



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

EFFECTO DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO EN LA RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DE ALTO DESEMPEÑO

Francisco Javier Romero Lozano¹, Jordi Aparicio Guirao², Sergio Serment Moreno³, Alejandro Castellanos Cordero⁴

¹Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería División de Posgrado, México, fj.romero@outlook.com

²Construcciones Rubau, México, japaricio@rubau.com

³Calidra, México, sserment@calidra.com.mx

⁴CEVITER, México. alejandro.castellanos@ceviter.com.mx

Resumen

El hidróxido de calcio, comúnmente conocido como hidróxido de calcio o cal apagada, se empezó a utilizar en EE. UU. para la producción de mezclas asfálticas en caliente en la década de los 70's con dos objetivos principales: 1) mejorar la adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto y 2) incrementar la cohesión y resistencia al daño por humedad. Adicional a esto, en diversos estudios y aplicaciones se ha demostrado que también incrementa la resistencia a la deformación plástica, el módulo dinámico y disminuye la velocidad de envejecimiento, lo que alarga la vida útil de la mezcla. Esto se debe principalmente a la interacción química que tiene el hidróxido de calcio con la superficie de los agregados pétreos y con los compuestos polares y radicales libres presentes en el asfalto. En México, en la mayoría de los diseños de mezclas asfálticas de alto desempeño se evalúan solamente la susceptibilidad a la humedad mediante TSR y la resistencia a la deformación plástica mediante la rueda cargada de Hamburgo. Adicional a estas evaluaciones de desempeño, actualmente se busca evaluar la susceptibilidad al agrietamiento como una medida indirecta de la resistencia a la fatiga de las mezclas. En las últimas décadas, se han desarrollado diferentes métodos de prueba para evaluar este parámetro, de entre los cuales se eligió la metodología I-FIT para el presente proyecto. En la presente investigación, se evaluó una mezcla asfáltica de alto desempeño con un asfalto modificado con polímero, clasificado mediante grado de desempeño (PG) como 76V-22, agregados gruesos basálticos y arena de basalto y andesita. A esta mezcla se le adicionó hidróxido de calcio en dos proporciones, 1 y 2% de hidróxido. Se evaluó el desempeño de las tres mezclas mediante TSR y rueda cargada de Hamburgo. Posteriormente las muestras se sometieron a un proceso de envejecimiento forzado en el laboratorio y se evaluó la resistencia al agrietamiento mediante flexión de especímenes semicirculares, SCB por sus siglas en inglés.

Palabras Clave: agrietamiento, hidróxido de calcio, mezcla asfáltica, semicircular bending.

1 Introducción

El hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) es actualmente conocido como un filler activo en las mezclas asfálticas [1-3]. El término filler activo hace referencia a las interacciones químicas que tiene el hidróxido de calcio con el asfalto y la superficie del agregado pétreo. El hidróxido de calcio es capaz de neutralizar el efecto dañino de los finos arcillosos que pueda contener el agregado pétreo. También, el hidróxido de calcio se siente atraído por carga electrostática a la superficie de los agregados principalmente la de aquellos con alto porcentaje de sílice, como el basalto y el granito. El hidróxido de calcio presente en la superficie del agregado pétreo atrae moléculas polares que contienen grupos funcionales ácidos presentes en el asfalto y forma sales de tipo oxalato (Figura 1) [4]. Los oxalatos de calcio son sales

orgánicas insolubles en agua y al estar presentes en la interfaz entre el agregado pétreo y el asfalto, su presencia incrementa la adherencia, la resistencia al daño por humedad y le módulo dinámico. Además, al interactuar con estos grupos funcionales ácidos presentes en las moléculas polares, el hidróxido de calcio reduce la velocidad de formación o asociación de asfaltenos, lo que disminuye la velocidad de envejecimiento del asfalto, alargando el tiempo de vida útil de la mezcla asfáltica [5-8].

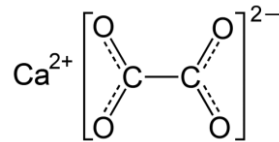


Figura 1. Oxalato de calcio. Sales insolubles formadas entre el hidróxido de calcio y compuestos polares presentes en el asfalto.

Debido al incremento en la rigidez que provoca el hidróxido en la mezcla, se recomienda que la dosificación sea entre 1 y 2.5%, para evitar que esta pudiera provocar agrietamientos prematuros. Debido a esto, en el presente trabajo se evaluó la susceptibilidad al agrietamiento utilizando la metodología I-FIT.

El presente trabajo pretende evaluar el efecto de la adición de hidróxido de calcio o cal hidratada en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa. Esta mezcla asfáltica se estará produciendo y colocando en el corto plazo. Para esto, la adición del hidróxido de calcio se puede realizar en plantas continuas y discontinuas. Uno de los métodos más utilizados es el proceso de marinado. Se mezcla el hidróxido de calcio necesaria con una de las fracciones del agregado pétreo y un ligero contenido de agua (>3% para el grueso y >6% para el fino), se deja reposando durante una noche y al día siguiente se coloca el agregado en las tolvas como normalmente se hace. También, muchas plantas de producción discontinua cuentan ya con un silo de almacenamiento y unidad de pesaje y alimentación para la adición de filler. En el caso de las plantas de producción discontinua, es posible adicionar el hidróxido directamente al tambor mezclador, previo a la adición del asfalto mediante un silo de almacenamiento y un sistema de inyección neumático o por medio de elevadores helicoidales. También se puede adicionar utilizando el anillo para la adición de RAP o en el caso de las platas de doble tambor, la cal se puede adicionar al tambor externo previo a la inyección del asfalto [9].

2 Desarrollo

Determinar el desempeño de una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa consta de diferentes fases, entre las cuales se encuentra el aseguramiento de la calidad de los materiales que estarán presentes en la mezcla asfáltica, tales como agregado pétreo, ligante asfáltico y cal, en la Tabla 1 se muestra la normativa mexicana aplicable para cada material a utilizar.

Tabla 1. Normativa aplicable para calidad de los materiales

Normas y Manuales	Designación
Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG)	N.CMT.4.05.004
Calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas	N.CMT.4.04
Calidad de cal para mezclas asfálticas	N.CMT.4.05.007

El desempeño de la mezcla se evalúa en 3 niveles de acuerdo con el nivel de tránsito para el que se empleará. La normativa mexicana, MMP-4-05-046/21, presenta los siguientes niveles de diseño para cada nivel de tránsito tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Nivel de diseño de acuerdo con el nivel de tránsito

Nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Ensayos recomendados
Nivel I Tránsito bajo	menor a 1 000 000	Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	de 1 000 000 a 10 000 000	Diseño volumétrico, susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	de 10 000 000 a 30 000 000	Diseño volumétrico, susceptibilidad a la humedad, susceptibilidad a la deformación permanente y módulo dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	mayor a 30 000 000	Diseño volumétrico, susceptibilidad a la humedad, susceptibilidad a la deformación permanente, módulo dinámico, fatiga

2.1 Verificación de la calidad de los materiales pétreos

Los materiales pétreos utilizados para el estudio es grava de ½” y arena producto de trituración. Se determinó su calidad de acuerdo con la normativa aplicable y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3, los cuales arrojan cumplimiento con los requerimientos.

Tabla 3. Calidad de agregado pétreo

Propiedad física	Normativa	Resultado	Requerimiento
Equivalente de Arena %	MMP.4.04.004	80	55 mín.
Azul de metileno mg/g	MMP.4.04.014	3	12 máx.
Abrasión de Los Angeles, %	MMP.4.04.006	10	30 máx.
MicroDeval, %	AASHTOTP58	8	15 máx.
Intemperismo Acelerado	MMP.4.04.008	3.2	15 máx.
Densidad del Grueso	MMP.04.003	2.702	2.4 mín
Densidad del fino	MMP4.04.003	2.623	2.4 mín
Absorción del Grueso%	MMP.4.04.003	1.4	reportar
Absorción del Fino%	MMP.4.04.003	0.9	reportar
Partículas aplanadas + alargadas, %	MMP.4.04.005	31	35 máx.
Angularidad del agregado fino, %	AASHTO T.304	50	45 mín.
1 o más caras fracturadas, %	MMP.4.04.013	100	100 mín.
2 caras fracturada, %	MMP.4.04.013	100	90 mín.
Desprendimiento por fricción, %	MMP.4.04.009	92	20 máx.

2.2 Verificación de calidad del cemento asfáltico

El cemento asfáltico utilizado corresponde a un PG 76V-22 modificado con polímero tipo I. Su calidad se verificó y los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Calidad del cemento asfáltico

Ensayo	Normativa	Resultado	Requerimiento
Condición Original			
Punto de inflamación	MMP-4-05-007	PI = 282°C	230 °C mín.
Viscosidad rotacional	MMP-4-05-005	$\delta = 2.927$ Pa.s	3 Pa.s máx
Penetración	MMP-4-05-006	47 dmm	40-90
Penetración	MMP-4-05-006	-	NA
Punto de reblandecimiento	MMP-4-05-009	68.5	55°C mínimo
Separación anillo y esfera	MMP-4-05-022	2	2°C máx
Recup. elástica por torsión	MMP-4-05-024	Recup =63.9%	45% mín.
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	MMP-4-05-025	G*/Sen = 2.601kPa	1 kPa mín
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)			
Pérdida por calentamiento	MMP-4-05-027	CM = -0.293%	± 1.0 % máximo
Recup elástica ductilómetro	MMP-4-05-026	0.812	75% mínimo
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	MMP-4-05-025	G*/Sen = 5.161 kPa	2.2 kPa mínimo
JNR a 3.2 kPa en MSCR	MMP-4-05-055	JNR3.2 = 0.662 kPa-1	1 máximo
JNR a 0.1 kPa en MSCR	MMP-4-05-055	JNR0.1= 0.475 kPa-1	NA
JNRdiff	MMP-4-05-055	Jnr diff = 39.37 %	NA
Respuesta elástica en MSCR	MMP-4-05-055	RE0.1 = 70.23 %	NA
Respuesta elástica en MSCR	MMP-4-05-055	RE3.2 = 48.66 %	30 mínimo
REdif (%)	MMP-4-05-055	Rdiff = 30.71 %	NA
Después de Envejecimiento a Presión (PAV)			
Envejecimiento en PAV	ASTM D6521-13	G*(sen)= 964.7 kPa	5000 kPa máximo
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	MMP-4-05-025	S = 74.8	300 MPa máximo
Rigidez a flexión en Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	MMP-4-05-029	m = 0.336	0.300 mínimo

2.3 Propuesta granulométrica

Dentro del estudio realizado se utilizaron tres mezclas: M0 que corresponde a la mezcla base, es decir, no contiene hidróxido de calcio, la mezcla M1 que contiene el 1% de hidróxido de calcio y la mezcla M2 que contiene el 2% de hidróxido de calcio. Las proporciones utilizadas quedaron de la siguiente manera: M0 - 57% grava y 43% arena, M1- 57% grava, 42% arena y 1% de hidróxido de calcio, por último, M2 - 57% grava, 42% arena y 1% de hidróxido de calcio, dando como resultado las propuestas granulométricas mostradas en la Tabla 5, la gráfica de dichas propuestas se presenta en la Figura 2.

Tabla 5. Propuestas granulométricas

Malla	Abertura mm	Porcentaje que pasa			Puntos de control	
		M0	M1	M2	mínimo	máximo
2"	50.80	100.0	100.0	100.0	100	100
1 1/2"	37.50	100.0	100.0	100.0	100	100
1"	25.00	100.0	100.0	100.0	100	100
3/4"	19.00	100.0	100.0	100.0	100	100
1/2"	12.50	96.2	97.8	97.8	90	100
3/8"	9.60	73.4	84.8	84.8	76	92
1/4"	6.30	35.1	63.0	63.0	56	81
No. 4	4.75	13.2	50.5	50.5	45	74
No. 10	2.00	1.2	31.5	31.8	25	55
No. 20	0.85	0.0	18.9	19.5	15	42
No. 40	0.43	0.0	12.5	13.2	11	32
No. 60	0.25	0.0	9.1	9.9	8	25
No. 100	0.15	0.0	7.0	7.8	5	18
No. 200	0.075	0.0	5.0	5.8	2	9

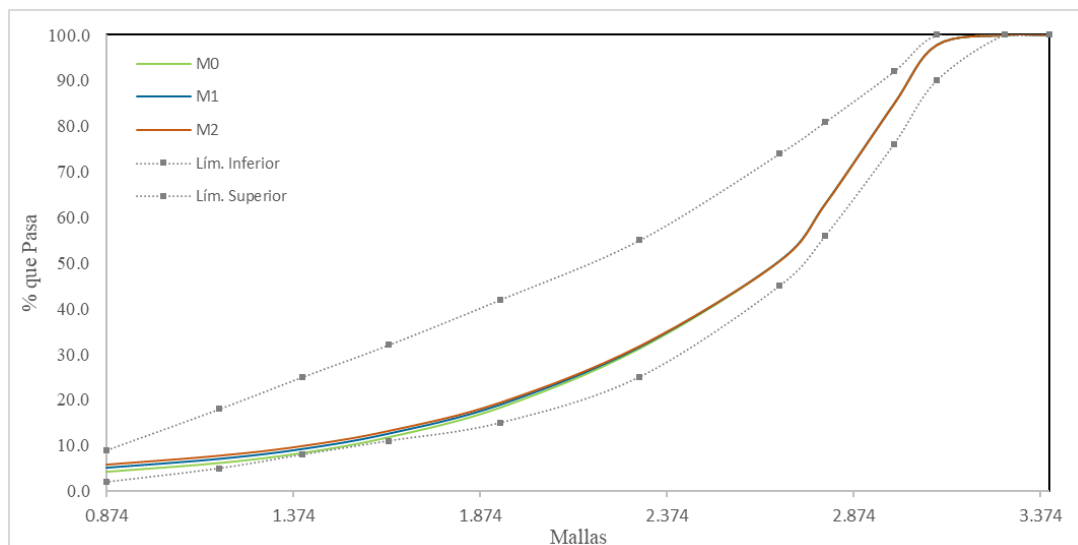


Figura 2. Curvas granulométricas

2.4 Diseño Volumétrico

Se elaboraron 10 probetas con cinco contenidos de asfalto diferentes, es decir, cada contenido por duplicado, se determinaron sus propiedades volumétricas. Lo anterior para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico, en la Tabla 6 se muestran los contenidos de asfalto óptimo para cada mezcla, así como sus propiedades volumétricas.

Tabla 6. Propiedades volumétricas

Mezcla	Pb	Gmb	Gmm	Vacíos (%)	VAM	VFA	Dp
M0	6.23	2.359	2.464	4.3	17	75	0.76
M1	5.85	2.365	2.472	4.3	16.3	73.5	0.96
M2	5.15	2 1/3	2.463	4.3	15.8	72.8	1.16

2.5 Susceptibilidad a la humedad

Para cada mezcla se elaboraron 6 probetas con el contenido de asfalto óptimo correspondiente, con una geometría de 150 mm de diámetro y 95 mm de altura, con un % de vacíos de $7 \pm 0.5\%$. Se separaron en dos subconjuntos de 3 probetas cada uno. Un subconjunto se sometió a congelamiento a -18°C y posteriormente a temperatura a 60°C , previo al ensayo se colocaron en un baño a 25°C , el subconjunto no acondicionado se colocó únicamente en un baño a 25°C previo al ensayo.

Ambos subconjuntos se sometieron a ensayo a tensión y se determinó el esfuerzo de cada probeta. El porcentaje de TSR se obtuvo de la relación del esfuerzo promedio del subconjunto acondicionado respecto al subconjunto no acondicionado. El valor mínimo requerido es del 80%.

Los valores obtenidos de las mezclas evaluadas a la susceptibilidad a la humedad se presentan en la Figura 3.

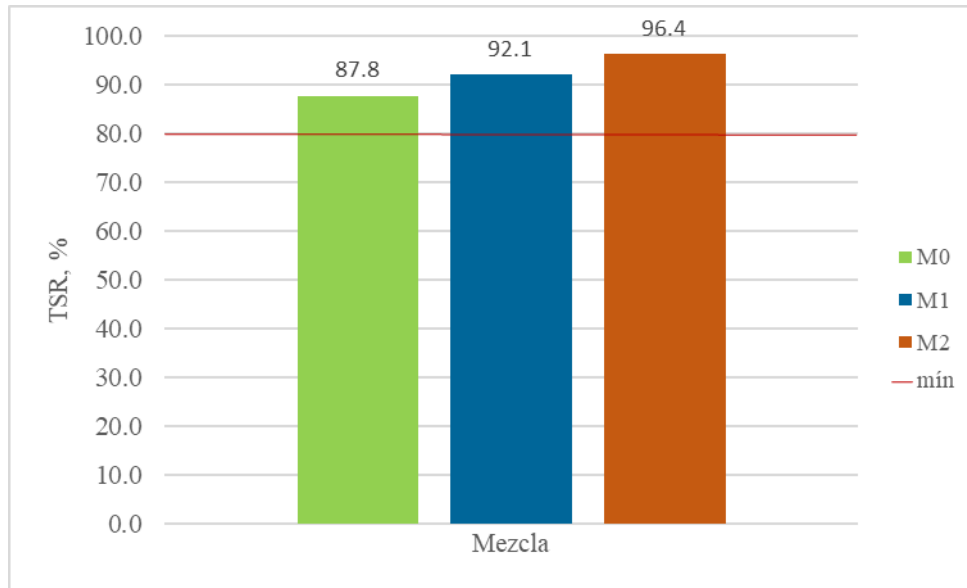


Figura 3 Ensayo de susceptibilidad a la humedad (TSR)

2.6 Susceptibilidad a la deformación permanente

Para cada mezcla se elaboraron 4 probetas con una geometría de 150 mm de diámetro y 50 mm de altura, con un % de vacíos de $7 \pm 0.5\%$.

Las probetas se colocaron en el molde del equipo para el ensayo de rueda cargada de Hamburgo. Los especímenes se acondicionaron por 30 min a 50°C en un baño de agua y se sometieron al paso de una rueda con carga de $705 \pm 4.5 \text{ N}$ a una velocidad de 50 pasadas por minuto durante 20,000 pasadas. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.

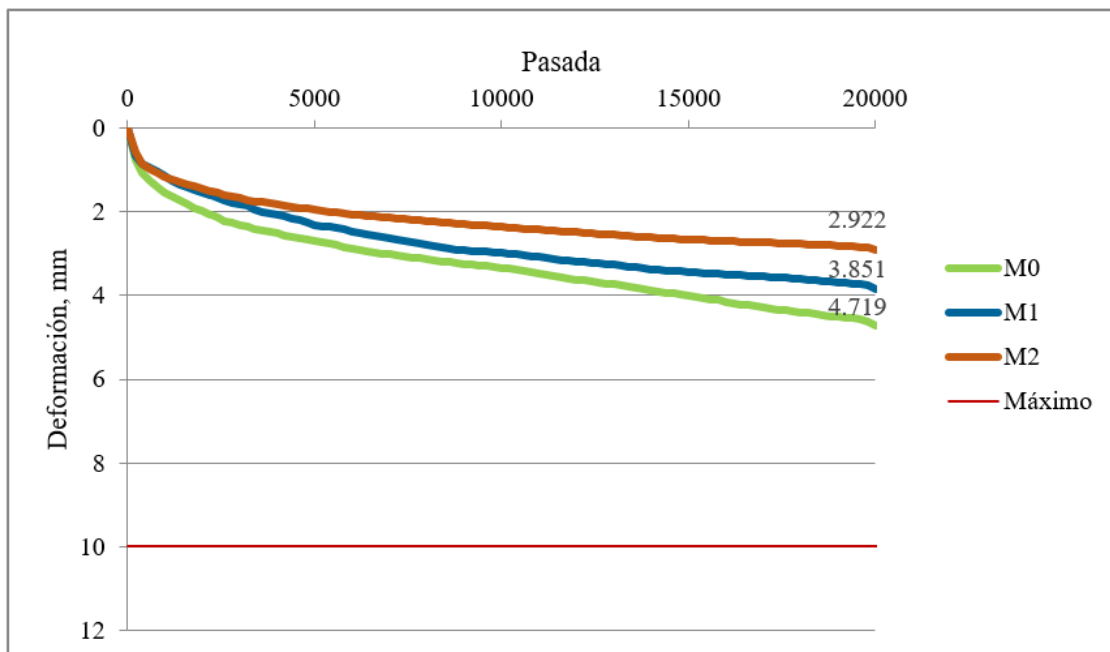


Figura 4. Resistencia a la deformación permanente

2.7 Índice de agrietamiento

Para cada mezcla se elaboraron 3 probetas con una geometría de 150 mm de diámetro y 120 mm de altura, con un % de vacíos de $7 \pm 0.5\%$. De cada probeta se obtuvieron 4 semicírculos, los cuales tenían una geometría final de 57 mm de espesor y 73 mm de radio.

A cada juego se le realizó una ranura al centro de su longitud con diferentes espesores un juego con 25 mm de profundidad, otro con 32 mm de profundidad y otra con 38 mm de profundidad.

Una vez preparados los especímenes se ensayaron a compresión, determinando la carga máxima aplicada y la deformación.

El valor crítico de índice de agrietamiento se determinó empelando la ecuación 1.

$$Jc = \frac{-1}{b} \left(\frac{dU}{da} \right) \quad (1)$$

Donde:

Jc= Índice de agrietamiento crítico (kJ/m²),

b=espesor de la ranura (m),

a=profundidad de la ranura (m),

U=energía de deformación hasta la falla (kJ), y

dU/da= variación de la energía de agrietamiento con la profundidad (kJ/m)

La energía de deformación para cada ensayo a diferente profundidad de ranura se determinó empleando la ecuación 2.

$$U = \sum_{i=1}^n (u_{i+1} - u_i) \times P_{i+\frac{1}{2}} \times (u_{i+1} - u_i) \times (P_{i+1} - P_i) \quad (2)$$

Donde:

P_i = carga aplicada (kN) en la aplicación del paso de carga i,

P_{i+1} = carga aplicada (kN) en la aplicación del paso de carga i+1,

u_i = desplazamiento de la cruceta (m) en el paso i, y

u_{i+1} = desplazamiento de la cruceta (m) en el paso i+1.

La variación de la energía de agrietamiento con la profundidad de la ranura (dU/da) de las mezclas M0, M1 y M2 se muestran en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7 respectivamente.

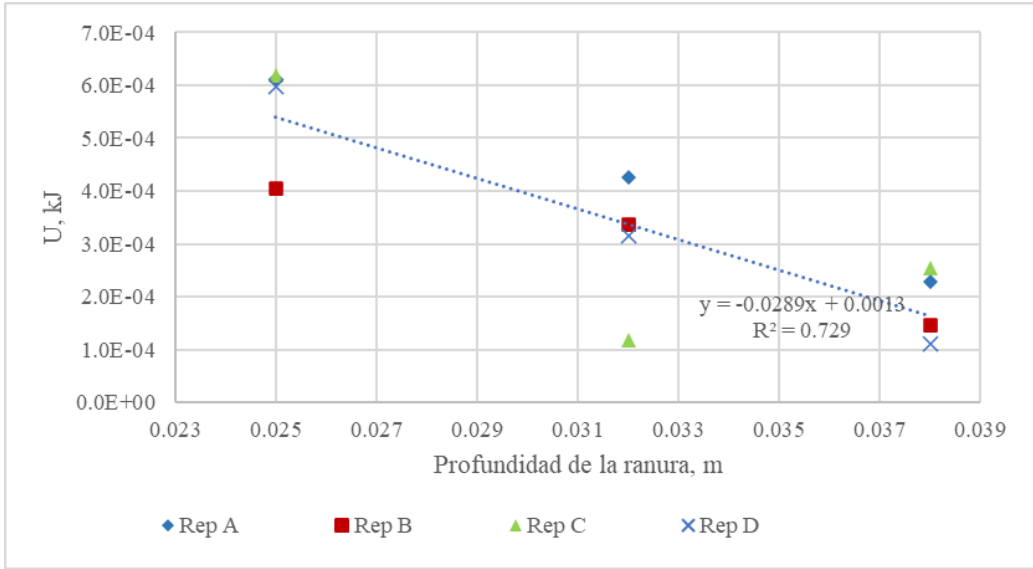


Figura 5. Energía de fractura en mezcla M0

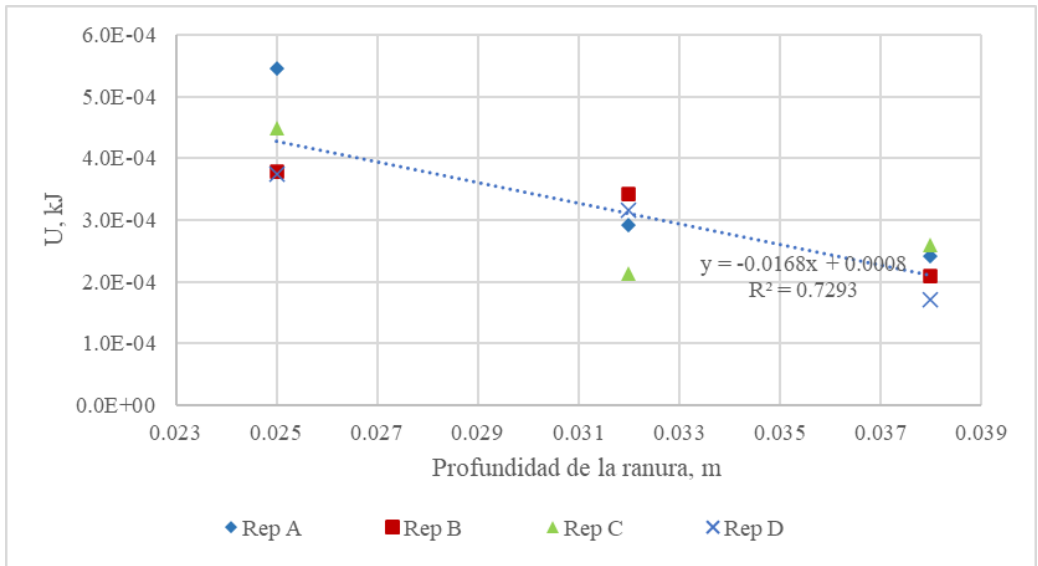


Figura 6. Energía de fractura en mezcla M1

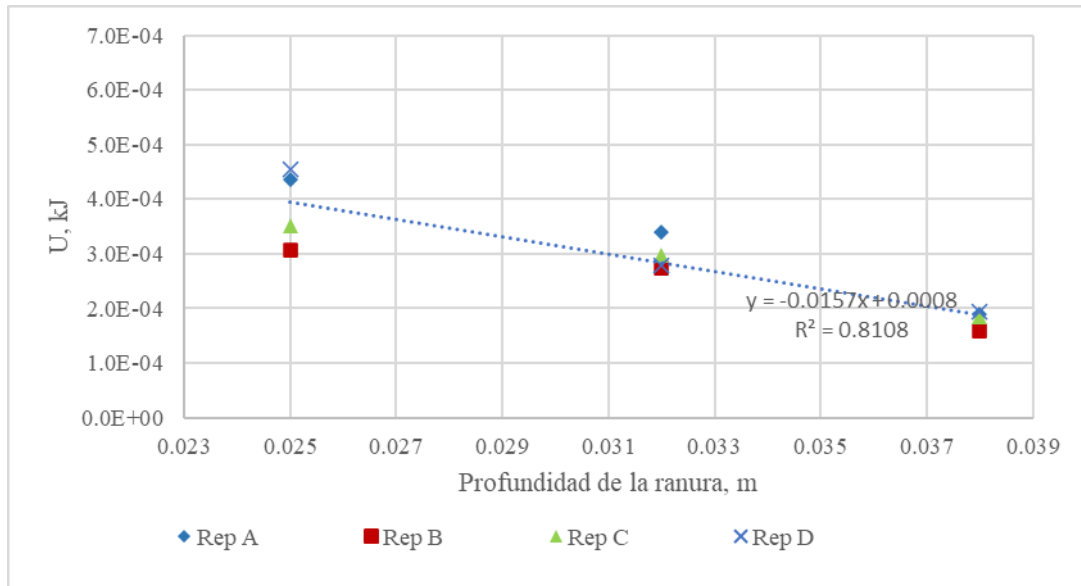


Figura 7. Energía de fractura en mezcla M2

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos del valor crítico de índice de agrietamiento de cada mezcla analizada.

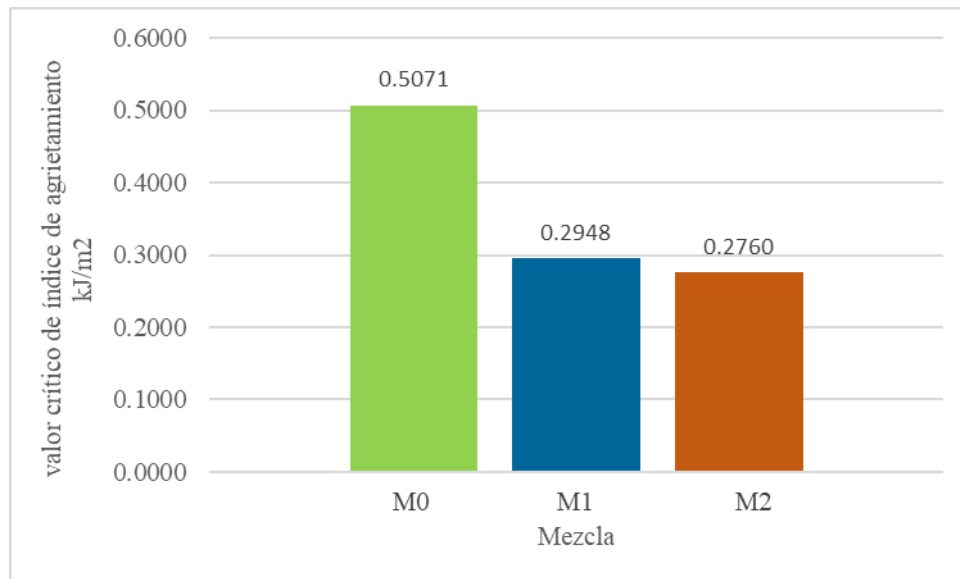


Figura 8. Índice de agrietamiento

Conclusiones

Las mezclas analizadas cumplen con los criterios establecidos para mezclas asfálticas de alto desempeño en México. El aporte de hidróxido de calcio ayuda a incrementar la adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, lo que disminuye la susceptibilidad a la humedad de la mezcla. Esto se debe a la formación de oxalatos de calcio, que son insolubles en agua, en la interfaz entre el agregado pétreo y el asfalto. Eso se puede observar en el incremento que presentan los resultados de TSR al ir incorporando el hidróxido de calcio.

También se observa un incremento en la resistencia a la deformación plástica de las mezclas con la adición del hidróxido de calcio. Debido a la interacción entre el calcio y las moléculas polares del ligante, se incrementa la rigidez de la mezcla, lo que se traduce en una menor deformación permanente en los ensayos de rueda cargada. Así mismo, al incrementar la rigidez de las mezclas, el índice de agrietamiento disminuye. Esto quiere decir que se requiere de una menor energía para la creación de nuevas superficies, lo que indica una mayor susceptibilidad al agrietamiento. Es por este incremento en la rigidez inicial, que el contenido de cal en las mezclas asfálticas debe limitarse a no más de 2.5 a 3%. Es importante resaltar que este efecto se observa a corto plazo, ya que la cal rigidiza al inicio, pero a largo plazo actúa como un agente antioxidante.

Los resultados presentados son la primera etapa de esta investigación. Para la segunda etapa, las mezclas analizadas serán sometidas a un proceso de envejecimiento acelerado. Posteriormente se evaluará nuevamente su resistencia al agrietamiento mediante el ensaye de Semicircular Bend. Esto para estudiar el efecto que tiene la adición de cal en el envejecimiento de las mezclas. Finalmente, se pretende construir un tramo de prueba donde se pueda colocar una sección con cada tipo de mezcla y poder evaluar su desempeño en campo.

3 Referencias

- [1] Little, D. N., Petersen J. C. (2005). *Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited*. Journal of Materials in Civil Engineering, 207-218. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(207)).
- [2] Little, D.N., Epps, J.A. (2001). *The Benefits of hydrated lime in hot mix asphalt*. Arlington, VA: National Lime Association. Consultado en: <http://www.lime.org/ABenefit.pdf>.
- [3] Lesueur, D., Petit, J., & Ritter, H. (2012). The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: A state-of-the-art review. Road Materials and Pavement Design, 14(1), 1-16. <https://doi:10.1080/14680629.2012.743669>.
- [4] Grajales J. A., Pérez L. M., Schwab A. P., Little, D.N. (2021). *Quantum chemical modelling of the effects of hydrated lime (calcium hydroxide) as a filler in bituminous materials*. ACS Omega, 3130-3139. doi:<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05519>.
- [5] Kakade, V. B., Reddy, M. A., Reddy, K. S. (2016). *Effect of aging on fatigue performance of hydrated lime modified bituminous mixes*. Construction and Building Materials, 113, 1034-1043. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.066>.
- [6] Hopman, P.C., Vanelstraete, A., Verhasselt, A., & Walter, D. (1999 May). *Effects of hydrated lime on the behaviour of mastics and on their construction ageing*. Proceedings of the 5th International Conference on Durable and Safe Road Pavements (Vol. 1, pp. 59–68). Warsaw, Poland: Polish Road and Bridge Research Institute.
- [7] Chachas, C.V., Liddle, W.J., Peterson, D.E., & Wiley, M.L. (1971). *Use of hydrated lime in bituminous mixtures to decrease hardening of the asphalt cement (Report No. PB 213 170)*. Salt Lake City, Utah: Utah State Highway Department.
- [8] Mohammad, L.N., Saadeh, S., Kabir, M., & Othman, A. (2008). Mechanistic properties of hot-mix asphalt mixtures containing hydrated lime. Transportation Research Record, 2051, 49–63. <https://doi.org/10.3141/2051-07>.

[9] National Lime Association (2003). *How to Add Hydrated Lime to Asphalt: An Overview of Current Methods*. Consultado en:
https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/how-to-add-lime.pdf.