



Artículo de investigación

Mezclas asfálticas elaboradas con agregado calizo y adición de óxido de calcio probadas a temperaturas de servicio

Asphalt mixtures made with limestone aggregate and addition of calcium oxide proved at service temperatures

Gilberto Wenglas Lara ^{ID}, Sergio Adrián Domínguez Mendoza ^{ID}, Juan Carlos Burillo Montufar ^{ID},
José Castañeda Ávila ^{ID}

Universidad Autónoma de Chihuahua, C. Escorza 900, Col. Centro 31000, Chihuahua, Chihuahua, México

Autor de correspondencia: Gilberto Wenglas Lara, Universidad Autónoma de Chihuahua, C. Escorza 900, Col. Centro 31000, Chihuahua, Chihuahua, México. Correo: gwenglas@uach.mx, ORCID: 0009-0009-9971-3070.

Recibido: 1 de Octubre del 2024

Aceptado: 18 de Diciembre del 2024

Publicado: 28 de Diciembre del 2024

Resumen. - La cal hidratada es un material ampliamente usado para mejorar las propiedades mecánicas de durabilidad de mezclas asfálticas. Por otra parte, el agregado pétreo es esencial en el comportamiento de la capa de rodamiento de un pavimento asfáltico por lo que debe dársele especial atención en el diseño, y considerar su origen mineralógico. Además, el empleo de adiciones de bajo costo para mejorar las propiedades de mezclas asfáltica es una actividad recurrente, sin embargo, el efecto depende del tipo del agregado. La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto del tipo de agregado, calizo y no calizo, así como la adición de óxido de calcio, en muestras asfálticas estándares, evaluadas con el método Marshall y la prueba de compresión simple. Las mezclas elaboradas con material calizo y 2 % de cal presentaron mejores resultados de estabilidad, flujo y de resistencia a la compresión. Estos resultados pueden ser de beneficio para la elaboración de mezclas asfálticas donde hay abundancia y disponibilidad de material calizo.

Palabras clave: Asfalto; Tipo de agregado; Cal hidratada; Modificador asfáltico; Estabilidad.

Abstract.- Hydrated lime is a material widely used to improve the mechanical properties and durability of asphalt mixtures. On the other hand, the aggregate is essential in the performance of the surface layer of an asphalt pavement, so special attention must be given to its design, and its mineralogical origin must be considered. Furthermore, the use of low-cost additions to improve the properties of asphalt mixtures is a recurring activity, however, the effect depends on the type of aggregate. This research aims to evaluate the effect of the type of limestone and non-limestone aggregate, as well as the addition of calcium oxide in standard asphalt samples evaluated with the Marshall method and the simple compression test. The mixtures made with limestone material and 2 % lime presented better results in terms of stability, flow, and compressive strength. These results may be beneficial for the preparation of asphalt mixtures where there is an abundance and availability of limestone material.

Keywords: Asphalt; Type of aggregate; Hydrated lime; Asphalt modifier; Stability.



1. Introducción

El comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica se caracteriza por ser viscoelástico, y se ve afectado de manera importante por la temperatura a la que se ve expuesta la mezcla [1]. El material asfáltico exhibe un comportamiento frágil a bajas temperaturas, adoptando una consistencia viscosa, tendiendo a un fluido, conforme aumenta la temperatura [2]. Adicionalmente, la mezcla se caracteriza por su sensibilidad a la velocidad de deformación, esto es, su resistencia dependerá de la velocidad de aplicación de la carga y, asimismo, de los materiales de la mezcla, como es el asfalto y los agregados pétreos. En [3] se estudió la influencia de la forma, angularidad y textura de agregados pétreos en el desempeño de mezclas asfálticas a alta temperatura, donde la angularidad impacta en la resistencia a la deformación permanente. Adicionalmente, en [4] se muestra la influencia de la forma del agregado en el módulo dinámico de mezclas asfálticas probadas a altas temperaturas.

Por otra parte, en [5] manifiesta que además de la geometría del agregado, su mineralogía, influye en la micro y macro textura de la mezcla asfáltica. La búsqueda de mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica con materiales alternativos o de bajo costo es una tarea permanente en materia de pavimentos. En [6] se presenta una investigación de la adición de pavimento reciclado (RAP, por sus siglas en inglés) y tejas provenientes de material usado en techos de construcciones (RAS, por sus siglas en inglés) en mezclas asfálticas, encontraron resultados positivos preliminares con el uso de 25 % de RAP y una combinación de ambos materiales con una adición 25 % y 5 % de RAP y RAS, respectivamente.

Una revisión relevante del uso de materiales sólidos de desperdicio (de la actividad agrícola, industrial, construcción y minería) como adiciones de material fino en mezclas asfálticas se presentan en [7], destacando un impacto positivo en la estabilidad, resistencia a las roderas, al agrietamiento y a la fatiga. Un caso particular se presenta en [8], donde se reemplaza la porción de finos por material de desecho industrial mejorando la adhesión del asfalto con el agregado permitiendo que la mezcla asfáltica presente una mayor resistencia al agua y durabilidad. En [9] se muestra el uso de adiciones de material fino alternativo, escoria de acero y humo de sílice, en mezclas con RAP, obtuvieron valores adecuados de estabilidad. En [10] se presenta el uso de adiciones finas de cal y cemento para incrementar el desempeño de mezclas asfálticas a altas temperaturas y su durabilidad.

El hidróxido de calcio, también conocido como cal hidratada, es un material ampliamente usado en mezclas asfálticas desde hace décadas, ya que ha demostrado mejorar las características de la mezcla, las cuales se mantienen a través de la vida útil del pavimento. En [11] se presentan los resultados del uso de cal hidratada como modificador de mezclas de concreto asfáltico, caracterizadas por el módulo de resiliencia y la deformación permanente, donde se obtuvieron valores significativos en la resistencia a la deformación y reducción en las deformaciones resilientes a altas temperaturas de prueba debido a que la cal mejora la rigidez del asfalto. En [12] se evaluó la finura y contenido de cal en muestras asfálticas, demostrando un incremento en la adhesividad del asfalto con el incremento de la finura de la adición, reportando, adicionalmente, que el asfalto modificado exhibe mayor resistencia a la deformación a altas temperaturas.

En [13] presenta una revisión de diferentes referencias del uso de la cal hidratada en la matriz asfálticas, destacando mejoras en las propiedades de dureza y resistencia a la fatiga, oxidación y daño por humedad. En [14] se prueban mezclas asfálticas con agregado basáltico y adicionadas con cal, con resultados importantes en la reducción de roderas y en el envejecimiento del asfalto, los cuales son factores importantes en pavimentos expuestos a altas temperaturas.

En la región de Chihuahua, es posible localizar bancos de materiales que cumplan con un margen significativo con especificaciones, sin embargo, el agregado de origen calizo ha sido utilizado ampliamente en mezclas asfálticas, debido a la amplia disponibilidad del material, con lo cual se logra reducir el costo de producción de mezclas asfálticas. Este último material no ha representado la mejor opción para usarse en mezclas asfálticas cuando existen disponibles materiales con mejores propiedades, pero el hidróxido de calcio permite hacer que las mezclas exhiban un desempeño más adecuado en diferentes temperaturas.

En la presente investigación se evaluaron mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con óxido de calcio, el cual se considera un modificador de bajo costo y de fácil acceso. El objetivo es mejorar el desempeño de la mezcla asfáltica usando agregado de origen calizo y comparar contra una mezcla con agregado de origen no calizo. Los materiales pétreos se obtuvieron de dos bancos de materiales localizados en la ciudad de Chihuahua, en el estado de Chihuahua. La etapa experimental consistió en elaborar mezclas asfálticas con diferentes proporciones de modificador, contemplando una mezcla base, y los dos tipos de agregado estudiados, considerando un rango de temperaturas bajo, medio y alto, las cuales son temperaturas características en la región. Las mezclas asfálticas fueron ensayadas con la prueba

Marshall y la de Compresión Simple. Los resultados de la investigación fortalecen el conocimiento del uso del hidróxido de calcio y agregados de distinto origen, considerando la temperatura en que se desempeñará la mezcla asfáltica.

2. Antecedentes

Las mezclas asfálticas son mezclas que se derivan de la combinación de agregados pétreos, asfalto como ligante y aditivos, los cuales resultan de un diseño, donde el laboratorio es parte esencial del proceso [15], [16], [17]. Los agregados calizos se caracterizan por una relativa alta porosidad y una baja resistencia mecánica [18] y debe tomarse en cuenta en el diseño de las mezclas asfálticas, como en problemas de resistencia al deslizamiento de la superficie de rodamiento [19]. Sin embargo, en estudios recientes en mezclas asfálticas con agregados de origen calizo, se muestran resultados que sugieren su uso [20], [21], [22]. En [23], se evaluaron mezclas porosas con agregado calizo con resultados favorables en la resistencia a la rodera y diferencias no significativas en resistencia a la tensión, al comparar con mezclas elaboradas con agregado basáltico. En [17] obtuvieron resultados con la prueba Marshall, a temperatura estándar, y resistencia a la compresión, de muestras asfálticas elaboradas con agregados calizos que permitieron recomendar su uso en pavimentos.

En el desempeño de las mezclas asfálticas, los aditivos y adiciones minerales representan un papel importante. La cal hidratada es una adición de uso común en mezclas asfálticas que permite modificar ciertas características e incrementa su vida útil. En [13] analizaron varias referencias donde se reportó el empleo de cal hidratada en mezclas asfálticas, exponiendo el impacto positivo y limitantes de su uso, resaltando una mejora en las características de dureza y la resistencia a la fatiga, oxidación, envejecimiento

químico y daño por humedad, así como beneficios importantes en los valores de la deformación permanente. En [24] reportaron resultados de mezclas asfálticas adicionadas con cal hidratada de un tramo de carretera para ser evaluado al inicio y después de 5 años de uso; basado en estudios del asfalto y propiedades mecánicas, se encontró una reducción significativa del envejecimiento del asfalto. Indicadores químicos validaron que la cantidad de asfaltenos y compuestos de oxidación se redujeron para la mezcla con cal. En [25] se reportó que la cal hidratada mejora las propiedades de la mezcla asfáltica de manera que incrementa la resistencia al agrietamiento, reduce la resistencia a la deformación permanente y la tasa de rigidez, a causa de la oxidación del material.

En [26] se evaluaron mezclas de concreto asfáltico elaboradas con agregados calizo e hidróxido de calcio, el cual se utilizó como una adición para acondicionar la mezcla a zonas con inundaciones. Contenidos de hidróxido de calcio del 5 % incrementaron la estabilidad de la mezcla. Los contenidos de material calizo combinados con hidróxido de calcio fueron del orden del 5 % al 15 %. Aunque obtuvieron resultados favorables de estabilidad y flujo, sugiere el uso de mayores porcentajes de material calizo.

En [11] hicieron un estudio experimental donde realizaron pruebas de compresión repetida uniaxial y triaxial para evaluar el comportamiento elastoplástico de mezclas asfálticas modificadas con cal hidratada, con resultados favorables en deformación permanente y el módulo de resiliencia, con mejoras a altas temperaturas. Por otra parte, en [27] se evaluó el efecto de hielo y deshielo en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas a través de pruebas de compresión simple y módulo de resiliencia.

Una mezcla asfáltica define su comportamiento no solo por las características del ligante utilizado, sino también por las características mecánicas y de composición de los agregados pétreos. Ambos componentes definen el tipo de mezcla que se está buscando diseñar. No siempre se tiene disponibles materiales con dureza preferible, como un basalto. Sin embargo, el material pétreo calizo es recomendable para utilizarse en mezclas asfálticas [28], el cual puede tener un comportamiento aceptable por sus características de adherencia con el asfalto, así como características más deseables con adición de cal hidratada. Aunque el empleo de agregado calizo se ha visto limitado en mezclas asfálticas debido a que se asumen propiedades mecánicas débiles del material pétreo, diversas investigaciones han demostrado ser adecuado su uso [29].

3. Etapa experimental

La etapa experimental consistió en la fabricación de muestras cilíndricas de asfalto modificado con adiciones de cal (óxido de calcio, CaO). Asimismo, se contempló un agregado que no es de origen calizo y uno de composición calizo. Las pruebas para evaluar las muestras cilíndricas fueron el Método Marshall y la prueba de Compresión Simple.

3.1. Ligante asfáltico

El cemento asfáltico usado en todas las muestras fue del tipo AC-20 [30]. Con el objeto de evitar el choque térmico y garantizar la trabajabilidad de los materiales, así como lograr la incorporación y distribución uniforme del material asfáltico con el pétreo, se mezclaron a una temperatura que osciló en un rango de 130 a 160 °C [31]. El asfalto registró su punto de inflamación a los 232 °C [32], el punto de reblandecimiento a los 43 °C [33], el grado de penetración fue de 42 mm [34] y una viscosidad Saybolt Furol a 135 °C de 77 s [35].

3.2. Granulometría de agregados pétreos

El material pétreo utilizado se obtuvo de dos bancos de materiales, uno de ellos con material de origen calizo y el otro no calizo. Los agregados pétreos conformaron aproximadamente del 80 al 96 % de la mezcla asfáltica. La granulometría de diseño ocupada en las diferentes muestras, de acuerdo con el origen del material pétreo, se muestra en la Figura 1. Las

curvas granulométricas correspondientes a ambos materiales cumplen con los límites que indica la normatividad mexicana de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes como requisitos de los materiales de granulometría de material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa, correspondiente a un volumen de tránsito esperado mayor a un millón de ejes equivalentes [36].

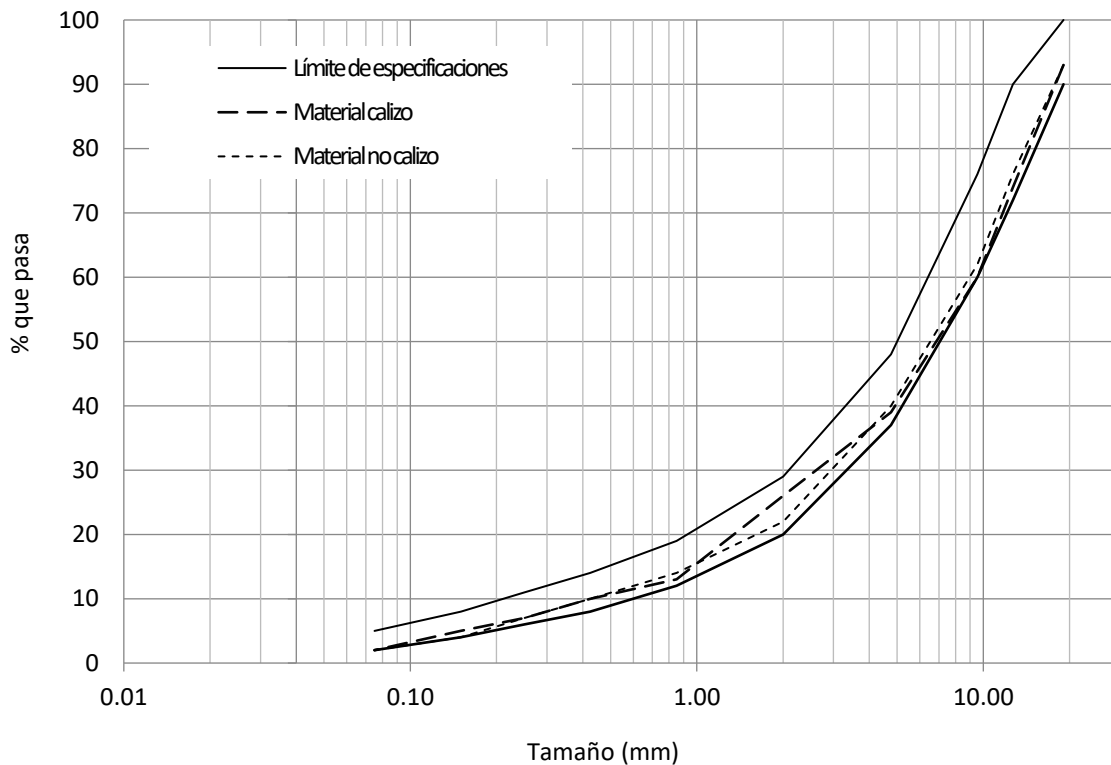


Figura 1. Granulometría del material calizo y el no calizo.

El agregado denominado como material no calizo se caracteriza como un coluvión, de agregados finos y gruesos volcánicos, de composición félsica denominada riolita. El agregado se obtuvo de un banco de materiales en la ciudad de Chihuahua, Chih., con coordenadas UTM: Este: 387148.73 m E, Norte: 3176322.07 m N, caracterizado por contener finos de media a baja plasticidad. La extracción de materiales de origen calizo se llevó a cabo en el banco de materiales

ubicado con coordenadas UTM: Este: 395806.45 m E Norte: 3175551.63 m N.

3.3. Distribución de especímenes

Para ambos tipos de agregados, se realizó la distribución de muestras, que se presenta en la Tabla 1. Para cada prueba se ensayaron 27 muestras cilíndricas considerando una temperatura baja, una media y un alta. Para el

caso del método Marshall, las temperaturas fueron 10, 20 y 50 °C; de manera análoga, para la Prueba de Compresión Simple las temperaturas de evaluación fueron 0, 20 y 40 °C. Además de la mezcla de referencia, con 0% de cal, se elaboraron mezclas con contenidos de cal de 2% y 5%. La densidad y granulometría del

material de origen no calizo, no permitió conformar muestras representativas con contenido del 5% de cal, en virtud del volumen resultante, mayor a la capacidad del molde de prueba, de manera que esta condición de filler no fue posible contrastarla.

Tabla 1. Distribución de muestras para las diferentes temperaturas y contenido de Cal.

Contenido de Cal (%)	Prueba Marshall			Prueba de Compresión Simple		
	Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
	10	20	50	0	20	40
0	3	3	3	3	3	3
2	3	3	3	3	3	3
5*	3	3	3	3	3	3

*Este contenido de cal no fue posible evaluarlo para el caso de material no calizo.

3.4. Preparación de especímenes de laboratorio

Las mezclas asfálticas se diseñaron de acuerdo con el Método Marshall, cumpliendo con lo establecido en la norma Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras N-CMT-4-05003/02 [31]. Las muestras se probaron en el equipo UNIFRAME Series Electomechanical Universal Tester, de 50 a 100 kN de capacidad (Figura 2). La prueba estándar indica la elaboración de muestras cilíndricas de una altura de 64 mm y de 102 mm de diámetro. Los parámetros característicos del ensayo son la densidad, el análisis de vacíos, así como la estabilidad y flujo de los especímenes compactados. De acuerdo con la norma, se debe establecer el número de ejes equivalentes con el objeto de determinar el número de golpes de compactación. Para la presente investigación se consideró un tránsito esperado mayor a un millón de ejes equivalentes, por los que el número de golpes de compactación por cada cara de la muestra cilíndrica fue de 75.



Figura 2. Muestra en prensa Marshall.

La adición del modificador se agregó una vez que se tenía una mezcla homogénea del material pétreo y el asfalto. Después de homogeneizado el material, se procedió al llenado de los moldes, los cuales se calentaron previamente a la temperatura de mezclado, compactándose como lo indica la norma N-CMT-4-05003/02. Al término de los golpes de compactación, se dejaron reposar las muestras durante 24 h, se cubrieron con parafina para obtener el peso al aire y sumergido, con objeto de obtener el porcentaje de vacíos.

A continuación, las muestras se colocaron en baño María con el objeto de lograr la temperatura de prueba. Posteriormente, se secaron de manera

superficial con una manta y se procedió a colocar en el anillo del equipo Marshall. Finalmente se obtuvo su estabilidad y flujo.

El ensayo de Compresión Simple se efectuó con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último de muestras cilíndricas, cuyas dimensiones fueron de 64 mm de altura por 102 mm de diámetro. La prueba se llevó a cabo en condición no confinada, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación, en un equipo FORNEY Testing Machine, modelo It 1150, con capacidad de 1471 kN (Figura 3).



Figura 3. Muestra en prensa Universal de compresión simple.

4. Presentación de resultados

4.1 Método Marshall

4.1.1. Muestras elaboradas con material calizo

Como resultados de la prueba Marshall, en la Figura 4 se presenta la estabilidad de muestras de mezclas asfálticas elaboradas con material de origen calizo y asfalto, considerando tres escenarios: una mezcla base sin cal, y dos con contenido de cal de 2 y 5 %. En todos los casos, la temperatura resulta ser determinante en la

estabilidad, a mayor temperatura es menor la estabilidad. Sin embargo, para la temperatura 10 °C, no se presentó un cambio importante respecto a la adición de cal, de lo cual se desprende que, en regiones donde imperan temperaturas frías, la adición de este filler, no mejora la mezcla, si lo que se busca es evitar daños por fatiga en la superficie de rodamiento. Para la temperatura de 20 °C, se incrementó la estabilidad con valores de 51.2 y 52.4 kNw, que representan el 2.3 y 4.9 %, para el 2 y 5 % de cal, respectivamente. Para la temperatura de 50 °C, únicamente el 5 % de cal presentó un incremento, el cual fue del 13.4 %.

En todos los casos de estabilidad, superó el valor que establece la norma Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de 8kN [37]. Este resultado es significativo, dado que el contenido

de cal puede representar una alternativa para incrementar la estabilidad de mezclas asfálticas en climas templados y calurosos, considerando que, al presentarse temperaturas frías, no representa una desventaja el aditivo.

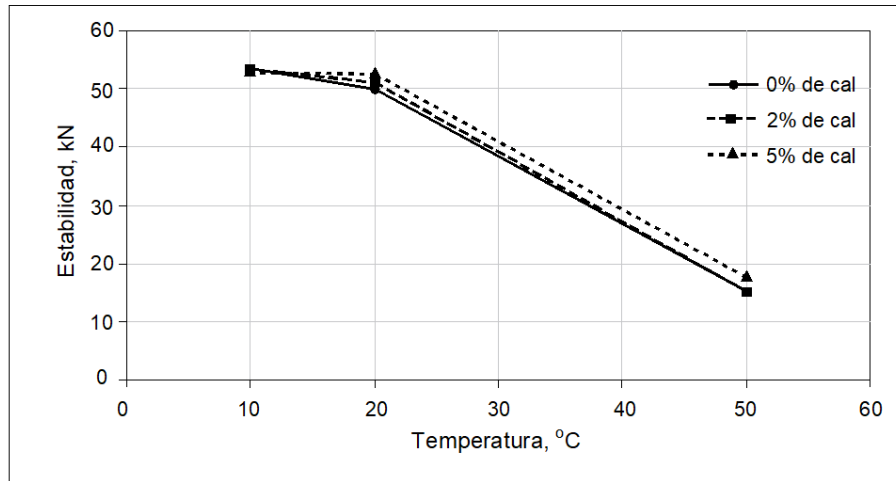


Figura 4. Estabilidad de muestras elaboradas con agregado calizo adicionadas con cal.

En la Figura 5 se presenta el flujo de muestras de mezclas asfálticas elaboradas con material de origen calizo, para las tres condiciones de mezcla: una base, sin cal, y dos mezclas con contenido de cal de 2 y 5 %. La temperatura afectó el flujo de forma evidente. Se obtuvieron valores de flujo más grandes a mayor temperatura. Se observa que el contenido de cal mejoró la mezcla en términos del flujo: a mayor contenido de cal menor la deformación. Estos resultados son de utilidad cuando el objetivo es el control de roderas en la capa asfáltica de rodamiento en regiones con temperaturas calurosas [38]. Sin embargo, para la temperatura alta de 50 °C el incremento de cal del 5% no varió el flujo respecto al resultado del contenido del 2%. En [25] en 2018, evaluó mezclas asfálticas adicionadas con cal al 1.5 %, con resultados favorables de resistencia a la fatiga. Adicionalmente, en todos los casos, el flujo superó el valor del rango que establece la norma de 2 a 3.5 mm [37], para esta temperatura. En la condición del 5 % de cal, para la temperatura de 10 °C, el flujo es menor que lo indicado por la

norma y, para la temperatura de 20 °C, el valor de flujo queda en límite inferior de la norma, lo que representa una mezcla de mayor rigidez. Además, el incremento al 5 % presentó un flujo similar al del contenido del 2 %, para la temperatura de 50 °C.

Los resultados obtenidos con el material calizo, al ser un material, tradicionalmente no preferido ante aquellos del tipo basáltico o riolítico, como material de construcción en mezclas asfálticas en pavimentos flexibles, mostraron que el contenido del 2 % de cal mejora la estabilidad y flujo, al compararse con la norma, por lo que puede considerarse como un material adecuado en construcción de pavimentos.

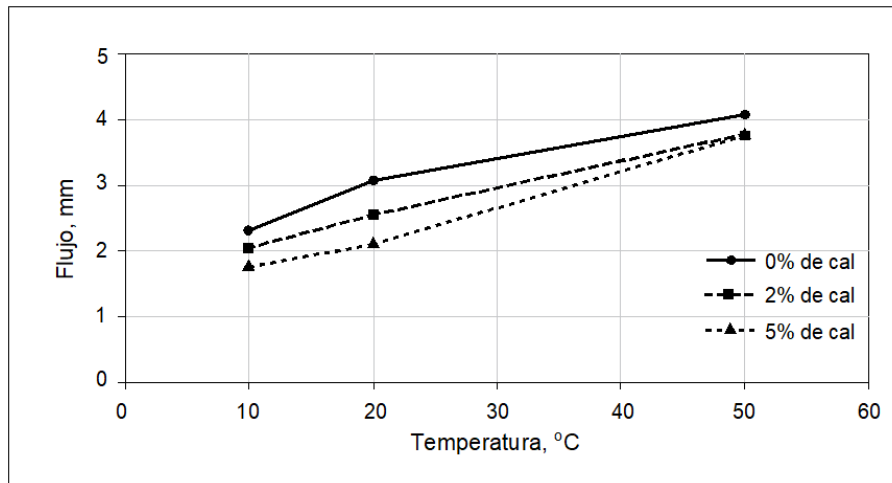


Figura 5. Flujo de muestras elaboradas con agregado calizo adicionadas con cal.

4.1.2. Muestras elaboradas con material no calizo

En la Figura 6 se muestra la estabilidad de mezclas asfálticas para las diferentes temperaturas de prueba de la mezcla base y el 2 % de contenido de cal. Debido a la densidad y granulometría del material de origen no calizo, no fue posible elaborar muestras representativas con contenido del 5 % de cal. Se observa que en el incremento de estabilidad no es significativa

para la temperatura de 10 °C, sin embargo, para las temperaturas de 20 y 50 °C, el contenido de 2 % de cal, incrementó la estabilidad con valores de 48.9 y 25.2 kNw, que representa el 7.1 y 18.7 %, respectivamente. En todas las condiciones de prueba, los valores de estabilidad fueron superiores a lo establecido por la norma.

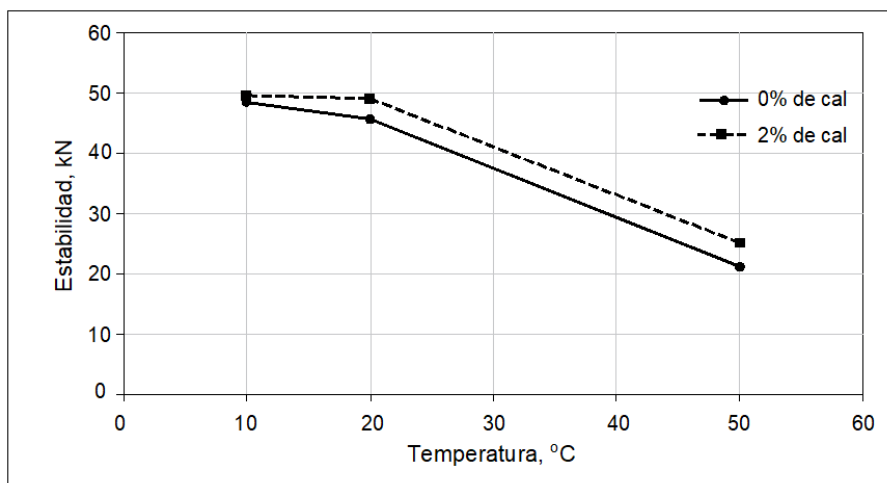


Figura 6. Estabilidad de muestras elaboradas con agregado no calizo adicionadas con cal.

En el caso del flujo (Figura 7), de las mezclas elaboradas con el 2 % de cal, presentó una

disminución de manera uniforme para las diferentes temperaturas de prueba, con una

tendencia paralela. La mayor disminución de flujo se presentó para la temperatura de 10 °C, con valores de 2.7 y 3.9 mm, para las muestras del 0% y la de 2 %, respectivamente, lo que representa una diferencia del 40.5 %. Para las temperaturas de 20 y 50 °C, disminuyó el flujo con valores de 4.2 y 5.1 mm, que representa el

25.4 y 19.0 %, respectivamente. La adición de cal favoreció el flujo dado que todos los valores se acercaron más al rango de la norma (2 a 3.5 mm). El incremento favorable en la estabilidad y flujo, también fue reportado en investigaciones anteriores, a partir del 1.5 % de adición de cal [25], [39].

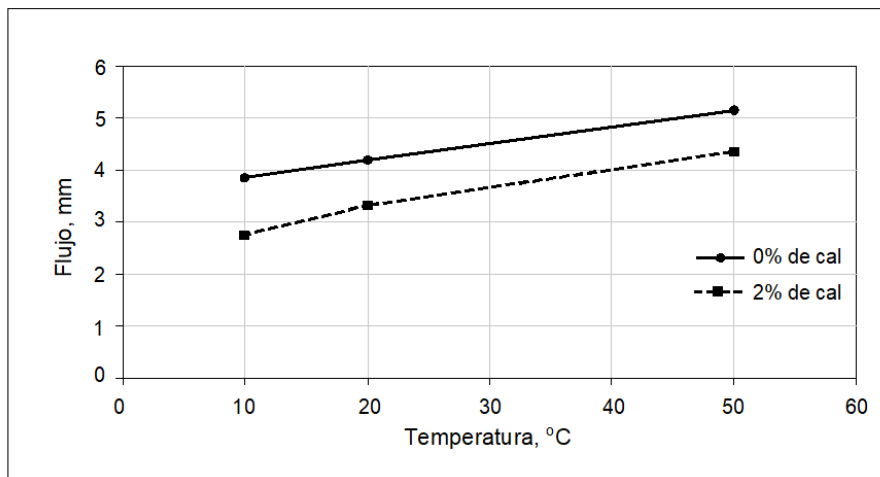


Figura 7. Flujo de muestras elaboradas con agregado no calizo adicionadas con cal.

4.2 Muestras probadas a compresión simple

Con el objeto de evaluar las probetas en las mismas condiciones de agregado, asfalto, adiciones y números de golpes en su compactación, las muestras ensayadas a compresión simple se elaboraron de acuerdo con la norma de Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras N-CMT-4-05003/02 [31], y se probaron en un equipo Universal. En las Figuras 8 y 9 se muestran los resultados de la prueba de compresión simple para los dos materiales evaluados (material calizo y no calizo). Se

observa una mejora en los valores de resistencia para el caso de las muestras elaboradas con material calizo, siendo mayor para la temperatura de 10 y 20 °C, con contenido del 2 % de cal. El material no calizo, en todos los escenarios de temperatura de prueba, muestra resultados de compresión simple similares. Esto permite argumentar, de manera preliminar, que la mezcla de material calizo adicionada con cal, contribuye a una mezcla de mejor estructura, comparadas con las muestras elaboradas con material no calizo, en las cuales el filler no representó incrementos importantes.

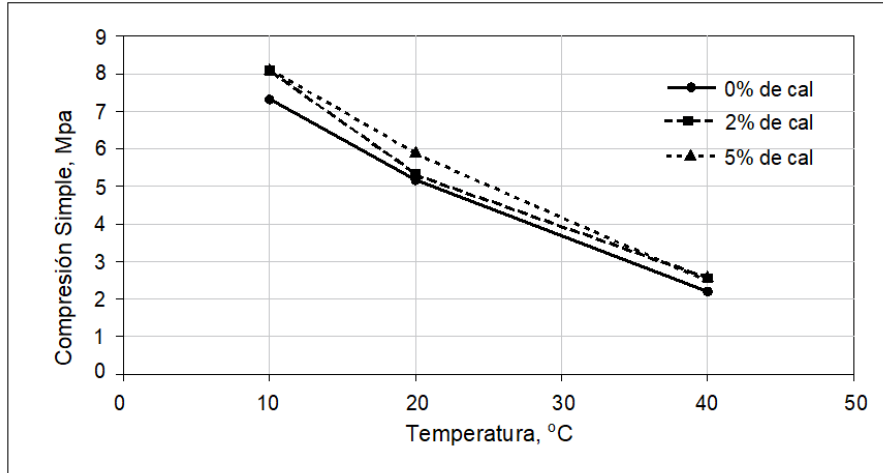


Figura 8. Resistencia a la compresión de muestras elaboradas con agregado calizo adicionadas con cal.

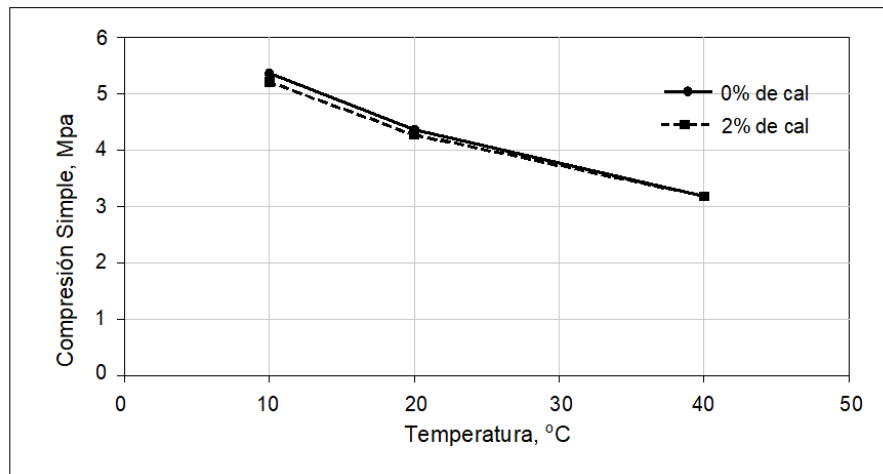


Figura 9. Resistencia a la compresión de muestras elaboradas con agregado no calizo adicionadas con cal.

5. Conclusiones

Se evaluaron muestras cilíndricas de mezclas asfálticas elaboradas con dos tipos de agregados, uno de origen calizo y otro de origen no calizo, adicionadas con filler de óxido de calcio y sometidas a tres temperaturas de prueba.

El contenido del 2 % fue el que presenta, en términos generales, las mezclas con mejores resultados en aquellas que se elaboraron con agregado calizo. La estabilidad se incrementó para las mezclas probadas a temperaturas de 20 y 50 °C, pero sin disminuirla a la temperatura de 10

°C. En el caso del flujo, mejoró para las temperaturas de 10 y 20 °C. Sin embargo, para la temperatura de 10 °C, el valor de flujo para la condición del 5% de contenido de cal fue menor que lo indicado por la norma (de 2 a 3.5 mm) y, para la temperatura de 20 °C, el valor de flujo queda en límite inferior de la norma, lo que representa carpetas asfálticas más rígidas. Además, el contenido del 5 %, presentó un flujo similar al del contenido de 2 % para la temperatura de 50 °C. Estos resultados son de utilidad para regiones donde el clima, a lo largo del año, presenta amplios gradientes de temperatura.

El material de origen no calizo presentó mejores resultados de estabilidad con adiciones de óxido de cal para temperatura de prueba media y alta, sin embargo, en flujo, el contenido de cal no beneficia la mezcla si lo que se busca es prevenir asentamientos graduales de la carpeta en pavimentos.

Las muestras elaboradas con agregado calizo y adicionadas con 2 % de cal, mejoraron su resistencia a la compresión, comparadas con aquellas de la mezcla base, sin embargo, para el caso de las muestras elaboradas con material no calizo, la adición de cal no representó una mejora para la mezcla.

En general, el agregado pétreo calizo es una alternativa para usarse en mezclas asfálticas, y se pueden mejorar las características de la mezcla usando óxido de calcio. Con ello, es posible contribuir a diseños de mezclas durables y que cumplan con la normatividad a un menor costo.

6. Reconocimiento de autoría

Gilberto Wenglas Lara: Conceptualización; Análisis de datos; Discusión, Escritura y Administración de proyecto. *Sergio Adrián Domínguez Mendoza:* Ideas; Investigación; Desarrollo experimental y Análisis de datos. *Juan Carlos Burillo Montufar:* Revisión y Edición; *José Castañeda Ávila:* Investigación y Escritura.

Referencias

[1] X. Gu, Q. Dong, and Q. Yuan, "Development of an Innovative Uniaxial Compression Test to Evaluate Permanent Deformation of Asphalt Mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 1,

Jan. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001038.

[2] A. Behnood and M. Modiri Gharehveran, "Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders," *Eur Polym J*, vol. 112, pp. 766–791, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049.

[3] M. Magnoni and F. Giustozzi, "Evaluation of the Effect of Aggregates Mineralogy and Geometry on Asphalt Mixture Friction," *Journal of Civil & Environmental Engineering*, vol. 6, no. 3, 2016, doi: 10.4172/2165-784X.1000223.

[4] H. Wang, Y. Bu, Y. Wang, X. Yang, and Z. You, "The Effect of Morphological Characteristic of Coarse Aggregates Measured with Fractal Dimension on Asphalt Mixture's High-Temperature Performance," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1155/2016/6264317.

[5] J. Gao, H. Wang, Y. Bu, Z. You, X. Zhang, and M. Irfan, "Influence of Coarse-Aggregate Angularity on Asphalt Mixture Macroporosity: Skid Resistance, High-Temperature, and Compaction Performance," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, no. 5, May 2020, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003125.

[6] K. H. Moon, A. C. Falchetto, M. Marasteanu, and M. Turos, "Using recycled asphalt materials as an alternative material source in asphalt pavements," *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 149–159, Jan. 2014, doi: 10.1007/s12205-014-0211-1.

[7] J. Choudhary, B. Kumar, and A. Gupta, "Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review," *Constr Build Mater*, vol. 234, p. 117271, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117271.

- [8] C. Dimulescu and A. Burlacu, "Industrial Waste Materials as Alternative Fillers in Asphalt Mixtures," *Sustainability*, vol. 13, no. 14, p. 8068, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13148068.
- [9] M. Naser, M. Abdel-Jaber, R. Al-Shamayleh, R. Ibrahim, N. Louzi, and T. AlKhrissat, "Improving the Mechanical Properties of Recycled Asphalt Pavement Mixtures Using Steel Slag and Silica Fume as a Filler," *Buildings*, vol. 13, no. 1, p. 132, Jan. 2023, doi: 10.3390/buildings13010132.
- [10] Y. Chen, S. Xu, G. Tebaldi, and E. Romeo, "Role of mineral filler in asphalt mixture," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 23, no. 2, pp. 247–286, Feb. 2022, doi: 10.1080/14680629.2020.1826351.
- [11] A. Al Ashaibi, Y. Wang, A. Albayati, L. Weekes, and J. Haynes, "Uni- and tri-axial tests and property characterization for thermomechanical effect on hydrated lime modified asphalt concrete," *Constr Build Mater*, vol. 418, p. 135307, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135307.
- [12] S. Han, S. Dong, Y. Yin, M. Liu, and Y. Liu, "Study on the effect of hydrated lime content and fineness on asphalt properties," *Constr Build Mater*, vol. 244, p. 118379, May 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118379.
- [13] K. Kikut, A. Baldi, and A. L. Elizondo Salas, "Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas: Revisión del estado del arte," *Revista Infraestructura Vial*, vol. 22, no. 29, pp. 12–19, 2020, doi: 10.15517/iv.v22i39.41618.
- [14] A. K. Das and D. Singh, "Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers," *Constr Build Mater*, vol. 141, pp. 442–452, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.032.
- [15] B. Xu, J. Chen, C. Zhou, and W. Wang, "Study on Marshall Design parameters of porous asphalt mixture using limestone as coarse aggregate," *Constr Build Mater*, vol. 124, pp. 846–854, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.005.
- [16] Y. Jiang, C. Deng, J. Xue, and Z. Chen, "Investigation into the performance of asphalt mixture designed using different methods," *Constr Build Mater*, vol. 177, pp. 378–387, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.108.
- [17] M. H. Abdul Hamid, H. D. Mohd Suffi, N. A. Najwa Yusoff, and H. Bujang, "The Study on Marshall Design Parameter of Hot Mix Asphalt Mixture (HMA) Using Limestone Aggregate," *MULTIDISCIPLINARY APPLIED RESEARCH AND INNOVATION*, vol. 5, no. 1, pp. 118–124, Jan. 2024, doi: 10.30880/mari.2024.05.01.018.
- [18] C. Răcănel, M. Dicu, Ș. M. Lazăr, and A. Burlacu, "Asphalt Mixtures with Limestone Aggregate for Base Layer," *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, vol. 1, no. 1, pp. 36–49, Dec. 2012, doi: 10.1515/rjti-2015-0004.
- [19] M. Deepak, K. Ken, and P. Frazier, "Evaluation of Limestone Coarse Aggregate in Asphalt Concrete Wearing Courses," Alabama, Jul. 1991, <https://www.eng.auburn.edu/files/centers/hrc/2019-10.pdf>.
- [20] S. Hasita, A. Suddepong, S. Horpibulsuk, W. Samingthong, A. Arulrajah, and A. Chinkulkijniwat, "Properties of Asphalt Concrete Using Aggregates Composed of Limestone and Steel Slag Blends," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, no. 7, Jul. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003148.
- [21] J. Hu, T. Ma, Y. Zhu, X. Huang, and J. Xu, "A feasibility study exploring limestone in porous asphalt concrete: Performance evaluation and superpave compaction characteristics," *Constr Build Mater*, vol. 279,

- p. 122457, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122457.
- [22] G. Xu, J. Fan, T. Ma, W. Zhao, X. Ding, and Z. Wang, "Research on application feasibility of limestone in sublayer of Double-Layer permeable asphalt pavement," *Constr Build Mater*, vol. 287, p. 123051, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123051.
- [23] J. Hu, T. Ma, Y. Zhu, X. Huang, and J. Xu, "A feasibility study exploring limestone in porous asphalt concrete: Performance evaluation and superpave compaction characteristics," *Constr Build Mater*, vol. 279, p. 122457, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122457.
- [24] B. Stéphane, H. Ferhat, R. Hervé, M. Pierre, and L. Didier, "Improving the durability of asphalt mixtures with hydrated lime: Field results from highway A84," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, no. 1, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00551.
- [25] A. Rasouli, A. Kavussi, M. J. Qazizadeh, and A. H. Taghikhani, "Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime," *Constr Build Mater*, vol. 655–662, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.003.
- [26] G. Danny, N. K. Y., J. P. F. Napitupulu, and A. Makmur, "The Influence of Limestone And Calcium Hydroxide Addition in Asphalt Concrete Mixture," *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*, vol. 7, no. 2, p. 83, Jun. 2016, doi: 10.21512/comtech.v7i2.2242.
- [27] W. Si, B. Ma, H. Wang, N. Li, and J. Hu, "Analysis of Compressive Characteristics of Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles in Cold Plateau Regions," *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, vol. 7, no. 4, pp. 17–22, Dec. 2013, doi: 10.1061/JHTRCQ.0000342.
- [28] J. Hu, T. Ma, Y. Zhu, X. Huang, and X. Jian, "A feasibility study exploring limestone in porous asphalt concrete: Performance evaluation and superpave compaction characteristics," *Constr Build Mater*, vol. 279, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122457.
- [29] D. Sybilski, W. Bańkowski, and M. Krajewski, "Applicability of limestone aggregates for High Modulus Asphalt Concrete," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 96–101, 2010, <http://www.ijprt.org.tw/files/sample/V3N2%286%29.pdf>.
- [30] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, "Calidad de Materiales Asfálticos," N-CMT-4-05-001/05. [Online]. Available: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-001-05.pdf>
- [31] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, "Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras," N-CMT-4-05-003/02. [Online]. Available: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-003-02.pdf>
- [32] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, "Punto de Inflamación Cleveland en Cementos Asfálticos," <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-007-00.pdf>.
- [33] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, "Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos," <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-009-00.pdf>.
- [34] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, "Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos," <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-006-00.pdf>.
- [35] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, "Viscosidad Saybolt-Furol en

Materiales Asfálticos,”
<https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-004-00.pdf>.

[36] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas,” N-CMT-4-04/01. [Online]. Available: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-04-01.pdf>

[37] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras,” N-CMT-4-05-003/02. [Online]. Available: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-003-02.pdf>

[38] G. Kollaros, Kalaitzaki. E., and A. Athanasopoulou, “Using Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt Mixtures in Road Construction,” *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 6, no. 7, pp. 261–266, 2017, <https://www.researchgate.net/publication/318773632>.

[39] O. M. Ogundipe, “Marshall stability and flow of lime-modified asphalt concrete,” *Transportation Research Procedia*, vol. 14, no. 1, pp. 685–693, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.333.

Derechos de Autor (c) 2024 Gilberto Wenglas Lara, Sergio Adrián Domínguez Mendoza, Juan Carlos Burillo Montufar, José Castañeda Ávila



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)