



Evaluación de la adición de Hidróxido de Calcio a una mezcla templada con altas tasas de material reciclado (RAP)

Alfonso Díaz¹, Sergio Serment²,
Rosita Martínez³, Jorge Mejía⁴, Eymard Ávila⁵

¹ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Alfonso.diaz@ergon.com

² Calidra, Monterrey, México, sserment@calidra.com.mx

³ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Rosita.martinez@ergon.com

⁴ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Jorge.mejia@ergon.com

⁵ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Eymard.avila@ergon.com

Resumen

El Hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ha estado presente en la historia de la humanidad desde tiempos antiguos. Particularmente en la construcción de edificaciones y caminos. En la fabricación de mezclas asfálticas se ha utilizado desde 1910.

Se ha demostrado que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es más que un polvo de relleno y se le denomina como filler activo debido a las interacciones químicas que presenta en la mezcla asfáltica.

Los principales beneficios de su uso en las mezclas asfálticas son: a) mejora la adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto disminuyendo el daño causado por la humedad, b) incrementa la resistencia a la deformación plástica o formación de roderas y c) reduce la velocidad de envejecimiento del ligante asfáltico.

Este trabajo forma parte de una investigación integral de evaluación de la tecnología de mezcla asfáltica templada con altas tasas de RAP. En un estudio previo de los autores se encontró que la mezcla templada con 100% RAP y 3% de emulsión asfáltica alcanza y supera el desempeño de una mezcla asfáltica convencional para capa de base (base negra). Sin embargo, se busca reutilizar el RAP donde mayor valor pueda aportar alargando la vida útil de un pavimento.

En este estudio particular se evalúa el potencial beneficio de la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en una mezcla templada para que logre o mejore las propiedades de desempeño de una mezcla densa con material 100% virgen y asfalto convencional.

En una primera etapa se evaluaron las pruebas de TRS, M_{rt} , IDEAL-CT de la mezcla templada con tres contenidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y en la segunda etapa se evaluaron las pruebas de HWT, Curva maestra de módulo dinámico y resistencia a la fatiga, para la mezcla con el contenido óptimo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, obteniendo resultados de desempeño que cumplen con las especificaciones de una mezcla densa convencional.

Palabras Clave: Mezcla Templada, Hidróxido de Calcio, Emulsión Asfáltica

1 Introducción

El hidróxido de calcio, comúnmente conocido como cal hidratada o apagada, se utiliza en la fabricación de mezclas asfálticas desde 1910[1]. Se ha demostrado que el hidróxido de calcio no es solamente un polvo o relleno mineral, se le denomina como filler “activo” debido a las interacciones químicas que presenta en la mezcla asfáltica. Los beneficios principales de utilizar hidróxido de calcio en las mezclas asfálticas son; mejora la adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto y disminuye el daño causado por la humedad, incrementa la resistencia a la deformación plástica o formación de

roderas y reduce la velocidad de envejecimiento del ligante asfáltico, incrementando así el tiempo de vida útil de las mezclas asfálticas.[2, 3]

El mecanismo de reacción e interacciones que presenta la cal con las diferentes moléculas presentes en el asfalto aún es tema de estudio y no está del todo esclarecido. Sin embargo, en la literatura encontramos un mecanismo de reacción aceptado y al que se le atribuye en mayor medida los efectos observados en la mezcla asfáltica [4]. Las moléculas polares en el asfalto se unen por medio de puentes de hidrógeno a la superficie de los agregados pétreos, sin embargo, esta unión es fácilmente deshecha por el agua. La cal, debido a la carga eléctrica del calcio, reacciona con estas moléculas polares, preferentemente con los ácidos carboxílicos para formar complejos del tipo $\text{Ca}(\text{RCOO})_2$ como se muestra en la Figura 1 que se consideran como sales insolubles en agua. La formación de estas sales orgánicas insolubles en el agua que se da en la interfaz entre el agregado pétreo y el asfalto, lo que incrementa el daño por humedad. Además, al reaccionar preferentemente con los ácidos carboxílicos presentes en el asfalto, se reduce la velocidad de asociación de resinas para formar asfaltenos y la velocidad de formación de compuestos oxidados, retrasando así el envejecimiento de la mezcla asfáltica.

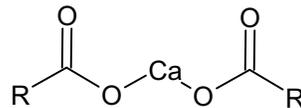


Figura 1. Complejo insoluble en agua formado por la reacción del calcio con los ácidos carboxílicos.

2 Objetivo

El objetivo de este estudio es evaluar el potencial beneficio de la adición de Hidróxido de Calcio a una mezcla templada elaborada con cien por ciento RAP. Se busca que la mezcla templada con RAP e hidróxido de calcio logre o mejore las propiedades de desempeño de la mezcla control con material virgen y asfalto convencional.

3 Matriz experimental

En la Figura 2 se presenta el proceso experimental que se planteó para este estudio, inicialmente se propone realizar la verificación de la compactación de la mezcla utilizando cuatro contenidos de emulsión asfáltica y tres contenidos de adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Los contenidos de emulsión asfáltica e Hidróxido de Calcio se calcularon con respecto al peso del agregado.

Se plantean dos etapas para la evaluación de la mezcla templada, en la primer etapa se evaluará el desempeño de la mezcla con el contenido óptimo de emulsión seleccionado más la adición de 1%, 1.5% y 2% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mediante las pruebas de susceptibilidad al daño por humedad (TSR), módulo resiliente total (Mrt) y la susceptibilidad al agrietamiento (IDEAL-CT) con las cuales será seleccionado el contenido óptimo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ conforme a su incremento en el desempeño de la mezcla vs la mezcla templada sin $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

En la segunda etapa se evaluará la mezcla fabricada con el contenido óptimo de emulsión más el contenido óptimo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mediante las pruebas de rueda cargada de Hamburgo (HWT), Curva maestra del módulo dinámico y resistencia a la fatiga (ley de fatiga). Los resultados de la segunda etapa se compararán contra el desempeño de una mezcla asfáltica densa de alto desempeño fabricada con agregados 100% vírgenes y asfalto convencional grado de desempeño PG 64-22.

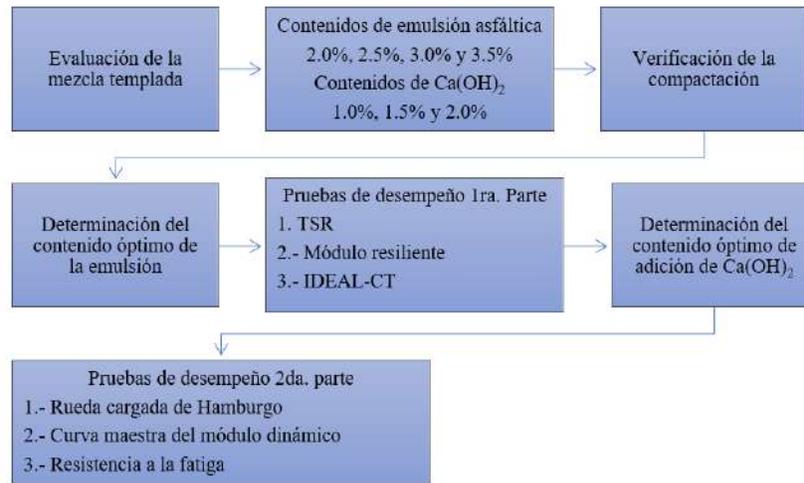


Figura 2. Proceso planteado para la experimentación

4 Metodología y materiales

4.1 Materiales

4.1.1 Emulsión asfáltica.

Se evaluaron diversos tipos y formulaciones de emulsiones basadas en el grado de envejecimiento del RAP obtenido en el apartado 4.1.2.1 y se seleccionó la emulsión que presentó la mejor compatibilidad con el RAP. La emulsión seleccionada es una emulsión asfáltica catiónica denominada EARA-2P cuyas características se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Resultados de la evaluación de la emulsión EARA-2P

<i>Prueba</i>	<i>Método de prueba</i>	<i>Valor obtenido</i>
Pruebas a la emulsión asfáltica		
Contenido de cemento asfáltico, 204°C, %	ASTM D 6997	63.2
Contenido de aceite destilado, 204°C, %	ASTM D 6997	0.5
Viscosidad Saybolt Furol 25°C, SSF	ASTM D 7496	35.0
Retenido en malla no. 20, %	ASTM D 6933	0.0000
Asentamiento a 5 días, %	ASTM D 6930	0.20
Pruebas al residuo, obtenido por destilación		
Punto de reblandecimiento, °C	ASTM D 36	28.10
Jnr 0.1kPa ⁻¹ , 40°C	ASTM D 7405-20	1.49
R, 0.1kPa, 40°C, %	ASTM D 7405-20	46.44
Jnr 3.2kPa ⁻¹ , 40°C	ASTM D 7405-20	2.72
R, 3.2kPa, 40°C, %	ASTM D 7405-20	22.94
G*/sen δ, 40°C, KPa	ASTM D 7175-15	2.60
Angulo de fase, 40°C, °	ASTM D 7175-15	73.10



4.1.2 RAP

4.1.2.1 Asfalto recuperado del RAP

La extracción del material asfáltico del RAP se realizó de acuerdo con ASTM D2172 (método B). La recuperación se realizó mediante un proceso de recirculación (evaporación-condensación) con Tricloro-Etileno (C_2HCl_3). El asfalto recuperado fue separado del disolvente utilizando el procedimiento ASTM D5404.

Se obtuvo el grado PG del asfalto extraído del RAP, bajo la normativa N·CMT·4·05·004/18 “Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño” que cumplió como un grado PG 100-22.

El contenido de asfalto existente en el RAP se obtuvo por medio del método de ignición ASTM D6307 el cual fue de 7.4 % con respecto a la mezcla.

4.1.2.2 Agregados pétreos

La mezcla templada fue elaborada con agregados 100% RAP proveniente del pavimento asfáltico fresado del Periférico Ecológico de Puebla, en el estado de Puebla, México.

Se obtuvo la granulometría del RAP y se utilizó una fracción única con tamaño de $\frac{3}{4}$ " (19mm) a finos, retirando por medio de cribado el material retenido en la malla de una pulgada.

Para la mezcla de control se utilizaron agregados pétreos 100% vírgenes del banco Thomé ubicado en la ciudad de Puebla con un contenido de 5.8% de cemento asfáltico convencional grado PG 64-22 con respecto a la mezcla. Se utilizó una granulometría para una mezcla asfáltica de granulometría densa de tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " de acuerdo con los límites establecidos en el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011 Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. Las granulometrías para la mezcla templada y la mezcla densa convencional de control se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Granulometrías de la mezcla templada y de la mezcla densa de control.

Abertura de Malla	1"	3/4"	3/8"	4	10	20	40	60	100	200	
Mezcla Templada	25.00	19.00	9.60	4.75	2.00	0.85	0.43	0.25	0.15	0.075	
ESPECIFICACIÓN N·CMT·4·02·003/21	90-100	76-100	42-100	24-70	10-27	5-14	4-10	2-8	1-7	0-6	
Abertura de Malla	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	8	16	30	50	100	200
Mezcla densa	25.00	19.00	12.60	9.60	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
ESPECIFICACIÓN PA-MA 01/2011	100	90-100	-90	-	-	23-49	-	-	-	-	2-8

4.1.3 Hidróxido de Calcio ($Ca(OH)_2$)

Como adición de fino activo se utilizó el $Ca(OH)_2$, comúnmente conocido como cal hidratada a un nivel de pureza del 90%.



En un estudio sobre el estado del arte de los beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas realizado en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) se encontró que los porcentajes usuales en los que se utiliza este aditivo corresponden a un rango entre 1%-2% base peso del agregado [5].

En este trabajo se utilizaron tres porcentajes de adición de Ca(OH)_2 los cuales fueron de 1.0%, 1.5% y 2.0% estos con respecto al peso total del agregado.

4.2 Fabricación de los especímenes de prueba.

Los especímenes de prueba se armaron mediante granulometrías inversas con 6 tamaños de control que fueron: retenido en malla de $\frac{3}{4}$ ", retenido en malla de $\frac{3}{8}$ ", retenido en malla #4, retenido en malla #20, retenido en malla #60 y material que pasa la malla #60.

El mezclado de los especímenes se realizó calentando el RAP a una temperatura de 90°C y la emulsión asfáltica a 60°C, el Ca(OH)_2 se adicionó a temperatura ambiente al momento del mezclado, teniendo como resultado la mezcla asfáltica a una temperatura de 70 a 75°C. La mezcla se curó en horno a una temperatura de 70°C por un tiempo de 2 horas y posteriormente se realizó la compactación de los especímenes de prueba. Una vez compactados los especímenes se curaron en horno a una temperatura de 50°C por un tiempo de 48 horas para eliminar la humedad restante en la mezcla.

La geometría de los especímenes fue de acuerdo con el tipo de prueba y el ajuste de vacíos se realizó bajo una compactación definida por altura a un nivel de vacíos del $7\pm 1\%$.

Los especímenes cilíndricos fueron compactados mediante el compactador giratorio y las vigas para fatiga fueron compactadas por medio de un compactador lineal.

4.3 Metodología de evaluación.

La evaluación del desempeño de la mezcla templada con la adición de Ca(OH)_2 se realizó en dos etapas.

En la primera etapa se evaluó la susceptibilidad de la mezcla al daño inducido por humedad de acuerdo con AASHTO T283 "Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage". El módulo resiliente total de acuerdo con ASTM D7369-11 "Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test" y la susceptibilidad al agrietamiento por medio de la prueba IDEAL-CT de acuerdo con ASTM D8225-19 "Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature."

En la segunda etapa de evaluación de desempeño se midió la susceptibilidad a la deformación permanente bajo la recomendación AMAAC RA 01/2011 "Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera con el analizador de rueda cargada de Hamburgo (HWT), en una mezcla asfáltica compactada", el módulo dinámico de acuerdo con AASHTO T 342-11 "Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)" y la resistencia a la fatiga por medio del ensaye de la viga de cuatro puntos de acuerdo con AASHTO T 321-07 "Standard Method of Test for Determining the fatigue life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending".



5 Análisis y discusión de resultados

5.1 Verificación de la compactación

Se realizó la verificación del porcentaje de vacíos que alcanza la mezcla a una compactación de 100 giros mediante el compactador giratorio.

Para cada contenido de emulsión y para cada contenido de Ca(OH)_2 se compactaron dos pastillas con una masa de 4500 gramos, la fabricación de las pastillas fue de acuerdo a lo descrito en el apartado 4.2 de este trabajo.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de compactación para cada una de las variables propuestas en este estudio, así como los valores de la densidad teórica máxima (Gmm) que tiene la mezcla en cada una de las combinaciones de emulsión e Ca(OH)_2 .

Se puede observar que el contenido de emulsión asfáltica es la variable predominante en el porcentaje de vacíos que alcanza la mezcla ya que para el 2.0% de emulsión se tienen vacíos alrededor del 10% y para el 3.5% de emulsión se alcanzan vacíos alrededor del 4.5%.

En cambio para los diferentes contenidos de Ca(OH)_2 adicionados a la mezcla, existe una variación mínima para cada contenido de emulsión la cual va de 0.5% a 1.9% máximo.

El menor contenido de vacíos alcanzado en la mezcla templada se obtuvo con un 3.5% de emulsión asfáltica y 2.0% de Ca(OH)_2 .

Tabla 3. Resultados de compactación de las diferentes variables de la mezcla templada.

ID	% Emulsión	% C.A.	1.0% Ca(OH)_2		1.5% Ca(OH)_2		2.0% Ca(OH)_2	
			Densidad Teórica Máxima (Gmm)	% Va.	Densidad Teórica Máxima (Gmm)	% Va.	Densidad Teórica Máxima (Gmm)	% Va.
A1	2.0%	1.3%	2.399	10.3	2.379	9.8	2.377	8.4
A'1				9.9		9.8		8.7
B1	2.5%	1.6%	2.390	8.9	2.370	7.7	2.367	7.0
B'1				9.1		7.8		7.4
C1	3.0%	1.9%	2.380	7.8	2.360	6.0	2.357	6.1
C'1				8.3		6.0		6.1
D1	3.5%	2.2%	2.370	5.1	2.350	4.4	2.348	4.1
D'1				4.6		4.8		4.1

Para la evaluación de la primera etapa de desempeño de la mezcla se tomó un contenido de 3.0% de emulsión asfáltica para estandarizar el contenido de asfalto y solo variar el contenido de Ca(OH)_2 en la mezcla.

5.2 Evaluación del desempeño primera etapa

5.2.1 Susceptibilidad al daño por humedad (TSR)

Una de las ventajas en la mezcla asfáltica que se reportan en la literatura por la adición de Hidróxido de Calcio es que mejora la adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto y disminuye el daño causado por la humedad [2,3].

Para el diseño de una mezcla densa de alto desempeño, En México está especificado un valor de $\text{TSR} \geq 80\%$ de acuerdo con el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011.

En la Figura 3 se presentan los resultados de TSR de la mezcla templada sin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y de las mezclas con adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Se puede observar que para la adición de los tres contenidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se obtuvieron valores de TSR mayores a 80%.

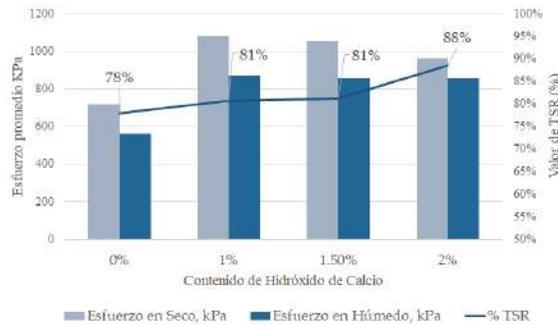
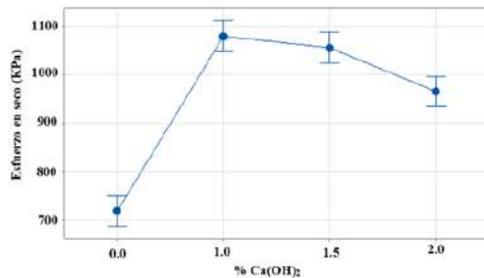


Figura 3. Resultados de TSR para los diferentes contenidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Se realizó un análisis estadístico Anova mediante el método de Tukey con un nivel de confianza al 95% para los esfuerzos de tensión indirecta en seco Figura 4 y para los esfuerzos de tensión indirecta en húmedo Figura 5.

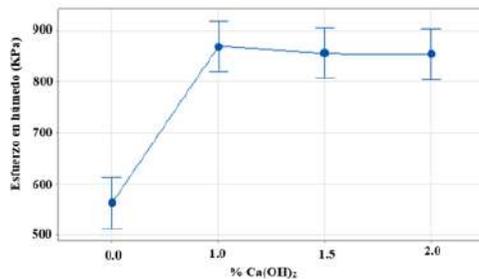
En la Figura 4 se puede observar que para las adiciones de 1.0% y 1.5% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se obtuvieron valores estadísticamente iguales, los cuales fueron 45% mayores al valor obtenido para la mezcla sin $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La mezcla con 2.0% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtuvo un valor 26% superior a la mezcla sin $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

En la Figura 5 se observa que los valores de tensión indirecta en húmedo para los tres contenidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ corresponden a un mismo grupo estadístico con un aumento alrededor del 50% sobre la tensión en húmedo de la mezcla sin $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



ID espécimen	N	Promedio	Grupo estadístico
EARA-2P+1.0%Ca	3	1078.67	A
EARA-2P+1.5%Ca	3	1055.3	A
EARA-2P+2.0%Ca	3	965.3	B
EARA-2P-0%Ca	3	718.3	C

Figura 4. Análisis estadístico del esfuerzo a tensión indirecta en seco



ID espécimen	N	Promedio	Grupo estadístico
EARA-2P+1.0%Ca	3	870	A
EARA-2P+1.5%Ca	3	856.3	A
EARA-2P+2.0%Ca	3	854.3	A
EARA-2P-0%Ca	3	561.7	B

Figura 5. Análisis estadístico del esfuerzo a tensión indirecta en húmedo.

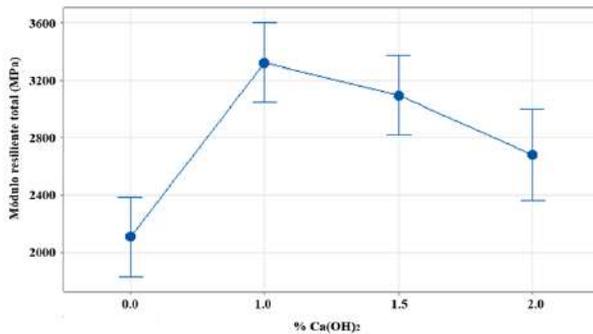
5.2.2 Módulo resiliente total

Los resultados obtenidos de M_{rt} en función del contenido de Ca(OH)_2 en la mezcla, se muestran en la Figura 6.

De manera general se puede observar que al adicionar Ca(OH)_2 en la mezcla templada se genera un aumento en su rigidez.

Para los tres contenidos de Ca(OH)_2 evaluados en este estudio, se puede observar que el valor de M_{rt} disminuye conforme el contenido de Ca(OH)_2 aumenta. Estadísticamente, la mezcla con 1.0% de Ca(OH)_2 obtiene el valor de M_{rt} más alto con un aumento de 57% y la mezcla con 2.0% obtiene el valor más bajo con un aumento de 27%, respectivamente sobre la mezcla templada sin Ca(OH)_2 .

Este comportamiento puede ser atribuido a que al aumentar el contenido de Ca(OH)_2 en la mezcla, existe mayor área superficial y mayor demanda de contenido de asfalto. Sin embargo, se decidió no aumentar el contenido de emulsión para mantener la factibilidad económica de esta tecnología.



ID Especimen	N	Promedio	Grupo estadístico
EARA-2P+1.0%Ca	4	3322	A
EARA-2P+1.5%Ca	4	3094	AB
EARA-2P+2.0%Ca	3	2681	BC
EARA2P+0%Ca	4	2108	C

Figura 6. Resultados y análisis estadístico del módulo resiliente total.

5.2.3 IDEAL-CT

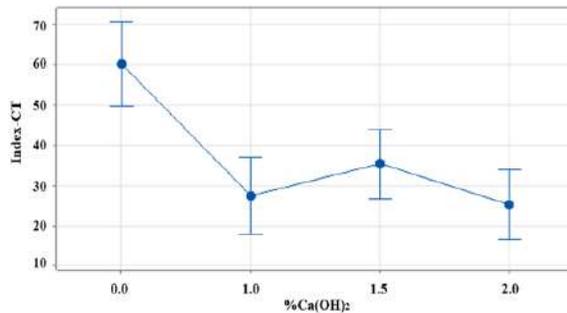
En la Figura 7 y Figura 8 se presentan los resultados del índice de agrietamiento (Index-CT) y carga pico para la mezcla templada sin Ca(OH)_2 y para la mezcla templada con los tres contenidos de Ca(OH)_2 evaluados.

Como se observó en los resultados de TSR y M_{rt} , la adición de Ca(OH)_2 genera que la mezcla asfáltica templada incremente su rigidez, este mismo efecto puede ser observado con los valores de obtenidos en la carga pico de la prueba de IDEAL-CT, sin embargo, esto causa que el valor de Index-CT se reduzca.



Figura 7. Resultados de Index-CT y carga pico

Del análisis estadístico realizado que se muestra en la Figura 8, se observa que de las mezclas con adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la que presenta el mejor comportamiento ante la susceptibilidad al agrietamiento es la que contiene 1.5% con un valor de Index-CT de 38.6 grupo estadístico B y por el contrario la que presenta el desempeño más bajo es la mezcla con 2.0% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un valor de Index-CT de 25.14 grupo estadístico C.



ID Espécimen	N	Promedio	Grupo estadístico
EARA-3.0%+0%Ca	4	60.39	A
EARA-2P+1.5%Ca	5	38.59	B
EARA-2P+1.0%Ca	6	27.903	BC
EARA-2P+2.0%Ca	6	25.14	C

Figura 8. Análisis estadístico del Index-CT

5.2.4 Selección del contenido óptimo de Hidróxido de Calcio

La selección del contenido óptimo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la mezcla templada se determinó basado en el desempeño de las pruebas evaluadas en la primera etapa de este estudio. En la Tabla 4 se muestra el resumen de resultados para las pruebas de TSR, M_{rt} e Index-CT de la mezcla templada para la adición de 1.0%, 1.5% y 2.0% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

De acuerdo con los datos analizados de la prueba de TSR se encontró que la mezcla templada con los tres contenidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ cumplen con un valor mayor de 80%, sin embargo estadísticamente los contenidos de 1.0% y 1.5% muestran los valores con una mayor resistencia a la tensión indirecta en seco y húmedo. La prueba de M_{rt} mostró el mayor valor para la mezcla con 1.0% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ seguido de la mezcla con 1.5% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, grupos estadísticos A y AB y finalmente en la prueba de IDEAL-CT la mezcla con adición de 1.5% obtuvo el mayor valor de Index-CT, grupo estadístico B.

De tal manera que el contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que proporciona el desempeño más balanceado entre rigidez y ductilidad de la mezcla es 1.5%.



Tabla 4. Resumen de resultados de la primera etapa de evaluación de desempeño.

% emulsión	% Hidróxido de Calcio	Esfuerzo en seco promedio (KPa)	Esfuerzo en húmedo promedio (KPa)	TSR (%)	Mr Total (Mpa) promedio	Energía de fractura J/m ²	Index-CT
3.0%	1.0%	1078.9	870.1	80.6%	3321.9	4883.0	27.9
3.0%	1.5%	1055.2	856.4	81.2%	3094.4	4848.3	38.6
3.0%	2.0%	965.1	854.1	88.5%	2680.9	4339.2	25.1

5.3 Evaluación del desempeño segunda etapa

5.3.1 Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la rueda cargada de Hamburgo.

De acuerdo con el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011, las mezclas asfálticas densas de alto desempeño deben de cumplir con un valor de deformación permanente evaluado mediante la rueda cargada de Hamburgo (HWT) menor de 10mm con un mínimo de 10000, 15000 y 20000 pasadas de acuerdo con un nivel de tránsito bajo, medio o alto respectivamente.

Se evaluó la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla templada con 3% de emulsión EARA-2P y 1.5% de Ca(OH)₂ y se obtuvo un resultado de 6.4 mm de deformación a las 20000 pasadas cumpliendo satisfactoriamente con la especificación para una mezcla densa de alto desempeño con un nivel de servicio alto o muy alto. Los resultados se muestran en la Figura 9.

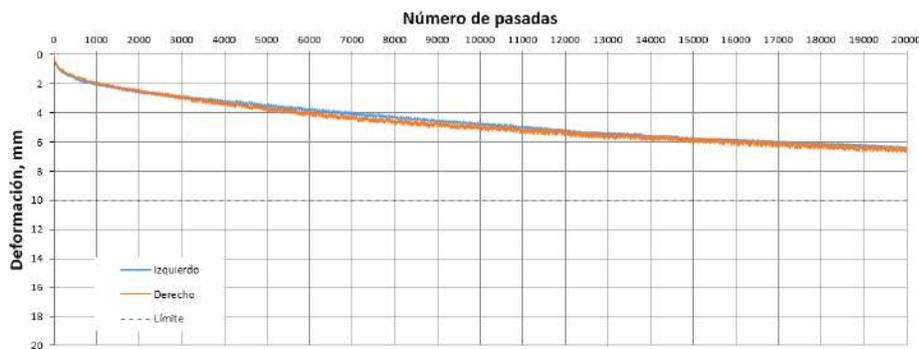


Figura 9. Evaluación de la rueda cargada de Hamburgo.

5.3.2 Módulo dinámico

Las curvas maestras de la mezcla templada más 1.5% de Ca(OH)₂ y de la mezcla densa convencional de control se presentan en la Figura 10. Estas curvas presentan el comportamiento de la mezcla ante los efectos de la temperatura y frecuencia de manera simultánea a una temperatura de referencia de 20°C.

La curva en color rojo representa la mezcla templada más Ca(OH)₂ y la curva en color azul representa la mezcla densa convencional de control. Se puede observar que ambas mezclas obtuvieron valores muy similares de módulo dinámico, sin embargo, en la parte superior derecha que corresponde a temperaturas bajas y frecuencias altas, la mezcla densa convencional muestra un comportamiento

ligeramente más rígido, en la parte central del gráfico correspondiente a temperaturas y frecuencias intermedias las dos curvas se cruzan obteniéndose valores mayores de módulo dinámico para la mezcla templada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la zona que corresponde a temperaturas intermedias a altas y frecuencias bajas.

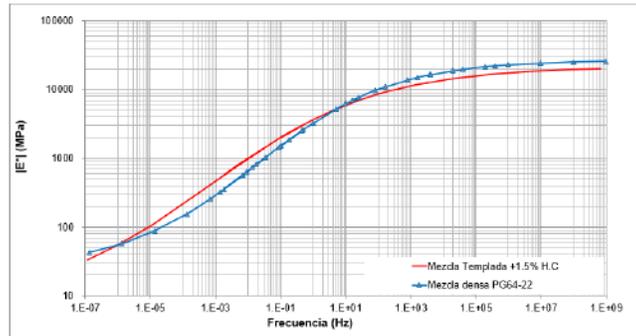


Figura 10. Curva maestra de la mezcla templada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vs mezcla densa convencional PG64-22

5.3.3 Resistencia a la fatiga

Para obtener la ley de fatiga de cada una de las mezclas, se evaluaron al menos seis vigas a tres niveles de deformación mediante el procedimiento de prueba AASHTO T-321, se utilizó el criterio de falla clásico (50% de reducción de la rigidez inicial) para obtener el número de repeticiones a la falla. Las leyes de fatiga obtenidas se muestran en la Figura 11.

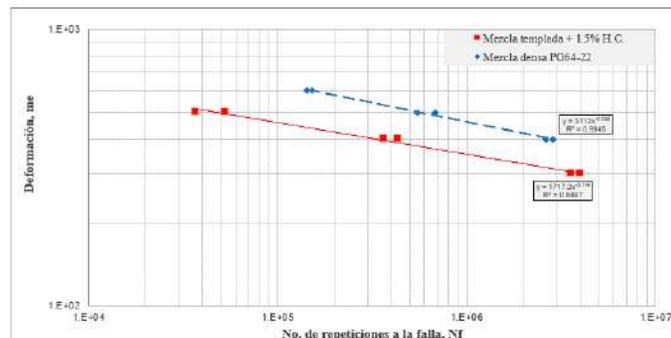


Figura 11. Ley de fatiga de la mezcla templada +1.5% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vs mezcla densa convencional PG64-22

De manera general, la granulometría, los vacíos de aire en la mezcla y el contenido de asfalto son algunos de los factores que determinan la vida a fatiga de una mezcla asfáltica.

Para el caso de este estudio la mezcla templada tiene 1.9% de residuo asfáltico de aporte nuevo y la mezcla densa convencional de control tiene un contenido de asfalto de 5.8%. Como ya se evidenció en las pruebas anteriores la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ genera que la mezcla templada aumente su rigidez por lo que se puede esperar una reducción en su vida a fatiga.

Para la mezcla asfáltica densa convencional de control se obtuvo una resistencia a la fatiga mayor que para la mezcla templada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$. De acuerdo con el procedimiento descrito en reporte N° 646 de NCHRP para determinar el límite de resistencia a la fatiga (FEL)[6] se obtuvo un valor de 209 $\mu\epsilon$ para la mezcla templada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y un valor de 254 $\mu\epsilon$ para la mezcla densa convencional de



control. Ambas mezclas cumplen con un valor mayor a $180 \mu\epsilon$ requerido en las especificaciones particulares de algunos proyectos ejecutados en México y de acuerdo con lo recomendado por el NCAT. [7]

6 Conclusiones

- La inclusión de Ca(OH)_2 en la mezcla templada incrementó los valores de tensión indirecta en seco y húmedo y permitió cumplir con el requerimiento mínimo de relación de tensión indirecta.
- En el proyecto particular la concentración de Ca(OH)_2 que permitió obtener el mejor balance entre módulo resiliente y la energía de fractura medida en IDEAL-CT fue de 1.5% base peso del RAP.
- El uso de Ca(OH)_2 permitió mejorar la resistencia a la deformación plástica cumpliendo con el valor especificado para carpetas densas de alto desempeño.
- En la curva maestra de módulo dinámico, la mezcla templada con Ca(OH)_2 tuvo un desempeño mayor en la zona de bajas frecuencias y/o temperaturas intermedias a altas en comparación con la mezcla densa control
- La resistencia a fatiga de la mezcla templada con Ca(OH)_2 fue menor que la de la mezcla densa control, Sin embargo cumplió con las especificaciones de FEL usados en México y recomendado por el NCAT.
- La mezcla templada con Ca(OH)_2 cumple con los requisitos de desempeño especificados en la normativa mexicana para una mezcla densa.

7 Trabajos futuros

Dado que se pudo comprobar que la mezcla templada con adición de Ca(OH)_2 alcanza satisfactoriamente los requerimientos de calidad y desempeño de una mezcla densa, se tiene proyectado evaluar otras fuentes de RAP y la ejecución de un tramo de prueba de una capa densa para monitorear su comportamiento ante las sollicitaciones reales del tránsito.

8 Referencias

- [1] Kennedy, T. (1984). Use of hydrated lime in asphalt paving mixtures. Arlington, USA: National Lime Association.
- [2] Dallas N Little, 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. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(207))
- [3] Lesueur, D. (s.f.). Hydrated lime: A proven additive for durable asphalt pavements-Critical literature review. Bruselas: European Lime Association. Obtenido de <http://www.eula.eu>
- [4] Grajales, J. A., Pérez, L. M., Shwab, A. P., & Little, D. N. (2021). Quantum Chemical Modeling of the Effects of Hydrated Lime (Calcium Hydroxide) as a Filler in Bituminous Materials. *ACS Omega*, 3130-3139.
- [5] Kikut, K., Baldi, A., Elizondo A. L. (2020) Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas: Revisión del estado del arte. *Revista Infraestructura Vial*. LanammeUCR.
- [6] NCHRP (2010). Report 646. Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt. Transportation Research board. Washington, D.C.
- [7] NCAT. (2016). Report 15-05R Refined limiting strain criteria and approximate ranges of maximum thicknesses for designing long-life asphalt pavements. Auburn University.