

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



ASFALTOS MODIFICADOS CON AGREGADOS DE ORIGEN CALIZO

POR:

SERGIO ADRIÁN DOMÍNGUEZ MENDOZA

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

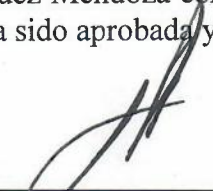
MAESTRO EN INGENIERÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

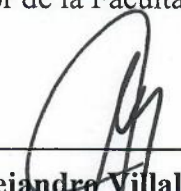
DICIEMBRE, 2021



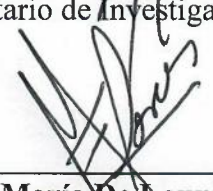
Asfaltos modificados con agregados de origen calizo. Tesis presentada por Sergio Adrián Domínguez Mendoza como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:



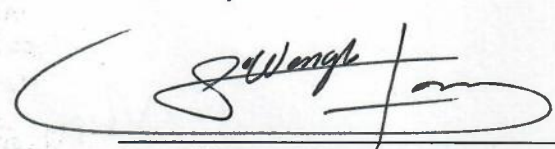
M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.A. María De Lourdes Flores Portillo
Coordinador Académico



Dr. Gilberto Wenglas Lara
Director de Tesis

Diciembre de 2021

Comité:
M.A. María De Lourdes Flores Portillo
M.I. José Antonio Portillo Ocegüera
M.I. Adán Costeño García

© Derechos Reservados

**Sergio Adrian Dominguez
Mendoza**

Circuito Número I s/n, Nuevo Campus
Universitario II, 31100 Chihuahua, Chih.

DICIEMBRE 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

10 de diciembre de 2021.

ING. SERGIO ADRIÁN DOMÍNGUEZ MENDOZA

Presente.-

En atención a su solicitud relativa al trabajo de Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Gilberto Wenglas Lara** para que lo desarrolle como Tesis, con el título: **"ASFALTOS MODIFICADOS CON AGREGADOS DE ORIGEN CALIZO"**.

Índice de Contenido

Índice de contenido

Agradecimientos

Resumen

Índice de figuras

Capítulo 1. Introducción

1.1 Objetivos

1.2 Alcances

1.3 Aportación

Capítulo 2. Antecedentes y Marco Teórico

2.1 Conceptos básicos

2.2 Principales características del asfalto.

2.3 Clasificación de los materiales asfálticos

2.4 Características de los agregados.

2.5 Banco de materiales en el estado de Chihuahua.

2.6 Modificadores Utilizados.

Capítulo 3 Metodología

3.1 Distribución de Especímenes

3.2 Granulometría de los agregados.

3.3 Caracterización de las mezclas asfálticas.

3.4 Procedimiento Método Marshall



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

4 Resultados y Análisis

- 4.1 Resultados del método Marshall con material Calizo.
- 4.2 Resultados del método Marshall con material No Calizo.
- 4.3 Resultados del método de Compresión Simple, con material Calizo.
- 4.4 Resultados del método de Compresión Simple, con material No Calizo.

5 Conclusiones y recomendaciones

6 Referencias

Bibliografía

ATENTAMENTE
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

Copyright ©

por

ING. SERGIO ADRIÁN DOMÍNGUEZ MENDOZA, 2021

Agradecimientos

A mis padres Gabriel Dominguez (+) y Olga Mendoza, a mi querida esposa Edna López y mis dos hijos Lucia Dominguez y Adrián Dominguez (+) que nos cuida y nos protege desde el cielo, a cada uno de mis amigos y compañeros y amigos que me apoyaron en este proyecto que gracias a ellos he logrado conseguir esta meta en mi vida.

A los Ingenieros Luis González, Jesús Villa, Jesús López y Pamela Caballero los cuales aportaron gran dedicación, aportes y trabajo para lograr realizar esta investigación y al Dr. Gilberto Wenglas por su paciencia y apoyo para concluir con éxito la investigación.

Resumen

El origen y características físicas de los agregados pétreos influyen de manera importante en el desempeño de una mezcla asfáltica. Por otra parte, debido a la necesidad de generar una mejor adherencia del asfalto con el agregado, así como una mejor estabilidad de las mezclas, se adicionan materiales que resulte en una mezcla de mayor calidad. En la presente investigación se evaluó el efecto de materiales pétreos de origen calizo y de no calizo. Además, se elaboraron mezclas asfálticas usando como modificadores que se caracterizan por considerarse de bajo costo como el Azufre y la CAL (óxido de calcio, CAO), además de PET (Polietileno Tereftalato), como un material alternativo, el cual representa uno de los principales contaminantes del medio ambiente. Las muestras de mezcla asfáltica fueron evaluadas por la metodología Marshall y por la prueba de compresión simple.

Palabras clave: Asfaltos modificados, agregados, calizo

Abstract

The origin and physical characteristics of stone aggregates have an important influence on the performance of an asphalt mix. On the other hand, due to the need to generate a better adhesion of the asphalt with the aggregate, as well as a better stability of the mixes, materials are added that result in a higher quality mix. In the present investigation, the effect of stone materials of limestone and non-limestone origin was evaluated. In addition, asphalt mixtures were made using as modifiers that are characterized by being considered low cost such as Sulfur and CAL (calcium oxide, CAO), as well as PET (Polyethylene Terephthalate), as an alternative material, which represents one of the main pollutants of the environment. The asphalt mix samples were evaluated by the Marshall methodology and by the simple compression test.

Keywords: Modified asphalt, aggregates, limestone



Índice de Contenido

Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Índice de Figuras.....	x
1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Alcances.....	2
1.3 Aportación	2
2. Antecedentes y Marco Teórico	3
2.1 Conceptos básicos.....	3
2.2 Principales características del asfalto.	4
2.3 Clasificación de los materiales asfálticos	4
2.4 Características de los agregados.	7
2.5 Banco de materiales en el estado de Chihuahua.	10
2.6 Modificadores Utilizados.....	15
3. Metodología.....	18
3.1 Distribución de Especímenes.....	18
3.2 Granulometría de los agregados.	20
3.3 Caracterización de las mezclas asfálticas.	25
3.4 Procedimiento Método Marshall	26
4. Resultados y Análisis.....	30
4.1 Resultados del método Marshall con material Calizo.	30
4.2 Resultados del método Marshall con material No Calizo.	32
4.3 Resultados del método de Compresión Simple, con material Calizo.....	34
4.4 Resultados del método de Compresión Simple, con material No Calizo.....	36
5. Conclusiones y recomendaciones.....	40
6. Referencias.....	42



Índice de Tablas

Tabla 1. Características de los agregados (Materiales pétreos para mezclas asfálticas en caliente Norma SCT N-CMT-4-04/17, 2017).	8
Tabla 2. Granulometría de los agregados (Materiales pétreos para mezclas asfálticas en caliente Norma SCT N-CMT-4-04/17, 2017).	9
Tabla 3. Distribución de muestras material de origen Calizo.	19
Tabla 4. Distribución de muestras material de origen No Calizo.	19
Tabla 5. Granulometría de material de origen Calizo.	20
Tabla 6. Granulometría de material de origen No Calizo.	22
Tabla 7. Parámetros de calidad en función del Número de ejes equivalentes.	26
Tabla 8. Temperatura de mezclado (Calidad de mezclas asfálticas para carreteras, norma SCT N-CMT-4-05003/02)	29
Tabla 9. Resumen de resultados Marshall de material de origen Calizo.	30
Tabla 10. Resumen de resultados Marshall de material de origen No Calizo.	32
Tabla 11. Resumen de resultados Compresión Simple de material de origen Calizo.	34
Tabla 12. Resumen de resultados Compresión Simple de material de origen No Calizo.	36



Índice de Figuras

Figura 1	SCT Inventario Nacional de Bancos De Materiales Ubicación de los Bancos, http://b.materiales.siac.gob/#	10
Figura 2	SCT Inventario Nacional de Bancos De Materiales Listado De Mezclas Asfálticas, http://b.materiales.siac.gob/#	11
Figura 3	Banco de los agregados de origen Calizo donde se realizó la extracción de materiales en esta investigación fue el material producto del banco de la empresa Grupo Cementos de Chihuahua ubicado en Chihuahua, Chihuahua. Coordenadas UTM: Este: 395806.45 m E Norte: 3175551.63 m N.....	12
Figura 4	Banco de los agregados de origen No Calizo donde se realizó la extracción de materiales en esta investigación ubicado en Chihuahua, Chihuahua. Coordenadas UTM: Este: 387148.73 m E Norte: 3176322.07 m N.....	13
Figura 5	Grafica de Granulometría usada en mezcla del material de origen Calizo.....	21
Figura 6	Grafica de Granulometría usada en mezcla del material de origen No Calizo.....	22
Figura 7	Proceso de Cribado en laboratorio.....	23
Figura 8	Proceso Cribado en laboratorio para formar las muestras de 1,100 Gramos.....	23
Figura 9	Muestras de 1,100 Gramos antes de hacer la mezcla con el material asfáltico y los modificadores.....	24
Figura 10	Diferentes etapas del desarrollo del método Marshall.	28
Figura 11	Grafica de resultados material Calizo del parámetro de Estabilidad en relación con la normativa vigente N-CMT-4-05003/02 de la Secretaria De Comunicaciones y Transportes.....	31
Figura 12	Grafica de resultados material Calizo del parámetro de Flujo en relación con la normativa vigente N-CMT-4-05003/02 de la Secretaria De Comunicaciones y Transportes.....	31
Figura 13	Grafica de resultados material No Calizo del parámetro de Estabilidad en relación con la normativa vigente N-CMT-4-05003/02 de la Secretaria De Comunicaciones y Transportes.....	33
Figura 14	Grafica de resultados material No Calizo del parámetro de Flujo en relación con la normativa vigente N-CMT-4-05003/02 de la Secretaria De Comunicaciones y Transportes.....	33



Figura 15	<i>Grafica de resultados material Calizo del parámetro de Compresión Simple.....</i>	35
Figura 16	<i>Grafica de resultados material No Calizo del parámetro de Compresión Simple.....</i>	37
Figura 17	<i>Muestra en prensa de Compresión Simple.....</i>	38
Figura 18	<i>Equipo Compresión Simple.....</i>	38
Figura 19	<i>Muestras falladas de Compresión Simple.....</i>	39
Figura 20	<i>Muestra falladas de Compresión Simple.....</i>	39



1. Introducción

La presente investigación promueve el obtener carreteras de mejores calidades a un costo más bajo, dada la importancia social de las vías de comunicación terrestres, en específico las carreteras, y el impacto económico que genera, crea la necesidad de investigar los comportamientos de los asfaltos expuestos a diversos modificadores. La presente investigación evalúa los modificadores: Azufre, PET (Polietileno Tereftalato) y CAL (óxido de calcio, CAO), los cuales son modificadores de fácil acceso y de bajo costo. Con estos modificadores se planteó el lograr mezclas con un mejor desempeño estándar, sin encarecer la mezcla, y que lleve a disminuir el mantenimiento. La etapa experimental consistió en elaborar mezclas asfálticas con diferentes contenidos de modificadores a una mezcla base, considerando dos tipos de agregado pétreo: calizo y no calizo.

En la presente investigación se determinó el efecto de la composición de los agregados en la calidad de la mezcla asfáltica, efectuando mezclas de dos bancos de material diferentes con agregados, uno de origen Calizo y el otro de origen No Calizo. Ambos bancos de material se localizaron en la región de la ciudad de Chihuahua.

Con el objeto de determinar la condición óptima del asfalto y, asfalto con modificador, con el objeto de lograr una mezcla con el mejor comportamiento, se llevaron a cabo ensayos por triplicado, tanto en la clasificación de los materiales, como para el porcentaje óptimo de asfalto, y en la generación de mezclas con aditivos.

Para la etapa experimental se elaboraron muestras cilíndricas de mezclas asfálticas, las cuales se sometieron a diferentes temperaturas. Las pruebas para caracterizar las mezclas fueron el método Marshall y la Prueba de Compresión Simple.



1.1 Objetivos

Generar una relación costo – calidad, en base a la calidad de los agregados para elaborar mezclas asfálticas en caliente con el beneficio de ser elaborada con materiales locales, esto gracias a los modificadores propuestos.

1.2 Alcances

Los resultados de este proyecto proveerán datos en relación con las mezclas asfálticas en caliente, con el uso de aditivos de bajo costo, con el fin de lograr disminuir los costos de acarreo y explotación de bancos sin tener que afectar la calidad de la mezcla asfáltica.

1.3 Aportación

A todos los generadores de mezclas asfálticas en caliente, a las dependencias gubernamentales y a los usuarios, nos permitirá tener carpetas de mejor calidad a un costo más económico.



2. Antecedentes y Marco Teórico

Para lograr entender como es el comportamiento de un asfalto debemos tener primero bien definido que es el asfalto que de acuerdo con la Norma de la SCT N·CMT·4·05·001/05 Calidad de materiales asfálticos “El asfalto es un material bituminoso de color negro, construidos principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientes normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.”

Teniendo claro que es un asfalto se tiene que determinar cuáles son las principales características que lo hacen trabajar para así determinar cómo se puede mejorar su comportamiento, así como determinar las clasificaciones en las que se divide.

2.1 Conceptos básicos

Asfaltos modificados: Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumático, que son sustancias estables en el tiempo y a cambio de temperaturas, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas o reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como la oxidación. (Calidad para asfaltos modificados Norma SCT N-CMT-4-05-002/06, 2006).

Mezcla asfáltica en caliente: Son elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla (Calidad de mezclas asfálticas para carreteras Norma SCT N-CMT-4-05-003/08, 2008).



Materiales pétreos: Los materiales pétreos que comprende esta norma son los materiales naturales, seleccionados o sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, que aglutinados con un material asfáltico se emplean en la elaboración de mezclas asfálticas a que se refiere la norma N-CMT-4-05-003, calidad de mezclas asfálticas para carreteras.

2.2 Principales características del asfalto.

Consistencia:

Habilidad para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que el asfalto es un material termoplástico; es decir se funde a altas temperaturas.

Aglutinación:

Es la capacidad de unir varias cosas para formar otra mayor.

Ductilidad:

Es la capacidad de disipación de energía que tiene un material dentro de su rango plástico. La rotura del material es dependiente de la deformación de este. En el caso del asfalto, la ductilidad le permite normalmente tener mejores propiedades aglomerantes, y los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura; obteniendo la capacidad para mantener sus propiedades con el paso del tiempo y la acción de agentes que envejecen el material.

2.3 Clasificación de los materiales asfálticos

Existen diversos tipos de materiales o productos asfálticos para pavimento, estos se obtienen de la refinación del crudo en la torre de vacío. Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados. A continuación, se muestran una breve reseña de cada uno de estos.



Asfaltos rebajados:

Los asfaltos rebajados, que regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y subbases hidráulicas, son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado.

Emulsiones asfálticas:

Las emulsiones asfálticas son los materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. Estas se pueden tener de dos maneras distintas que son: de rompimiento rápido y de rompimiento medio.

Asfaltos sopladados con aire:

Son asfaltos sometidos a un tratamiento de soplado de aire a altas temperaturas para proporcionar ciertas características deseadas para la realización de ciertos trabajos como aplicaciones hidráulicas, material para techar, etc.

Asfaltos AC:

Son los cementos asfálticos obtenidos del proceso de destilación del petróleo. También se les conoce como asfaltos no modificados.

Asfaltos modificados:

Son los cementos asfálticos combinados con algún componente para mejorar las propiedades físicas de éste.

Dentro de las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), que rigen actualmente sobre el uso del asfalto en el país, regula el uso de asfaltos modificados los cuales se utilizan en esta investigación, por lo que se requiere definir lo que se considera como un asfalto modificado de acuerdo a la Norma SCT : “Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambio de temperaturas que se le añaden al material



asfáltico para modificar sus características reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interface entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia de agua. También, aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repartidos por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo.”

Por lo anteriormente expuesto, es importante mencionar las ventajas y desventajas que presenta un asfalto modificado:

- a) Tiene un gran número de ventajas que brinda el asfalto modificado como, por ejemplo:
- Mayor resistencia a las deformaciones a altas temperaturas.
 - Menor susceptibilidad a la formación de roderas.
 - Menor rigidez ante bajas temperaturas. Mejora la adherencia y daño por humedad.
 - Mayor elasticidad que mejora la resistencia al agrietamiento por fatiga.
 - Reduce la exudación del asfalto.
 - Alarga la vida útil de la mezcla.
 - Mayor cohesión, trabajabilidad y compactación.
 - Reduce costos de mantenimiento, produciendo rentabilidad económica en el tiempo.



b) A su vez esta clase de asfaltos modificados tienen ciertas desventajas como:

- Se tiene que realizar el tendido de la mezcla y la compactación a una temperatura más alta en el rango de entre los 150°C -160°C, debidas a las propiedades físicas del polímero.
- Envejecimiento prematuro del asfalto debido a las altas temperaturas mayores a los 180°C a las que es elaborada la mezcla.
- Limpieza de tuberías de la planta en caliente cada que se termine la jornada de trabajo.

2.4 Características de los agregados.

Para poder definir el asfalto con modificadores tenemos que presentar una granulometría del material de los agregados que se ocupará para esta investigación, en este caso utilizaremos muestras triplicadas de los agregados, la cual con el fin de lograr igualar las condiciones a la investigación anterior realizada y así poder obtener comparaciones más representativas.

Tenemos que tomar en cuenta que, para esta investigación, se consideró que el diseño es para un tránsito esperado mayor a un millón de ejes equivalentes y, tenemos que considerar, que el material pétreo que se utilice para la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densa, en caliente o en frio, en función de su tamaño nominal y de la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes (ΣL) de ocho punto dos toneladas, acumuladas durante el periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño, que en ningún caso será menor de diez años. Cumplirá con lo que se indique a continuación:

El tránsito esperado (ΣL) es mayor a un millón de ejes equivalentes y hasta treinta millones de ejes equivalentes. El material pétreo según su tamaño nominal cumplirá con las características que se establece la Tabla1 y Tabla 2.



Tabla 1. Características de los agregados (Materiales pétreos para mezclas asfálticas en caliente Norma SCT N-CMT-4-04/17, 2017).

Carateristica ⁽¹⁾		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo		35
Desgaste Microdeval, %, máximo		18
Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo ⁽²⁾	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
	Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	90
	Dos o mas caras	80
Desprendimiento por fricción, %, máximo		20
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco ($d_{p,d}$), mínimo		2.4
Angularidad, % mínimo		40
Equivalente de arena, %, mínimo		45
Azul de metileno, mg/g, máximo		18



Tabla 2. Granulometría de los agregados (Materiales pétreos para mezclas asfálticas en caliente Norma SCT N-CMT-4-04/17, 2017).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ⁽¹⁾ mm (In)				
Abertura mm	Designación	9,5 (3/8)	12,5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37,5 (1 1/2)
		Porcentaje que pasa (en masa)				
50	2 in	----	----	----	----	100
37,5	1 1/2 in	----	----	----	100	90-100
25	1 in	----	----	100	90-100	74-90
19	3/4 in	----	100	90-100	79-92	62-83
12,5	1/2 in	100	90-100	72-89	58-81	46-74
9,5	3/8 in	90-100	76-92	60-82	47-75	39-68
6,3	1/4 in	70-89	56-81	44-71	36-65	30-59
4,75	N°4	56-82	45-74	37-64	30-58	25-53
2	N°10	28-64	25-55	20-46	17-42	13-38
0,85	N°20	18-49	15-42	12-35	9-31	6-28
0,425	N°40	13-37	11-32	8-27	5-24	3-21
0,25	N°60	10-29	8-25	6-21	4-19	2-16
0,15	N°100	6-21	5-18	4-16	2-14	1-12
0,075	N°200	2-10	2-9	2-8	1-7	0-6



2.5 Banco de materiales en el estado de Chihuahua.

El estado de Chihuahua, debido a su extensión territorial, presenta una importante variación de agregados. Actualmente la SCT tiene registrado en su Inventario Nacional de Bancos de Materiales 18 bancos de materiales para la elaboración de carpeta asfáltica para el estado de Chihuahua, como se muestra en las Figura 3 y Figura 4.

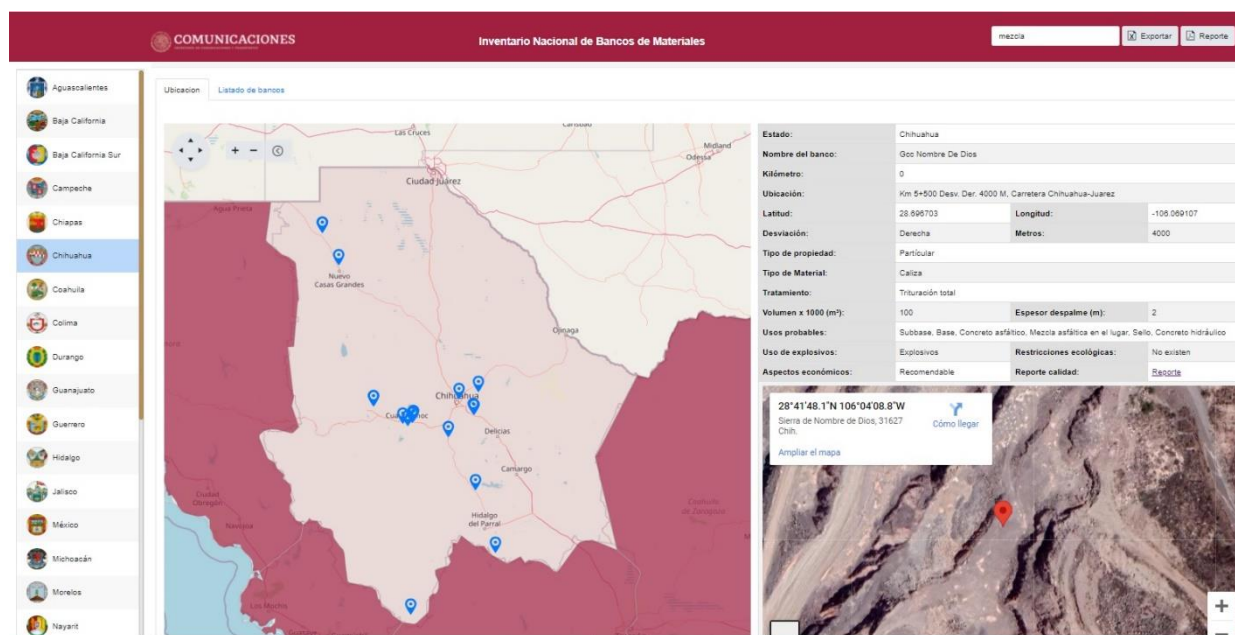
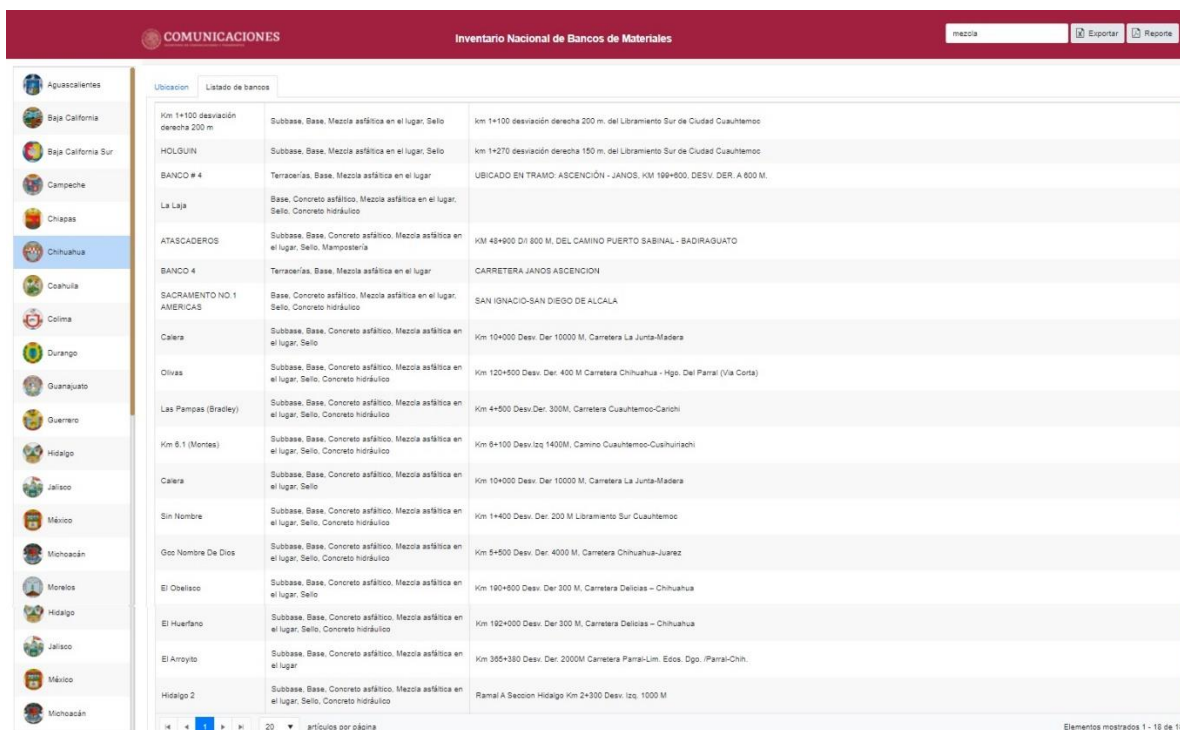


Figura 1: SCT Inventario Nacional de Bancos De Materiales Ubicación de los Bancos, <http://b.materiales.siac.gob/#>





En la presente investigación fue importante determinar que tanto afecta el origen (composición) de los agregados en la calidad de la mezcla asfáltica, por lo que se realizaron pastillas en igualdad de condiciones, pero con dos bancos de material diferentes con agregados diferentes, uno de origen Calizo (Figura 1) y el otro de origen No Calizo (Figura 2). La extracción de materiales de origen Calizo, se llevó a cabo en el banco de materiales de una empresa cementera, ubicado en Chihuahua, Chihuahua. Coordenadas UTM: Este: 395806.45 m E Norte: 3175551.63 m N. Para el caso de material No Calizo, la extracción se realizó en la misma localidad, en Chihuahua, Chihuahua, pero en las Coordenadas UTM: Este: 387148.73 m E Norte: 3176322.07 m N.

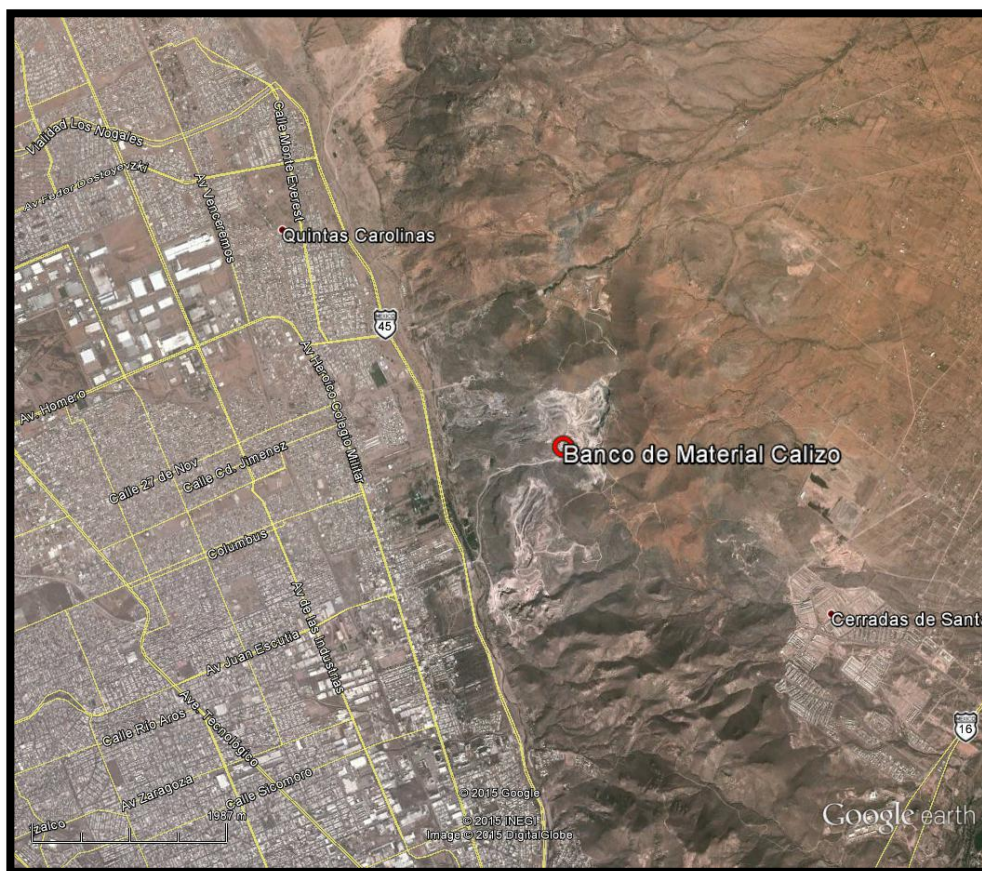


Figura 3: Ubicación del banco de los agregados de origen Calizo.



Figura 4: Banco de los agregados de origen No Calizo.

Los principales parámetros para la caracterización de los agregados para la elaboración de mezclas asfálticas son:

- **GRANULOMETRÍA**

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así poder obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular su porcentaje respecto al total y definir la masa que pasa. (Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas Norma SCT M·MMP·4·04·002/02, 2002)



- **PESO VOLUMÉTRICO**

Estas pruebas permiten determinar las masas volumétricas de los materiales para terracerías, es decir, las relaciones masa-volumen en diferentes estados o condiciones de acomodo, ya sean naturales o artificiales, así como los coeficientes de variación volumétrica al pasar de un estado a otro. (Masas Volumétricas y Coeficientes de Variación Volumétrica Norma SCT M·MMP·1·08/03 08, 2008)

- **EQUIVALENTE DE ARENA**

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra del material pétreo que pasa la malla N°4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla. (Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas Norma SCT M·MMP·4·04·004/02, 2002)

- **LÍMITES DE CONSISTENCIA**

Estas pruebas permiten conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales para terracerías que pasan la malla N°40 (0,425 mm), cuyos resultados se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. Las pruebas consisten en determinar el límite líquido, es decir, el contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 2,45 kPa (25 g/cm²); éste se considera como la frontera entre los estados semilíquido y plástico. (Límites de Consistencia Norma SCT M·MMP·1·07/07, 2007)

El límite plástico o el contenido de agua para el cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm; éste se considera como la frontera entre los estados plástico y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.



2.6 Modificadores Utilizados.

Una de las características de la mezcla modificada es la capacidad para proporcionar la mezcla de alta resistencia contra la deformación plástica que resulta de las cargas frecuentes del tráfico pesado y la presión alta causada por los neumáticos del vehículo.

Se ha traducido en un aumento significativo en el pavimento la durabilidad de un 20% hasta un 30% en comparación con las mezclas convencionales.

Algunas de las propiedades son mayor durabilidad, resistencia a la rotura de alto trabajo y ayuda contra el envejecimiento y la mejora de su capacidad para reducir al mínimo el ruido del tráfico.

Teniendo esto como antecedente podemos decir que es un buen elemento como agente aditivo tanto por la cuestión económica que es muy accesible dado que es un material de recicle como también por el lado que física y químicamente se adecua a lo necesario para el mejoramiento de nuestra mezcla asfáltica.

2.6.1 AZUFRE

El azufre se utiliza como aditivo extendedor, tiene como objetivo disminuir la cantidad de asfalto a emplearse en la mezcla asfáltica. Es un aditivo económico, fácil de integrarse con el asfalto, compatible con el mismo y no lo afecta. Esta clase de material, utilizado para esta causa, tiene los beneficios que es resistente al agua y a los combustibles.

Dado que en la actualidad los costos de petróleo y sus derivados, son altos, se decidió implementar esta clase de materiales para elaborar mezclas asfálticas, debido a el costo y la compatibilidad que existe y el comportamiento que ha demostrado a lo largo del tiempo, con adición de azufre así como a la disminución de temperaturas de mezclado y compactación, por lo que se busca los límites adecuados para ser utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas.



2.6.2 PET (POLIETILENO TEREFTALATO)

Es importante considerar el origen de este agente modificador, para darle una aplicación como material reciclable. El Tereftalato de polietileno (PET) es un termoplástico, resina de polímero, que pertenece a la familia de poliéster. El PET se usa en botellas de bebidas, fibras sintéticas, platos desechables y otros envases de plástico similar. La estabilidad de los valores del contenido de aglutinante diferentes depende de su relación con el contenido de PET, que siguen la misma tendencia.

Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

El fin de usar el PET como modificadores, es el fomentar el uso de materiales de desecho o re-uso en la industria de una manera ecológica y económica, de contribuir no sólo a en la construcción de carreteras y proyectos de pavimento más económico, sino también promover el cuidado del medio ambiente, buscando alternativas para el problema de residuos sólidos urbano, en particular el PET.



2.6.3 CAL (OXIDO DE CALCIO, CAO)

Debido a las investigaciones realizadas al comportamiento de la cal, se ha demostrado que este material, es una referencia mundial de los modificadores de asfalto para mitigar el daño de la humedad. Según Rasouli et al. (2018), la cal hidratada puede mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica de tres maneras: mejorando la resistencia al agrietamiento, mejorando la resistencia a la deformación permanente y reduciendo la tasa de rigidez a causa de la oxidación del material. A esto mismo se ha demostrado que existen diversos métodos, los cuales son adecuados para incorporar la cal a la mezcla asfáltica, entre los cuales tenemos:

- **Método de adición al tambor.** - La cal hidratada se agrega sobre todo, en su forma seca pura, pero se puede mezclar también con caliza fina para producir un “filler” activo (“filler” mezclado). Dependiendo de la tecnología de producción de mezclas asfálticas calientes (HMA) usada, la cal se añade al tambor junto con los “fillers” minerales, o se mezcla con otros finos en el grupo de tratamiento.
- **Cal seca en el método del árido húmedo.** - Este método implica medir la cal sobre una cinta de alimentación fría. Normalmente, la cal se adhiere suavemente al árido mojado superficialmente.
- **Método de la lechada de cal.**- Utiliza una lechada de cal, una mezcla de cal y agua, que se aplica al agregado en un porcentaje medido. Dicho método asegura una cobertura superior de la cal en la superficie de la roca. Después de que se aplique la lechada, el agregado se puede alimentar directamente en la planta o añadirse a la pila de cal durante un periodo de tiempo, permitiendo que la cal reaccione con las impurezas en la superficie del agregado.

En la presente investigación el método seleccionado fue “Método de adición al tambor”, este método fue seleccionado por la facilidad de replicar esta investigación en trabajo de campo.



3 Metodología

La etapa experimental consistió en la elaboración de muestras cilíndricas de mezclas asfálticas, con asfalto Ac-20, modificadas con Azufre, CAL (Oxido de calcio, CaO) y PET (Polietileno Tereftalato), en diferentes porcentajes. Además, se evaluó el efecto de la composición mineralógica del agregado pétreo, utilizando agregado de origen calizo y no calizo. Las mezclas se ensayaron con el método Marshall y la Prueba de Compresión Simple.

3.1 Distribución de Especímenes

De acuerdo con el tipo de agregado, Calizo y No Calizo, se realizó la distribución en dos categorías, como se presenta en la Tabla 3 y Tabla 4, respectivamente. Cada una de estas dos categorías se dividieron de tal forma que 45 muestras se usaron para realizar la evaluación por el método Marshall a temperaturas de 10, 20 y 50°C; de manera análoga, 45 muestras se ensayaron en la Prueba de Compresión Simple a temperaturas de 0, 20 y 40°C.

Para ambos tipos de agregados pétreos, se elaboraron especímenes, adicionando CAL, Azufre y PET, con los porcentajes que se indican en la Tabla 3 y Tabla 4 y la combinación de CAL – Azufre y CAL -PET es en función a determinar primeramente el porcentaje óptimo de CAL, para un total de 180 especímenes.



Tabla 3. Distribución de muestras material de origen Calizo.

MATERIAL CALIZO

MODIFICADOR	%	PRUEBA MARSHALL			PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE		
		Temperatura			Temperatura		
		10°C	20°C	50°C	0°C	20°C	40°C
Cal	0	3	3	3	3	3	3
	2	3	3	3	3	3	3
	5	3	3	3	3	3	3
Optimo Cal-Azufre	X% --- 7%	3	3	3	3	3	3
Optimo Cal-PET	X% --- 6%	3	3	3	3	3	3
TOTAL		15	15	15	15	15	15
TOTAL GENERAL		90					

Tabla 4. Distribución de muestras material de origen No Calizo.

MATERIAL NO CALIZO

MODIFICADOR	%	PRUEBA MARSHALL			PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE		
		Temperatura			Temperatura		
		10°C	20°C	50°C	0°C	20°C	40°C
Cal	0	3	3	3	3	3	3
	2	3	3	3	3	3	3
	5	3	3	3	3	3	3
Optimo Cal-Azufre	X% --- 7%	3	3	3	3	3	3
Optimo Cal-PET	X% --- 6%	3	3	3	3	3	3
TOTAL		15	15	15	15	15	15
TOTAL GENERAL		90					



3.2 Granulometría de los agregados.

La granulometría nos permite determinar la composición por tamaños de las partículas que integran los materiales empleados en terracerías, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular su porcentaje respecto al total y determinar el porcentaje que pasa.

Después de tener identificado el número total de muestras, se procedió a realizar la granulometría que se ocupó para cada mezcla. Las Tablas 5 y 6 muestran las granulometrías de los dos agregados pétreos.

La Tabla 5, muestra la distribución de los agregados de Origen Calizo, con su retenido por cada una de las mallas. Del mismo agregado, en la Figura 5, se muestran las curvas granulométricas con los límites que indica la normativa N-CMT-404/01 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, con la cual se garantiza que los tamaños de los agregados sean los indicados para la elaboración de ese diseño en particular.

Tabla 5. Granulometría de material de origen Calizo.

MATERIAL CALIZO					
MALLA	RETENIDO (gr)	RETENIDO PARCIAL (gr)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	% QUE PASA
3/4"	77.0	77.0	7.0	7.0	93.0
1/2"	209.0	286.0	19.0	26.0	74.0
3/8"	154.0	440.0	14.0	40.0	60.0
No4	231.0	671.0	21.0	61.0	39.0
No. 10	143.0	814.0	13.0	74.0	26.0
No. 20	143.0	957.0	13.0	87.0	13.0
No. 40	33.0	990.0	3.0	90.0	10.0
No. 60	33.0	1023.0	3.0	93.0	7.0
No. 100	22.0	1045.0	2.0	95.0	5.0
No. 200	33.0	1078.0	3.0	98.0	2.0
PASA 200	22.0	1100.0	2.0	100.0	0.0

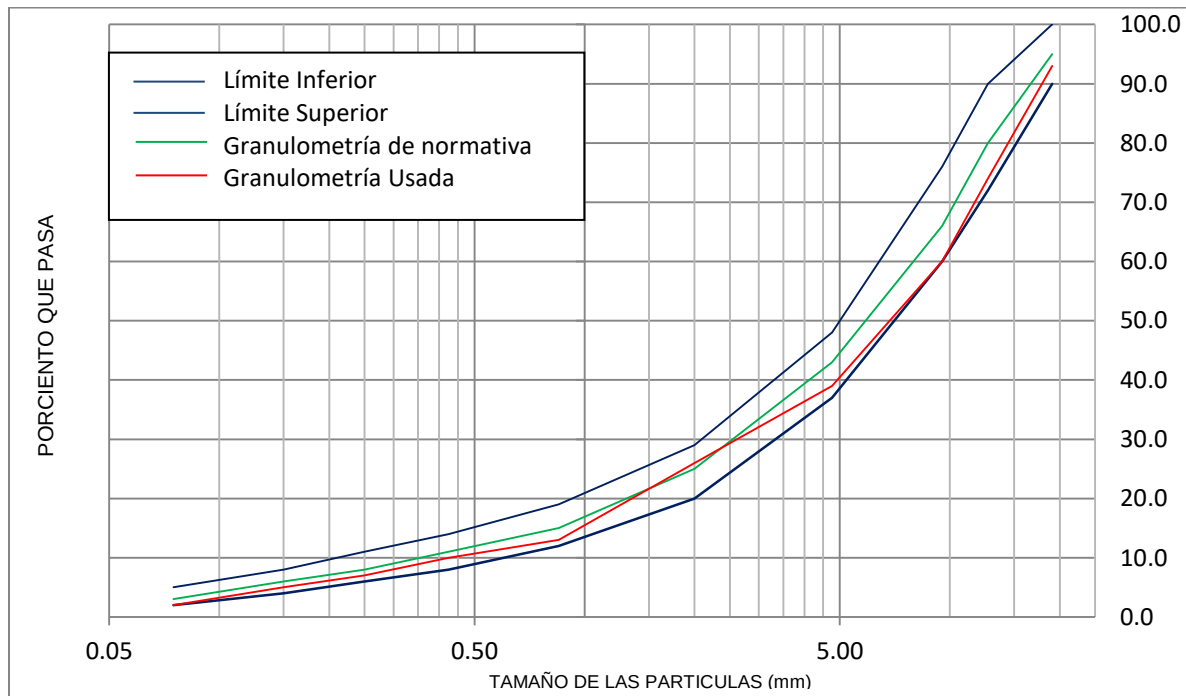


Figura 5: Granulometría usada en mezcla del material de origen Calizo.

Con relación a los materiales de Origen Calizo, en la Tabla 6 se muestra la distribución de los agregados, con su retenido por cada una de las mallas. Además, en la Figura 6, se presentan las curvas granulométricas correspondientes, así como los límites que indica la normativa N-CMT-404/01 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, con la cual se garantiza que los tamaños de los agregados sean los indicados para la elaboración de ese diseño en particular.



Tabla 6. Granulometría de material de origen No Calizo.

GRANULOMETRÍA MATERIAL NO CALIZO

MALLA	RETENIDO (gr)	RETENIDO PARCIAL (gr)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	% QUE PASA
3/4"	77.0	77.0	7.0	7.0	93.0
1/2"	187.0	264.0	17.0	24.0	76.0
3/8"	154.0	418.0	14.0	38.0	62.0
No4	242.0	660.0	22.0	60.0	40.0
No. 10	198.0	858.0	18.0	78.0	22.0
No. 20	88.0	946.0	8.0	86.0	14.0
No. 40	44.0	990.0	4.0	90.0	10.0
No. 60	33.0	1023.0	3.0	93.0	7.0
No. 100	33.0	1056.0	3.0	96.0	4.0
No. 200	22.0	1078.0	2.0	98.0	2.0
PASA 200	22.0	1100.0	2.0	100.0	0.0

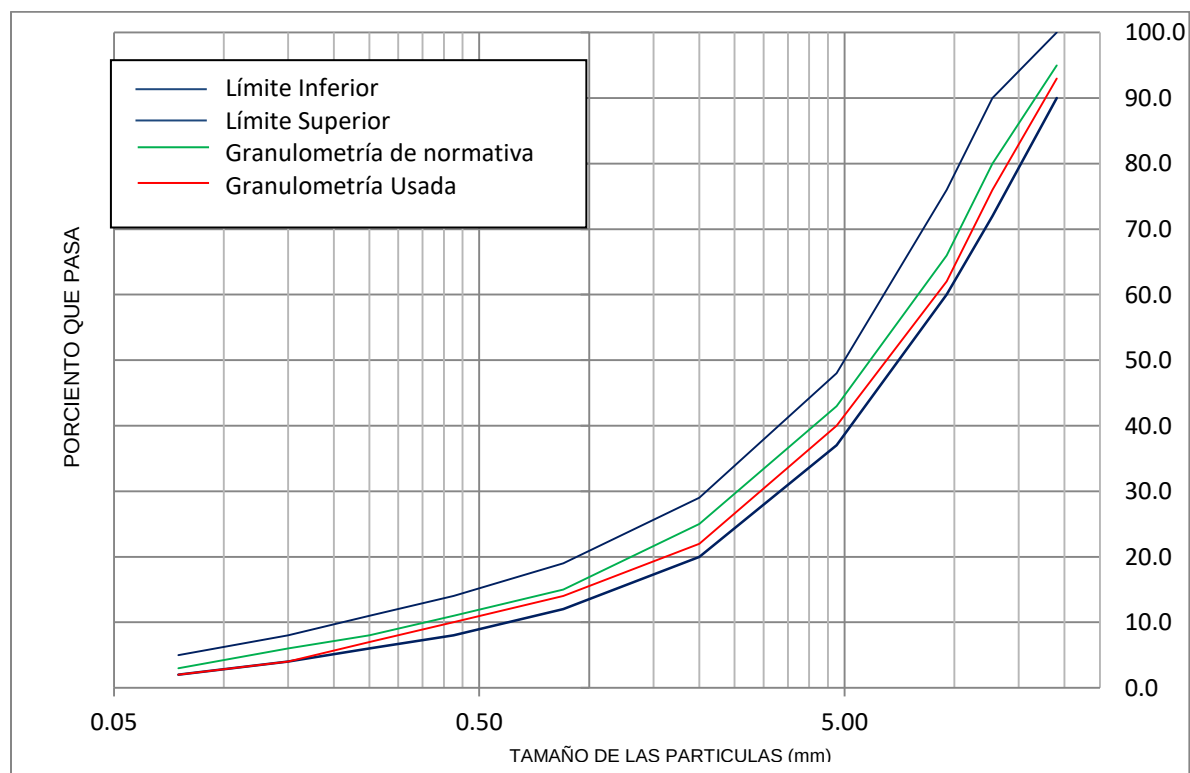


Figura 6: Granulometría usada en mezcla del material de origen No Calizo.



3.3 Elaboración de las muestras.

El proceso de elaboración de las muestras se decidió empezar por la condición cero (muestras de referencia) para ambos tipos de agregado, calizo y no calizo, esto con el fin de lograr determinar las condiciones naturales de los materiales, así como ver su comportamiento con los diferentes modificadores.



Figura 7: Proceso de cribado en laboratorio.



Figura 8: Proceso cribado en laboratorio para formar las muestras de 1,100 gr.



Figura 9: Muestras de 1,100 gr antes de hacer la mezcla con el material asfáltico y los modificadores



3.3 Caracterización de las mezclas asfálticas.

Método Marshall

Actualmente existen diferentes métodos de diseño de mezclas asfálticas para determinar el diseño óptimo a nivel laboratorio. Uno de los más reconocidos y recurridos es el método Marshall, y el más usado en México. Este método se basa en el ensayo de especímenes cilíndricos compactados, caracterizado por dos aspectos: la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo. Las mezclas asfálticas diseñadas mediante el diseño Marshall deben de cumplir con lo establecido en la norma N-CMT-4-05003/02 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Los parámetros que evalúa esta metodología

El método Marshall utiliza especímenes (pastillas) de prueba estándar de una altura de 64 mm y de 102 mm de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto y agregado. Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad, análisis de vacíos, y prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N que un espécimen estándar desarrollara a 60°C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.



Tabla 7. Parámetros de calidad en función del Número de ejes equivalentes.

CARACTERÍSTICAS	NUMERO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO ΣL	
	$\Sigma L < 10^6$	$10^6 < \Sigma L < 10^7$
COMPACTACIÓN; NUMERO DE GOLPES EN CADA CARA DE LA PROBETA	50	75
ESTABILIDAD; N (lbf), MÍNIMO	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
FLUJO; mm (10^{-2} in)	2 -4 (8 - 16)	2 -3,5 (8 - 14)
VACÍOS EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS (VMC): %	3 - 5	3 - 5
VACÍOS EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS (VFA): %	65 - 78	65 - 75

ΣL = NUMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 8.2 t, ESPERADO DURANTE LA VIDA ÚTIL DEL PAVIMENTO

Para la presente investigación se utilizó el diseño de $10^6 < \Sigma L < 10^7$ (un tránsito esperado mayor a un millón de ejes equivalentes, por lo tanto se generaron 75 golpes en cada cara de cada pastilla y se utilizaron los parámetros de la Tabla 7.

3.4 Procedimiento Método Marshall

Como primer paso se llevó a cabo la extracción de material pétreo (calizo y no calizo) de los bancos de materiales, y se efectuó la caracterización inicial de los mismos, cribándolos para definir la granulometría de diseño.

Una vez con el material cribado, se procedió a realizar el pesaje de cada uno de los tamaños retenidos por los tamices, respetando las granulometrías utilizadas para los dos agregados usados. Una vez finalizado el cribado, se empacó en bolsas, con contenido de 1,100 gr, dependiendo de la granulometría usada, esto con la finalidad de poder tener el material separado para cada agregado de cada pastilla. La Figura 14 muestra diferentes fases del desarrollo del ensayo Marshall.



A continuación, se calentaron los agregados a una temperatura de mezclado, como se indica en la Tabla 8. Al mismo tiempo, se calentó el cemento asfáltico AC – 20 a la misma temperatura, para poder así lograr el mezclado de los dos elementos y evitar el choque térmico. Incorporado el porcentaje de asfalto, se agregaron los modificadores, procediendo al llenado de los moldes, los cuales se calentaron previamente, compactándose con los golpes indicados por la norma., de acuerdo con granulometría mayor a un millón de ejes equivalentes, como se menciona en la Tabla 7. Al terminar los golpes de compactación se dejaron reposar las muestras, se pesó en el aire, se le colocó una capa impermeable al agua y luego se continuó a obtener el peso sumergido.



Figura (a): Muestras de 1,100 Gramos y Pastillas Asfálticas Elaboradas.



Figura (b): Pastillas Elaboradas.



Figura (c): Pastillas Con Estearato a 0° C. (Sumergido en agua).



Figura (d): Pastillas Con Estearato a 49° C. (Sumergido en agua en el baño Maria).



Figura (e): Pastillas En Prensa Marshall.



Figura (f): Pastillas Después de la Prensa Marshall.

Figura 10: Diferentes etapas del desarrollo del método Marshall.



Tabla 8. Temperatura de mezclado (Calidad de mezclas asfálticas para carreteras, norma SCT
N-CMT-4-05003/02)

CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO	TEMPERATURA DE MEZCLADO °C
AC - 5	120 - 145
AC - 10	120 - 155
AC - 20	130 - 160
AC - 30	130 - 165

A continuación, las muestras se colocaron en baño María, con el objeto de lograr dar la temperatura deseada. Posteriormente se secaron y se procedió a colocar en el molde. Finalmente, por medio de la prensa Marshall, se obtuvo su estabilidad y flujo.



4 Resultados y Análisis

4.1 Resultados del método Marshall con material Calizo.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la prueba Marshall, estabilidad y flujo, en relación con la normativa vigente N-CMT-4-05003/02 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, clasificados por temperatura a la cual se realizó el ensayo, en relación al tipo de modificador (Cal, Azufre y PET) y su contenido.

Tabla 9. Resumen de resultados Marshall de material de origen Calizo.

	TEMPERATURA (°C)	ESTABILIDAD (KN)	ESTABILIDAD (N)	FLUJO (MM)
0% CAL	10	53.21	53,210.00	1.92
	20	50.00	49,996.67	4.44
	50	15.68	15,680.00	4.04
2% CAL	10	53.18	53,180.00	2.03
	20	51.16	51,160.00	2.54
	50	14.60	14,596.67	3.76
5% CAL	10	52.64	52,636.67	1.94
	20	52.44	52,443.33	2.09
	50	17.79	17,786.67	4.58
2% CAL - 7% AZUFRE	10	54.80	54,796.67	2.48
	20	55.11	50,443.33	3.38
	50	56.61	24,556.67	4.38
2% CAL - 6% PET	10	52.97	42,115.00	2.74
	20	52.29	54,796.67	1.81
	50	43.78	50,443.33	5.82

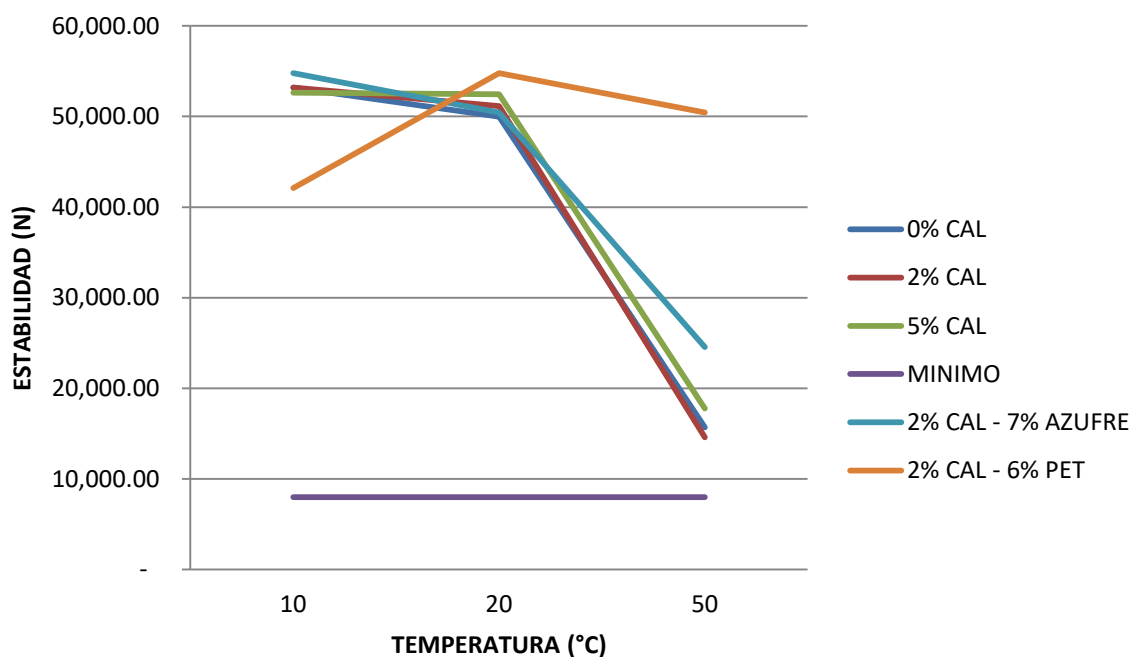


Figura 11: Resultados del parámetro de Estabilidad, de muestras con material Calizo.

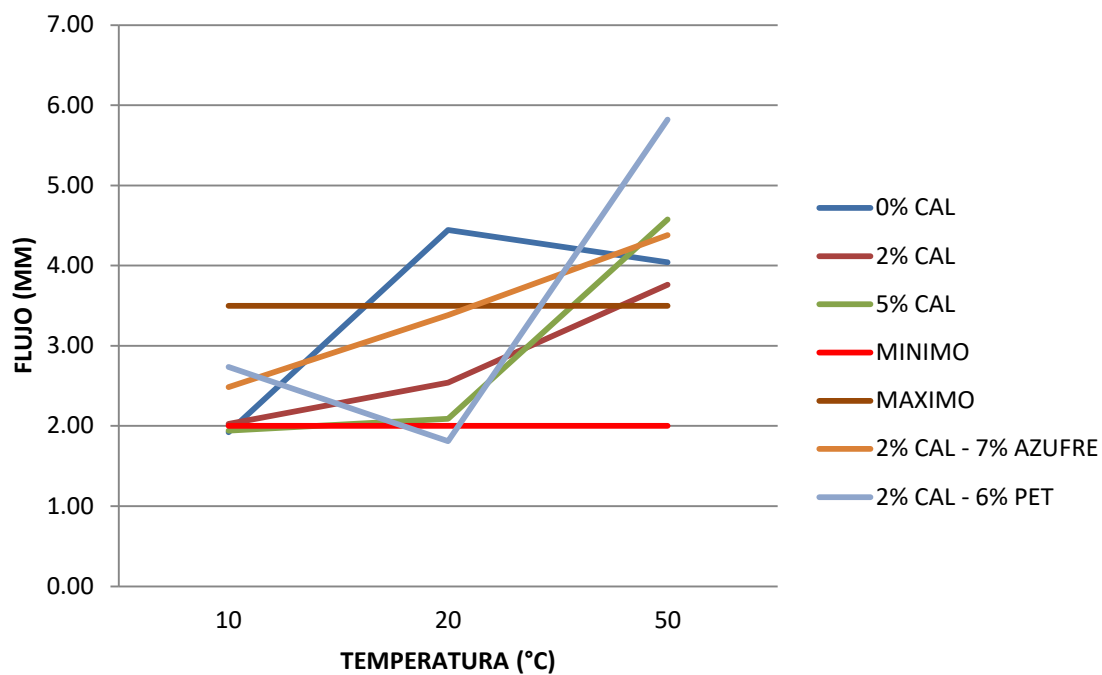


Figura 12: Resultados del parámetro de Flujo, de muestras con material Calizo.



4.2 Resultados del método Marshall con material No Calizo.

En la Tabla 10 y en las Figuras 13 y 14 se muestran los resultados de la prueba Marshall, parametros de estabilidad y flujo, clasificados por temperatura a la cual se realizó el ensayo, en relación al tipo de modificador(Cal, Azufre y PET) y su contenido.

Para el material No calizo, se presentó el problema que, por cuestiones de las dimensiones de las muestras. no fue posible realizar las pruebas con los modificadores con contenidos de 5% CAL y 2%CAL -6%PET, esto debido a que el total de la muestra fue mayor en tamaño que el molde para realizar la prueba Marshall.

Para el diseño Marshall, se utilizó el diseño de $10^6 < \Sigma L < 10^7$ (un tránsito esperado mayor a un millón de ejes equivalentes), por lo tanto los parámetros contra los que se evaluaron fueron 8,000 N como valor mínimo en relación con la estabilidad y el flujo. Según los parámetros de diseño, se tiene que está en el rango de 2 a 3.5mm.

Tabla 10. Resumen de resultados Marshall de material de origen No Calizo.

	TEMPERATURA (°C)	ESTABILIDAD (KN)	ESTABILIDAD (N)	FLUJO (MM)
0% CAL	10	48.34	48,343.33	2.74
	20	45.68	45,676.67	3.31
	50	22.00	21,996.67	4.32
2% CAL	10	49.52	49,515.58	3.85
	20	48.92	48,916.67	4.15
	50	25.17	25,173.33	5.14
2% CAL - 7% AZUFRE	10	54.80	54,796.67	2.48
	20	50.44	50,443.33	3.38
	50	24.56	24,556.67	4.38

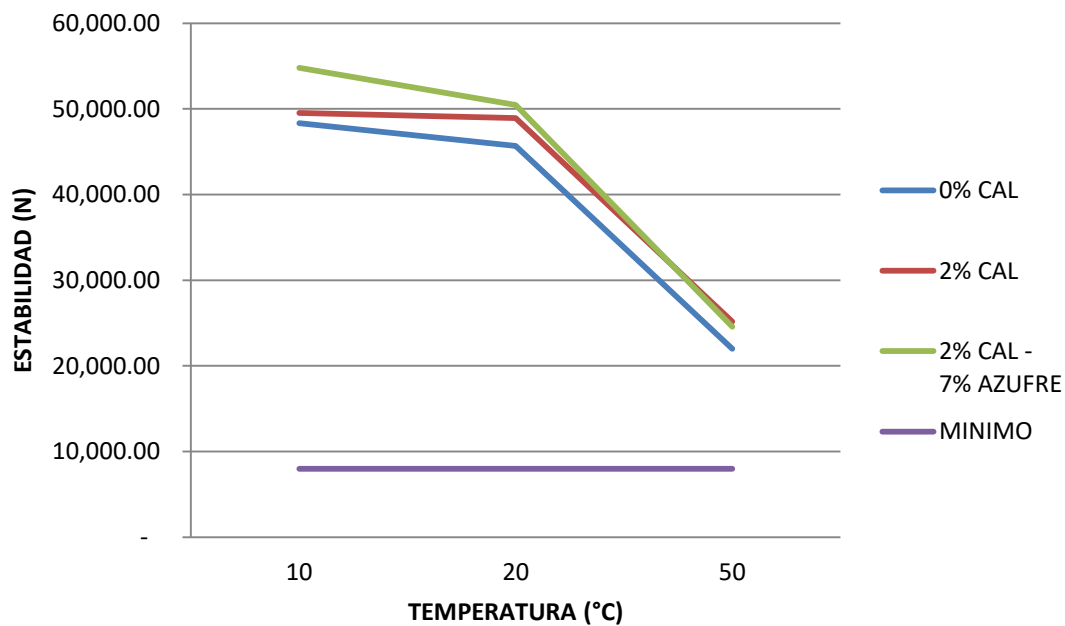


Figura 13: Resultados del parámetro de Estabilidad, de muestras con material No Calizo.

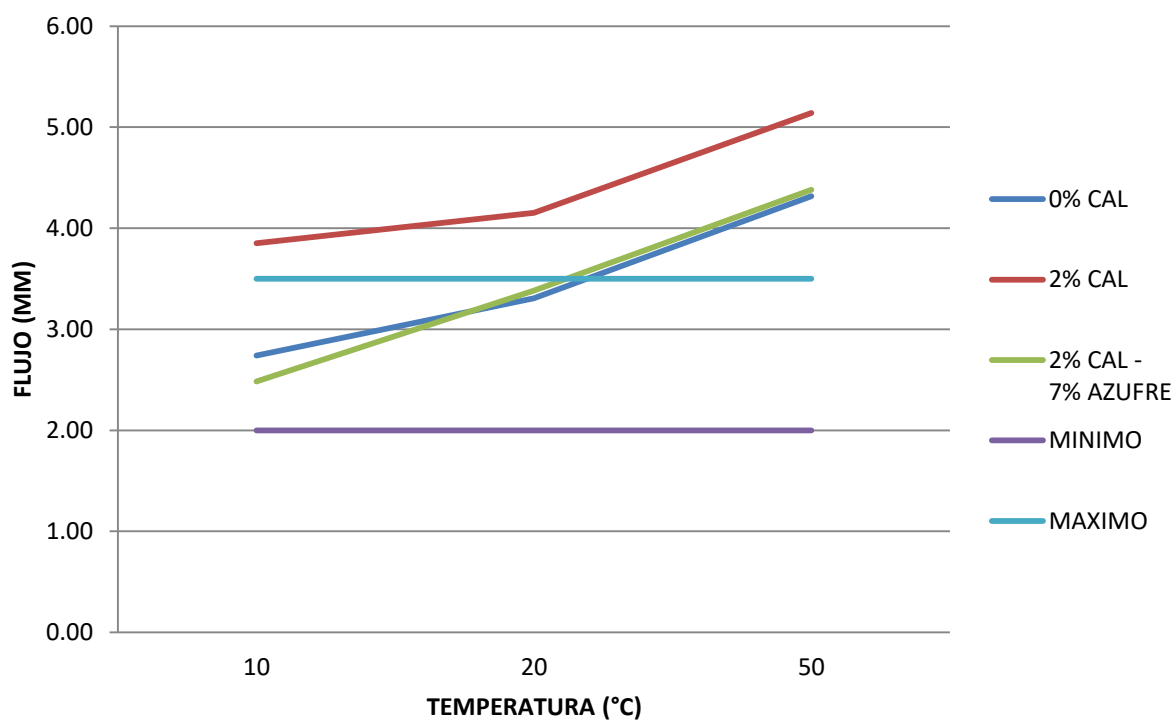


Figura 14: Resultados del parámetro de Flujo, de muestras con material No Calizo.



4.3 Resultados del método de Compresión Simple, con material Calizo.

El ensayo de Compresión Simple se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último de una muestra en forma de cilindro, con dimensiones de 64 mm con 102 mm de diámetro promedio, en condición no confinada, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación.

La Tabla 11 y Figura 20 se presentan los resultados de la prueba de Compresión Simple efectuada a las muestras cilíndricas, con los diferentes porcentajes de aditivos y condiciones de temperatura que se sometieron al momento de la prueba.

Tabla 11. Resumen de resultados Compresión Simple de material de origen Calizo.

	TEMPERATURA (°C)	COMPRESIÓN (KG)
0% CAL	0	5,829.17
	20	4,100.00
	40	1,718.33
2% CAL	0	6,475.00
	20	4,675.00
	40	1,752.50
5% CAL	0	6,754.17
	20	4,175.00
	40	2,020.83
2% CAL – 7%AZUFRE	0	9,208.33
	20	4,833.33
	40	2,129.17
2% CAL – 6%PET	0	9,016.67
	20	1,755.00
	40	737.50

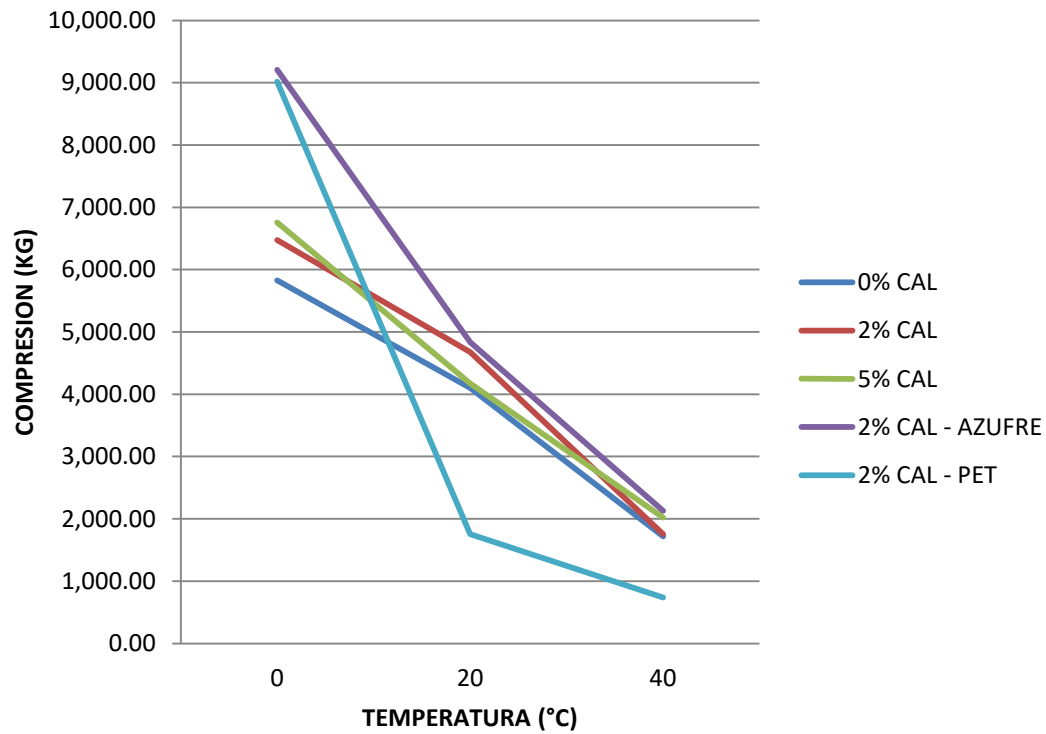


Figura 15: Grafica de resultados *material Calizo* del parámetro de Compresión Simple.

De los datos mostrados, se desprende, en relación con la Compresión Simple, que la mejor opción es la combinación de 2% CAL con AZUFRE, presenta un comportamiento más estable, tanto a bajas y como a altas temperaturas.



4.4 Resultados del método de Compresión Simple, con material No Calizo.

En relación con los resultados obtenidos se obtuvo un resumen clasificado por temperatura a la cual se realizó la prueba de compresión y adicionalmente por el tipo de modificador y el porcentaje de cada uno como se muestra en la tabla 12.

Para el material No calizo se presentó el problema que por cuestiones de las dimensiones de las muestras no fue posible realizar las pruebas del 5% CAL y 2%CAL -6%PET, esto generado a que el total de la muestra fue mayor en tamaño que el molde para realizar la prueba de Compresión Simple.

Tabla 12. Resumen de resultados Compresión Simple de material de origen No Calizo.

	TEMPERATURA (°C)	COMPRESIÓN (KG)
0% CAL	0	4,516.67
	20	4,200.00
	40	2,866.67
2% CAL	0	5,358.33
	20	2,858.33
	40	2,666.67
2% CAL - AZUFRE	0	8,125.00
	20	5,625.00
	40	3,808.33

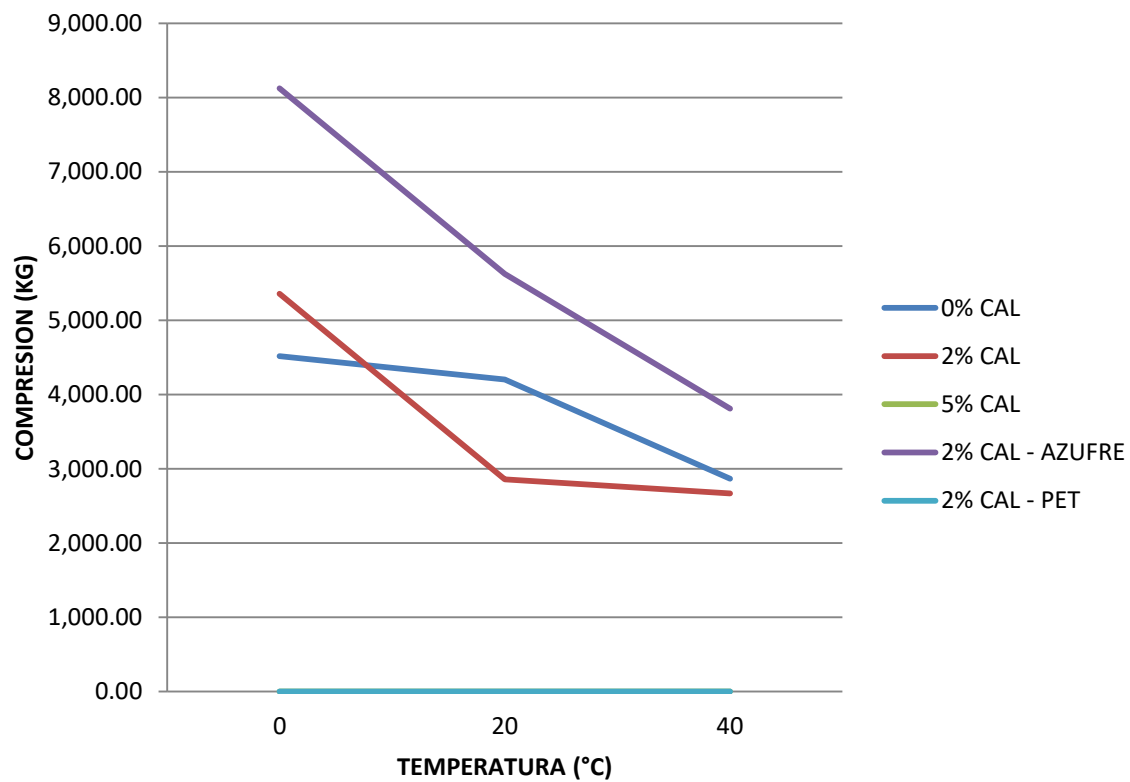


Figura 16: Grafica de resultados *Material No Calizo* del parámetro de Compresión Simple.

Para el caso de las muestras elaboradas con material No Calizo, ensayadas con la prueba de Compresión Simple, se puede determinar que la mejor opción es la combinación de 2% CAL con AZUFRE, ya que presenta un comportamiento más estable tanto a bajas y como a altas temperaturas.



Figura 17: Muestra en prensa de compresión simple.



Figura 18: Equipo Compresión Simple.



Figura 19: Muestras falladas de Compresión Simple.



Figura 20: Muestra falladas de Compresión Simple.



5 Conclusiones y Recomendaciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que los aditivos (modificadores) empleados en este trabajo de investigación, mejoraron el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

Los resultados son de gran importancia, ya que permitieron determinar el efecto de cada modificador y los beneficios en las diferentes mezclas asfálticas, de acuerdo a los ensayos de las muestras probadas por el método Marshall y por el de Compresión Simple. La temperatura a la que se sometieron las muestras influyó en los resultados en ambos métodos.

En general, en el método Marshall, el material calizo generó mejores resultados para el caso de las muestras con CAL 2%, ya que se presentó un comportamiento más estable. De manera análoga, el mejor resultado para el material no calizo, fue para el caso con CAL 2% y 7% de AZUFRE.

La mejora que se obtuvo con los modificadores fue en relación a la estabilidad de la mezcla, la cual permaneció en parámetros similares a la condición cero, tanto en el material Calizo y No Calizo. En relación con el flujo, en ambos casos, con los modificadores que representaron mejor comportamiento en el flujo, bajó independientemente de la temperatura.

Con el ensayo de Compresión Simple, los modificadores con mejor desempeño, fueron las muestras con la combinación del 2% de CAL con 7% de AZUFRE, ya que presentaron una mayor capacidad de carga, tanto para el material Calizo como también para el material de origen No Calizo.

En el material de origen Calizo la capacidad de carga aumentó con respecto a el material sin modificadores en un 57.97 %, esto para la condición de temperatura de 0°C. Para la temperatura de 20°C aumentó su capacidad de carga en un 17.89 % y, para la temperatura de 40°C aumentó su capacidad de carga en un 23.91%, logrando, para el material de origen Calizo, un incremento de su capacidad en todas las temperaturas de ensayo.



Las muestras elaboradas con material de origen No Calizo con modificadores presentaron una mayor capacidad de carga en un 79.89%, respecto a las elaboradas sin modificadores, esto para la condición de temperatura de 0°C. Para las muestras ensayadas a temperatura de 20°C, aumentó la capacidad de carga en un 33.93 % y, para la condición de temperatura de 40°C, aumentó en un 32.85%, esto es, que las muestras con material de origen No Calizo con modificadores incrementaron su capacidad de carga para todas las condiciones de temperaturas de prueba, por lo cual el material original experimentó una mejora al realizar esta combinación.

En general, los modificadores presentaron un beneficio la calidad de las mezclas, esto permite tener mezclas con mejores características a costos más económicos con acarreo con menores distancias y para mezclas de mejor calidad.

Es recomendable realizar un tramo de prueba, para lograr evaluar las mezclas con modificadores al someterlas a cargas de tráfico reales. Además, sería de interés evaluar el comportamiento de estos modificadores en las capas de microaglomerados, para determinar si son compatibles estos parámetros de diseño y lograr hacer superficies de rodamiento de mejor calidad a costos más económicos.



6 Referencias

- N-CMT-4-05-001/05, 2005. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) Calidad de materiales asfálticos.
- N-CMT-4-04/17, 2017. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) Materiales pétreos para mezclas asfálticas en caliente.
- N-CMT-404/01, 2001. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) LIMITES DE GRANULOMETRIA.
- N-CMT-4-05-002/06, 2006. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) Calidad para asfaltos modificados.
- N-CMT-4-05003/02, 2002. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) Metodo Marshall.
- Garnica, P., Delgado, H. y Sandoval, C. (2005). Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas. IMT. Publicación Técnica No. 271. México.
- Rasouli, A., Kavussi, A., Qazizadeh, M., y Taghikhani, A. (2018). Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime. Construction and Building Materials, 164, 655-662. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.003
- SCT Inventario Nacional de Bancos De Materiales Listado De Mezclas Asfálticas, <http://b.materiales.siac.gob/#>
- SCT Inventario Nacional de Bancos De Materiales Ubicación de los Bancos, <http://b.materiales.siac.gob/#>
- SCT M-MMP-1-07/07, 2007. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) Límites de Consistencia.
- SCT M-MMP-1-08/03 08, 2008. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) Masas Volumétricas y Coeficientes de Variación Volumétrica Norma.
- SCT M-MMP-4-04-002/02, 2002. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas Norma.
- SCT M-MMP-4-04-004/02, 2002. Norma SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes) Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas Norma.
- SCT N-CMT-4-05003/02, 2002 Norma SCT ((Secretaría de Comunicaciones y transportes) Calidad de mezclas asfálticas para carreteras.
- Normativa vigente de SCT (Secretaría de Comunicaciones y transportes)
<https://normas.imt.mx/>



Curriculum Vitae

Correo: adrian710.4@gmail.com

Objetivo Profesional:

Aplicar mis conocimientos para la mejora de la infraestructura o planeación de la misma, realizando los proyectos de ampliación o construcción, así mismo lograr ampliar mis cualidades humanas y profesionales.

Escolaridad:

Maestría en Vías Terrestres en la Universidad Autónoma de Chihuahua

Enero 2011- Diciembre 2012

Tesis: Asfaltos Modificados Con Agregados de Origen Calizo.

Universidad Autónoma de Chihuahua

Diplomado en Ferrocarriles Septiembre 2020- Diciembre 2020

Universidad Autónoma de Chihuahua

Ingeniero Civil Agosto 2005- Diciembre 2009

Experiencia Laboral:

- **Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)**

Fecha: Febrero 2012 – A la Fecha

Residencia General de Carreteras Alimentadoras

Puesto: Residente de Obra

- **Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) Facultad de Ingeniería**

Fecha: Agosto 2015 – A la fecha

Puesto: Catedrático.

Asociaciones Afiliadas:

Asociación Mexicana De Ingeniería De Vías Terrestres (AMIVTAC)

- Miembro De La Mesa Directiva. Coordinador del Capítulo Estudiantil 2020-a la fecha.
- Miembro De La Mesa Directiva. Coordinador del Capítulo Estudiantil 2016-2018
- Miembro de equipo Fundador del Capítulo Estudiantil Facultad De Ingeniería, UACH.

Colegio de Ingenieros Civiles de Chihuahua (CICCH)