógica calizo, basalto y granito, cumpliendo con las propiedades mecánicas, de origen y de consenso, y con ellas poder garantizar un excelente comportamiento en la vida de servicio de la mezcla asfáltica densa, en el pavimento. Los materiales muestreados y caracterizados en sus diferentes fracciones fueron los siguientes:

- Grava y arena de procedencia caliza.
- Grava y arena de procedencia granito.
- Grava y arena de procedencia basalto.

Para el diseño de la mezcla asfáltica se consideraron los límites granulométricos de la Tabla 2 y Figura 2, así como las tolerancias en cada malla. Se integró una mezcla asfáltica de tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ " (12.5 mm) y tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " (19.0 mm).

Las gravedades específicas del agregado pétreo combinado, gravas y arena caliza, considerando los porcentajes de cada una de las fracciones y tipos de agregados pétreos, fueron $G_{sa} = 2.712$; $G_{se} = 2.698$ y $G_{sb} = 2.675$.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 2. Granulometría de la mezcla asfáltica.

Mallas	3/4" (19.0 mm)	1/2" (12.5 mm)	3/8" (9.5 mm)	1/4" (6.3 mm)	No. 4 (4.75 mm)	No. 8 (2.36 mm)	No. 16 (1.18 mm)	No. 30 (600 µm)	No. 50 (300 µm)	No. 100 (150 µm)	No. 200 (75 µm)
Límites (%)	100	90-100	72-88	60-79	53-73	38-60	26-48	18-38	11-27	6-18	3-9
Granulometría (%)	100.0	92.0	78.0	64.0	55.0	40.0	28.0	20.0	13.0	8.0	5.0
Tolerancia (%)	+/- 2.0	+/- 2.0	+/- 2.0	+/- 2.0	+/- 2.0	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.5	+/- 1.0

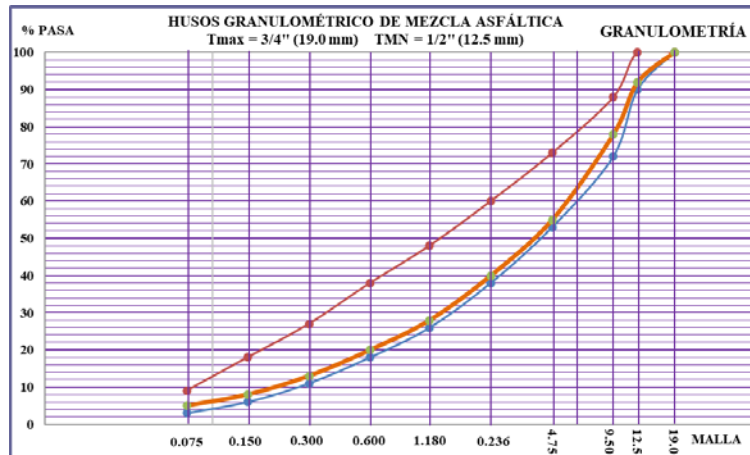


Figura 2. Granulometría de la mezcla asfáltica.

Los cementos asfálticos vírgenes empleados en el estudio, uno es modificado con polímero tipo SBS, PG76-22, y el otro convencional, PG64-22. La viscosidad dinámica por el equipo rotacional, a una temperatura de 135°C es igual a 1.133 y 0.521 Pa.s, para los cementos asfálticos PG76-22 y PG64-22, respectivamente, y ambos cumplen con valores menores al máximo especificado, 3.0 Pa.s, ASTM D4402.

Los valores de recuperación elástica por torsión para el PG76-22 y PG64-22, están en valores de 63.5% y 8.6, NLT-329, recuperación elástica por ductilómetro 68.3% y 11.5%, AASHTO T301, y son valores típicos de cementos asfálticos modificado con polímero y convencionales, respectivamente. De igual forma, para ambos cementos asfálticos el valor del índice de penetración, NLT-181, es de 1.885 y 0.833, respectivamente.

4.2 Método Universal de Caracterización de Ligantes, UCL.

Se desarrolló en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, [3, 4], y la filosofía del método es evaluar del cemento asfáltico, aquellas características que le va a proveer a la mezcla asfáltica un buen comportamiento en el pavimento. Es evaluar cómo cambia la cohesión en una mezcla asfálticas en diferentes condiciones de trabajo durante su vida útil, y como metodología define los siguientes pasos a realizarse:

- Susceptibilidad térmica.
Al ser el cemento asfáltico un material viscoelástico, su consistencia y comportamiento mecánico es función del tiempo de aplicación de carga y de la temperatura. De acuerdo a Pérez Jiménez et al., el cemento asfáltico, temperaturas altas, o tiempos largos de aplicación de carga, el ligante puede fluir, es inconsistente, y la mezcla se deforma. A temperaturas bajas, o tiempos cortos de aplicaciones de carga, el ligante se fragiliza y la mezcla pierde tenacidad. [3, 4].
- Adhesividad.
La acción del agua cuando ésta llega a estar en contacto con el agregado pétreo provoca el fenómeno desmenuamiento. El agregado pétreo posee características hidrofílicas y el agua al entrar en contacto con el agregado, desplaza al cemento asfáltico, fenómeno también conocido como daño por humedad, “stripping”.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

- Envejecimiento.

El cemento asfáltico, durante los procesos de trasiego, almacenamiento, producción de mezcla asfáltica, tendido y compactación, y durante su vida útil en el pavimento, se ve expuesto a altas temperaturas, a la acción del oxígeno (aire, agua), y a los rayos ultravioletas, condiciones que conlleva a una oxidación y envejecimiento, hasta perder propiedades elásticas e ir cambiando su comportamiento a más duro, a más frágil.

Estas tres condiciones de trabajo descritas a las que se expone a las mezclas asfálticas en su vida de servicio en un pavimento flexible, tiene como consecuencia un cambio en las prestaciones del cemento asfáltico perdiendo su capacidad de cohesionar a los agregados pétreos y disminuir la durabilidad de la mezcla asfáltica.

El Método UCL emplea para la evaluación de la cohesión el concepto definido en el método de ensayo Cántabro, el cual mide las pérdidas de un espécimen, al cual, dentro de la máquina de los Ángeles, sin carga abrasiva, se le desprende por impacto parte de la masa de cada espécimen ensayado. Se mide la masa inicial y después de 300 revoluciones, la masa final, calculándose el porcentaje de masa perdida durante el ensaye.

$$P_c = 100 [(P_i - P_f) / P_i] \quad (1)$$

donde:

P_c = Pérdidas al Cántabro, %.

P_i = Masa inicial, gramos.

P_f = Masa final, gramos.

La manufactura de los especímenes se realiza con agregados pétreos que siguen en calidad y granulometría una mezcla patrón. Los agregados pétreos deben de cumplir con tener una procedencia de roca sana y estar limpios, tener un desgaste de Los Ángeles menor del 25% y una absorción inferior al 1.5%. La granulometría de cada probeta, en un peso de 1,000 gramos, está integrada por un 80% en peso de agregado pétreo entre Malla No. 4 y Malla No. 8, y el 20% en peso entre la Malla No. 8 y la Malla No. 30.

Con un 4.5% de cemento asfáltico en peso del agregado pétreo, se manufacturan todas las probetas, empleando energía de densificación mediante el martillo Marshall, y compactándose a 50 golpes por cara. Para los tres tipos de agregados pétreos y los dos tipos de cementos asfálticos empleados, se elaboraron un total de 36 probetas a ensayarse en la máquina de Los Ángeles.

Para los tres tipos de agregados pétreos, basalto, granito y calizo y para los dos tipos de cementos asfálticos, PG76-22 y PG64-22, se tienen 6 combinaciones posibles. Para cada combinación se manufacturaron 6 probetas, de la cuales 3 se ensayaron en seco y 3 se acondicionaron mediante 24 horas sumergiéndolas en agua a una temperatura de 60°C.

4.3 Indirect Tensile Strength, IDT.

Este método para evaluar la resistencia a la tensión indirecta de una mezcla asfáltica, ITS o IDT, (ASTM D 6931), coadyuva a predecir posibles fallas del pavimento asfáltico como son deformaciones plásticas permanente o daños por humedad. Los dispositivos empleados son los cabezales de rotura Lottman, un marco de carga de estabilidad Marshall, en el cual se pueden ensayar núcleos de pavimento de 101.6 y 150.0 mm de diámetro. Se aplica una carga monótona con velocidad de 50 mm/minuto de desplazamiento, y las temperaturas de prueba pueden ser variables, de acuerdo a las condiciones a estudiar. Se aplica la prueba de resistencia a tensión indirecta descritas en ASTM D6931. [10]. Figura 3.

La resistencia a tensión indirecta es la máxima resistencia calculada a partir de la carga máxima aplicada para llegar a rotura y las dimensiones del espécimen, de acuerdo con lo siguiente:

$$ITS = IDT = 2P/\pi DH \quad (1)$$



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

donde:

ITS ó IDT es la resistencia a la tracción indirecta, en N/mm^2 .

P es la carga máxima, en newtons, N.

D es el diámetro de la muestra, en milímetros, mm.

H es la altura del espécimen, en milímetros, mm.

De las 6 probetas para un agregado pétreo y un cemento asfáltico, 3 de ellas se acondicionaron a un proceso de exposición al agua, de acuerdo al Método A de la norma UNE-EN 12697-12:2019. [11]. Con esto, a 3 probetas se le evaluó la resistencia a tensión indirecta promedio en seco, (σ_{seco}), y a 3 en húmedo, ($\sigma_{húm}$), permitiendo calcular la conservación de la resistencia a tensión indirecta tras inmersión.

$$IDT \text{ CONSERVADO (\%)} = 100 \sigma_{húm} / \sigma_{seco} \quad (2)$$

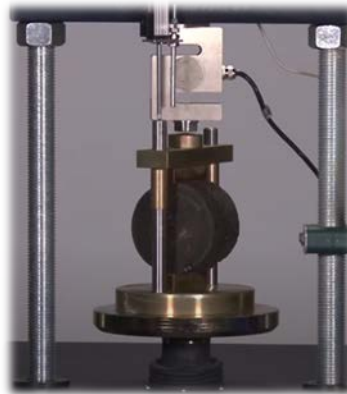


Figura 3. Estabilómetro Marshall y cabezal Lottman.

4.4 Deformaciones Plásticas Permanentes, HWTT.

Se empleó el ensayo descrito el procedimiento Susceptibilidad a la Humedad y a las Deformaciones Permanentes por Rodera de una Mezcla Asfáltica por medio de la Rueda Cargada de Hamburgo, o el procedimiento Tex-242-F Hamburg Wheel-Tracking Tests, HWTT, para evaluar la resistencia a deformaciones de mezclas asfálticas compactas. [11, 12 y 13].

Este método de prueba determina la susceptibilidad a fallas prematuras de las mezclas bituminosas debido a la debilidad en la estructura del agregado pétreo, rigidez inadecuada del cemento asfáltico o daño inducido por la humedad, y otros factores que influyen en una inadecuada adhesión pasiva entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo. Ver Figura 4.



Figura 4. Esquema de dispositivo Rueda Cargada para ensayo de probetas. HWTT.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

5 Análisis de resultados

Con los trabajos y ensayos realizados en los laboratorios de las empresas PETROTEKNO y ECN LABORATORIO, en Monterrey, se evaluó el comportamiento del daño inducido por humedad de mezclas asfálticas cuando son manufacturadas con materiales pétreos obtenidos de rocas caliza, basáltica o granítica. En las evaluaciones se emplearon cementos asfálticos convencional, PG64-22, y modificados con polímero, PG76-22.

5.1 Diseño de la mezcla asfáltica.

Cumpliendo con las especificaciones del Protocolo AMAAC, el diseño de la mezcla asfáltica se llevó a cabo y dio como resultados las propiedades volumétricas. Para el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica, $V_a = 4.0\%$, el contenido de cemento asfáltico óptimo, CCA_{opt} , es igual a 5.5% en peso del agregado pétreo, según se observa en la Figura 5.

Con este contenido de cemento óptimo, se revisaron y definieron los valores los vacíos en el agregado mineral, VAM, con un valor de 15.6% , los vacíos llenos de cemento asfáltico, VAF, con un valor del 75.0% , un porcentaje de cemento asfáltico efectivo, y una relación de filler pasa Malla No. 200 y cemento asfáltico igual a 1.01. Todas estas propiedades volumétricas cumplen con los valores recomendados en las especificaciones citadas.

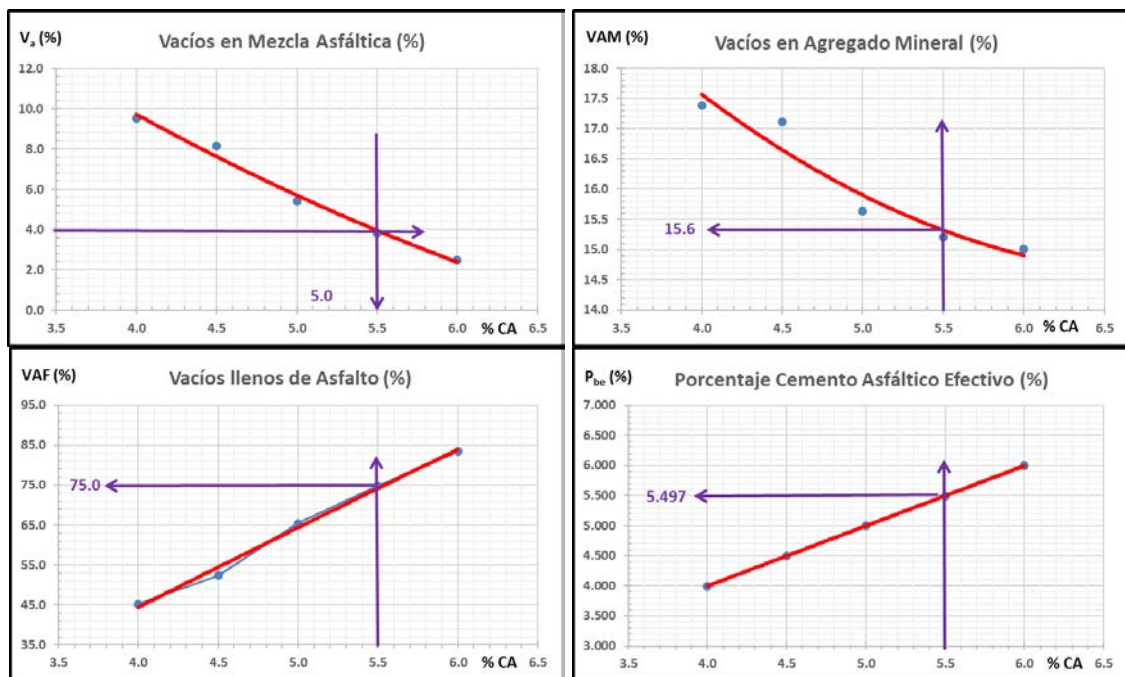


Figura 5. Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

5.2 Resultados del Método Universal de Caracterización de Ligantes, UCL.

En la producción de las 36 probetas, se calculó la densidad de la mezcla compacta, G_{mb} , densidad máxima G_{mm} y los vacíos en la mezcla asfáltica, V_a . Estos resultados para los dos tipos de cementos asfálticos se presentan en la Tabla 3.

El promedio y desviación estándar se obtuvo de los valores de densidad aparente y vacíos de 6 probetas en cada uno de los 6 tipos de mezclas asfáltica, en total 36 probetas. La densidad aparente promedio compacta de las probetas fabricadas con material calizo son de 1.966 y 1.998, y son mayores que los valores de densidad aparente promedio compacta de las mezclas fabricadas con material basalto y granito, que tienen valores entre 1.847 y 1.946. Para estos promedios de los grupos de mezclas asfálticas se tiene un COV entre 0.41 y 0.98%, valores muy bajos lo cual indica poca discrepancia entre los valores obtenidos.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 3. Valores promedio, desviación estándar y coeficiente de desviación.

	PÉTREO CALIZO		PÉTREO GRANITO		PÉTREO BASALTO	
	Densidad Aparente G_{mb}	Vacíos MA (%)	Densidad Aparente G_{mb}	Vacíos MA (%)	Densidad Aparente G_{mb}	Vacíos MA (%)
PG76-22						
Promedio	1.966	22.4	1.847	27.0	1.859	26.7
Desviación Estándar	0.008	0.315	0.009	0.362	0.013	0.494
Coficiente de Desviación , COV	0.41%	1.41%	0.50%	1.34%	0.67%	1.85%
	PÉTREO CALIZO		PÉTREO GRANITO		PÉTREO BASALTO	
	Densidad Aparente G_{mb}	Vacíos MA (%)	Densidad Aparente G_{mb}	Vacíos MA (%)	Densidad Aparente G_{mb}	Vacíos MA (%)
PG64-22						
Promedio	1.998	21.1	1.860	26.5	1.946	23.3
Desviación Estándar	0.008	0.321	0.016	0.629	0.019	0.752
Coficiente de Desviación , COV	0.41%	1.52%	0.86%	2.37%	0.98%	3.23%

Es importante mencionar que el promedio de los vacíos en las probetas con agregado pétreo granito y basalto son del mismo orden, valores entre 23.3 y 27.0%, sin embargo, las probetas con agregado pétreo calizo tienen valores de 21.2 y 22.4%, discrepando de los anteriores. Para los vacíos en la mezcla asfáltica, se tiene un COV entre 1.41 y 3.23%. Con la misma tendencia, los valores bajos del COV, indica poca discrepancia entre los valores de vacíos obtenidos. En ambos casos, estos bajos valores indican un procedimiento de fabricación de las probetas de muy buena calidad.

Recordando que la fabricación de todas las 36 probetas fue realizada por un procedimiento idéntico, aplicando una energía de compactación de 50 golpes por cara, a través de martillo de impacto Marshall. Se observó en la fabricación que las alturas finales de las probetas marcan una diferencia importante. Para el cemento asfáltico PG76-22, para las probetas con material calizo, basalto y granito, las aturas promedio de 6 probetas son: 65.67; 69.50 y 69.72 mm, con valores de COV igual a 0.56; 0.79 y 0.64%, respectivamente.

Para el cemento asfáltico PG64-22, para las probetas con material calizo, basalto y granito, las aturas promedio de 6 probetas son: 64.33; 69.72 y 69.11 mm, con valores de COV igual a 1.09; 1.96 y 1.32%, respectivamente.

Esto se debe a que los materiales tipo granito y basalto, por su microtextura, presentan un mayor coeficiente de rozamiento interno entre sus partículas que el material calizo. Por lo que, para la misma energía de compactación las probetas fabricadas con material calizo tendrán una menor altura y una mayor densidad aparente.

Adicionalmente, en la Figura 6 se muestran los resultados de las Pérdida al Cántabro promedio de 3 probetas ensayadas a 25°C en la máquina de Los Ángeles, sin ningún tipo de carga abrasiva. Para cada tipo de material pétreo, se tienen el resultado de promedios de 3 probetas ensayadas en seco, y 3 probetas ensayadas después de un acondicionamiento en agua a 60°C durante 24 horas. [3, 4].

La contribución a mejorar la adhesividad de los cementos asfálticos modificados, PG76-22 es mucho mayor que lo que aporta un cemento asfáltico convencional, PG64-22. Las Pérdidas al Cántabro empleando los primeros son bastante menor que empleando los segundos, tanto en seco como en húmedo.

Si se pone foco a los resultados en húmedo, donde está la acción del agua, para el PG76-22, las Pérdidas al Cántabro para el material calizo son igual al 35.0%, para el material granito son igual al 59.9% y para el material basalto son igual al 58.7%. En estos dos últimos materiales se tiene al menos, un 67.7% más de pérdidas que al usar material calizo.

Si se analiza los resultados para el PG64-22, las Pérdidas al Cántabro para el material calizo son igual al 40.7%, para el material granito son igual al 95.0% y para el material basalto son igual al 96.1%. De igual forma, en los dos últimos materiales se tiene al menos, un 133.4% más de pérdidas que al usar material calizo.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

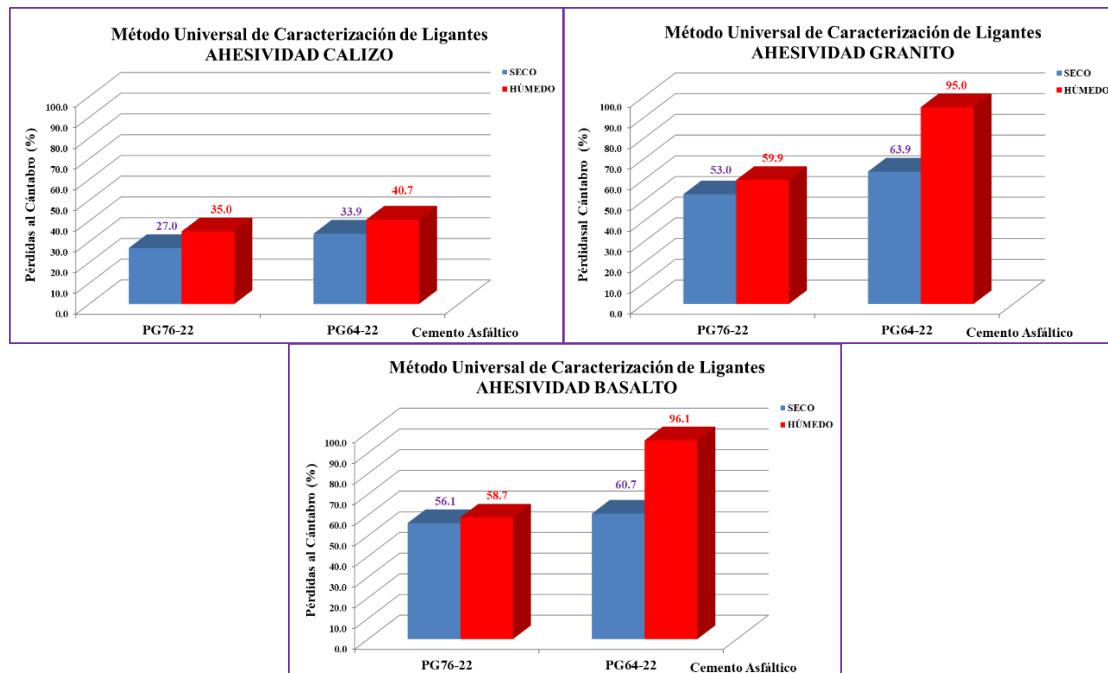


Figura 6. Pérdidas al Cántabro por adhesividad.

Para ambos tipos de cementos asfálticos, PG76-22 y PG64-22, es importante poner atención al deterioro por desenvuelta o desnudez, *stripping*, cuando se emplee materiales de procedencia de roca granito y basalto al 100% en su granulometría. Se tienen que considerar el empleo de algún aditivo o agente promotor de adherencia en la formulación de la mezcla asfáltica.

5.3 Resultados del esfuerzo a tensión indirecta, ITS.

Las Tablas 4 y 5 a continuación, contienen los resultados de los esfuerzos a tensión indirecta, ITS o IDT, de las diferentes mezclas asfálticas diseñadas y descritas en el apartado 5.1 de este informe técnico, y resultados para cada uno de los cementos asfálticos empleados, PG76-22 y PG64-22, mismos que llevan en un 5.5% en peso del agregado pétreo.

Para los tres tipos de materiales pétreos, calizo, granito y basalto, empleados en toda la granulometría descrita en el apartado 4.1, Tabla 2 y Figura 2, las probetas se fabricaron mediante el compactador giratorio, CGS, a un número de giros máximo, $N_{m\acute{a}x}$ de 100 giros.

Con este contenido de cemento asfáltico y energía de compactación, se obtuvo para el PG76-22, densidades compactas de la mezcla asfáltica, G_{mb} , de 2.236; 2.278 y 2.420, para los materiales pétreos de basalto, granito y caliza, respectivamente. Adicional y respectivamente, también se obtuvieron vacíos en la mezcla asfáltica, V_a , de 7.5%; 8.3% y 2.3%.

Para el PG64-22, las densidades compactas de la mezcla asfáltica, G_{mb} , son igual a 2.285; 2.276 y 2.417, para los materiales pétreos de basalto, granito y caliza, respectivamente. Adicional y respectivamente, también se obtuvieron vacíos en la mezcla asfáltica, V_a , de 7.3%; 8.8% y 2.7%.

Las probetas con material calizo, basalto y granito, fabricadas con cemento asfáltico PG76-22, para las probetas con material calizo, basalto y granito, las aturas promedio de 6 probetas son: 57.68; 64.64 y 63.80 mm, y para el cemento asfáltico PG64-22, para las probetas con material calizo, basalto y granito, las aturas promedio de 6 probetas son: 57.60; 62.53 y 62.56 mm.

Como se comentó anteriormente, esto se debe a que los materiales tipo granito y basalto, por su microtextura, presentan un mayor coeficiente de rozamiento interno entre sus partículas que el material calizo. Por lo que, para la misma energía de compactación las probetas fabricadas con material calizo tendrán una menor altura y una mayor densidad aparente.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 4. Valores promedio de esfuerzo a tensión indirecta y conservación en húmedo.

MATERIAL TIPO	ALTURA PROMEDIO (mm)	FUERZA MÁXIMA P (kN)	ESFUERZO TENSIÓN σ (Mpa)	CONDICIÓN	PROMEDIO σ (Mpa)	IDT CONSERVADO (%)
CALIZO PG76-22	57.67	21.88	1.642	$\sigma_{\text{húm}}$	1.833	93.8
	57.72	25.86	1.939			
	57.96	25.70	1.919			
	57.84	29.45	2.203	σ_{seco}	1.955	
	57.36	22.68	1.711			
	57.54	25.92	1.949			
MATERIAL TIPO	ALTURA PROMEDIO (mm)	FUERZA MÁXIMA P (kN)	ESFUERZO TENSIÓN σ (Mpa)	CONDICIÓN	PROMEDIO σ (Mpa)	IDT CONSERVADO (%)
GRANITO PG76-22	63.32	28.65	1.958	$\sigma_{\text{húm}}$	1.994	106.8
	64.15	27.27	1.840			
	63.53	32.09	2.186			
	63.60	27.01	1.838	σ_{seco}	1.868	
	63.52	30.63	2.087			
	64.65	25.09	1.680			
MATERIAL TIPO	ALTURA PROMEDIO (mm)	FUERZA MÁXIMA P (kN)	ESFUERZO TENSIÓN σ (Mpa)	CONDICIÓN	PROMEDIO σ (Mpa)	IDT CONSERVADO (%)
BASALTO PG76-22	63.18	20.42	1.398	$\sigma_{\text{húm}}$	1.048	85.8
	64.61	12.89	0.863			
	65.42	13.32	0.881			
	66.10	11.73	0.768	σ_{seco}	1.221	
	63.76	24.68	1.675			
	64.77	18.26	1.220			

En las Tablas 4 y 5, los resultados de los esfuerzos a tensión indirecta, ITS o IDT, y el valor conservado se obtuvieron de especímenes ensayados, en seco y húmedo de acuerdo a lo descrito en el apartado 4.3 y normas citadas en el mismo. Como se observa en ambas tablas, los valores conservados de los esfuerzos a tensión indirecta están arriba del 85%, cumpliendo en todos los casos.

Del ensayo de esfuerzos a tensión indirecta, ITS o IDT, se puede concluir que el daño inducido por agua en los 6 tipos de mezclas asfálticas no se presentaría en la vida útil. Sin embargo, hay que tener en cuenta que aplicar este ensayo a mezclas asfálticas con 100% de agregado pétreo calizo, es muy diferente que aplicarlos a mezclas asfálticas con 100% de agregado pétreo de granito o basalto. Los vacíos en la mezcla asfáltica son muy diferentes para la misma granulometría y energía de compactación.

5.4 Resultados de las Deformaciones Plásticas Permanentes, HWTT.

Para el ensayo de deformaciones plásticas empleando el ensaye HWTT, se fabricaron para cada tipo de mezcla asfáltica 4 probetas con las mismas características y serie de fabricación que las probetas empleadas en para evaluar los esfuerzos a tensión indirecta.

Los resultados de la Tabla 6 cumplen presentan a los 10,000 ciclos de carga y 50°C, excelentes valores de deformaciones plásticas las mezclas con materiales basalto y granito, todo lo contrario, fue para las fabricadas con material calizo, a pesar que su densidad, G_{mb} , y sus vacíos en la mezcla asfáltica, V_a , indican una mayor consolidación. La influencia del cemento asfáltico modificado es clara, provee de mayor resistencia a deformaciones plásticas permanentes. No se apreció en ninguna de las mezclas asfálticas desenvuelta o pérdidas de material.



Tabla 5. Valores promedio de esfuerzo a tensión indirecta y conservación en húmedo.

MATERIAL TIPO	ALTURA PROMEDIO (mm)	FUERZA MÁXIMA P (kN)	ESFUERZO TENSIÓN σ (Mpa)	CONDICIÓN	PROMEDIO σ (Mpa)	IDT CONSERVADO (%)
CALIZO PG64-22	57.68	21.52	1.615	$\sigma_{\text{húm}}$	1.770	92.6
	57.52	25.36	1.908			
	57.45	23.72	1.787			
	57.39	27.71	2.089	σ_{seco}	1.912	
	57.57	22.55	1.695			
	58.00	26.17	1.953			

MATERIAL TIPO	ALTURA PROMEDIO (mm)	FUERZA MÁXIMA P (kN)	ESFUERZO TENSIÓN σ (Mpa)	CONDICIÓN	PROMEDIO σ (Mpa)	IDT CONSERVADO (%)
GRANITO PG64-22	62.52	33.06	2.289	$\sigma_{\text{húm}}$	2.143	108.4
	63.18	31.10	2.130			
	61.85	28.75	2.011			
	62.55	27.38	1.894	σ_{seco}	1.978	
	62.60	24.45	1.691			
	62.65	33.99	2.348			

MATERIAL TIPO	ALTURA PROMEDIO (mm)	FUERZA MÁXIMA P (kN)	ESFUERZO TENSIÓN σ (Mpa)	CONDICIÓN	PROMEDIO σ (Mpa)	IDT CONSERVADO (%)
BASALTO PG64-22	61.02	25.87	1.834	$\sigma_{\text{húm}}$	1.637	110.0
	62.74	22.09	1.524			
	62.25	22.36	1.554			
	64.02	16.45	1.112	σ_{seco}	1.489	
	62.32	26.17	1.817			
	62.84	22.33	1.538			

Tabla 6. Resultados de deformaciones plásticas permanentes, HWTT.

MATERIAL TIPO	PIERNA	VACÍOS V_a (%)	DENSIDAD G_{mb}	DEFORMACIÓN PLÁSTICA HWTT (mm)	MATERIAL TIPO	PIERNA	VACÍOS V_a (%)	DENSIDAD G_{mb}	DEFORMACIÓN PLÁSTICA HWTT (mm)
BASALTO	IZQ	7.35	2.300	3.76	BASALTO	IZQ	7.80	2.294	1.75
	DER	7.54	2.295	3.82		DER	6.74	2.320	1.95
GRANITO	IZQ	8.28	2.276	0.97	GRANITO	IZQ	8.72	2.271	2.42
	DER	8.41	2.273	1.25		DER	8.82	2.268	2.78
CALIZO PG76-22	IZQ	2.48	2.421	3.79	CALIZO PG64-22	IZQ	2.89	2.416	9.9
	DER	2.04	2.431	4.76		DER	2.57	2.424	11.38

6 Conclusiones

De acuerdo a los hallazgos de este estudio de investigación, con soporte en los resultados obtenidos en los ensayos practicados a los diferentes materiales, a manera de conclusión se puede mencionar lo siguiente.

De acuerdo al Método UCL, para ambos tipos de cementos asfálticos, PG76-22 y PG64-22, es importante poner atención al deterioro por desvuelta o desnudez, *stripping*, cuando se emplee materiales de procedencia de roca granito y basalto al 100% en su granulometría. Se tiene que considerar el empleo de algún aditivo o agente promotor de adherencia en la formulación de la mezcla asfáltica.

Del ensayo de esfuerzos a tensión indirecta, ITS o IDT, se puede concluir que el daño inducido por agua en los 6 tipos de mezclas asfálticas no se presentaría en la vida útil. Sin embargo, hay que tener en cuenta que aplicar este ensayo a mezclas asfálticas con 100% de agregado pétreo calizo, es muy diferente que aplicarlos a mezclas asfálticas con 100% de agregado pétreo de



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

granito o basalto. Los vacíos en la mezcla asfáltica son muy diferentes para la misma granulometría y energía de compactación.

La influencia del cemento asfáltico modificado es clara, provee de mayor resistencia a deformaciones plásticas permanentes. No se apreció en ninguna de las mezclas asfálticas desmenuamiento o pérdidas de material en el ensayo de HWTT.

Por último, en la ecuación del uso de materiales para el Estado de Nuevo León, hay que considerar un actor no menos importante, el agregado sintético producto de la producción de acero, la escoria de acería, el cual cuenta con calidad para los propósitos de los pavimentos. Adicionalmente, se tiene que hablar de la capacidad de producción de los materiales estudiados.

7 Referencias

- [1] Caro-Spín Silvia y Álvarez-Lugo Alex Eduardo. (2011). Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.14603>. Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquia N.º 58 pp. 95-104. Marzo, 2011. Colombia.
- [2] Hend Ali Omar, Nur Izzi Md. Yusoff, Muhammad Mubarak, and Halil Ceylan. (2020). Effects of moisture damage on asphalt mixtures. ScienceDirect. Journal of Traffic and Transportation Engineering. Volume 7, Issue 5, October 2020, Pages 600-628. www.sciencedirect.com
- [3] Félix E. Pérez Jiménez y Miró Recasens Rodrigo. (1999). Evaluación de la cohesión y susceptibilidad térmica de los ligantes bituminosos mediante el método funcional UCL". 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Sevilla, España.
- [4] Miró Recasens Rodrigo. (1995). Metodología para la Caracterización de Ligantes Asfálticos Mediante el Empleo del Ensayo Cántabro. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, ETSECCPB. Universidad de Cataluña, Barcelona, España.
- [5] Arámbula Mercado, Edith. (2007). Influence of Fundamental Material Properties and Air Void Structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes. Doctoral Thesis. Texas A&M University. Texas State, EEUU.
- [6] Caro Spín Silvia. (2009). A COUPLED MICROMECHANICAL MODEL OF MOISTURE-INDUCED DAMAGE IN ASPHALT MIXTURES: FORMULATION AND APPLICATIONS. Doctoral Thesis. Texas A&M University. Texas State, EEUU.
- [7] Pérez Salazar Alfonso, Martínez Martínez Carlos Daniel, Curiel Íñiguez Norma Patricia. (2023). Caracterización y clasificación de materiales pétreos usados en capas de rodadura respecto al TxDOT Fase 2. Publicación Técnica No. 768. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.
- [8] Estado de Nuevo León. (2009). Ley para la Construcción y Rehabilitación de Pavimentos del Estado de Nuevo León. Ley Ambiental del Estado de Nuevo León. Monterrey, México.
- [X] A. Bhasin. (2006). Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot Mix Asphalt to Moisture Damage. Transportation Research Record. Vol. 1970. pp. 3-13
- [9] Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013. (2013). Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño. CDMX. Julio 2013. 2011. ISBN 978-607-8134-19-9.
- [10] ASTM D6931. (2012). Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures.
- [11] UNE-EN 12697-12:2019. (2021). Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.
- [12] TxDOT Designation: Tex-242-F. (2021). HAMBURG WHEEL-TRACKING TEST. Texas Department of Transportation, TxDOT. Austin, Texas.
- [13] AASHTO T 324. (2023). Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures.