

ING. VÍCTOR HUGO
CARDONA MONCADA

TENSIÓN INDIRECTA EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE SUSTITUYENDO PARCIALMENTE EL AGREGADO Y
ASFALTO POR RESIDUOS DE CANTERA Y RESINA

2022



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“TENSIÓN INDIRECTA EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE
SUSTITUYENDO PARCIALMENTE EL AGREGADO Y
ASFALTO POR RESIDUOS DE CANTERA Y RESINA”**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES
Y MOVILIDAD

PRESENTA
ING. VÍCTOR HUGO CARDONA MONCADA

DIRIGIDA POR:
DRA. TERESA LÓPEZ LARA

Santiago de Querétaro, Qro. Diciembre 2022



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

TENSIÓN INDIRECTA EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE SUSTITUYENDO PARCIALMENTE EL AGREGADO Y ASFALTO POR RESIDUOS DE CANTERA Y RESINA

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Víctor Hugo Cardona Moncada

Dirigido por:


Dra. Teresa López Lara

Dra. Teresa López Lara
Presidente



Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Secretario



Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Vocal



Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Suplente



Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Suplente



Firma

RESUMEN

Los residuos de toba volcánica son agregados pétreos que surgen por procesos de corte y tallado en los bancos de material, esto genera la acumulación de residuos y apertura de nuevos vertederos cubriendo grandes superficies aledañas. Por consiguiente, se busca introducir este material tal y como se encuentra en el banco de material, como una sustitución parcial en la estructura granulométrica densa de agregados basálticos. Lo anterior, fue para reducir el uso de agregado virgen, además se agregará una resina epóxica para que junto con la sustitución de agregados por residuos de toba volcánica se mantengan los valores de tensión indirecta respecto a la muestra base (mezcla densa basáltica).

Después de obtener la caracterización del material basáltico y residuos de toba volcánica se usó un diseño Marshall para obtener un contenido óptimo de aglutinante, en el cual se analiza la volumetría, estabilidad y flujo resultante en una estructura granulométrica densa basáltica y en otras con sustitución parcial (10 y 20%). Sin embargo, para obtener la tensión indirecta se agregó una sustitución parcial en el aglutinante por resina epóxica (8 y 16%) para cada estructura granulométrica densa.

El primer resultado que abrió paso a continuar con el diseño fue que los desechos de toba volcánica tuvieron una abrasión de 28.8% cumpliendo con los parámetros de calidad. Ahora bien, los resultados de estabilidad y flujo cumplieron todos los parámetros para el diseño Marshall de tráfico pesado ($ESALs > 10^6$) incluso los que tenían 10 y 20% de sustitución parcial de agregado por residuos, es decir, los valores se mantuvieron dentro de los parámetros incluso aumentaron. También para la tensión indirecta los valores aumentaron con la sustitución parcial de agregado por residuos, incluso al sustituir parcialmente el aglutinante por resina epóxica la resistencia aumento cuando se tiene 8% de resina epóxica. Por lo tanto, la mejor mezcla sustentable es cuando se tiene 10% de residuos de toba volcánica. Y cuando a la mezcla anterior se le sustituye 8% de resina epóxica, aparte de que la temperatura de mezclado y compactación baja 12°C, la estabilidad y resistencia a la tensión indirecta es excelente.

(Palabras clave: Toba volcánica, sustitución parcial, mezcla asfáltica, diseño Marshall, tensión indirecta, resina epóxica)

ABSTRACT

Volcanic tuff residues are stone aggregates that arise by cutting and carving processes in the material banks, this generates the accumulation of residues and the opening of new landfills covering large surrounding areas. Therefore, it is sought to introduce this material as it is found in the material bank, as a partial substitution in the dense granulometric structure of basaltic aggregates. The foregoing, to reduce the use of virgin aggregate, an epoxy resin will also be added so that, together with the replacement of aggregates by volcanic tuff residue, the indirect stress values are maintained with respect to the base sample (dense basaltic mixture).

After obtaining the characterization of the basaltic material and volcanic tuff residues, a Marshall design was used to obtain an optimal binder content, in which the volumetry, stability and flow resulting in a dense basaltic granulometric structure and in others with partial substitution are analyzed. (10 and 20%). However, to obtain the indirect tension, a partial substitution in the binder for epoxy resin (8 and 16%) was added for each dense granulometric structure.

The first result that opened the way to continue with the design was that the volcanic tuff waste had an abrasion of 28.8%, complying with the quality parameters. However, the stability and flow results met all the parameters for the heavy traffic Marshall design (ESALs>106) even those with 10 and 20% partial substitution of aggregate by waste, that is, the values remained within the parameters even increased. Also, for the indirect stress, the values increased with the partial substitution of aggregate for residues, even when partially substituting the binder for epoxy resin, the resistance increased when there was 8% epoxy resin. Therefore, the best sustainable mixture is when there is 10% volcanic tuff residue. And when 8% of epoxy resin is substituted for the previous mixture, apart from the fact that the mixing and compaction temperature drops by 12°C, the stability and resistance to indirect tension is excellent.

(Key words: Volcanic tuff, waste, partial substitution, asphalt mixture, Marshall design, indirect tensile, epoxy resin)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecido con la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UAQ, por brindarme la oportunidad de realizar un Posgrado del PNPC y así complementar mis estudios enfocados al área de Vías Terrestres y Movilidad.

Además, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, que me asignó un apoyo económico haciendo posible mi estancia, así como el suministro de materiales y equipo para el correcto desarrollo de mi experimentación.

Agradecido con Dios, así como con todos los que se encontraron a mi alrededor en ese momento y me apoyaron, especialmente mi familia, a estar de pie en el proceso a pesar de una pandemia que estuvo en curso. Ellos fueron pilar y apoyo externo indispensable para llegar hasta este momento.

Agradezco a mi directora de tesis la Dra. Teresa López Lara y al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel por estar en todo momento atendiendo mis necesidades generadas dentro de la investigación, de igual manera reiterando el valor de su tiempo. Gracias por compartir su experiencia y conocimiento con mucha servicialidad, en el cual una parte de su conocimiento queda plasmado en esta tesis. Además de la energía de ir más allá de lo convencional y el apoyo en resolver rumbos del tema y metodología.

Agradezco al resto de mis sinodales la Dra. María de la Luz Pérez Rea, al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza y al Dr. Ricardo Montoya Zamora, los cuales ejercieron un papel importante con su asesoría para delimitación de mi tema con sus constructivas observaciones y llevar a cabo mi investigación correctamente en el laboratorio. Así como el conocimiento catedrático que me brindaron en el transcurso del programa, que fue parte crucial para crecer y comenzar mi proceso de investigador.

También agradezco al coordinador M.C. Gerardo Medellín Aguilar y al personal encargado del Laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática por el gran apoyo en el uso y compostura de máquinas existentes y necesarias para mi experimentación.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3 HIPÓTESIS.....	6
1.4 OBJETIVO.....	7
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 INTRODUCCIÓN A LOS PAVIMENTOS.....	8
2.2 PAVIMENTO FLEXIBLE.....	8
<i>2.2.1 Capas de la estructura del pavimento.....</i>	<i>8</i>
<i>2.2.2 Clasificación de pavimentos flexibles.....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.3 Funciones</i>	<i>10</i>
2.3 MEZCLA ASFÁLTICA	11
<i>2.3.1 Clasificación</i>	<i>11</i>
<i>2.3.2 Agregado pétreo.....</i>	<i>12</i>
<i>2.3.3 Clasificación</i>	<i>13</i>
<i>2.3.4 Aglutinante</i>	<i>19</i>
2.3.4.1 Polímeros	19
2.3.4.2 Asfalto	20
2.3.4.3 Resinas.....	21
2.3.4.4 Aglutinante de asfalto modificado con resinas.....	22
2.4 ANTECEDENTE DE DISEÑOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS	22
2.5 MÉTODO MARSHALL.....	24
<i>2.5.1 Número de pastillas a realizar</i>	<i>24</i>

2.5.2	<i>Temperatura de mezclado y compactación</i>	25
2.5.3	<i>Preparación de moldes y martillos</i>	25
2.5.4	<i>Compactación de muestras</i>	25
2.5.5	<i>Estabilidad y flujo Marshall</i>	25
2.6	RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA	27
2.7	SOSTENIBILIDAD	29
2.8	SUSTITUCIONES PARCIALES	29
3.	METODOLOGÍA	31
3.1	SELECCIÓN DEL BANCO DE MATERIAL	31
3.2	SELECCIÓN Y MUESTREO DEL MATERIAL	33
3.3	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS	35
3.4	SELECCIÓN DE ASFALTO Y RESINA	40
3.4.1	<i>Asfalto</i>	40
3.4.2	<i>Temperatura</i>	42
3.4.3	<i>Resina</i>	43
3.5	DISEÑO MARSHALL	43
3.5.1	<i>Diseño experimental</i>	43
3.5.2	<i>Granulometrías densas de diseño y combinación de propiedades de agregados</i> .	44
3.5.3	<i>Diseño Marshall</i>	45
3.6	ENSAYOS DE CALIDAD	46
3.6.1	<i>Resistencia a la tensión indirecta</i>	46
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1	MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR MARSHALL	49
4.1.1	<i>Combinaciones de las granulometrías de diseño</i>	50
4.1.2	<i>Dosificación de muestras</i>	52
4.1.3	<i>Temperatura del asfalto</i>	54
4.1.4	<i>Volumetría, estabilidad y flujo</i>	55
4.1.4.1	<i>Aprovechamiento de la sustitución parcial por residuos de cantera</i>	62
4.2	ENSAYO DE CALIDAD	63
4.2.1	<i>Tensión indirecta</i>	63

4.2.2	<i>Aprovechamiento de la sustitución parcial (resina)</i>	65
4.2.3	<i>Comparativa de hipótesis y lo alcanzado en la investigación</i>	66
5.	CONCLUSIONES	67
6.	BIBLIOGRAFÍA	70
7.	ANEXO	81

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Nombre de las rocas resultante del agrupamiento de la clasificación de acuerdo con su textura y composición mineral (Tarbuck & Lutgens, 2005)	16
Tabla 2. Clasificación de depósitos piroclásticos (Branney, Brown, & Calder, 2021) ..	18
Tabla 3. Criterios del método Marshall (Asphalt Institute, 2014; N.CMT.4.05.003, 2016)	26
Tabla 4. Propuesta de categorización por tensión indirecta para minimizar la formación de surcos en el pavimento (Bennert, Haas, & Wass, 2018).....	28
Tabla 5. Clasificación y designación dependiendo de las proporciones granulométricas del material (ASTM C131, 2014)	38
Tabla 6. Aglutinante asfáltico clasificado por viscosidad (Lavin, 2003; N.CMT.4.05.001, 2006)	41
Tabla 7. Niveles de sustitución parcial de toba volcánica en %, para estabilidad y flujo Marshall	44
Tabla 8. Caracterización de los materiales usados para el diseño de mezcla	49
Tabla 9. Informe por superintendencia de aseguramiento de la calidad del producto (PEMEX) sobre Asfalto EKBE 64-22	49
Tabla 10. Propuesta de combinación de granulometrías con 0%, 10% y 20% de toba (diseño 1, 2 y 3 respectivamente)	50
Tabla 11. Propuesta de combinación de granulometrías para 0% de toba y 20% de toba (diseño 1, 2 y 3 respectivamente)	51
Tabla 12. Dosificación en gramos de muestra con 0% de sustitución de agregado	52
Tabla 13. Dosificación en gramos de muestra con 10% de sustitución de agregado	53

Tabla 14. Dosificación en gramos de muestra con 20% de sustitución de agregado	53
Tabla 15. Temperatura en grados centígrados de mezcla y compactación de una mezcla respecto a su contenido de resina	54
Tabla 16. Diferencias de temperaturas entre incrementos de sustitución parcial de resina epóxica	55
Tabla 17. Promedios de resultados de las pastillas por diseño Marshall con 0, 10 y 20% de toba volcánica	57
Tabla 18. Resultados de comparativa cuando se tiene un mismo porcentaje de asfalto .	62
Tabla 19. Resultados de contenido óptimo de asfalto	62
Tabla 20. Resultados de comparativa cuando se tiene un mismo porcentaje de asfalto .	64
Tabla 21. Análisis de resultados logrados comparados con la hipótesis	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación química de rocas volcánicas usando el diagrama TAS (Le Maitré <i>et al.</i> , 2002).....	17
Figura 2. Diagrama de la prueba de tensión indirecta (AlAwad,2004)	28
Figura 3. Mapa conceptual de metodología	31
Figura 4. Ubicación del banco de toba volcánica	32
Figura 5. Ubicación del banco de Basalto “El Jovero”	32
Figura 6. Ubicación del banco de Basalto “Grako”	33
Figura 7. Muestreo del material de acuerdo con la norma ASTM-D75	34
Figura 8. Muestreo del material de acuerdo con la norma ASTM-D75	34
Figura 9. Análisis granulométrico	35
Figura 10. Saturado superficialmente seco a) Basalto b) Toba volcánica	36
Figura 11. Densidad relativa y absorción del agregado fino cribado de la arena de basalto	37
Figura 12. Degradación de agregados gruesos a) Tambor con basalto b) Toba volcánica después de la abrasión.....	38
Figura 13. Partículas separadas por malla listas para calibrar a) Rocas de basalto b) Rocas de toba volcánica	39
Figura 14. Probetas y varilla lastrada para prueba de equivalente de arena.....	40
Figura 15. Asfalto.....	42
Figura 16. Resina epóxica	43

Figura 17. Muestras de mezcla asfálticas compactadas a diferentes contenidos de asfalto	45
Figura 18. Tensión indirecta pavimentos.....	46
Figura 19. Pastillas generadas para prueba de resistencia a la tensión indirecta (IDT) ..	47
Figura 20. Propuesta granulométrica para diferentes sustituciones de toba volcánica ...	51
Figura 21. Prueba de estabilidad y flujo	56
Figura 22. Pastillas para tensión indirecta envueltas en Parafilm.....	64

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Análisis granulométrico de las muestras extraídas de los bancos de material	48
Gráfica 2. Carta de viscosidad (Ekbe PG 64-22)	54
Gráfica 3. Comportamiento de las diferencias de temperatura entre incrementos de resina epóxica	55
Gráfica 4. Resultados de Vacíos de aire vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)	58
Gráfica 5. Resultados de Vacíos del Agregado Mineral vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)	59
Gráfica 6. Resultados de Vacíos llenados con asfalto vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)	59
Gráfica 7. Resultados de prueba Marshall; Estabilidad vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)	60
Gráfica 8. Resultados de prueba Marshall; Flujo vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)	61
Gráfica 9. Resultados de Gravedad Específica Neta vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)	61
Gráfica 10. Tensión indirecta en una mezcla asfáltica con sustitución parcial, tanto en el agregado, como en el aglutinante	65
Gráfica 11. Tensión indirecta en una mezcla asfáltica (otra forma de representación gráfica)	65

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con AASHTO (1993) existen dos principales tipos de pavimentos: los flexibles y los rígidos, son diferenciados tanto por los materiales usados, así como por el número de capas utilizadas. En 2017 se encontró que entre el 90 y 96% de carreteras en Europa y países de Norteamérica como Canadá, EUA y México son elaboradas con pavimentos flexibles de tipo asfálticos. Por ejemplo, México de 178,000 km de superficies pavimentadas tan sólo el 4% no son asfálticas (Thives & Ghisi, 2017). El presente estudio se enfocará en la superficie de rodadura de un pavimento flexible.

La capa de rodadura de un pavimento flexible generalmente está compuesta por 95% de agregado; mientras que el 5% corresponde al aglutinante, comúnmente asfalto con aditivos (Martinho, Picado & Capitão, 2018; Shah 97 *et al.*, 2020; Valdés *et al.*, 2019). El agregado pétreo basáltico y el asfalto son los materiales convencionales que se siguen usando, pero ahora se busca la manera acudir a las sustituciones parciales con el fin de conocer si la utilización de materiales de desecho son opción. En el caso de los agregados pétreos, inicialmente se realizan pruebas de caracterización que deben cumplir con los parámetros de límites máximos y mínimos para un pavimento, una vez completa la caracterización de ambos tipos de material se compararán los resultados de los agregados de desechos de toba volcánica con los agregados de control (basalto), es decir, el agregado convencional.

Los agregados pétreos de desechos de toba volcánica de acuerdo con la clasificación de residuos de Zaragoza (2000) pueden ser nombrados residuos industriales sólidos, los cuales son inertes, es decir, desechos sólidos no peligrosos. El conjunto de agregados como tal deberán cumplir una granulometría designada para mezclas asfálticas, la estructura granulométrica basáltica (muestra pétreo de control) se podrá sustituir parcialmente por otro material pétreo, en este caso, por desechos de toba volcánica. Estos desechos tienen una estructura granulométrica que no cumplen con los parámetros granulométricos para una mezcla asfáltica. Sin embargo, al realizar una sustitución parcial

de este material en una estructura granulométrica basáltica para mezcla asfáltica, se logrará con sustituciones parciales al combinar teóricamente los materiales y con ello se podrán definir los límites de sustitución parcial posibles.

Ahora bien, el aglutinante se aditiva, en este caso, la resina epóxica se utiliza con la expectativa de mejorar las características mecánicas de la mezcla, mientras que el agregado pétreo es usado para reducir un problema ambiental. Sin embargo, para comprobar que las sustituciones parciales son viables para mantener o mejorar los resultados de una mezcla asfáltica convencionales se establece un método de diseño.

Los métodos de diseño de una mezcla asfáltica son requeridos para encontrar las propiedades volumétricas y algunas otras propiedades principales que miden carga máxima aplicada y deformación adecuadas en una mezcla. Esto, con el fin de encontrar para una granulometría planteada un contenido de asfalto óptimo, es decir, aquel contenido que represente los mejores resultados. El método, para elegir el contenido óptimo de asfalto, es el diseño Marshall creado por Bruce Marshall, ex ingeniero del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi, el cual consiste en diseñar pastillas de mezcla asfáltica compactadas con cierto número de golpes dependiendo de los ejes equivalentes calculados.

El contenido óptimo se obtendrá de las gráficas resultantes cuando se ensayen las diferentes pastillas que se propusieron a diferentes contenidos de asfalto con sus respectivas repeticiones por contenido de asfalto. Con los resultados de volumetría y estabilidad y flujo se podrá realizar una comparativa con los diferentes porcentajes de sustitución parcial establecidos en el diseño experimental para afirmar si hubo mejoras al modificar las variables.

Entonces, para seguir validando el uso de los desechos en un compuesto existen más de una docena de pruebas de agrietamiento, pero la mayoría tienen complejos procedimientos de prueba y análisis. La prueba de resistencia a la tensión indirecta, por

sus ensayos mecánicos, es una de las pruebas más accesibles que mide la resistencia a los surcos de mezclas asfálticas en caliente. Esta prueba, en este estudio, se realizará con las combinaciones correspondientes y combinaciones respectivas.

A través de los años se han perfeccionado muchos métodos para la construcción de carreteras; sin embargo, lo que ha permanecido constante es el uso de materiales vírgenes como el asfalto y los agregados pétreos. Sin embargo, actualmente las vías terrestres son la infraestructura más usada de transporte en todo el mundo, pero no se ha buscado como tal la sustitución parcial de nuevos materiales que tengan un impacto positivo en el medio ambiente y estructura del pavimento, por eso, se proponen las variables de agregados de desechos de toba volcánica y resina epóxica.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Los residuos de toba volcánica son materiales que ya fueron explotados porque son producto de corte y procesos de pulido, estos desechos podrán utilizarse en la industria de construcción para evitar la sobreacumulación y la apertura de nuevos depósitos de desechos.

Sargin *et al.* (2016) mencionan que la necesidad de la explotación de bancos de material ha generado agotamiento de recursos naturales, por lo que los materiales de desecho comienzan a ser opción en el pavimento. Además, Garbacz & Sokolowska (2013) mencionan que estamos en una nueva era donde buscamos el desarrollo sostenible para equilibrar el uso de fuentes naturales al minimizar el consumo de materias primas. Así que una manera de disuadir la problemática mencionada es: sustituyendo áridos nuevos por áridos de desecho inertes en lugar de depositarlos en vertederos (Cardoso *et al.*, 2019; Putra *et al.*, 2018)). Dado que Putra *et al.* (2018) mencionan que los materiales de desecho pueden mejorar la resistencia y durabilidad de los pavimentos. Asimismo, Ortiz *et al.* (2016) aseguran que los residuos de cantera técnicamente se pueden aprovechar principalmente en aplicaciones en la industria de los áridos para la construcción, industria de la cerámica y la de los productos prefabricados de accesorios para bienes inmuebles.

A condición de la estructura granulométrica de los materiales de desecho, la sustitución parcial es la mejor opción para agregar estos materiales a las mezclas asfálticas, los cuales pueden generar efectos convenientes por la variabilidad de sus propiedades físicas, pero similitud en propiedades mecánicas. En adición, para subsanar las deficiencias de propiedades mecánicas que llegaran a tener los desechos, la resina termoestable es un polímero derivado del petróleo capaz de subsanar estas variabilidades. Por consiguiente, Barbuta & Toma (2015) hablan de que el uso de resinas epóxicas que unen los agregados finos de tamaño menor de 0.075 milímetros de toba volcánica y otros agregados gruesos como relleno generan una estructura más homogénea y compacta, dándole mejores propiedades mecánicas y elásticas mejoradas. Claro está que, según las proporciones usadas, mostrará mejoras a las propiedades de resistencia a la abrasión, intemperie, así como aislamiento acústico y térmico.

Entonces, para una mezcla homogénea de asfalto y resina en una mezcla asfáltica Cong *et al.* (2015) afirma que la resistencia a la tracción de un aglutinante de resina epóxica con asfalto está relacionada linealmente con el contenido de asfalto y sus resultados muestran que la resistencia a la tracción aumentó con la disminución del contenido de asfalto. También El Rahman & El Kholy (2012) mencionan que el cemento asfáltico modificado con polímeros aumenta su rendimiento en campo, los cuales mejoran la resistencia al agrietamiento térmico, resistencia a la tracción del asfalto, entre otras. Así mismo Wei & Zhang (2012) afirman que al crear el asfalto epoxi (resina epóxica y asfalto) muestra buenas características mecánicas.

Así que, al formar un material compuesto mezclado con residuos de cantera se le está dando uso a materiales inertes sin probabilidades de segundo uso que fueron extraídos del medio ambiente y cumplieron con un fin comercial de crear piezas ornamentales. Además, con la sustitución parcial de resina en el asfalto se está buscando que la deficiencia de los materiales de residuo subsane las deficiencias de los residuos.

Ahora bien, el Plan Nacional de Desarrollo (2019-2024) defiende la idea de ser defensor del ambiente natural por lo que la presente investigación va enfocada a subsanar el problema de sobreacumulación de residuos de cantera que mencionan Arroyo *et al.* (2016) y Galetakis & Soultana (2016) siendo una situación nacional que se encuentra en los depósitos de residuos de canteras, donde los residuos se encuentran en los costados de carreteras de diferentes localidades. Por lo tanto, al contemplar este material en pavimentos flexibles se evitaría la explotación de nuevos bancos de materiales, que para su proceso de extracción necesitan energías que contaminan. Los bancos de material por lo regular se encuentran en zonas rurales, por consecuencia, estos residuos se podrán aprovechar en la construcción de caminos rurales, reforzando la comunicación vial de la sociedad mencionada en el PND (2019-2024).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente para países desarrollados, la necesidad de los pavimentos crece día con día por diferentes causas como: el crecimiento horizontal de las ciudades, la importación de productos nacionales e internacionales, la migración de ciudad para mejorar el nivel socioeconómico, educativo, incluso de seguridad policial y sólo por mencionar algunas. En consecuencia, hay demanda de nuevas líneas de comunicación, así como el mantenimiento o modernización de líneas existentes.

Puesto que, la producción de cantera es a nivel mundial, si se toman en cuenta las cifras del SGM (2017) tan solo en México ha habido una producción no metálica minera de 274,966,721,544,645.00 de las cuales 259,466,388.52 ha sido de cantera o toba volcánica a nivel nacional en pesos corrientes. Por consecuencia, la extracción de agregados pétreos tiene influencia negativa al medio ambiente porque maximiza la producción de materiales no renovables (Shatarat *et al.*, 2019). Asimismo, Galetakis & Soultana (2016) reafirman que la explotación de cantera genera subproductos que plantean problemas ambientales graves, esto contribuye en gran medida a la acumulación y dispersión nociva en el aire, el agua y el suelo de partículas finas y pedacería.

Por otra parte, para Gómez *et al.* (2018) la extracción de toba volcánica causa problemas de contaminación del paisaje (contaminación paisajista) porque en su proceso de obtención se generan residuos por corte y/o tallado de la roca. Por ejemplo, Arroyo *et al.* (2016) en un estudio respecto al nivel de aprovechamiento de la toba volcánica, en cuanto al nivel de producción, obtuvo que: 59% se aprovecha, 23% es pedacería y 18% es polvo. Con las cifras anteriores, es una realidad que el material se encuentra disponible como residuo y en grandes cantidades y va aumentando cada año, así como las áreas de vertederos.

Ahora bien, en cuanto al aglutinante para la construcción de vías terrestres, de acuerdo con Padilha & Ghisi (2017) el pavimento asfáltico contiene asfalto producto del petróleo para cementar los agregados como arena y roca triturada. Por lo tanto, Autelitano *et al.* (2019) mencionan que la mayoría del asfalto refinado se obtiene de depósitos naturales como subproducto de la refinación del petróleo y este líquido viscoelástico al ser termoplástico, dependerá directamente de añadir la suficiente temperatura para mezclar y compactar. Entonces, la energía calorífica es necesaria para acondicionar el asfalto y así realizar la mezcla asfáltica en caliente. Por lo tanto, reducir la cantidad de calor empleado para alcanzar la temperatura de mezcla y compactación, a su vez logrará reducir la emisión de gases contaminantes. Esta reducción de gases sucede porque de acuerdo con Padilha & Ghisi (2017) al igual que Zapata & Gambatese (2005) mencionan que el consumo de energía del sector vial, para realizar procesos, incluye productos derivados del petróleo, gas natural, electricidad, combustibles no renovables y residuos.

1.3 HIPÓTESIS

La sustitución parcial de agregados convencionales y asfalto por residuos de toba volcánica y resina epóxica, mínimo en un 40% en peso respecto al total de agregados y un mínimo 10% de resina en peso respecto al total de aglutinante, conserva la resistencia a la tensión indirecta de un pavimento flexible.

1.4 OBJETIVO

Disminuir la cantidad de agregado natural y de asfalto usado en un pavimento flexible utilizando residuos de cantera y resina epóxica; y mantener la resistencia a la tensión indirecta.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN A LOS PAVIMENTOS

Rondón & Reyes (2015) definen a un pavimento como conjunto de estructuras viales superpuestas, en forma multicapa construidas por materiales seleccionados, apoyadas sobre una subrasante natural, modificada o sobre un terraplén.

Tanto AASHTO (1993), Huang (2004) como Papagiannaskis & Masad (2008) mencionan que los pavimentos de acuerdo con su estructuración se pueden dividir en: pavimentos flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos compuestos. Este estudio, se enfoca a un pavimento flexible que de acuerdo con Kumar & Prasad (2020) es una estructura con varias capas elásticas que se apoya sobre una capa natural. En adición, para Papagiannaskis & Masad (2008) el término flexible es debido a la manera en que el asfalto puede distribuir tensiones y desviaciones no uniformes las cuales dependerán de la rigidez relativa con relación a las capas granulares subyacentes.

2.2 PAVIMENTO FLEXIBLE

Para Arshad (2018) un pavimento flexible es una superestructura vial que hace factible el tránsito de ciertos vehículos con cargas específicas sobre un conjunto de materiales con características idóneas compactados en diversas capas. El primer contacto lo tiene la capa superior y distribuirá las cargas a través de todas las capas inferiores sin causar ninguna destrucción en el pavimento. Y a la vez brindar comodidad y seguridad en una superficie uniforme de color y textura.

2.2.1 Capas de la estructura del pavimento

Para AASHTO (1993) un pavimento flexible se compone por una serie de capas en su estructura que son:

- Cama de camino preparada o subrasante: Es una capa con material de terreno natural compactada a una densidad especificada.
- Subbase: Se construye sobre la subrasante y es una capa de material granular con

pocos requerimientos de fuerza, plasticidad y gradación. Por eso, se puede omitir cuando la subrasante tiene una calidad de altas especificaciones. En caso de que se use esta capa puede ser tratada que es cuando se usan materiales específicos. Para capas no tratadas deberán cumplir con un 95% de compactación Proctor. Las funciones estructurales secundarias adicionales de una subbase son:

- Usar materiales graduados relativamente densos si se requiere evitar la intrusión de suelos con granos finos en la base.
- Evitar que el agua libre se retenga con una capa con material de drenaje.
- Establecer una plataforma resistente para utilizar equipo de construcción cuando el suelo como tal no puede sostenerlo.

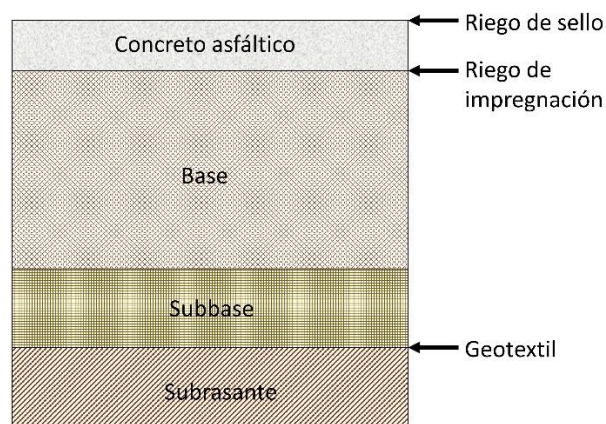


Figura 1. Sección transversal típica de un pavimento flexible (AASHTO, 1993)

- **Base:** Se construye sobre la subbase, en caso de que no haya sido necesaria construirla directamente sobre la subrasante, la cual consiste en agregados como grava y arena triturada. Se puede usar sin tratar, pero requiere mayores condiciones de calidad en la construcción como una calidad de compactación de hasta un 95% de máxima densidad o usar materiales alternativos para estabilizar como cemento portland, asfalto, entre otras.

Es requerido estudiar el comportamiento de los materiales para encontrar el más adecuado de acuerdo con los objetivos y alcances establecidos. El estudio riguroso se logra

con pruebas específicas que miden desde calidad individual hasta su comportamiento en un compuesto (mezcla).

2.2.2 Clasificación de pavimentos flexibles

De acuerdo con Kumar & Prasad (2020) los pavimentos flexibles dependiendo de la intensidad de tráfico en un tiempo determinado se clasifican de la siguiente manera.

- Alto volumen: Diseñadas en 3 a 4 capas que se mencionan de manera descendente como capa de concreto asfáltico, base, subbase y continua con capas de subrasante compactadas.
- Bajo volumen: Diseñada a 2 capas, la cual en orden descendente es la capa de concreto asfáltico y material granular que este último experimenta un comportamiento de deformación en parte recuperable y otra plástica.

2.2.3 Funciones

Para Mallick & El-Korchi (2013) los pavimentos son usados para construir carreteras, pistas de aterrizaje, estacionamientos y calzadas. Lo anterior, con el fin de ejercer una comunicación funcional entre las personas para el desarrollo de la vida diaria. Mientras tanto, la función técnicamente como estructura, es soportar la carga aplicada por vehículos sin que sufra deformaciones excesivas.

Las características funcionales de acuerdo con Méndez (2009) que debe cumplir son:

- Circulación segura, cómoda (textura adecuada) y confortable prolongada.
- Uso de la vía bajo cualquier condición climatológica y durabilidad ante estas.
- Distribuir las cargas vehiculares sobre la estructura de multicapas, sin deformarlas o dañarlas.
- Atender las exigencias medio ambientales (contaminación del aire), así como la estética (distribución) y generación de ruido.
- Ser lo más económica posible respecto a las exigencias de resistencia estructural.

2.3 MEZCLA ASFÁLTICA

El pavimento flexible está compuesto por varias capas que incluyen agregados pétreos, de éstas, la de rodadura está compuesta por 95% de agregado, mientras que el 5% corresponde al aglutinante, generalmente asfalto con aditivos (Martinho *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2020; Valdés *et al.*, 2019). Estos componentes según Fakhri *et al.* (2018) es lo que conforma a una mezcla asfáltica, la cual su rendimiento se influencia por sus materiales, la composición, diseño de mezcla, tipo de aglutinante y agregado.

Ahora bien, una vez que la mezcla asfáltica es compactada se le conoce como carpeta asfáltica. Según Thom (2014) menciona que la mezcla al aplicarle una compresión adecuada de acuerdo con las especificaciones generadas en los métodos de diseño, las características mecánicas tenderán a mejorar.

2.3.1 Clasificación

La mezcla asfáltica al ser un compuesto con diversos materiales, cada uno de ellos posee diversas propiedades y de estas realizar diversas combinaciones. Con lo anterior, se deduce que se tienen diversas clasificaciones:

Por la distribución de agregados de acuerdo con Asphalt Institute (2014):

- Mezclas asfálticas de granulometría densa: Cuando se tienen agregados bien distribuidos en todos los números de tamices.
- Mezclas asfálticas de granulometría abierta: Cuando se tiene entre 18 y 22% de vacíos de aire, esto para que el agua drene. De la misma manera para Tanzadeh (2019) menciona que una granulometría abierta es una mezcla que tiene agregado con un grado de separación el cual se utiliza esencialmente en la superficie de la infraestructura carretera.
- Asfalto con matriz de piedra: Cuando se tiene entre 70 a 80% de un agregado grueso, con más del 6% de asfalto y arriba del 10% de relleno de finos. Así mismo Maurice (2017) menciona que los pavimentos de

grado grueso la distribución de los agregados permitirá un alto grado de compactación mejorando las propiedades mecánicas de resistencia.

Por calentarse o no, antes del transporte, colocación y compactación de acuerdo con la NCHRP (2011):

- Mezcla de asfalto en caliente: El asfalto que se utiliza para esta condición es rígido a temperatura ambiente, por eso, es necesario calentarlo antes del transporte, colocación y compactación.
- Mezcla asfáltica en frío: Se utiliza una emulsión líquida a temperatura ambiente, esta compuesta de asfalto, agua y otros aditivos que cuando entra en contacto con el agregado, el asfalto se separa del agua y cubre el agregado.
- Mezcla asfáltica tibia: Cuando se usan métodos para reducir de 1 a 30°C la temperatura de una mezcla asfáltica en caliente y esto puede ser a través de: aditivos químicos, técnicas de aplicación de agua haciéndolo espumar y agregar ligantes duros y blandos.

Por el lugar de mezclado de acuerdo con Jiménez, & Molina (2009):

- En planta: Se realizan en lugares con máquinas estacionarias que reflejan un control estricto.
- En sitio: Se realizan en los lugares de la pavimentación con máquinas móviles y equipo especial.

2.3.2 Agregado pétreo

Papagiannaskis & Masad (2008) mencionan que los agregados se refieren a ese material derivado de rocas naturales o subproductos de procesos de fabricación que pueden ser de diversos tamaños. El término agregado surge porque cada partícula es un conjunto de minerales que se encuentran unidos y cada uno mantiene sus propiedades. Sin embargo, las rocas más usadas son agregados de varias clases de minerales provenientes de una roca o con la calidad de una roca (Tarbuck & Lutgens, 2005). Aproximadamente

2.1 mil millones de toneladas de agregados naturales se producen anualmente de las cuales 897 millones son toneladas de arena y grava.

2.3.3 Clasificación

Las rocas pueden ser asignadas con un nombre de acuerdo con sus proceso de formación (ígneas, sedimentarias y metamórficas); propiedades determinadas por sus composición química, donde sólo ocho elementos representan más del 98% en peso de la corteza continental siendo el Oxígeno (46.6%), Silicio (27.7%), Aluminio (8.1%), Hierro (5.0%), Calcio (3.6%), Sodio (2.8%), Potasio (2.6%) y Magnesio (2.1%), de los cuales los dos primeros de mayor porcentaje son fácil de combinarse y formar el mineral más común llamado silicato, dando como resultado la mayoría de las rocas ígneas; así como por la estructura interna de sus materiales (Tarbuck & Lutgens, 2005).

De acuerdo con Papagiannaskis & Masad (2008) y Orozco, Branch, & Jiménez (2014) los agregados en cuanto al origen geológico de su roca madre se clasifican como ígnea, sedimentaria y metamórfica.

- Rocas ígneas: Cuando el silicato líquido o magma fundido se enfría. Existen dos tipos dependiendo de sus procesos de solidificación:
 - o Extrusivas: Cuando el magma se enfría en la superficie de la corteza terrestre rápidamente formando cristales pequeños.
 - o Intrusivas: Cuando el magma se enfría con mayor lentitud que las extrusivas, pero debajo de la corteza terrestre formando grandes cristales.
- Rocas sedimentarias: Se forman debido a la consolidación de rocas que se han ido desintegrando por procesos de desgaste y la abrasión por el viento, agua hielo, gravedad o de alguna manera por precipitados químicos.
- Rocas metamórficas: A partir de las rocas sedimentarias e ígneas a través del proceso de recristalización donde influye la temperatura y la presión se forman este tipo de rocas.

De acuerdo con Tarbuck & Lutgens (2005) la porción sólida de nuestro planeta excepto el núcleo es ígnea, cubierta parcialmente por una capa delgada de rocas sedimentarias. Por lo tanto, las ígneas se clasificarán de acuerdo con Gill (2010) por su

composición química, composición mineral, textura y color. Pero, inicialmente se tiene que conocer si su origen es intrusivo (plutónico) o extrusivo (volcánico).

2.3.3.1.1 Textura

Una vez que se conoce el origen de la roca se comienza la clasificación por textura, ya que es de manera observacional y no se requiere equipo sofisticado para describir el aspecto general en función al tamaño, forma y ordenamiento de sus cristales, todo esto dependerá en gran medida del enfriamiento del magma o lava. De acuerdo con Tarbuck & Lutgens (2005) la clasificación por textura es:

- Afanítica: Son rocas de estructura fina con cristales demasiado pequeños, que se forman con el enfriamiento rápido de lava en la superficie o masas pequeñas de magma dentro de la corteza superior.
- Fanerítica: Son rocas de estructura de grano grueso perceptibles a simple vista, que surgen de la solidificación lenta de masas grandes de magma debajo de la superficie.
- Porfídica: Son rocas que sus diferentes minerales encontrados en profundidades mayores se solidifican a diferentes temperaturas y velocidades, por lo que algunos cristales son bastante grandes mientras que otros apenas se comienzan a formar, sin embargo, siguen siendo perceptibles a simple vista y cuando salen a la superficie el resto de los cristales se solidifican rápidamente. Es decir, grandes cristales incrustados en una matriz de otros más pequeños.
- Vítreas: Son rocas formadas cuando los iones antes de poderse unir en una estructura cristalina ordenada se congelan cuando son expulsadas en erupciones volcánicas y se asemejan a un vidrio.
- Piroclástica: Son rocas formadas a través de partículas expulsadas arrastradas e las paredes de la chimenea volcánica durante una erupción violenta, entonces los fragmentos de roca se consolidan con el resto de la lava en la superficie rápidamente. Es decir, son fragmentos de rocas ya solidificadas antes de la explosión volcánica cementadas con lava que se solidifica después de la explosión en el exterior de forma rápida.


2.3.3.1.2 Colores

Otra clasificación es por las proporciones de colores claros y oscuros que contengan.

- Félsicas: Minerales claros de cuarzo y feldespato.
- Intermedias: Composición entre las rocas félsicas y máficas, al menos un 25% de silicatos oscuros, .
- Máficas: Silicatos oscuros y además plagioclasa.
- Ultramáfica: Contienen minerales ferromagnesianos de color oscuro y no contienen minerales claros.

Ahora bien, si agrupamos las rocas ígneas en clasificación de acuerdo con su textura, su composición mineral y color resultaría la siguiente matriz como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Nombre de las rocas resultante del agrupamiento de la clasificación de acuerdo con su textura y composición mineral (Tarbuck & Lutgens, 2005)

Composición química		Granítica (félsica)	Andesítica (intermedia)	Basáltica (máfica)	Ultramáfica
Minerales dominantes		Cuarzo Feldespatos potásico Plagioclasa rica en sodio y calcio	Anfíbol Plagioclasa rica en sodio y calcio	Piroxeno Plagioclasa rica en calcio	Olivino Piroxeno
Minerales accesorios		Anfíbol Moscovita Biotita	Piroxeno Biotita	Anfíbol Olivino	Plagioclasa rica en calcio
T E X T U R A	Fanerítica (Grano grueso)	Granito	Diorita	Grabo	Peridotita
	Anfanítica (grano fino)	Riolita	Andesita	Basalto	Komatita (poco común)
	Porfídica	Porfídico, precede cualquiera de los nombres anteriores siempre que haya fenocristales apreciables			Poco comunes
	Vítrea	Obsidiana (vidrio compacto) Pumita (vidrio vacuolar)			
	Proclástica (fragmentaria)	Toba (fragmentos de menos de 2mm) Brecha volcánica (fragmentos de más de 2mm)			
Color de la roca (basado en el % de minerales oscuro)	0% a 25%	25% a 45%	45% a 85%	85% a 100%	
					

Sin embargo, si se desconocieran los minerales, pero se conoce el análisis químico de las rocas la forma de clasificación sería de acuerdo con el diagrama de clasificación, por su nombre en inglés “Total Alkali-Silica” (TAS) como se ve en la Figura 1. Esta metodología consiste en clasificar y nombrar una roca ígnea en función del peso de los minerales Na_2O y K_2O contra el contenido de SiO_2 (silicatos).

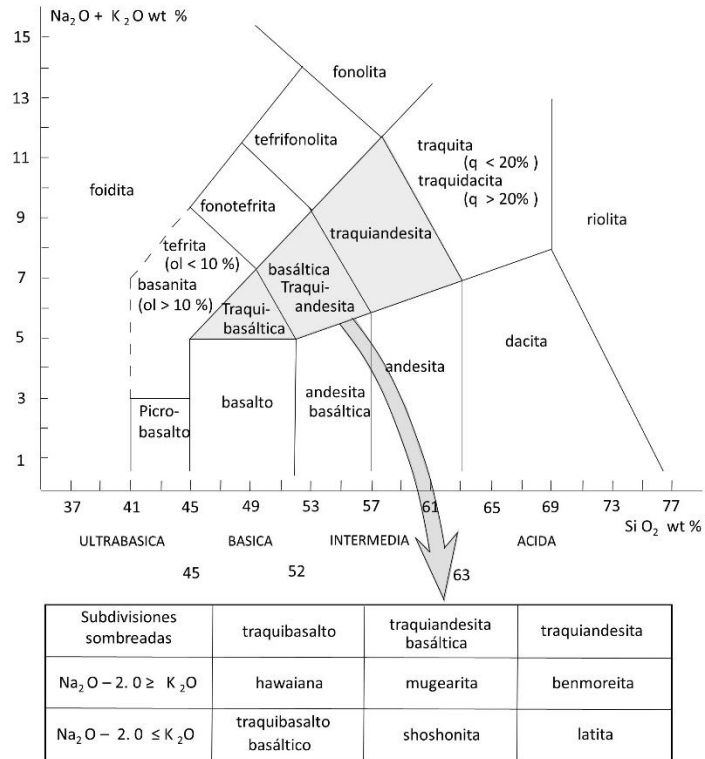


Figura 1. Clasificación química de rocas volcánicas usando el diagrama TAS (Le Maitré *et al.*, 2002)

El basalto es roca ígnea que por su composición mineralógica es máfica, mientras que por su textura puede ser porfídica o afanítica, cuyos cristales o fenocristales la hacen tener una matriz fuerte (Castro, 2015). Las gravas utilizadas en un pavimento normalmente son de textura anfanítica. Y si se contara con la información química para Le Maitre *et al.* (2002), de acuerdo con el diagrama de clasificación, por su nombre en inglés, “Total Alkali-Silica” (TAS), si se tuvieran valores entre 45% y 52% de SiO₂ también se le conocería como basalto (Figura 2).

En cambio, la toba volcánica según Rico & Del Castillo (2005) es una roca ígnea de la más común sobre las rocas extrusivas piroclásticas por su textura, la cual está compuesta por fragmentos de fenocristales rotos y fragmentos de lava solidificada. Aunque también se podría considerar como riolita debido a que sus colores son claros y para colores claros se tienen minerales y compuestos similares a una riolita, sin embargo, los procesos de formación definirían exactamente el nombre correcto. Se considera que la toba volcánica

es poco resistente, pero algunas se encuentran lo suficientemente bien consolidadas para soportar cargas importantes una de ellas hasta se puede considerar como cimentación o para usarlas en taludes verticales.

Un piroclasto es un fragmento de roca formado por la explosión volcánica para después transportarse en forma de depósitos ya sea sobre el aire, en contacto con la superficie o las profundidades del mar. Estos depósitos se clasifican en diversos tipos dependiendo del tamaño de sus clastos. Ahora bien, el nombre de toba es inicialmente por el pequeño tamaño de sus clastos como se muestra en la

Tabla 2. Mientras que volcánica porque su proceso de formación fue consecuencia de una explosión volcánica y así resulta el nombre de *Toba Volcánica*.

Tabla 2. Clasificación de depósitos piroclásticos (Branney, Brown, & Calder, 2021)

Nombre del depósito		Descripción
Aglomerado		Bombas (diámetro > 64 mm) > 75%
Brecha piroclástica		Bloques (diámetro < 64 mm) > 75%
Toba de brecha		25% < Bombas y/o bloques < 75%
Toba de lapilli		Bombas y/o bloques < 25%, lapilli y ceniza < 75%
Roca de lapilli		Lapilli (2 mm < diámetro < 64 mm) < 75%
Toba o toba de ceniza	Toba gruesa	2 mm < Ceniza < 1/16 mm
	Toba fina	Ceniza < 2 mm

Así mismo para Alvarado (2009) la toba es una roca volcánica formada por cenizas que pueden contener fragmentos de lava y algunos cristales, pómez y obsidiana. Según Ortiz *et al.* (2018) los rayos de difracción en una muestra de toba volcánica indican un 76% de dióxido de silicio (SiO₂) y óxido de sodio (Na₂O), por lo tanto, al citar el diagrama de clasificación TAS que menciona Le Maitre *et al.* (2002) se le conocería por su composición química como riolita.

Las tobas volcánicas según Germinario & Torok (2019) son muy heterogéneas y exhiben una diversidad litológica recurrente que puede estar asociado por sus propiedades petrofísicas y mecánicas. Las tobas son usadas normalmente en construcción de iglesias, castillos y monumentos históricos en general. Por lo regular hay en muchas partes del mundo no sólo en México y más principalmente en países como Italia y Alemania. Las propiedades de la toba volcánica según Stuck (2008) la convierte en un material muy apreciado; pero debido a que es un material poroso lo pone en riesgo a la intemperie en el contexto de que se encuentra expuesto sin ningún recubrimiento.

2.3.4 Aglutinante

2.3.4.1 Polímeros

Polímero según Ebewele (2000) es una palabra que se deriva del griego, el cual “poli” significa muchos y “meres” significa partes. Es conjunto de moléculas grandes, también conocidas como macromoléculas unidas por enlaces covalentes y repeticiones químicas pequeñas. Los monómeros que contiene la estructura son moléculas que se convierten en un polímero al combinarse con otras moléculas.

De acuerdo con Bower (2002) los polímeros se pueden clasificar de muchas maneras y dos clasificaciones muy útiles son las siguientes.

- Por su estructura: Polímeros lineales, ramificados o en red.
- Por sus propiedades: Termoplásticos, elastómeros o termoestables.
 - o Termoplásticos: Son moléculas lineales o plastificadas que se ablandan al fundirse.
 - o El caucho o elastómero: Son polímeros en red y tienen comportamientos elásticos a altas tensiones. Tienen la condición de que al calentarse no tienen esa fase de derretirse como podría pensarse a causa de los enlaces cruzados.
 - o Termoestables: Son polímeros de red que son rígidos, no se pueden derretir al calentarse, tiene la característica de que no requiere calor externo para que pueda efectuarse la reticulación. Un ejemplo muy común son las

resinas epóxicas, resinas de urea-formaldehído, entre otras.

2.3.4.2 Asfalto

El asfalto es un sistema coloidal con compuestos químicos de alto peso molecular llamados micelas de asfaltenos que a su vez se encuentran dispersos en compuestos de menor peso molecular llamados maltenos y son un conjunto de: resinas, aromáticos y saturados. La cantidad de estos compuestos dará una variabilidad en el rendimiento en forma proporcional a la variabilidad de sus asfaltenos y maltenos (Paliukaité, Vaitkus & Zofka, 2014). Básicamente el 5% de aglutinante según Loaiza & Colorado (2018) de un cemento asfáltico típico contiene: 2% de saturados, 73% de aromáticos, 7% de resinas 139 y 18% de asfaltenos.

De acuerdo con Papagiannaskis & Masad (2008) el asfalto es una mezcla de hidrocarburos, heteroátomos (nitrógeno, azufre, oxígeno y metales) de diferentes pesos moleculares, que se crea a partir de la destilación del petróleo crudo.

Papagiannaskis & Masad (2008) mencionan que, a nivel molecular, el asfalto tiene una estructura alifática de cadenas lineales o ramificadas y un anillo insaturado, donde los átomos se encuentran unidos por enlaces covalentes. En ese sentido para Thom (2014) es importante discernir las clases de las moléculas que son:

- Asfaltenos: Son moléculas polares con carga positiva y negativa, teniendo facilidad para enlazarse.
- Resinas: Son altamente polares y afectan el grado de que los asfaltenos se dispersen.
- Aromáticos: No son polares y actúan como solventes para los asfaltenos y resinas.
- Saturados: Generará un betún más suave y con menor viscosidad, además es más fácil curar.

2.3.4.3 Resinas

En este trabajo de investigación, se utilizarán las resinas termoestables que de acuerdo con Melero (1993) un polímero termoestable también puede ser llamado termoendurecible, entonces para este concepto Pemberton *et al.* (2019) menciona que algunas de las resinas termoendurecibles son: resinas fenólicas, epoxi, poliéster insaturado, vinil éster, entre otras. Estas resinas vienen líquidas que se suelen solidificar con productos químicos y/o calor.

Así, por ejemplo, Forsdyke & Starr (2002) hablan de algunas aplicaciones para cada tipo de resinas que son las siguientes:

- Acrílica: Pinturas, compuestos, chapas, entre otros.
- Alkyds: Pinturas.
- Bismaleimida: Compuestos.
- Epoxy: Adhesivos, compuestos para pisos, materiales de recubrimiento, concreto polimérico, herramientas, entre otros.
- Furano: Herramientas.
- Melaminas y Ureaformaldehídos: Materiales de moldeo, espumas, entre otros.
- Fenólico: Compuestos avanzados, refuerzo de caucho, adhesivos, elementos de fricción, concreto polimérico, aislamiento eléctrico, selladores, tintas de impresión, laminados de madera, entre otros.
- Poliéster insaturado ortoftálico e isoftálico: Adhesivos, piezas fundidas, materiales para pisos, pasta para rellenos, concreto polimérico, entre otros.
- Uretanos e isocianuro: Compuestos, pintura, molduras, entre otros.
- Vinil éster: Materiales para pisos, herramientas, entre otros.

De las resinas mencionadas anteriormente, se dará prioridad en usar las resinas epóxicas debido a los antecedentes exitosos ya mencionados y a sus usos mostrados por Forsdyke & Starr (2002). La particularidad de mezclar un asfalto, según Liu *et al.* (2016), con una resina epóxica, asevera que la reacción puede ocurrir a temperatura normal, como ya se ha venido mencionando el cual tiene buen rendimiento. Entonces, el asfalto funciona

como solvente y la resina epóxica como soluto, el cual experimenta en ese proceso un aumento de viscosidad. Así también, Gaowang *et al.* (2018) hablan de la conjunción de resinas de poliéster con asfalto y resinas epóxicas con asfalto de manera exitosa. En referencia a lo anterior, se espera que se tengan un buen resultado en la interacción de resinas termoestables con el asfalto, por lo que será necesario variar las proporciones para encontrar la mejor conjunción.

2.3.4.4 Aglutinante de asfalto modificado con resinas

De acuerdo con Cong *et al.* (2015) este aglutinante estará formado por una fase continua que sería la resina epóxica y una fase discontinua que sería asfalto. En esta unión sus dependientes son el tiempo y la temperatura donde aquel material con menor peso molecular se convierte en uno de alto peso molecular para conformarse en un sólido.

No existe un porcentaje estandarizado óptimo de asfalto en peso respecto al agregado, esto es porque los agregados pétreos siempre tienen una gran o menor variabilidad en sus propiedades físicas. Entonces, el uso de la prueba Marshall funcionará para establecer el contenido óptimo de asfalto respecto a los resultados de volumetría, estabilidad y flujo normados para carreteras con distintos tipos de carga vehicular.

Speight (2016) menciona que el petróleo es la fracción no destilable del petróleo, el cual es tratado por métodos solventes para que su producto terminado se pueda utilizar en una capa del pavimento flexible, principalmente en la que se encuentra expuesta. Este material bituminoso es debido al hidrocarburo que se disuelve en disulfuro de carbono y otros disolventes aromáticos.

2.4 Antecedente de diseños para mezclas asfálticas

Según Asphalt Institute (2014) el diseño comenzó cuando Prevost Hubbard y Frederick Field desarrollaron un diseño de mezclas finas determinando un valor mínimo de estabilidad Hubbard-Field tendiendo de referencia la experiencia de pavimentos que resistían los empujes, el cual permaneció de 1920 a 1950.

De acuerdo con NCHRP (2011) en 1930, Bruce Marshall, trabajador del Departamento de Carreteras de Mississippi elaboró una forma de diseñar una mezcla de asfalto en caliente que le asignó el nombre de Mezcla Marshall con la premisa de que el laboratorio debería de producir una densidad representativa a la del lugar. Entonces seleccionó la muestra con mayor densidad y comprobó la estabilidad y flujo para estandarizar valores. Este comenzó a tener popularidad en 1950, incluso fue adoptado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. Durante la Segunda Guerra Mundial, ya que requerían un diseño para soportar las cargas de los aviones y aeronaves. En la actualidad, sigue siendo un método muy usado por su facilidad de muestreo en campo, ya que el martillo compactador y moldes son fáciles de transportar e instalar.

Casi al mismo tiempo que Bruce Marshall, Francis Hveem, trabajador de la División de Carreteras de California desarrollaba su método de diseño de mezcla asfáltica en caliente. Sin embargo, la prueba centrífuga de queroseno equivalente para determinar un aproximado del contenido óptimo de asfalto es lo que la diferencia de otros diseños, así también la evaluación de muestras a través de un estabilómetro y una prueba de hinchamiento. Mientras que lo que compartían era la metodología para obtención de datos de volumetría.

De acuerdo con NCHRP (2011), Asphalt Institute (2014) y la Federal Highway Administration (FHWA), a finales de los 80's e inicios de los 90's, financió el Programa de Investigación de Carreteras Estratégica (SHRP) mientras que Transportation Research Board (TRB) la administró con profesionales de todo Estados Unidos, para mejorar pruebas y especificaciones de las variables de una mezcla en caliente. Para después dar lugar a la creación del sistema Superpave de diseño y análisis de mezclas, similar a Marshall en volumetría, sin embargo, en lugar de compactar con un martillo estándar las pastillas, estas se elaboran en un compactador giratorio, así también se tienen específicos requisitos de propiedades de agregados y estructuras granulométricas.

2.5 Método Marshall

De acuerdo con Asphalt Institute (2014) el método Marshall es exclusivo para mezclas asfálticas en caliente de gradación densa, esto porque el rango permisible para vacíos de aire es de 3 a 5%. Dicho método consiste en establecer una gradación densa de agregados se prueban distintos contenidos de asfalto para evaluar criterios volumétricos y de resistencia, para una vez generadas las gráficas correspondientes establecer gráficamente un contenido óptimo de asfalto. Cada contenido de asfalto deberá tener tres repeticiones para generar un promedio por cada contenido establecido a probar. Algo importante es que el procedimiento para elegir el contenido óptimo aparte de cumplir con los rangos estandarizados se requiere de juicio y experiencia con los materiales utilizados.

En la actualidad los procedimientos del Método Marshall han sido estandarizados por la ASTM y la AASHTO, los cuales también especifican que además de ser para mezclas densas y de mezclas asfálticas en caliente, la estructura granulométrica como tamaño máximo de partícula debe tener hasta 1 pulgada. Sin embargo, si se requieren agregar tamaños más grandes existe el procedimiento Marshall modificado el cual acepta tamaño máximo de partícula hasta 1.5 pulgadas, sin embargo, cambia la metodología en cuanto al tamaño de la elaboración de la pastilla.

De forma desglosada lo que se mide con la prueba Marshall es la estabilidad, el flujo, la rigidez, la gravedad específica a granel, la densidad, el porcentaje de vacíos de aire, los vacíos en el agregado mineral y los vacíos rellenos con asfalto. Los valores óptimos para tomar como base serán según el nivel de tráfico, que dependerán del acomodo dos variables principales: el agregado y el aglutinante (Loaiza & Colorado, 2018; Aksoy *et al.*, 2012; Miller, 1988).

2.5.1 Número de pastillas a realizar

De acuerdo con Asphalt Institute (2014) las pastillas se generan a través de elegir una estructura granulométrica densa con tamaño máximo de partícula hasta 1". Una vez elegida, se designan diferentes posibles porcentajes de asfalto a evaluar, para que con cada

uno de los porcentajes elaborar mínimo 3 especímenes de los cuales los resultados se obtendrá un promedio.

2.5.2 Temperatura de mezclado y compactación

De acuerdo con NCHRP (2011) menciona que la forma de definir estas dos temperaturas es a través del Viscosímetro Brookfield el cual mide la viscosidad rotacional, en el cual se requieren hacer lecturas recomendadas entre 135 y 165°C, en el cual el rango de temperatura de mezclado es de 170 ± 20 centipoises, mientras que la de compactación corresponde a 280 ± 30 centipoises.

2.5.3 Preparación de moldes y martillos

Los moldes tendrán que estar limpios de residuos o aditivos, además se tendrán que colocar en un baño de agua, placa caliente u horno, la temperatura recomendada es la de mezcla y la de compactado para evitar la pérdida de temperatura de la mezcla asfáltica.

Los moldes para elaborar las pastillas tendrán que tener una medida de forma que la pastilla compactada logre tener una altura de 63.5 ± 1.27 mm y 101.6 mm de diámetro. En el cual se colocará un filtro para que cubra este diámetro en la parte de la base y otro después de colocar la mezcla con el objetivo de que la mezcla no se adhiera a la base del molde ni del martillo.

2.5.4 Compactación de muestras

Se requiere una caída libre lo más perpendicular entre la mezcla y el martillo de 457 mm, para esto se aplicarán 35, 50 o 75 golpes dependiendo de los criterios requeridos (ver. Tabla 3) en las dos caras circulares de la pastilla para esto se retirará la placa base y el collar para invertir el molde. Una vez compactado, con la pastilla dentro, los moldes se dejarán enfriar con la intención de que la pastilla al ser extraída no se deforme, pero también que no se adhiera demasiado la pastilla al molde.

2.5.5 Estabilidad y flujo Marshall

La estabilidad es la máxima resistencia que tendrá el espécimen al aplicarse una carga en Newtons o libras, mientras que el flujo será la deformación que se genera en unidades

de 0.25 mm o 1/100 pulgadas (Asphalt Institute, 2014). La estabilidad entre mayor sea significa que la mezcla resistirá esfuerzos de mayor magnitud (empujes) y a su vez menores desplazamientos ocasionados por el flujo (deformaciones). Con esto, bajo la acción del tráfico se reducirá la aparición de surcos y el pavimento se adaptará a movimientos graduales sin agrietarse (Aksoy, Iskender 154 & Tolga, 2012).

Tabla 3. Criterios del método Marshall (Asphalt Institute, 2014; N.CMT.4.05.003, 2016)

Criterios del Método Marshall ¹	Tráfico ligero ³		Tráfico medio ³		Tráfico pesado ³	
	Superficie y base		Superficie y base		Superficie y base	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Compactaciones, número de golpes en cara circular	35		50		75	
Estabilidad ² , N	3336	-	5338	-	8006	-
Flujo ^{2,4,5} , 0.25 mm	2	4.5	2	4	2	3.5
Porcentaje de vacíos de aire ⁶	3	5	3	5	3	5
Porcentaje vacíos rellenos de asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

NOTAS:

1. Al diseñar una mezcla asfáltica para pavimentación, se deben considerar todos los criterios, no solo el valor de estabilidad.
2. Las bases de mezcla asfáltica en caliente que no cumplen con estos criterios cuando se prueban a 60°C (140°F) son satisfactorias si cumplen con los criterios cuando se prueban a 38 °C (100 °F) y se colocan a 100 mm (4 pulgadas) o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica sólo a las regiones que tienen una variedad de condiciones climáticas similares a las que prevalecen en la mayor parte del Estados Unidos. Se puede considerar una temperatura de prueba más baja diferente en regiones que tienen condiciones climáticas más extremas.
3. Clasificaciones de tráfico
 - Condiciones de tráfico ligero que dan como resultado un ESAL de diseño de 20 años < 10⁴
 - Condiciones de tráfico medio que dan como resultado un ESAL de diseño de 20 años entre 10⁴ y 10⁶
 - Condiciones de tráfico pesado que dan como resultado un ESAL de diseño a 20 años > 10⁶
4. El valor de flujo se refiere al punto donde la carga comienza a disminuir.
5. Se establecieron los criterios de fluidez para asfaltos puros. Los criterios de flujo a menudo se exceden cuando se utilizan polímeros modificados o se utilizan ligantes modificados con caucho. Por lo tanto, el límite superior de los criterios de flujo se debe omitir cuando se modifican con polímeros o se utilizan ligantes modificados con caucho.
6. El porcentaje de vacíos de aire debe apuntar aproximadamente a 4 por ciento. Esto puede ajustarse ligeramente si es necesario para cumplir con los otros criterios de Marshall.

2.6 RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA

De acuerdo con la ASTM-D6931 (2017) un ensayo a tensión indirecta es un proceso donde se somete un cilindro a compresión sobre el largo de los planos diametrales. La carga que se aplica es a través de dos barras una inferior y otra superior, esto a través de franjas de 12.70 ± 0.3 mm de ancho a una velocidad constante de 50 mm/min y acondicionamiento de muestra a 25°C hasta que ocurra la falla.

De acuerdo con Huang (2004) las pruebas de tensión indirecta tienen la ventaja que se realizan a través de cilindros de tamaño Marshall (102 mm diámetro, 64 mm altura), las pastillas pueden hacerse manualmente con materiales en el laboratorio u obtener de núcleos directamente del pavimento, en los cuales se evaluará la calidad relativa de las mezclas, esto con la intención de estimar el potencial de formación de surcos o grietas (Huang, 2004) (AlAwad, 2004). La prueba para obtener la carga final no excederá de 2 minutos después de retirar los especímenes de su respectivo acondicionamiento a 25°C.

Se debe de tener en cuenta que AlAwad (2004) menciona que las premisas que se toman son que el material es isotrópico, es decir, que su comportamiento es el mismo en cualquier dirección, que es un material elástico y homogéneo. La fórmula para calcular la tensión indirecta es la siguiente:

$$s_t = \frac{2000 * P}{\pi * D * t}$$

Donde:

S_t : Tensión indirecta, KPa.

P: Carga máxima aplicada a la fractura, N.

D: Diámetro del espécimen, mm.

t: Ancho del espécimen, mm.

La carga a la que se somete es en forma paralela al ancho del espécimen como se observa en la Figura 2.

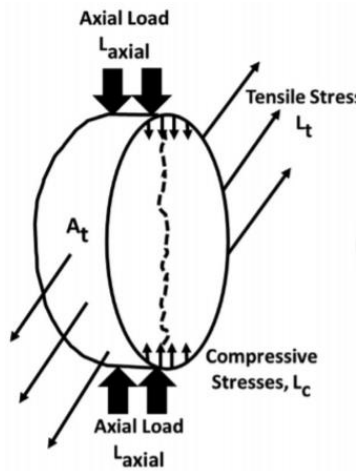


Figura 2. Diagrama de la prueba de tensión indirecta (AlAwad,2004)

Un aspecto crucial para considerar según Huber & Decker (1995) es que las mezclas que soportan mayores umbrales de tensión, la probabilidad de resistir el agrietamiento aumenta (Huber & Decker, 1995). Una forma de establecer la calidad de resistencia a la formación de surcos se puede utilizar la categorización de resistencia a la formación de surcos citada por Bennert, Haas, & Wass (2018) como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Propuesta de categorización por tensión indirecta para minimizar la formación de surcos en el pavimento (Bennert, Haas, & Wass, 2018)

Categoría de resistencia a la formación de surcos	Rango de resistencia a la tensión indirecta
Muy pobre	<50
Pobre	50 a <110
Mínima	110 a <170
Justa	170 a <270
Buena	270 a <430
Muy buena	430 a <660
Excelente	>660

Entonces la mezcla asfáltica resiste tensiones, por eso, no utiliza acero como en una mezcla de concreto hidráulico; sin embargo, al modificar esta mezcla queda este parámetro en cierto dilema cuando se modifican las propiedades del aglutinante y/o el tipo

de agregado, ya que esta resistencia a la tensión indirecta está relacionada al tipo de aglutinante y agregado en un compuesto.

2.7 SOSTENIBILIDAD

La sostenibilidad es un concepto que ha sido complicado de llegar a un acuerdo en su definición, sin embargo, la Comisión Mundial sobre el Ambiente y el Desarrollo (WCED) menciona que la mejor definición se genera cuando se cumplen los siguientes parámetros: se deben cumplir las necesidades actuales pero cuidando que las generaciones futuras puedan satisfacer sus necesidades para tener un desarrollo sostenible, pero si es enfocado a los pavimentos referido al impacto del medio ambiente, deberá cumplir con el tríptico de triple resultado final que es el medio ambiente, la economía y la sociedad.

2.8 SUSTITUCIONES PARCIALES

Los agregados según su clasificación geológica y geotécnica tienen variabilidad en sus propiedades mecánicas, por lo tanto, se pueden hacer combinaciones de las granulometrías de diversos materiales hasta reemplazos parciales de ciertos tamaños de partícula (Martinho *et al.*, 2018). Los reemplazos pueden ser de un mismo material en términos geológicos, pero con diferentes características como en su textura, tamaño, forma, entre otras. También se puede agregar otro material que cumpla con la mayoría de las características para agregarse a una capa de pavimento. Sin embargo, los objetivos de las sustituciones variarán porque algunos serán para subsanar el medio ambiente, mientras que otros serán para darle mayor resistencia al compuesto o ambas. Entonces la sustitución parcial comenzará desde pequeños porcentajes de sustitución para comenzar a conocer el comportamiento de esta sustitución ante una prueba de calidad, en el cual si se obtienen resultados óptimos se puede buscar alcanzar el 100% de sustitución, claro está que los valores de calidad se sigan cumpliendo.

Las sustituciones en una mezcla asfáltica pueden ser tanto en el aglutinante como en el agregado, sin embargo, la sustitución puede ser sin modificaciones del material sustituyente, es decir, tal y como se encuentra el material sustituto se agrega en

parcialidades, mientras que la otra forma procesando el material ya sea física o químicamente para lograr agregarlo.

Por ejemplo, en el caso de sustituciones parciales de agregados en pavimentos, se ha realizado de forma contundente, en especial, para materiales sustentables donde Plati (2019) menciona algunos como: recuperado de pavimento asfáltico (RAP), agregado de concreto reciclado (RCA), tejas de asfalto reciclado (RAS), escoria de horno de acero (SFS), arena residual de fundición (WFS), desechos de vidrio (WG), ladrillo triturado (CB). Así también se ha hecho uso de polvo de agregado fino reciclado, polvo de vidrio, polvo de mármol, barro rojo (Mistry & Kumar, 2020).

Por consiguiente, se tienen que comprobar los parámetros de calidad con normativas vigentes, demuestren que la sustitución parcial está teniendo un resultado óptimo, en el caso de las mezclas asfálticas deben mantenerse los parámetros establecidos de diseño, como lo es la Estabilidad y Flujo Marshall, al haber encontrado el contenido óptimo de asfalto (Aksoy *et al.*, 2012).

3. METODOLOGÍA

Dentro de la organización del presente proyecto se desarrollarán etapas como se muestra en la Figura 3, las cuales mencionan las actividades necesarias a emplear para llevar a cabo el correcto desarrollo de la investigación.

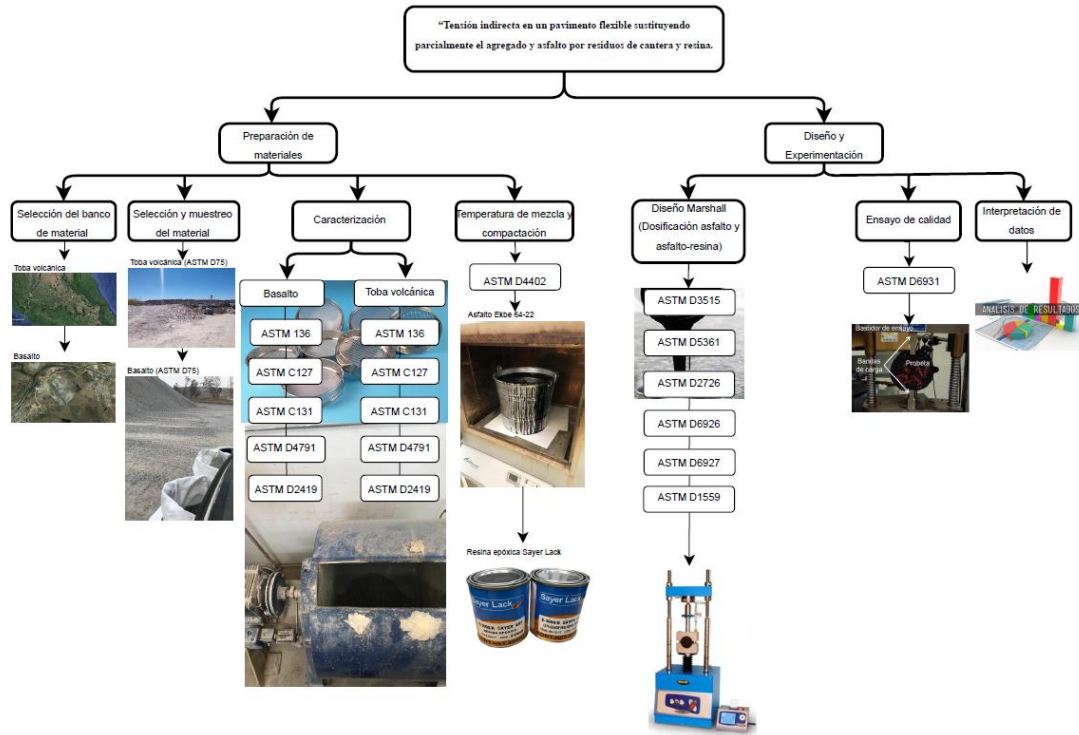


Figura 3. Mapa conceptual de metodología

3.1 SELECCIÓN DEL BANCO DE MATERIAL

Primero se ubicó el banco con residuos de toba volcánica llamado "Rancho Jaramillo" ubicada en Rancho Dandhó s/n Huichapan, Hidalgo, México. En el cual se tiene la problemática planteada por Arroyo *et al.* (2016), el cual tiene coordenadas 20.399° Latitud y -99.709° Longitud (ver. Figura 4).

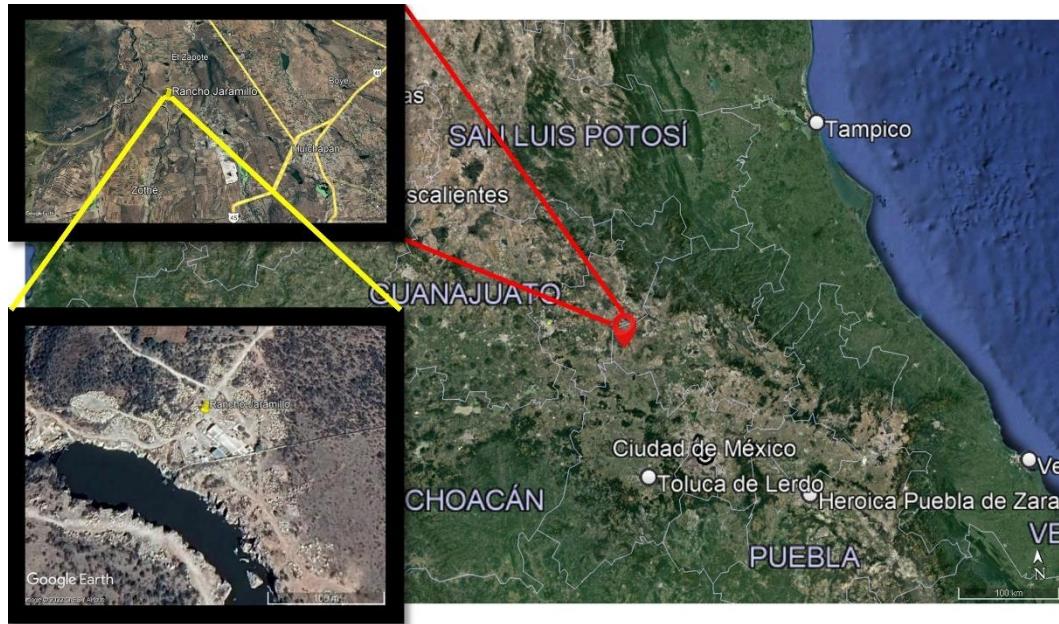


Figura 4. Ubicación del banco de toba volcánica

Ahora para el banco de material de Basalto se acudió a las instalaciones de “el Jovero” con coordenadas $21^{\circ} 2' 57.91''$ N y $100^{\circ} 30' 49.66''$ O (Figura 5) y a las de “Grako” con $20^{\circ} 31' 15.09''$ N y $100^{\circ} 30' 49.0''$ O (Figura 6) a este segundo banco se acudió debido a que en el primero no producían grava de TN 1”.

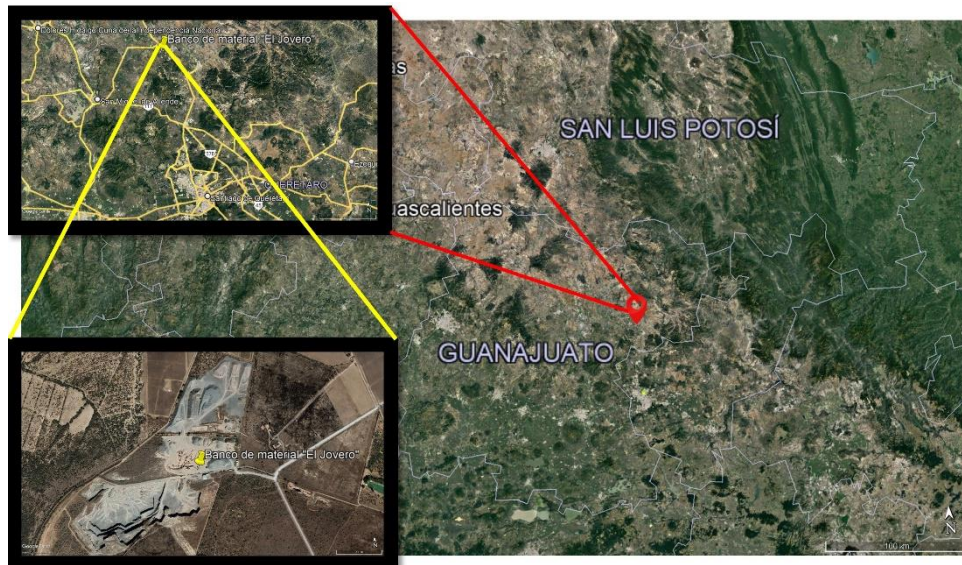


Figura 5. Ubicación del banco de Basalto “El Jovero”

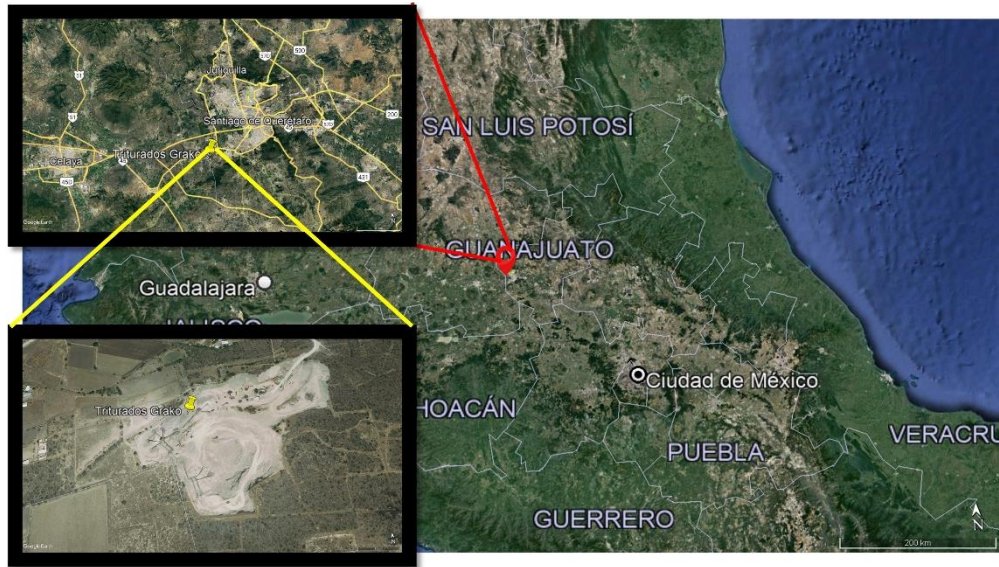


Figura 6. Ubicación del banco de Basalto “Grako”

3.2 SELECCIÓN Y MUESTREO DEL MATERIAL

Debido a que sólo existía un macro montículo como se ve en la Figura 7 y Figura 8, se propuso hacer una recolección con la norma ASTM-D75, el muestreo se formó al tomar material de tres diferentes partes del montículo: superior, intermedia e inferior. En cada sección se hizo un corte verticalmente con la pala, para recolectar el material y evitar una segregación de los agregados finos.



Figura 7. Muestreo del material de acuerdo con la norma ASTM-D75

En el caso del material de basalto, se encontraban distintos tipos de montículos, los cuales tenían tamaños nominales diferentes: arena, grava (sello) TN 3/8, grava TN 3/4. Para cada montículo se consideró el mismo muestreo mencionado de la ASTM D75, esto debido a que se iba a conformar la estructura granulométrica densa inicial para formar una granulometría de control que cumpliera con todos los parámetros. Sin embargo, se acudió a otro banco de basalto para poder obtener una muestra de grava TN 1”.



Figura 8. Muestreo del material de acuerdo con la norma ASTM-D75

3.3 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los agregados pétreos se transportarán al laboratorio para realizar su caracterización geotécnica y obtener valores de sus propiedades índice y mecánicas. Con esto se obtendrá la calidad de los materiales para dictaminar si se pueden usar en una mezcla asfáltica usando las siguientes pruebas establecidas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales por sus siglas en inglés ASTM:

- ASTM C136: Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos.



Figura 9. Análisis granulométrico

Esta prueba se encarga de establecer la proporción de cada tamaño de partícula por muestra cuando se hace la relación del material retenido respecto al total. Lo anterior se logra a través de una serie de mallas que se acomodan en orden de tamaño de abertura desde la más grande hasta la más pequeña.

De acuerdo con Lavin (2003) las pruebas y especificaciones de los Estándares de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales por sus siglas en inglés ASTM, son especificaciones muy conocidas y usadas en América del Norte y muchas partes del mundo, además las normas ASTM pueden compararse fácilmente con los estándares

locales o regionales, entonces algunas de las pruebas necesarias a utilizar para caracterizar el agregado grueso serán las siguientes:

- ASTM C127: Método de prueba estándar para gravedad específica y absorción de agregado grueso.

Esta prueba trata de obtener aproximadamente cuatro propiedades: una llamada gravedad específica o densidad relativa que trata de obtener una relación del peso en aire de un determinado volumen de agregados respecto al peso en aire del mismo volumen, pero de agua a una determinada temperatura, pero sin incluir los vacíos entre partículas. La segunda, bulk gravedad específica (SSD), es igual que la anterior pero ahora al peso de cada unidad de volumen de los agregados, se le sumará el peso del agua que lograron adquirir los vacíos de cada roca al dejarlos saturando por 24 horas en agua. El tercero, gravedad específica aparente, es la relación del peso en aire de un determinado volumen de agregados respecto al peso en aire de un volumen igual (sin contemplar el peso en aire de agua del volumen de los vacíos por cada partícula) de agua. La cuarta, la absorción, es la relación entre el peso del agua que absorbieron los vacíos de los agregados respecto al peso seco en aire de los agregados.



Figura 10. Saturado superficialmente seco a) Basalto b) Toba volcánica

- ASTM C128: Densidad relativa y absorción de agregado fino.

Ahora bien, a diferencia de los agregados gruesos es que los agregados finos se usan picnómetros calibrados, es decir, que ahora la manera de conocer el peso en aire de agua del mismo volumen del agregado fino. Esto surge cuando se llena y pesa con agua el matraz graduado, después se pesa el matraz con el agregado fino saturado superficialmente seco y al final se pesa el matraz con el material mencionado relleno de agua hasta la marca de calibración. De igual manera con la gravedad específica bulk la masa será el peso del material fino saturado superficialmente seco.

Mientras que para la gravedad específica aparente se requiere que el peso del agua del mismo volumen del agregado fino se obtenga con el material seco y no con el material fino saturado superficialmente seco.



Figura 11. Densidad relativa y absorción del agregado fino cribado de la arena de basalto

- ASTM C131: Resistencia a la degradación de agregados gruesos de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina Los Ángeles.

En esta prueba a través de un tambor (ver. Figura 12 a)) que gira de 30 a 33 rpm con cierto número y peso de esferas de acero, además dependiendo de la granulometría será el material que se empleará de cada malla como se observa en la Tabla 5. Hasta que se cumplan 400 revoluciones se detendrá la prueba para medir la degradación de los agregados ya que hubo una abrasión, desgaste, impacto o molienda, por lo que al final se tamiza (ver. Figura 12 b)) y lo que pase la malla resulta como el porcentaje de degradación.

Tabla 5. Clasificación y designación dependiendo de las proporciones granulométricas del material (ASTM C131, 2014)

Tamaño del tamiz		Masa de los tamaños indicados, g			
Pasa	Retiene	Clasificación			
		A	B	C	D
$1\frac{1}{2}$ "	1"	1 250 ± 25	...	...	...
1"	$\frac{3}{4}$ "	1 250 ± 25	...	...	...
$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	1 250 ± 25	2 500 ± 10	...	...
$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$ "	1 250 ± 25	2 500 ± 10	...	...
$\frac{3}{8}$ "	$\frac{1}{4}$"	...	...	2 500 ± 10	...
$\frac{1}{4}$ "	No.4	...	...	2 500 ± 10	...
No. 4	No. 8	...	...	...	5 000 ± 10
Número de esferas		12	11	8	6
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10



a)



b)

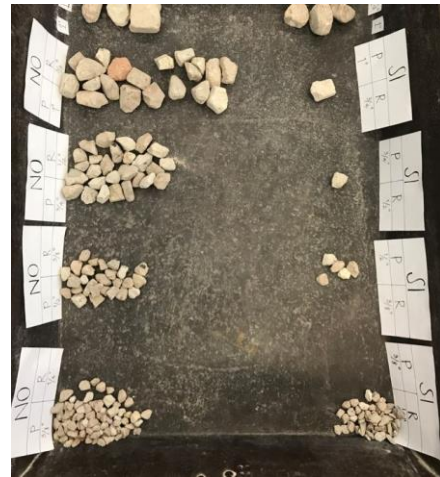
Figura 12. Degradación de agregados gruesos a) Tambor con basalto b) Toba volcánica después de la abrasión

- ASTM D4791: Partículas planas y alargadas en agregado grueso.

Esta prueba determina el porcentaje de partículas planas y alargadas con el fin de evitar que las partículas no se puedan colocar para una óptima compactación. El cual la muestra dependerá del tamaño máximo nominal de partícula para cribar el material malla por malla (ver. Figura 13 a) y b)) y poder verificar cada partícula por el dispositivo de calibre proporcional.



a)



b)

Figura 13. Partículas separadas por malla listas para calibrar a) Rocas de basalto b) Rocas de toba volcánica

- ASTM D2419: Método de prueba estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregados finos.

La prueba consiste en conocer de manera porcentual la cantidad de contaminación de limo o arcilla en un agregado fino (arena), es decir, de aquel material que pasa el tamiz No. 4 (4.75 mm). Esto se logra a través de sustancias químicas (sustancia floculante) para que una vez que se cumpla un periodo de sedimentación, la arcilla floculada quedará en la parte de arriba de un matraz, mientras que en la parte de abajo queda la arena. La irrigación correcta se hace a través de un sifón con tubo de irrigación (ver. Figura 13).



Figura 14. Probetas y varilla lastrada para prueba de equivalente de arena

3.4 SELECCIÓN DE ASFALTO Y RESINA

3.4.1 Asfalto

De acuerdo con NCHRP (2011) el asfalto durante 100 años se ha querido probar para definir con pruebas simples estandarizar especificaciones efectivas. La prueba de penetración fue de las primeras en usarse la cual consistía en una aguja de peso ligero que se dejaba caer sobre una muestra de asfalto por cierto tiempo, para medir lo que penetró la aguja. Y así existían otras pruebas empíricas parecidas, pero no medían módulos o resistencias, mucho menos estas a altas temperaturas.

Entonces, según Lavin (2003) existían unas pruebas que generaban un sistema de clasificación que al menos daban una indicación de características de manejo del ligante asfáltico es el de viscosidad, en el cual se usa un viscosímetro de tubo capilar que se prueba con asfalto a temperaturas de 60 y 135°C. La primera temperatura se definió debido a que se eligió como la óptima máxima a la cual se puede someter un pavimento y siga con su funcionamiento, mientras la segunda era la que más se acercaba a las temperaturas de mezclado y compactación. Entonces la clasificación comienza con las letras “AC” y se siguen de un guion (-) procediendo números que son el 1% de la viscosidad a 60°C en unidades de poises, claro está que con ciertos rangos como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Aglutinante asfáltico clasificado por viscosidad (Lavin, 2003; N.CMT.4.05.001, 2006)

Requisitos de prueba	Grado de viscosidad					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad a 60°C (poises)	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Penetración a 25°C (dmm)	≥200	≥120	≥70	≥60	≥50	≥40

Por ejemplo, la prueba de viscosidad no mostraba el grado de elasticidad de un asfalto, por eso la SHRP desarrolló procedimientos para asegurarse de las propiedades de un asfalto que se basaban en principios ingenieriles, a esta clasificación le llamó como grado de desempeño por sus siglas en Inglés “PG”, el cual a través de ciertas pruebas como: Viscosidad rotacional a 135°C, viscosidad absoluta a 60°C, temperatura de inflamación Cleveland copa abierta, solubilidad en tricloroetileno, módulo de corte dinámico (asfalto original), pérdida por calentamiento, módulo de corte dinámico (asfalto después de RTFO), módulo de corte dinámico (asfalto después de PAV), pendiente de deformación y rigidez de la deformación. Estos parámetros al cumplir ciertos rangos adquieren dos números, los primeros se refieren a la temperatura máxima que el asfalto puede seguir funcionando correctamente con niveles de tráfico bajos, mientras que el segundo se refiere al mínimo de temperatura que se puede usar sin que sufra una falla. Sin embargo, cuando se va a elaborar un proyecto, primero se elabora un cálculo zonificado del lugar donde se elaborarán los trabajos de pavimentación con mezcla asfáltica, para de acuerdo con cálculos y características climáticas propias del lugar se establezca el grado que requiere el lugar y con ello buscar el mismo asfalto o aquél que se le asemeje. En este estudio, el grado PG resultante fue de 64-22, el cual se podrá aplicar en proyectos que requieran de este tipo de asfalto o aquellos que se le asemejen respetando los rangos de tolerancia.



Figura 15. Asfalto

3.4.2 Temperatura

La temperatura en una mezcla asfáltica es una condición crucial, cuando se tiene una temperatura muy alta el asfalto comienza a fluir como película de asfalto envolvente a las partículas, y no es lo suficientemente gruesa para poder tener un buen curado de la mezcla, ahora bien, si se hace la mezcla a temperatura límite cuando el asfalto empieza a fluir, es decir, a temperatura baja, el asfalto será incapaz de recubrir las partículas de forma integral generando problemas en la compactación, por esta razón existe una temperatura ideal de mezclado y compactación (Luo *et al.*, 2021).

De acuerdo con Luo *et al.* (2021) mencionan que es necesario realizar una prueba que mide la viscosidad del aglutinante a diferentes temperaturas, usando el viscosímetro Brookfield (ASTM-D4402), leyendo datos entre el rango de 135 °C y 175 °C, donde se tiene normado que la viscosidad óptima para mezclado es de 0.17 ± 0.02 Pa*s y 0.28 ± 0.03 Pa*s para compactación, así que el viscosímetro Brookfield al marcar la viscosidad deseada se leerá su temperatura. Entonces, la prueba consistirá en medir la viscosidad a diferentes incrementos de temperatura, sin embargo, en los puntos que se seleccionen para leer la viscosidad se harán varias mediciones en un tiempo determinado para poder asegurar que la muestra se acondicionó correctamente de acuerdo con la lectura marcada con el termostato, entonces con los resultados se promediarán por punto de medición para

generar una curva con los promedios de las distintas mediciones. A través de la gráfica se podrá crear una ecuación que pueda arrojar resultados confiables de temperatura o directamente de lectura desde la gráfica cuando se tienen los rangos de temperatura y mezclado.

3.4.3 Resina

La resina será un aglutinante que de igual forma que la toba volcánica se agregará en forma de sustitución parcial, este aglutinante se sustituirá en proporciones de 8% y 16% respecto al asfalto. Cabe recalcar, la prueba de viscosidad se repetirá para cada adición de resina en el asfalto para conocer la nueva temperatura de mezclado y compactación.



Figura 16. Resina epóxica

3.5 DISEÑO MARSHALL

3.5.1 Diseño experimental

Para considerar el número de especímenes o repeticiones se seguirán los lineamientos de las normas ya mencionadas en la metodología. Pero para el diseño se atiende la norma ASTM D6926 para lograr llegar a la matriz de la Tabla 7. Porque para cada combinación de agregado con aglutinante en sus porcentajes establecidos se tendrán que realizar por lo menos tres especímenes. Por ejemplo, cuando se tiene 0% de sustitución parcial de agregado por residuos de toba volcánica son requeridas 12 muestras, esto es porque se

establecieron cuatro contenidos de asfalto a probar que van aumentando en 0.5%. De la misma manera, se requerirán 12 muestras para 10% de sustitución y, para 20%.

Tabla 7. Niveles de sustitución parcial de toba volcánica en %, para estabilidad y flujo Marshall

Propuesta de contenido de asfalto (% respecto al peso del agregado)	Niveles de agregado convencional o basáltico (%)		
	100	90	80
	Niveles de desechos de toba volcánica (%)		
	0	10	20
3.5	3	3	3
4.0	3	3	3
4.5	3	3	3
5.0	3	3	3

3.5.2 Granulometrías densas de diseño y combinación de propiedades de agregados

Se estableció en primer lugar la combinación correspondiente que generará una nueva granulometría, esto al mezclar los materiales en distintos porcentajes con el objetivo de que los porcentajes que pasan por cada malla de agregado se comporten adecuadamente respectivamente a los límites establecidos en la ASTM D3515 para una granulometría densa (Anexo 1), y a su vez se genere una nueva propuesta granulométrica que será probada con cuatro porcentajes de asfalto comenzando por 3.5%. El método para desarrollar es la prueba estándar Marshall que permite agregados hasta con tamaño nominal máximo de 1 pulgada (Asphalt Institute, 2014).

La granulometría densa esperada de las combinaciones es de tamaño máximo nominal de 1" (ver.Anexo 1), el material a considerar inicialmente será únicamente basalto para realizar una mezcla de control y que cumpla con las especificaciones de la norma ASTM D6926 y D6927 donde se generan probetas de aproximadamente 102 mm de diámetro y 64 mm de altura como se muestra en la Figura 17. Así mismo una vez establecida la mezcla

de control, se puedan realizar las combinaciones correspondientes de basalto por residuos de toba volcánica, a través de las sustituciones parciales.

3.5.3 Diseño Marshall

En total, de las consideraciones para las combinaciones, se generarán 36 pastillas Marshall, para esto la forma en que dosificada cada muestra densa de material pétreo fue haciendo proporciones de material por cada una de las mallas para tener una muestra teórica que se pueda asemejar más a la realidad de los proceso, esto es porque en laboratorio no se cuenta con máquinas que proporcionen por tipo de material sino que sería un muestreo después de la combinación con cuarteos y al tener un máximo de tamaño nominal de partícula las disgregaciones son más probables. Una vez seguidas las instrucciones del método Marshall, cada pastilla después de acondicionarse será cargada en una dirección perpendicular al eje cilíndrico por medio del aparato Marshall como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Muestras de mezcla asfálticas compactadas a diferentes contenidos de asfalto

La estabilidad se puede definir como la resistencia máxima cuando se le aplica una carga durante una secuencia de carga con velocidad constante de deformación y también se puede definir como la carga obtenida cuando la tasa de aumento de la carga comienza a disminuir.

3.6 ENSAYOS DE CALIDAD

A lo largo del tiempo se han ido desarrollando técnicas para poder conocer los comportamientos de los materiales compuestos, para de alguna manera poder evaluar la calidad de cada uno o la funcionalidad, por lo que según Speight (2016) los estándares para carreteras y pavimentos desarrollados por la ASTM Internacional y AASHTO permiten que las empresas que desarrollan ingeniería puedan diseñar materiales y pavimentos para garantizar la resistencia y durabilidad. Pero no solo se habla de una resistencia si no que el punto más importante es que su aplicación y uso sean seguros.

3.6.1 Resistencia a la tensión indirecta

La prueba mecánica fundamental y requerida para este proyecto será la que se observa en la Figura 18 para las pastillas generadas mostradas en la Figura 19:

- ASTM C6931: Método de prueba estándar para la resistencia a la tensión indirecta (IDT) de mezclas bituminosas.

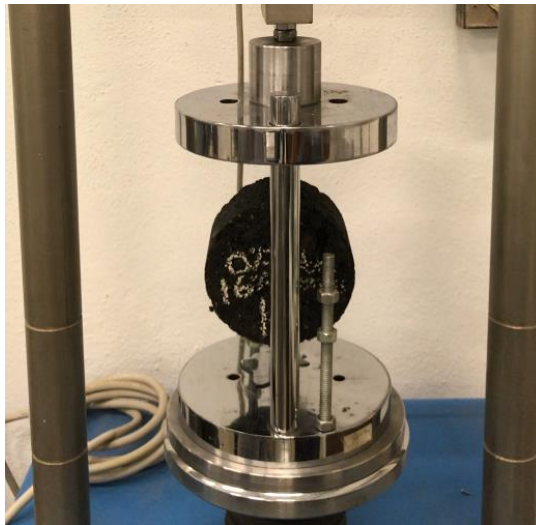


Figura 18. Tensión indirecta pavimentos

En esta prueba se carga una muestra cilíndrica a lo largo de su plano diametral vertical a una velocidad de deformación y una temperatura de ensayo especificadas. El objetivo

es evaluar la calidad de la mezcla una vez que se encontró el porcentaje óptimo de aglutinante para la granulometría densa elegida. Además, ésta prueba es una de varias pruebas que existen para mediar el potencial de formación de surcos o grietas en la superficie de un pavimento.



Figura 19. Pastillas generadas para prueba de resistencia a la tensión indirecta (IDT)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas granulométricas de cada material se muestran en la Gráfica 1, donde se pueden visualizar los límites superior e inferior de una curva granulométrica densa. Por lo tanto, ningún material cumple con la granulometría normada para una mezcla asfáltica densa, así que es requerida la combinación de los materiales en proporciones correctas para que cumplan y la curva se encuentre preferentemente en la media de los límites superior e inferior.

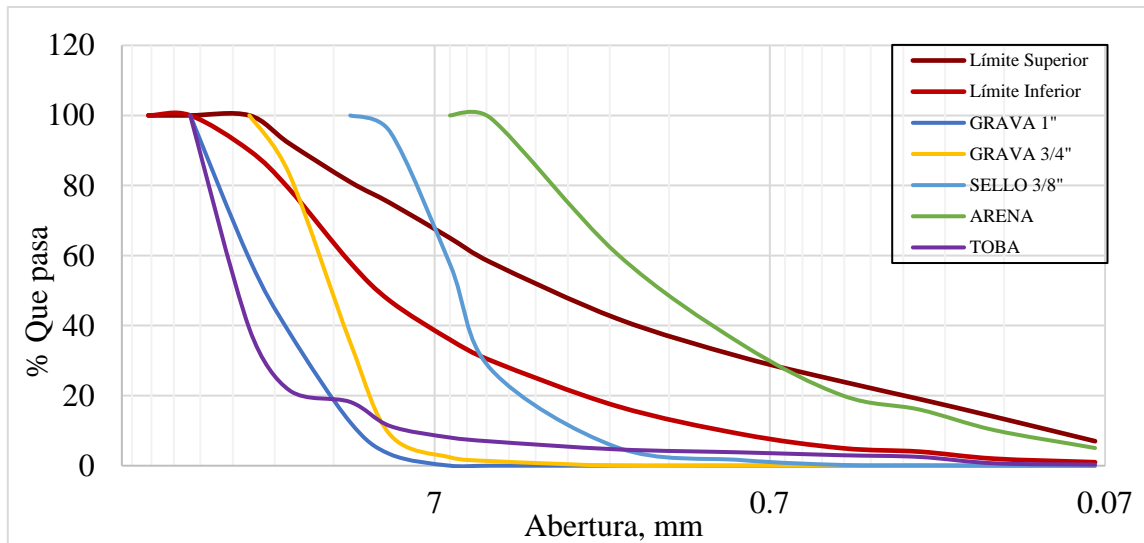


Tabla 8. Caracterización de los materiales usados para el diseño de mezcla

Caracterización del material	Grava 1 "	Grava 3/4"	Sello 3/8"	Arena	Toba volcánica	Promedio	Límites
Densidad del grueso	2.58	2.58	2.58	-	1.17	2.23	-
Densidad del fino	-	-	-	2.478	-	2.48	-
Absorción del grueso	1.8%	1.8%	1.96%	-	12.44%	4.5%	-
Absorción del fino	-	-	-	3.35%	-	3.3%	-
Abrasión de los Ángeles	14%	14%	15%	-	28.26%	17.6%	30% máx
Partículas aplanadas y alargadas	48.4%	8.6%	8.6%	-	27.55%	23.3%	35% máx
Equivalente de arena	-	-	-	81.4%	-	81.4%	55% min

En la Tabla 9 se tienen los resultados de la caracterización del grado de desempeño “PG” del asfalto a utilizar el cual resultó ser un PG 64-22. Sin embargo, también se tienen presentes las propiedades para poder caracterizar al asfalto por su viscosidad, por lo tanto, el asfalto cumplió con el parámetro de medición de viscosidad a 60°C con 2136 cP para clasificarse como AC-20, ya que el parámetro dicta que debe cumplir con 2000±400 cP.

Tabla 9. Informe por superintendencia de aseguramiento de la calidad del producto (PEMEX) sobre Asfalto EKBE 64-22

Prueba de análisis	Unidades	Método ASTM	Especificación	Resultado
Viscosidad rotacional a 135° C	cP	ASTM D 4402	Máximo 3000	488
Viscosidad absoluta a 60°C	Poises	ASTM-D2171	Informar	2136
Temperatura de inflamación Cleveland copa abierta	°C	ASTM-D92	230 mínimo	326
Solubilidad en tricloroetileno	% masa	ASTM-D2042	99 mínimo	99.91
Módulo de corte dinámico (asfalto original)	kPa	ASTM D7175	Mínimo 1.00	1.14
Pérdida por calentamiento	% masa	ASTM D2872	Máximo 1.000	-0.466
Módulo de corte dinámico (Asfalto después de RTFO)	kPa	ASTM D7175	Mínimo 2.20	2.37
Módulo de corte dinámico (Asfalto después de PAV)	kPa	ASTM D7175	Máximo 5000	1430
Pendiente de deformación (m)	---	ASTM D6648	Mínimo 0.30	0.318
Rigidez a la deformación (s)	MPa	ASTM 6648	Máximo 300	127

4.1 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR MARSHALL

4.1.1 Combinaciones de las granulometrías de diseño

El diseño fue con base a las granulometrías establecidas por el material obtenido, es decir, la toba volcánica sería quien marcaría la pauta del porcentaje para poder establecer de los otros tres materiales su resto de porcentaje, entonces al final tener una combinación con el que se pudiera realizar una prueba Marshall.

En la Tabla 10 se observa el resultado de las combinaciones por porcentaje de cada material extraído desde los bancos de material. Se crearon 3 diseños, los porcentajes de toba volcánica para los diseños fueron los primeros en definirse (0%, 10% y 20%) los cuales se establecerían fijos para definir el resto de los porcentajes. Los resultados mostraron que cuando el porcentaje de toba volcánica comienza a aumentar, el porcentaje de grava TN 1" disminuye, esto es porque como se observó en la Gráfica 1, los residuos de toba volcánica son de tamaño máximo nominal de 1".

Tabla 10. Propuesta de combinación de granulometrías con 0%, 10% y 20% de toba (diseño 1, 2 y 3 respectivamente)

Tipo de material	Diseño		
	1	2	3
Grava 1"	14.21%	5.00%	0.00%
Grava 3/4"	28.12%	27.84%	22.51%
Sello 3/8"	16.34%	16.66%	18.05%
Arena	41.33%	40.50%	39.44%
Toba	0.00%	10.00%	20.00%
Total	100.00%	100.00%	100.00%

En el diseño 1 de la Tabla 10, el material es únicamente basalto, aquel material que es usado convencionalmente en un pavimento, el cual nombrará como muestra de control, esto con la finalidad de comparar los resultados de las pruebas mecánicas con aquellas que tienen algún porcentaje de toba volcánica.

La distribución granulométrica resultante para los diseños (1, 2 y 3) después de combinarlos teóricamente resultaron similares como se muestran en la Tabla 11, esto sucedió porque se interpreta que la sustitución del material de residuo fue en lugar de otro que presenta similar composición granulométrica, en este caso de la grava de 1". Entonces para la grava de 1" y los residuos de toba volcánica de 1" el mayor porcentaje de materia retenido se encuentra en las mallas de 1" y 3/4".

Tabla 11. Propuesta de combinación de granulometrías para 0% de toba y 20% de toba (diseño 1, 2 y 3 respectivamente)

Malla	Abertura mm	Diseño granulométrico		
		1	2	3
% Material que pasa				
1 1/2"	37.50	100	100	100
1"	25.00	94	92	88
3/4"	19.00	86	84	81
1/2"	12.50	69	69	69
3/8"	9.50	60	60	61
1/4"	6.35	51	52	52
#4	4.75	46	46	46
#10	2.00	26	26	26
#20	0.85	15	15	15
#40	0.43	8	8	9
#60	0.25	7	7	7
#100	0.15	4	4	4
#200	0.075	2	2	2
		0	0	0

En la Figura 20 se comprueba lo anterior, porque ahora de manera gráfica, los diseños con 0, 10 y 20% de sustitución de agregado por residuos de toba volcánica (diseño 1, 2 y 3) se pueden observar como a partir de la malla con abertura de 12.4 mm hasta 0.075mm se alcanza a percibir como una sola línea.

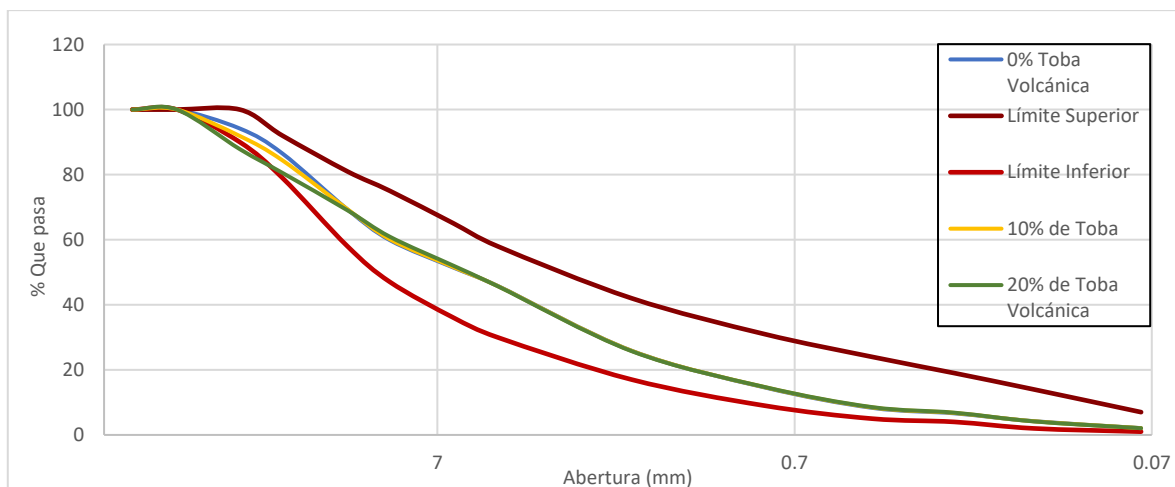


Figura 20. Propuesta granulométrica para diferentes sustituciones de toba volcánica

4.1.2 Dosificación de muestras

La norma ASTM D6926 indica elaborar un espécimen de 63.5 mm de altura con 1200 g de muestra de agregado con estructura granulométrica densa, sin embargo, la altura fue superior, por lo que se hicieron otras pruebas piloto con 1100 g y 1000 g resultando al final que la muestra de 1000g era la que más se acercaba a la altura normada. Sin embargo, las muestras llegan a tener pequeñas variaciones respecto a los 63.5 por eso, se hace una respectiva corrección que depende de la variación de la altura siguiendo el procedimiento mencionado en la normativa ASTM D6927.

Las dosificaciones por muestra para conformar una pastilla Marshall, se elaboraron malla por malla para tener una muestra teórica. Son 3 tablas, esto porque cada tabla hace referencia a los resultados de las combinaciones de cada diseño de la Tabla 11 en el cual se tiene 0, 10 y 20% de sustitución de agregado por residuos de toba volcánica. En la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14 se observa la dosificación de material por malla junto con sus acumulados hasta lograr tener la muestra de 1000 g (ver. Anexo 2, Anexo 3 y Anexo 4).

Tabla 12. Dosificación en gramos de muestra con 0% de sustitución de agregado

P agregado	1000									
	14%		28%		16%		41%		0%	
%	Grava		Grava		Sello		Arena		Toba	
Malla	1 1/2"	Acumulado	3/4"	Acumulado	3/8"	Acumulado	Acumulado	Acumulado	Acumulado	Acumulado
2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1"	58.19	58.19	-	-	-	-	-	-	-	-
3/4"	29.80	87.99	47.04	189.13	-	-	-	-	-	-
1/2"	36.47	124.46	135.17	324.30	-	-	-	-	-	-
3/8"	12.98	137.44	74.15	398.46	7.69	430.95	-	-	-	-
1/4"	4.65	142.09	18.08	416.54	61.73	492.68	-	-	-	-
No. 4	-	142.09	3.01	419.55	49.09	541.78	3.95	590.64	-	-
No. 10	-	142.09	3.71	423.26	36.33	578.10	159.75	750.39	-	-
No. 20	-	142.09	-	423.26	5.98	584.09	106.52	856.90	-	-
No. 40	-	142.09	-	423.26	2.60	586.68	60.57	917.47	-	-
No. 60	-	142.09	-	423.26	-	586.68	16.71	934.18	-	-
No. 100	-	142.09	-	423.26	-	586.68	24.17	958.35	-	-
No. 200	-	142.09	-	423.26	-	586.68	21.12	979.48	-	-
Pasa	-	142.09	-	423.26	-	586.68	20.53	1,000.00	-	-
Total	142.09		281.17		163.42		413.32		-	

Son 3 tablas, esto porque cada tabla hace referencia a los resultados de las combinaciones de cada diseño de la Tabla 11, en el cual se tiene 0, 10 y 20% de sustitución de agregado por residuos de toba volcánica.

Tabla 13. Dosificación en gramos de muestra con 10% de sustitución de agregado

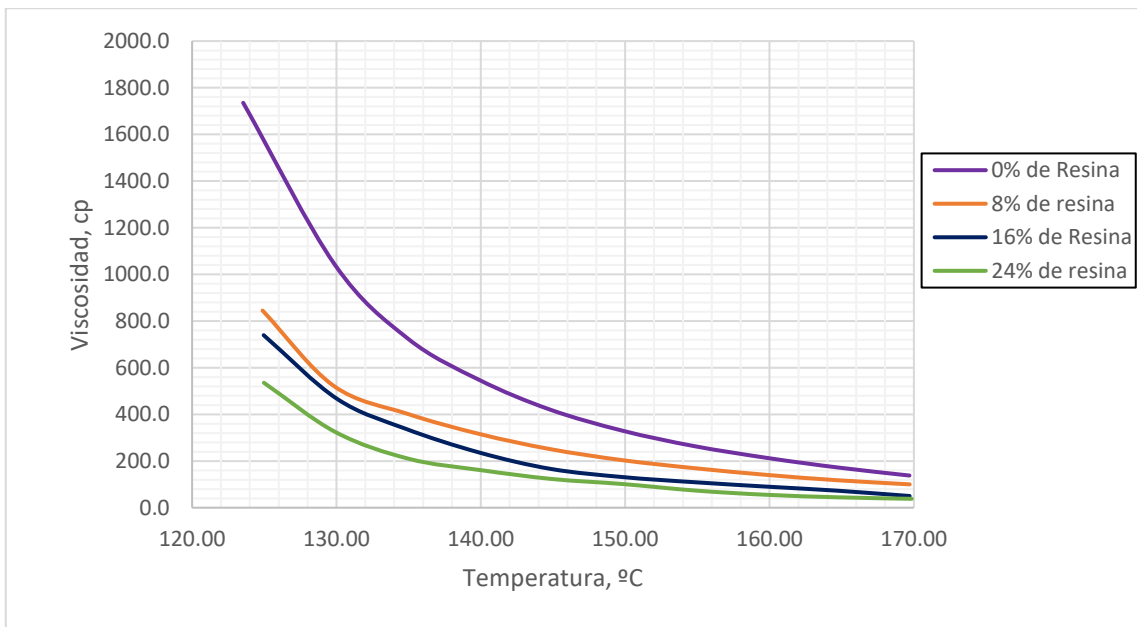
P agregado		1000									
%	5%		28%		17%		41%		10%		
Malla	Grava 1 1/2"	Acumulado	Grava 3/4"	Acumulado	Sello 3/8"	Acumulado	Arena	Acumulado	Toba	Acumulado	
2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1 1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	900.00	
1"	20.48	20.48	-	-	-	-	-	-	60.84	960.85	
3/4"	10.49	30.96	46.57	96.57	-	-	-	-	17.60	978.45	
1/2"	12.83	43.80	133.82	230.39	-	-	-	-	3.36	981.80	
3/8"	4.57	48.37	73.41	303.80	7.84	336.20	-	-	6.88	988.69	
1/4"	1.64	50.00	17.90	321.70	62.93	399.13	-	-	3.27	991.96	
No. 4	-	50.00	2.98	324.68	50.04	449.17	3.87	498.82	1.12	993.08	
No. 10	-	50.00	3.67	328.36	37.03	486.20	156.56	655.37	2.26	995.34	
No. 20	-	50.00	-	328.36	6.10	492.30	104.39	759.76	0.86	996.20	
No. 40	-	50.00	-	328.36	2.65	494.95	59.36	819.12	0.81	997.01	
No. 60	-	50.00	-	328.36	-	494.95	16.37	835.50	0.49	997.50	
No. 100	-	50.00	-	328.36	-	494.95	23.69	859.18	1.82	999.32	
No. 200	-	50.00	-	328.36	-	494.95	20.70	879.89	0.37	999.69	
Pasa	-	50.00	-	328.36	-	494.95	20.12	900.00	0.32	1,000.00	
Total	50.00		278.36		166.59		405.06		100.00		

Tabla 14. Dosificación en gramos de muestra con 20% de sustitución de agregado

P agregado		1000									
%	0%		23%		18%		39%		20%		
Malla	Grava 1 1/2"	Acumulado	Grava 3/4"	Acumulado	Sello 3/8"	Acumulado	Arena	Acumulado	Toba	Acumulado	
2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1 1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	800.00	
1"	-	-	-	-	-	-	-	-	121.69	921.69	
3/4"	-	-	37.65	37.65	-	-	-	-	35.20	956.89	
1/2"	-	-	108.19	145.84	-	-	-	-	6.71	963.60	
3/8"	-	-	59.35	205.19	8.50	233.54	-	-	13.77	977.37	
1/4"	-	-	14.47	219.67	68.19	301.73	-	-	6.54	983.91	
No. 4	-	-	2.41	222.08	54.23	355.96	3.77	409.34	2.24	986.15	
No. 10	-	-	2.97	225.05	40.13	396.09	152.45	561.79	4.53	990.68	
No. 20	-	-	-	225.05	6.61	402.69	101.65	663.44	1.72	992.40	
No. 40	-	-	-	225.05	2.87	405.56	57.80	721.24	1.63	994.03	
No. 60	-	-	-	225.05	-	405.56	15.95	737.19	0.98	995.00	
No. 100	-	-	-	225.05	-	405.56	23.06	760.25	3.63	998.63	
No. 200	-	-	-	225.05	-	405.56	20.16	780.41	0.74	999.37	
Pasa	-	-	-	225.05	-	405.56	19.59	800.00	0.63	1,000.00	
Total	0.00		225.05		180.52		394.44		200.00		

4.1.3 Temperatura del asfalto

Los resultados que se muestran en la Tabla 15 y se visualizan en la Gráfica 2 son las temperaturas de mezclado y compactación a la que se tienen que elevar los materiales. El asfalto a temperatura ambiente se endurece ya que es un polímero termoplástico, pero al calentarse vuelve a fluir, mientras que la resina a temperatura ambiente fluye. Por lo anterior, para el asfalto y las dos sustituciones parciales por resina epóxica, las temperaturas de mezclado y compactación se modifican, esto es porque la viscosidad cambia por la adición de resina.



Gráfica 2. Carta de viscosidad (Ekbe PG 64-22)

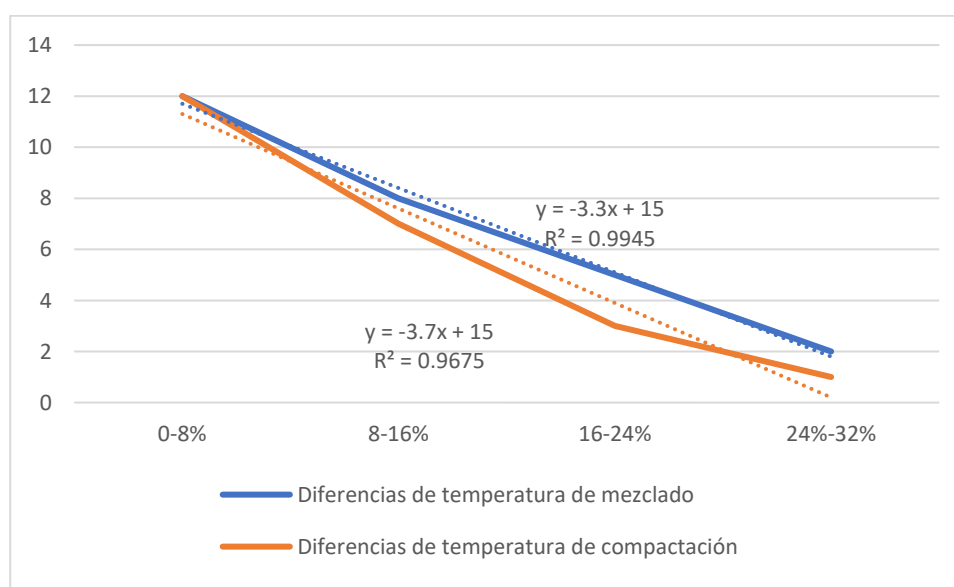
Tabla 15. Temperatura en grados centígrados de mezcla y compactación de una mezcla respecto a su contenido de resina

Técnica	% Sustitución de resina			
	0%	8%	16%	24%
Mezcla (°C)	166	154	146	141
Compactación (°C)	158	146	139	136

En la Tabla 15 la temperatura de mezclado y compactación cuando se tiene 8% de resina bajó 12°C, mientras que cuando se tiene 16% de resina, bajó 20°C y cuando se tiene 24% baja hasta 24±1°C respecto a la temperatura sin sustitución. En la Gráfica 3 las diferencias de temperatura para mezclado tienen un comportamiento lineal con $R^2=0.99$ mientras que para compactación se tiene una $R^2=0.96$.

Tabla 16. Diferencias de temperaturas entre incrementos de sustitución parcial de resina epóxica

	0-8%	8-16%	16-24%
Mezcla (°C)	12	8	5
Compactación (°C)	12	7	3



Gráfica 3. Comportamiento de las diferencias de temperatura entre incrementos de resina epóxica

4.1.4 Volumetría, estabilidad y flujo

Para poder elegir el contenido óptimo de asfalto fue necesario generar la volumetría de las pastillas ensayadas, así como su estabilidad y flujo. Los resultados se presentan en la Tabla 17, en la cual cuando hay 0% de sustitución de Toba, la estabilidad entré más

porcentaje de asfalto se le agrega, va aumentando poco a poco hasta que al llegar 4.5% disminuye, pero el flujo continúa aumentando. Así que se consideró el punto más alto de la estabilidad para elegir el contenido óptimo de asfalto y que cumpliera con todos los parámetros, en este caso fue el 4.55%. Los vacíos del agregado mineral (VAM) se refieren al espacio intergranular ocupado por asfalto y aire, por lo que entre menor sea, la muestra se ha compactado correctamente, mientras que los vacíos llenados con asfalto (VFA) es aquel porcentaje de VMA que es asfalto en ese volumen, para obtener estos datos es necesario tener gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (G_{mb}). De la misma manera las proporciones en volumen por cada variable fue una relación del porcentaje de asfalto respecto al peso de la mezcla con el G_{mb} entre la densidad de la variable en cuestión ya sea asfalto o del promedio de los agregados.

Mientras que la estabilidad corregida es aquel valor que se obtuvo de la aplicación de carga como se observa en la Figura 21.



Figura 21. Prueba de estabilidad y flujo

Tabla 17. Promedios de resultados de las pastillas por diseño Marshall con 0, 10 y 20% de toba volcánica

Toba	No. Pastilla	Asfalto respecto al agregado (%)	Gravedad específica (Gmb)	Proporciones en Volumen			VAM (%)	VFA (%)	Estabilidad corregida (N)	Flujo (mm)
				Cemento Asfáltico (%)	Agregado Pétreo (%)	Vacíos de aire (%)				
0%	1,2,3	3.50	2.33	7.68	86.08	6.24	13.92	55.18	5,358.59	2.26
	4,5,6	4.00	2.36	8.82	86.53	4.65	13.47	65.50	6,283.74	3.11
	7,8,9	4.50	2.37	9.94	86.61	3.45	13.39	74.28	9,262.07	3.35
	10,11,12	5.00	2.36	10.95	85.95	3.10	14.05	77.97	8,504.62	4.55
10%	13,14,15	3.50	2.27	7.47	83.75	8.78	16.25	46.00	6,332.65	2.33
	16,17,18	4.00	2.29	8.58	84.16	7.25	15.84	54.28	8,228.12	2.90
	19,20,21	4.50	2.34	9.79	85.31	4.90	14.69	66.65	8,754.08	3.29
	22,23,24	5.00	2.33	10.81	84.80	4.39	15.20	71.14	9,800.18	4.40
20%	25,26,27	3.50	2.24	7.37	82.59	10.04	17.41	42.43	8,836.83	2.26
	28,29,30	4.00	2.29	8.58	84.14	7.28	15.86	54.13	8,645.29	2.79
	31,32,33	4.50	2.33	9.74	84.95	5.30	15.05	64.80	8,461.52	3.09
	34,35,36	5.00	2.35	10.86	85.24	3.90	14.76	73.60	9,353.12	3.78

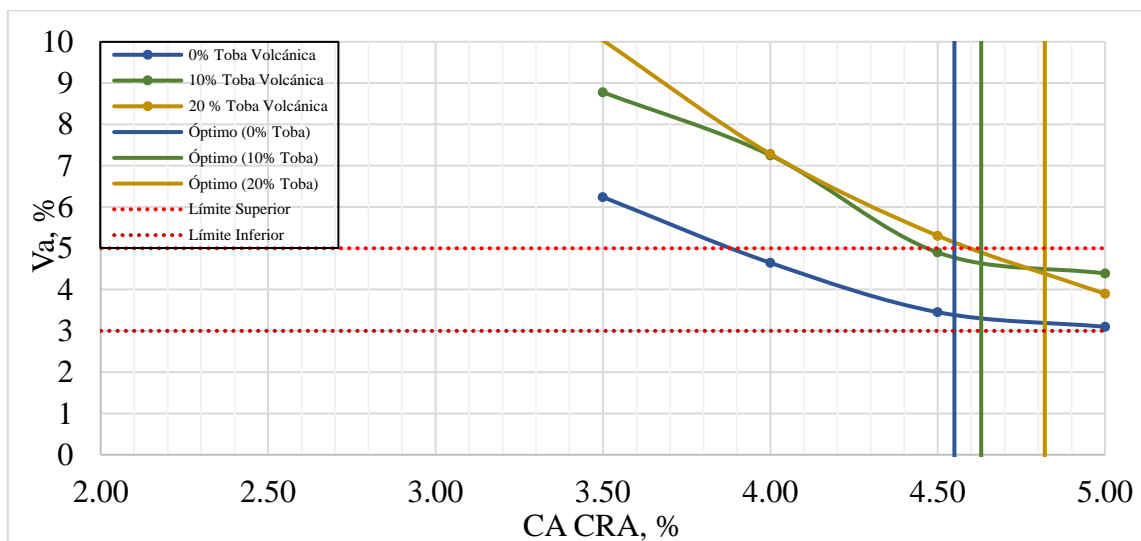
Ahora bien, de la Tabla 17 en la muestra con 10% de sustitución parcial por residuos de toba volcánica, la estabilidad aumentó respecto a la muestra de control. El aumento fue a causa de la absorción considerable que tiene en comparación al basalto, sin embargo, el flujo disminuye porque dicha absorción genera un contacto mayor entre partículas.

De acuerdo con la Tabla 3 la mezcla diseñada se hizo con parámetros Marshall para un pavimento con capacidad para más de un millón de ejes equivalentes con vida útil mayor a 20 años, el cual los criterios Marshall lo clasifican como *Tráfico Pesado*.

Por último, de la Tabla 17 cuando se tiene 20% de sustitución de toba volcánica, la estabilidad sigue siendo mayor respecto a la muestra de control (0% de sustitución), pero es menor que cuando se tiene 10% de sustitución. Lo anterior surge porque ahora está haciendo efecto la deficiencia de abrasión que se presentó en la caracterización. Y el flujo

sigue comportándose de igual manera los materiales que cuando se tenía 10%, solamente los valores aumentan porque ahora se tiene más residuo de toba.

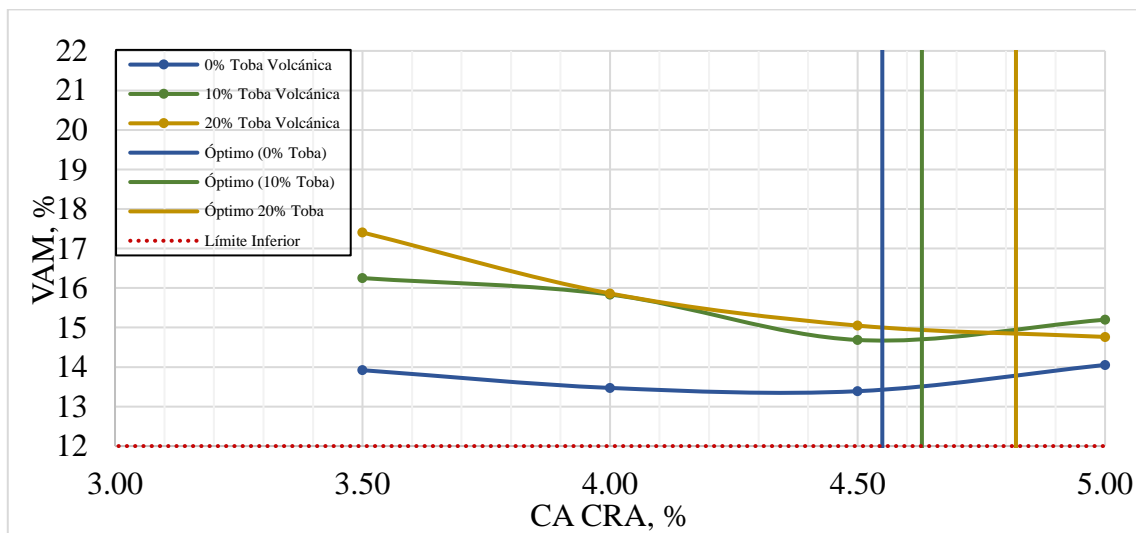
Ahora bien, en la Gráfica 4 se muestra el comportamiento de los vacíos de aire (V_a) de las diferentes mezclas. Se observa que los valores en su conjunto por tipo de diseño de vacíos de aire (V_a) son mayores cuando se tiene toba volcánica, esto es porque al tener menor peso específico al elaborar las muestras se agregarán más partículas de grava para cumplir con el peso de muestra de 1000g y también con la granulometría, generando mayor cantidad de vacíos entre partículas por el tamaño del agregado. Un contenido bajo de vacíos de aire en una mezcla densa provoca baches, surcos o sangrado del asfalto. Por lo tanto, para evitar esto, para una mezcla densa el rango es de 3-5%.



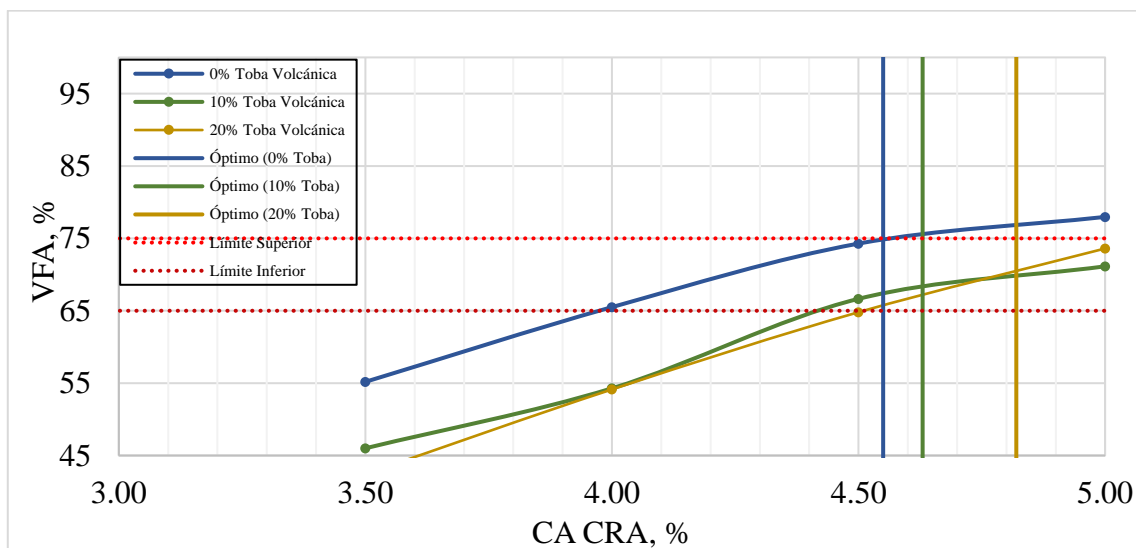
Gráfica 4. Resultados de Vacíos de aire vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

Tanto en la Gráfica 5 como en la Gráfica 6 se vuelve a representar de manera visual las diferencias por cada porcentaje de sustitución ya que el VAM es menor para 0% de toba, es decir, tienen mayor grado de compactación y el VFA es mayor ya que se tienen menores vacíos de aire. Sin embargo, los valores para 10% y 20% siguen cumpliendo los rangos estandarizados, sólo que desfasados de la mezcla convencional. Estos dos tipos de vacíos se obtienen principalmente a través del Gmb. El VMA debe de ser mayor a 12, esto es porque si fuera menor los agregados estarían cubiertos con películas muy delgadas de

asfalto generando un pavimento de baja durabilidad. Mientras que el VFA es el asfalto efectivo el cual, si se encuentra arriba de 75%, la mezcla tendrá poca durabilidad. Pero si es bajo, la mezcla se vuelve inestable. Para un rango de tráfico alto requiere un VFA más bajo y para un rango de tráfico bajo, VFA alto.

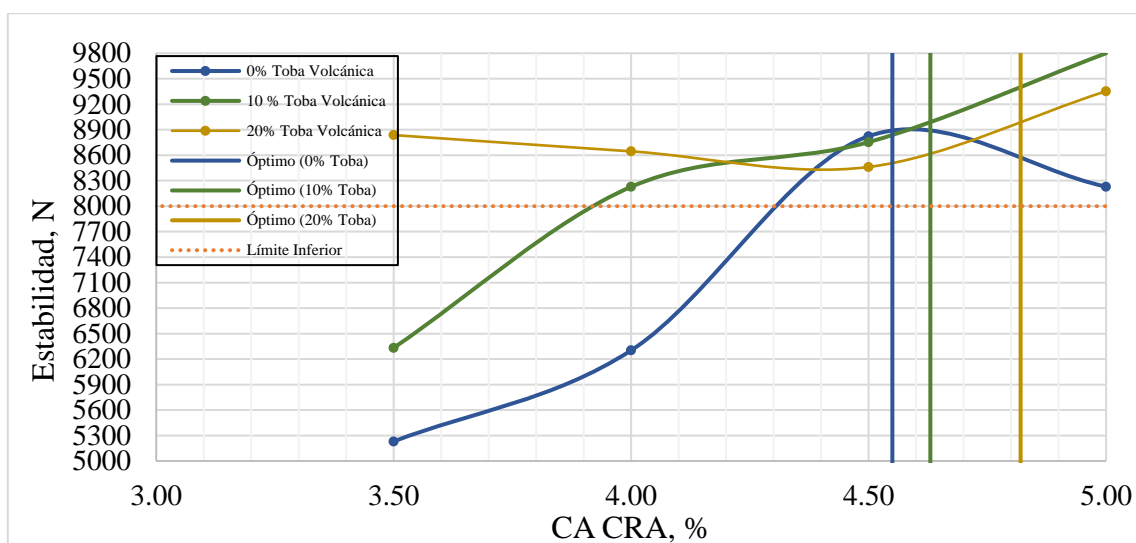


Gráfica 5. Resultados de Vacíos del Agregado Mineral vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

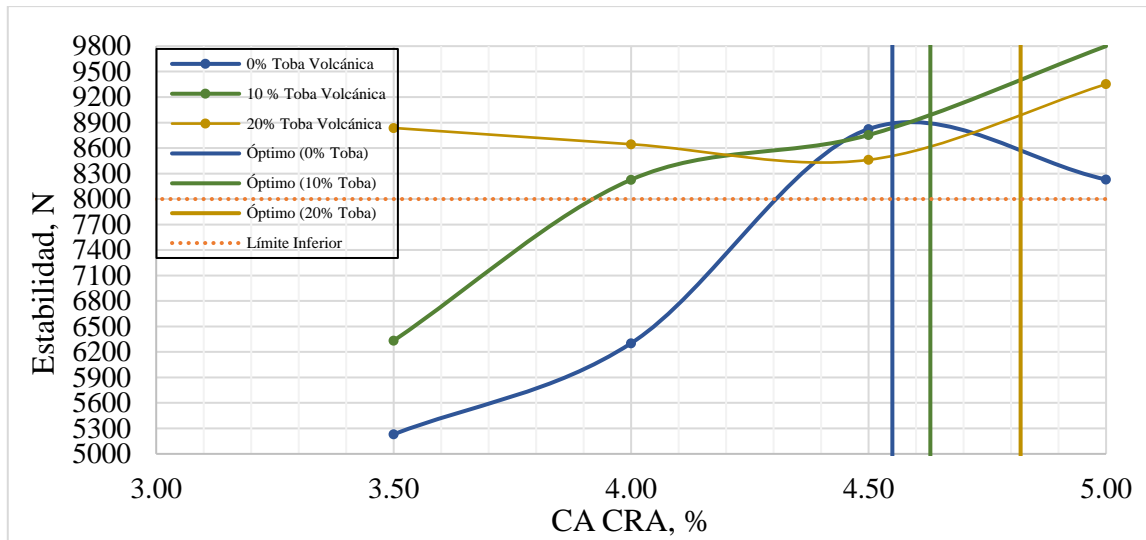


Gráfica 6. Resultados de Vacíos llenados con asfalto vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

En la Gráfica 7, la estabilidad cuando se tiene 20% de toba volcánica para 3.5% de asfalto es superior a las otras sustituciones; lo anterior es porque al tener un menor peso específico de las partículas de grava respecto al basalto, la muestra tendrá mayor cantidad de número de gravas de toba, por lo tanto, se generará una mayor resistencia. La estabilidad es la resistencia de carga máxima, que entre mayor sea, cumple con las demandas del tráfico seleccionado para soportar los empujes y evitar los desplazamientos de la carpeta asfáltica. En seguida, en la Gráfica 8 se observa que, entre mayor cantidad de toba existe mayor absorción y menor flujo, pero aun así individualmente tienen la tendencia a incrementar conforme adquieren mayor cantidad de asfalto. El flujo es la deformación total de la mezcla, el cual es lo que hace al pavimento adaptarse a asentamientos y movimientos graduales sin agrietarse.

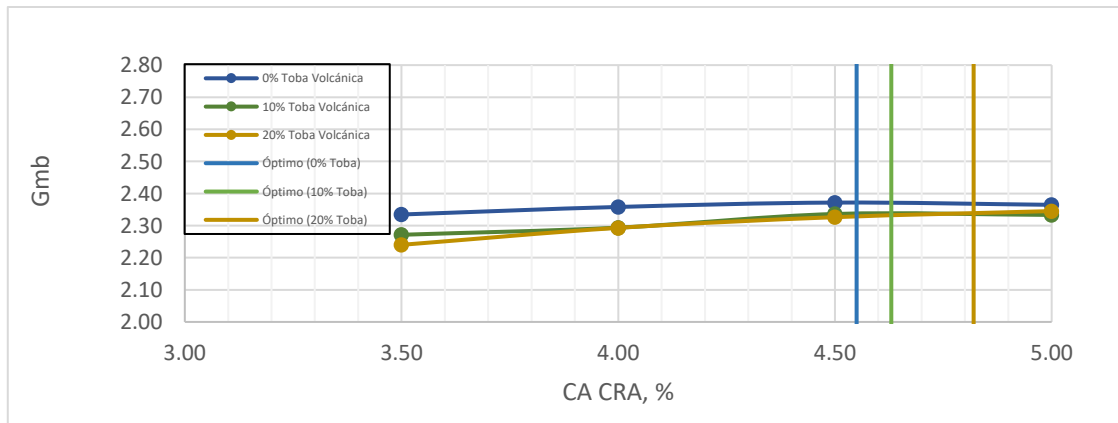


Gráfica 7. Resultados de prueba Marshall; Estabilidad vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)



Gráfica 8. Resultados de prueba Marshall; Flujo vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

En la Gráfica 9 se puede visualizar que el peso específico (Gmb) en sustituciones de 10% y 20% comienzan a comportarse de la misma manera siendo menores a la que tiene basalto solamente (muestra base) debido a que la gravedad específica del basalto es mayor que de la toba.



Gráfica 9. Resultados de Gravedad Específica Neta vs. Contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

En la Tabla 18 se muestran los datos exactos cuando cada sustitución parcial en las gráficas se evalúa con el mismo contenido de asfalto, para poder elaborar una comparativa.

Cuando se tiene 10% se genera una mayor estabilidad con 9358.76 Newtons que cuando no hay sustitución con 8976.86 N o cuando se tiene 20% de sustitución con 8871.84.

Tabla 18. Resultados de comparativa cuando se tiene un mismo porcentaje de asfalto

Propiedades volumétricas y resultados de Marshall	Sustitución parcial con desechos de toba volcánica		
	0%	10%	20%
Contenido de asfalto	4.55	4.55	4.55
Va (%)	3.37	5.18	5.14
VAM (%)	13.41	14.60	15.00
VFA (%)	74.95	67.65	65.78
Estabilidad (N)	8976.87	9358.76	8871.84
Flujo (mm)	3.40	3.36	3.13
Gmb	2.37	2.34	2.33

Ahora bien, en la Tabla 19 se tienen los contenidos óptimos con base en los límites establecidos en la normativa (Asphalt Institute, 2014; N.CMT.4.05.003, 2016), todos cumplen cuando se tienen contenidos de asfalto de 4.55%, 4.63% y 4.82%.

Tabla 19. Resultados de contenido óptimo de asfalto

Sustitución parcial con toba volcánica	0%	10%	20%	Límite inferior	Límite superior
Contenido óptimo	4.55	4.63	4.82	-	-
Va (%)	3.37	4.98	4.35	3	5
VAM (%)	13.41	14.54	14.82	12	-
VFA (%)	74.95	69.06	70.70	65	75
Estabilidad (N)	8976.87	9459.23	9297.38	8000	
Flujo (mm)	3.40	3.48	3.44	2	3.5
Gmb	2.37	2.35	2.34	-	-

4.1.4.1 Aprovechamiento de la sustitución parcial por residuos de cantera

Al realizar un proyecto de infraestructura vial, los materiales utilizados son con base a los materiales locales disponibles. Por lo tanto, los residuos de toba volcánica son sustentables ya que se usarán tal y como se encuentran en el banco de material de forma gratuita mientras que otros materiales son cobrados por m³, para la construcción de

pavimentos flexibles aledaños a cualquier banco de material que tenga residuos de toba volcánica con granulometrías que se adapten a una estructura granulométrica densa, los cuales evitarán la apertura de nuevas superficies con función de vertederos. Con lo anterior, logra que la sociedad conserve espacios limpios, conservación de flora/fauna e incita a la construcción de caminos.

4.2 ENSAYO DE CALIDAD

4.2.1 Tensión indirecta

Primero es necesario visualizar el comportamiento por separado, cuando se tiene la sustitución de toba volcánica como cuando se tiene la de la resina epóxica. En contexto general, en la Gráfica 10 se tienen los resultados de tensión indirecta para cada contenido óptimo de asfalto, el cual cambia de acuerdo con su porcentaje de sustitución parcial por residuos de toba volcánica. Entonces para cada contenido óptimo se hizo una sustitución parcial por resina en porcentajes de 0, 8 y 16% generándose las pastillas mostradas en la Figura 22.

Ahora bien, los resultados en la Gráfica 10, generan 3 líneas en las cuales se observa claramente que cuando se tiene 8% de sustitución por resina epóxica, la tensión indirecta tiene los mejores resultados incluso que la muestra base, pero cuando se tiene 16% la resistencia a la tensión disminuye notablemente. Por lo tanto, entre 8 y 16% se tiene el máximo porcentaje de sustitución que se puede realizar en una mezcla asfáltica antes de resistencia se vea afectada.

Otro comportamiento importante, se observa en la Tabla 20 cuando la mezcla tiene un 10% de sustitución parcial por residuos de toba volcánica, se tienen valores cercanos al máximo de tensión indirecta, excepto cuando se le sustituye 16%, esto es porque el exceso de resina cambia completamente su comportamiento.

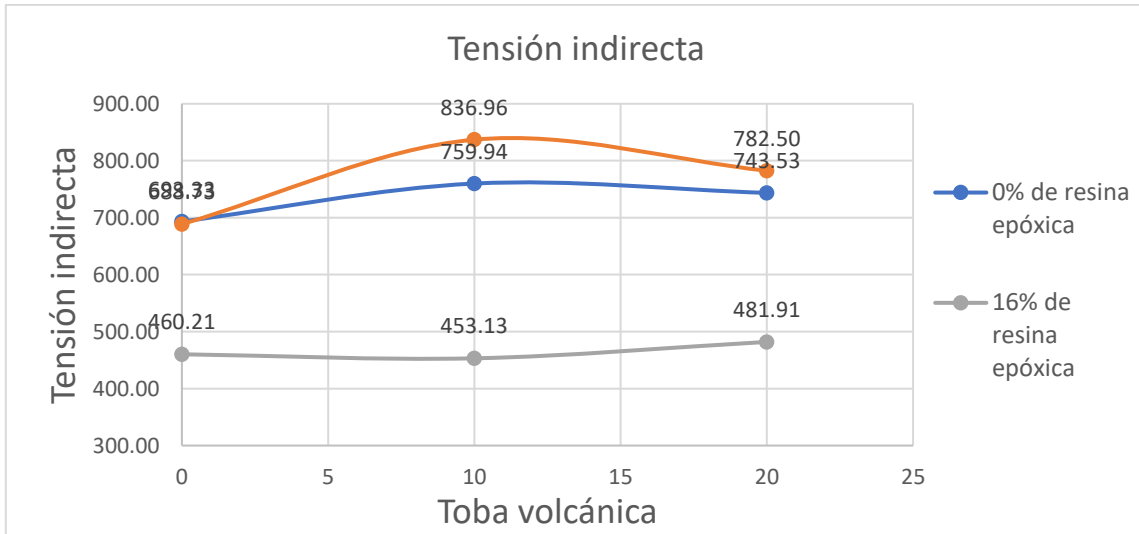
Tabla 20. Resultados de comparativa cuando se tiene un mismo porcentaje de asfalto

Sustitución parcial		Respecto al agregado		Vacíos de aire (%)	VAM (%)	VFA (%)	Tensión indirecta (kPa)	Altura (cm)
Toba Volcánica (%)	Resina (%)	No. Pastilla	Asfalto (%)					
0	0	1,10,19	4.55	6.66	18.06	62.96	693.33	62.59
10	0	2,11,20	4.63	6.73	18.12	62.72	759.94	63.07
20	0	3,12,21	4.82	6.85	18.22	62.29	743.53	63.53
0	8	4,13,22	4.55	6.74	19.04	64.46	688.73	61.02
10	8	5,14,23	4.63	6.85	19.13	64.09	836.96	62.63
20	8	6,15,24	4.82	6.98	19.24	63.62	782.50	63.75
0	16	7,16,25	4.55	6.81	18.50	63.02	460.21	60.65
10	16	8,17,26	4.63	6.93	18.60	62.61	453.13	62.49
20	16	9,18,27	4.82	7.07	18.72	62.11	481.91	63.68

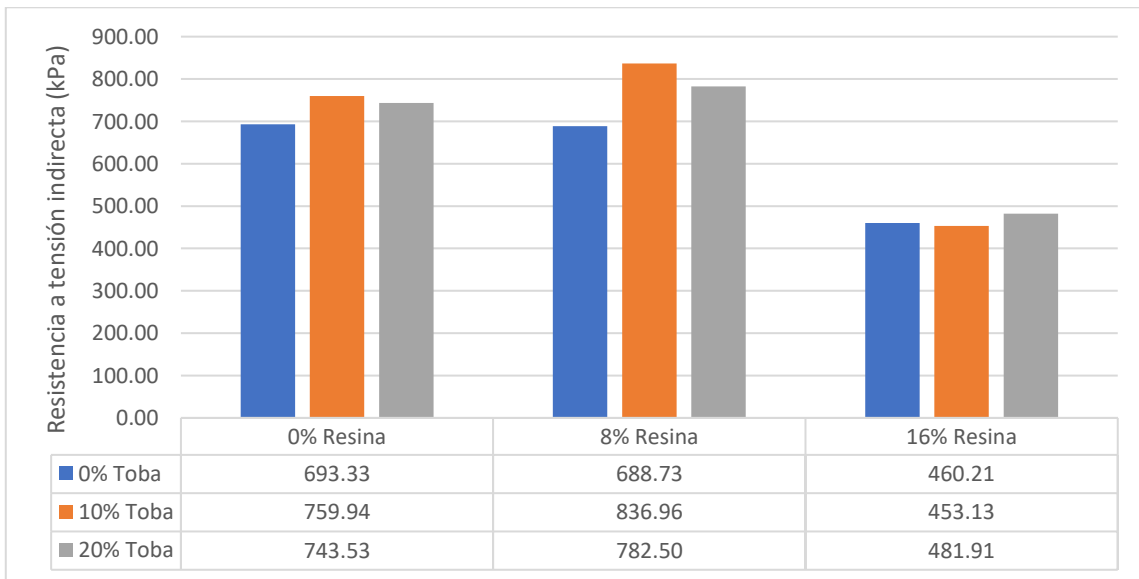


Figura 22. Pastillas para tensión indirecta envueltas en Parafilm

Gráfica 10. Tensión indirecta en una mezcla asfáltica con sustitución parcial, tanto en el agregado, como en el aglutinante



Gráfica 11. Tensión indirecta en una mezcla asfáltica (otra forma de representación gráfica)



4.2.2 Aprovechamiento de la sustitución parcial (resina)

La sustitución parcial de resina epóxica, se convierte en opción para las empresas que requieren reducir la energía para producir el calor necesario para llegar a una temperatura

de mezcla y compactación. En este caos, cuando se tiene 8% de resina epóxica se pueden ahorrar hasta 12°C debajo de las temperaturas requeridas.

4.2.3 Comparativa de hipótesis y lo alcanzado en la investigación

Tabla 21. Análisis de resultados logrados comparados con la hipótesis

		Óptimo		
Consideraciones	Hipótesis	1	2	3
Sustitución parcial por toba volcánica	Mínimo 40%	Hasta 10%	Sin sustitución	Hasta 10%
Sustitución parcial por resina epóxica	Mínimo 10%	Sin sustitución	Hasta 8%	Hasta 8%
Conservar la resistencia a la tensión indirecta de un pavimento flexible.	No se cumple	La resistencia a la tensión indirecta no solo se conserva, sino es superior a la mezcla base basáltica.	La resistencia a la tensión indirecta no solo se conserva, sino es superior a la mezcla base basáltica.	La resistencia a la tensión indirecta no solo se conserva, sino es superior al óptimo 1 y 2.
Residuos de Toba volcánica (%)	Resina epóxica (%)	Resistencia a la tensión indirecta (Kpa)		
10	0	759.94	-	-
0	8	-	688.73	-
10	8	-	-	836.96

En la Tabla 21 se muestran claramente los porcentajes inicialmente planteados en la hipótesis, en comparativa con los resultados óptimos de sustitución que a pesar de que fueron menores se tiene que la resistencia a la tensión indirecta es excelente y es mayor que cuando no se tiene sustitución parcial (residuos de toba volcánica y/o resina epóxica). La mayor resistencia a la tensión indirecta fue de 836.96 Kpa cuando se tiene 10% de residuos de toba volcánica y 8% de resina epóxica, sin embargo, otro resultado categorizado como excelente fue cuando se tiene 10% de residuos de toba volcánica con 759.94 Kpa, siendo superior al resultado de 688.73 Kpa que cuando no se tiene ningún tipo de sustitución parcial.

5. CONCLUSIONES

Se considera que el uso de residuos de toba volcánica y resina es una de muchas alternativas de sustitución de materiales para la elaboración de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles, esto se logró a través de las sustituciones parciales, tanto en la estructura granulométrica de una muestra base para los agregados y en el aglutinante la resina se combinó justo cuando se calienta el asfalto. Inicialmente de los residuos de toba volcánica se comprobó que, a pesar de que varias citas bibliográficas mencionaban que era un material blando y poroso, el desgaste a la abrasión fue de 28.8%. Mientras que la sustitución parcial de asfalto por resina epóxica generó que la temperatura de mezclado y compactación disminuyera.

Ahora bien, los resultados de volumetría, estabilidad y flujo resultaron de elaborar un diseño Marshall a 20 años para tráfico pesado y mayor a un millón de ejes equivalentes (ESAL). Dichos resultados arrojaron que el porcentaje óptimo de sustitución parcial de agregado basáltico por residuos de toba volcánica fue de 10% porque los resultados de estabilidad son mayores a las de las otras sustituciones, surgió esta ventaja porque la grava de toba volcánica al ser más ligera que el basalto, en cada tamaño de partícula se agregaron más rocas de toba volcánica para cumplir con el peso requerido de la sustitución. El contenido óptimo de aglutinante cuando se tiene 10% de residuos de toba volcánica su aumento es relativamente bajo (0.08%) respecto a la mezcla convencional (muestra base),

esto se debe a que los agregados de toba volcánica al tener una densidad de 1.17, su porosidad hace que absorba más cantidad de asfalto.

Los resultados de tensión indirecta resaltan aumento de resistencia cuando hay 8% de resina, sin embargo, cuando se sustituye un 16% la resina comienza a tener un comportamiento completamente diferente ya que disminuye la resistencia a la tensión indirecta. Por lo tanto, entre 8% y 16% se encuentra el máximo de resina epóxica que se puede sustituir parcialmente en una mezcla asfáltica con las mismas características.

Finalmente, la hipótesis no se cumple para 40% de sustitución de agregado por residuos de toba volcánica y cuando hay 10% de resina epóxica, pero la sustitución parcial de 10% de agregados por residuos de toba volcánica y 8% de asfalto por resina epóxica, no sólo mantuvo los valores de la mezcla base basáltica, sino que hasta los aumentó y generó resultados para una resistencia a la tensión indirecta excelente. Es decir, una resistencia excelente a la creación de surcos bajo la acción de las cargas del tráfico. Sin embargo, para cuestiones económicas la sustitución de 10% de agregados por residuos de toba volcánica, sin sustitución parcial en el aglutinante es la que resultaría más barata.

Además, cumpliría con el triple resultado de la sustentabilidad: en primer lugar, se está subsanando una problemática a la sociedad de sobre acumulación de desechos, es decir, se está evitando la creación de nuevos depósitos que pueden tener otros usos para la población aledaña. En segundo lugar, cumple expectativas ambientales porque se evitaría el llenado de nuevas superficies que tienen flora y fauna propia del lugar. Y, en tercer lugar, es económico porque el material se encuentra disponible en el banco de material ya que son residuos. Esto se contempla así porque cuando se construye una carretera se buscan los materiales viables dentro de la zona, entonces para construcciones aledañas al banco de material, los residuos de toba volcánica no tendrán costo alguno, mientras tanto que los triturados de roca basáltica sí lo tendrán.

Mientras que cuando se requiera bajar la temperatura 12° centígrados para mezclar y compactar una mezcla, para evitar la energía y el residuo que provoca esa generación extra de calor para elevar 12°C, la mejor opción es sustituir el aglutinante por 8% de resina epóxica y aprovechar la sustitución de 10% de agregados por residuos de toba volcánica.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington : American Association of State Highway and Transportation Officials .
- Ahmedzade, P., & Yilmaz, M. (2008). Effect of polyester resin additive on the properties of asphalt binders and mixtures. *Construction and building materials*, 22(4), 481-486.
- Akbulut, H., & Gurer, C. (2007). Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. *Building and environment*, 42(5), 1921-1930.
- Aksoy, A., Iskender, E., & Tolga Kahraman, H. (2012). application of the intuitive k-NN Estimator for prediction of the Marshall Test (ASTM D1559) results for asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 561-569.
- AlAwad, M. (2004). Modification of the Brazilian indirect tensile strength formula for better estimation of the tensile strength of rocks and rock-like geomaterials. *King Saud University - Engineering Sciences*, 1-8.
- Alvarado , G. (2009). *Los Volcanes de Costa Rica*. Costa Rica: EUNED.
- Apaza Apaza , F., Rodrigues Guimaraes , A., Marcos Vivoni, A., & Schroder , R. (2021). Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials* , 1-15.
- Arroyo, F., Ávila , E., & Flores, E. (2016). El costo oculto del scrap en la producción de laminado de cantera. *Iberoamericana de Ciencias*, 3(7), 1-6.
- Arshad , M. (2018). Experimental evaluation of constitutive models for the estimation of resilient modulus values and an assessment of pressure sensitivity of granular blends containing reclaimed asphalt pavement materials. *Construction and Building Materials*, 491-502.

- Asi, I. (2007). Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan Climatic and traffic conditions. *Construction and Building Materials*, 21, 1732-1740.
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. USA: Asphalt Institute.
- ASTM-D6931. (2017). *Método de prueba estándar para resistencia ala tracción indirecta (IDT) de mezclas bituminosas*.
- Autelitano, F., Garilli, E., & Giuliani, F. (2019). Electronic nose for smart identification of roofing and paving grade asphalt. *Transportation Research Procedia*, 40, 4-11.
- Barbuta , M., & Toma , L. (2015). Experimental Evaluation of Strength and Elastic Properties of Polymer Concret with Different Volumen of Volcanic Tuff Acting as Filler. *Materials in Civil Engineering*, 27(6), 1-9.
- Behl, A., Sharma, G., & Kumar, G. (2014). A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads. *Construction and Building Materials*, 54, 113-117.
- Bennert, T., Haas, E., & Wass, E. (2018). Indirect Tensile Test (IDT) to Determine Asphalt Mixture Performance Indicators during Quality Control Testing in New Jersey. *Transportation Research Record*, 1-10.
- Bonilla , G., & Sirit , Y. (2005). Diseño experimental para ingenieros civiles. *Tekhne*(8), 17-22.
- Bower, D. (2002). *An Introduction to Polymer Physics* . New York: Cambridge University Press.
- Branney, M., Brown, R., & Calder, E. (2021). Pyroclastic Rocks. En *Encyclopedia of Geology* (pág. 24). San Diego, CA: Elsevier.

- Cardoso, R., Vasco Silva, R., De Brito, J., & Dhir, R. (2015). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Management*, 49, 131-145.
- Cong, P., Tian, Y., Liu Ning, & Xu, P. (2015). Investigation of epoxy-resin-modified asphalt binder. *Applied Polymer*, 43401-43401.
- Cruz Martínez, L., & Sosa Herrera, M. (2016). Reutilizar neumático en mezclas de asfalto parareparar baches en zonas urbanas.
- Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos*. Colombia : Universidad de Antioquia.
- DOF. (2003). *NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*. Distrito Federal : Miércoles 20 de octubre de 2004.
- Ebewele, R. (2000). *Polymer Science and Techonoly*. Nigeria: CRC Press.
- El Rahman, A., & El Kholly, M.-S. (2012). Modification of local Asphalt with epoxy resin to be used in pavement. *Egyptian Journal of Petroleum* , 139-147.
- Fakhri, M., Haghghat Kharrazi, E., & Aliha , M. (2018). Mixed mode tensile- in plane shear freacture energy determination for hot mix asphalt mixtures under intermediate temperature conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 192, 98-113.
- Fonseca , C. (2000). Estudio de deformaciones plásticas permanentes (rutting) en mezclas asfálticas elaboradas con materiales de la zona noreste de México mediante la máquina de pista (wheel tracking). *Revista Ingeniería de Construcción*, 15(2), 1-15.

- Forsdyke, K., & Starr, T. (2002). *Thermoset Resins: Market Report*. United Kingdom: Rapra Technology.
- Galetakis, M., & Soutana, A. (2016). A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*, 102, 769-781.
- Gaowang, Z., Hongliang, Z., Xinde, B., & Hongzhi, Y. (2018). Laboratory study on performances of bismaleimide/unsaturated polyester resin modified asphalt. *Construction and building materials*, 179, 576-586.
- Garbacz, A., & Sokolowska, J. (2013). Concrete-like polymer composites with fly ashes. *Construction and Building Materials*, 38, 689-699.
- Germinario, L., & Torok, Á. (2019). Variability of technical properties and durability in volcanic tuffs from the same quarry region: Examples from Northern Hungary. *Engineering Geology*, 262, 1-28.
- Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes: A practical guide*. Oxford: Wiley-Black Well.
- Golestaneh, M., Amini, G., Najafpour, G., & Beygi, M. (2010). Evaluation of Mechanical Strength of Epoxy Polymer Concrete with Silica Powder as Filler. *World Applied Sciences*, 216-220.
- Gómez Balbunea, D., López Lara, T., Hernández-Zaragoza, J., Ortiz Mena, R., Navarro Rojero, M., Horta Rangel, J., . . . Rojas González, E. (2018). Polymer-Cement Mortar with Quarry Waste as Sand Replacement. *Materials Science and Engineering*, 2018, 1-10.
- Gunasekera, K., Anderson, W., & Lakshmanan, T. (2008). Highway-Induced Development: Evidence from Sri Lanka. *World Development*, 36(11), 2371-2389.

- Hongliang, Z., Gaowang, z., Feifei, H., Zengping, Z., & Wenjiang, L. (2018). A lab study to develop a bridge deck pavement using bisphenol a unsaturated polyester resin modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 159, 83-98.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design* . Kentucky: Pearson.
- Huber, G., & Decker, D. (1995). *Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their Performance*. Philadelphia: ASTM.
- Jiménez Acuña, M., Sibaja Obando, D., & Molina Zamora, D. (2009). Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones. *Infraestructura Vial*, 11(21), 18-29.
- Kumar Singh, A., & Prasad Sahoo, J. (2020). Analysis and design of two layered flexible pavement systems: A new mechanistic approach. *Computers and Geotechnics*, 117, 1-11.
- Lavin , P. (2003). *A practical guide to design, production, and maintenance for engineers and architects* . New York: Spoon Press .
- Le Maitre, R., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M., Bonin, B., Bateman, P., . . . Woolley, A. (2002). *Igenous Rocks: A classification and Glossary of Terms*. Oxford: Cambridge University Press.
- Leng, Z., Pdhan, R., & Sreeram, A. (2018). Production of a sustainable paving material trough chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt. *Cleaner Production*, 180, 682-688.
- Liu , X., Zhou, C., Feng, D., Tang, H., Xu, Y., & Fan , X. (2016). Influence of moisture in aggregates on properties of cold-mixed resin asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 232-240.
- Loaiza, A., & Colorado, H. (2018). Marshall stability and flow tests for asphalt concrete containing electric arc furnace dust waste with high ZnO contents

- from the steel making process. *Construction and Building Materials*, 166, 769-778.
- López Lara , T., Hernández Zaragoza , J., Martínez Barrera , G., & Menchaca Campos , C. (2015). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. México: Omnia Publisher SL.
- Mallick, R., & El-Korchi, T. (2013). *Pavement Engineering: Principles and Practice* . New York: CRC Press.
- Martínez Echevarría, M., López Alfonso, M., Garach, L., Alegre, J., Poon, C., Agrela , F., & Cabrera , M. (2020). Crushing treatment on recycled aggregates to improve their mechanical behaviour for use in unbound road layers. *Construction and Building Materials*, 263(1-12).
- Martinho, F., Picado-Santos, L., & Capitão, S. (2018). Feasibility Assessment of the Use of Recycled Aggregates for Asphalt Mixtures. *Sustainability*, 10(6).
- Maurice Stewart, C., Reyes, J., & García , V. (2017). Comparison of Fracture Test Standards for a Super Pave Dense-Graded Hot Mix Asphalt. *Engineering Fracture Mechanics*, 169, 262-275.
- Melero Columbrí, F. (1993). *Materiales y procesos avanzados*. España: T.G.I., C.S.I.C.
- Méndez Acurio, J. (2009). *Ingeniería de Pavimentos: Materiales, Diseño y Conservación*. Lima, Perú: Instituto de la construcción y gerencia.
- Miller C, F. (1988). Pavement densification related to asphalt mix characteristics. *Transportation Research Record*(1178), 9-15.
- Mistry, R., & Kumar Roy , T. (2020). Predicting Marshall stability and flow of bituminous mix containing waste fillers by the adaptive neuro-fuzzy inference system. *Revista de la construcción*, 19(2).

- Mohammed Babalghaith, A., Koting, S., Ramli Sulong, N., Rehan Karim, M., & Mohammed AlMashjary, B. (2020). Performance evaluation of stone mastic asphalt (SMA) mixtures with palm oil clinker (POC) as fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 269, 1-11.
- Montgomery, D. (2013). *Design and Analysis of Experiment*. Arizona: John Wiley & Sons, Inc. .
- Navarro, F., Partal, P., Martínez-Boza, F., & Gallegos, C. (2004). Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. *Fuel*, 83, 2041-2049.
- NCHRP. (2011). *A manual for design of hot mix Asphalt with commentary (Report 673)*. Noreste de Washington: Transportation Research Board.
- Orozco Centeno, W., Branch Bedoya, J., & Jiménez Builes, J. (2014). Classification of fine-grained igneous, sedimentary and metamorphic rocks through structured programming. *Boletín de Ciencias de la Tierra*(36), 5-9.
- Orozco-Centeno, W., Branch Bedoya, J., & Jiménez-Builes, J. (2014). Classification of fine-grained igneous, sedimentary and metamorphic rocks through structured programming. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 36, 5-9.
- Ortiz Mena, R., Gómez Balbuena, D., Rosales Álvarez, J., & González García, M. (2016). Matriz de calidad de la disposición de residuos de cantera en Huichapan Hidalgo México. *Ingeniantes*, 1(1), 28-33.
- Ortiz Mena, R., Navarro-Rojero, M., Gómez-Balbuena, D., López Lara, T., & Hernández Zaragoza, J. (2018). Alternativas sustentables para uso de residuos de explotación de tobas volcánicas en materiales de construcción. *Gestión I+D*, 3(1), 56-81.
- Padilha, T., & Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption. *A review Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 473-484.

- Papagiannaskis, A., & Masad, E. (2008). *Pavement design and materials* . New Jersey: John Wiley & Sons .
- Pemberton, R., Summerscales, J., & Graham-Jones, J. (2019). *Marine Composites: Design and Performance*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Construction and building materials*, 211, 539-555.
- Putra Jaya, R., Rosli Haninin, M., Abdul Hassan, N., Yaacob, H., Khairul Idham Mohd Star, M., Naquiuddin Mohd, M., . . . Irwan Ramli, N. (2018). Marshall stability properties of asphalt mixture incorporating black rice husk ash. *Materials today: Proceedings*, 5(10), 22056-22062.
- Richardson, A., Ampt, E., & Meyburg, A. (1995). *Survey Methods for Transport Planning* . Australia : Eucalyptus Press.
- Rico Rodriguez, A., & Del Castillo , H. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres* . México : Limusa.
- Rondón Quintana , H., & Reyes Lizcano, F. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y deiseño*. México : Macro.
- Sargin Karahancer, S., Eriskin , E., Capali, B., Saltan, M., & Terzi, S. (2016). Investigation of Using Waste Welded Tuff Material as Mineral Filler in Asphalt Concrete. *Natural and Applied Sciences*, 20(3), 399-404.
- Sarndal, K., Swensson , B., & Wretman , J. (2003). *Model Assisted Survey Sampling*. New York: Springer-Verlag.
- SGM. (2017). *Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2017_Edicion_2018.pdf
- Shah, S., Anwar, M., Arshad, H., Qurashi, M., Nisar, A., Khan, A., & Waseem, M. (2020). Marshall stability and flow analysis of asphalt concrete under

progressive temperature conditions: An application of advance decision-making approach. *Construction and Building Materials*, 262, 1-14.

Shams Esfandabad , A., Mohsen Motevalizadeh, S., Sedghi, R., Ayar, P., & Mohammad Asgharzadeh, S. (2020). Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET). *Construction and Building Materials* , 120-410.

Shatarat, N., Abed Alhaq, A., Katkhuda , H., & Abdel Jaber, M. (2019). Investigation of axial compressive behavior of reinforced concrete columns usign Recycled Coarse Aggregate and Recycled Asphalt Pavement aggregate. *Construction and Building Materials*, 217, 384-393.

Speight, J. (2016). *Asphalt Materials Science and Technology*. Massachusetts: Butterworth-Heinemann.

Speight, J. (2016). *Asphalt Materials Science and Technology*. Massachusetts: Elsevier.

Stuck , H., Forgó, L., Rudrich , J., Siegesmund , S., & Torok, A. (2008). The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. *Enverionmental Geology*, 56, 699-713.

Tanzadeh, R., Tanzadeh , J., Honarmand , M., & Amid Tahami, S. (2019). Experimental study on the effect of basalt and glass fibers on behavior of open-graded friction course asphalt modified with nano-silca. *Construction and Building Materials*, 212, 467-475.

Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Educación.

Thives, L., & Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and enegy csumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 473-484.

- Thom, N. (2014). *Principles of Pavement Engineering* . London : Institution of Civil Engineering .
- Tolga Balta, M., Dincer , I., & Hepbasli, A. (2011). Development of sustainable energy options for buildings in a sustainable society. *Sustainable Cities and Society*, 1(2), 72-80.
- Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Kleiziené, R., Sernas, O., & Grazulyte, J. (2017). Modified asphalt mixtures for heavy duty pavement wearing layers. *Construction and Building Materials*, 131, 503-511.
- Valdes Vidal, G., Calabi Foody, A., Sánchez Alonso, E., & Miró, R. (2019). Effect of aggregate type on the fatigue durability of asphalt mixtures. *Construction and building materials*, 224, 124-131.
- Valdéz Vidal , G., Calabi Floody, A., & Sánchez Alonso, E. (2017). Evaluation of the durability of asphalt mixtures depending on the physical properties of aggregates. *Revista de la Construcción*, 16(1), 92-103.
- Wainwright, P., Cresswell, D., & Van der Slott, H. (2002). The production of synthetic aggregate from a quarry waste using an innovative style rotatory kiln. *Waste management & Research*, 20(3), 279-289.
- Wang, J., Yuan , J., Kim, K., & Xiao, F. (2018). Chemical, thermal and rheological characteristics of composite polymerized asphalts. *Fuel*, 227, 289-299.
- Wedekind , W., López-Doncel , R., Dohrmann, R., Kocher , M., & Siegesmund , S. (2013). Wathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion . *Environmental Earth Sciences* , 69, 1203-1224.
- Wei, J., & Zhang , Y. (2012). Study on the Curing Process of Epoxy Asphalt. *Testing and Evaluation*, 40(7), 1-8.

- White , P., Golden, J., Biligiri, K., & Kaloush, K. (2010). Modeling climate change impacts of pavement production and construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 776-782.
- WRA. (2019). *Reducción de la huella de carbono del ciclo de vida de los pavimentos*. La Défense Cedex: PIARC.
- Xue, Y., Ge, Z., Li, F., Su, S., & Li , B. (2017). Modified asphalt properties by blending petroleum asphalt and coal tar pitch. *Fuel*, 207, 64-70.
- Zapata, P., & Gambatese, J. (2005). Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *J Infrastruct Syst*, 11, 9-20.
- Zaragoza Bernal, A. (2000). *Reutilización de los residuos generados en obra para la obtención de hormigones*. España: Espagrafic.
- Ziari , H., Goli, A., & Armini, A. (2016). Curmb Rubber Modifier on the Performance Propierties of Rubberied Brinders. *Materials in Civil Engineering*, 28(12), 1-9.

7. ANEXO

Anexo 1. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (ASTM D3515, 2009; N.CMT.4.04, 2017)

Abertura mm	Malla Designación	Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
		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

Anexo 2. Dosificación de muestra de 1000 gramos por cada número de malla cuando hay 0% de toba volcánica

	Muestreo material →	Grava 1/2" Grako		Grava 3/4" Jovero		Sello 3/8" Jovero		Arena 3A Jovero		Toba Volcánica Residuos Jaramillo		Resultados									
		14.21%		28.12%		16.34%		41.33%		0.00%		100%									
Juego de mallas ↓																	Diseño granulométrico				
Malla	Abertura mm	% que pasa		Equivalente de %retenido		% que pasa		% que retenido		Equivalente de %retenido		% que pasa		% que retenido		Equivalente de %retenido		Suma	Combinación	Límite Inf.	Límite Sup.
		pas	o	%retenido	%retenido	pas	o	%retenido	%retenido	pas	o	%retenido	%retenido	pas	o	%retenido	%retenido				
2"	50.8	100	0	0	100	0	0	100	0.0	0	100	0	0	100	0	0	0	100	100	100	
1 1/2"	37.5	100	0	0	100	0	0	100	0.0	0	100	0	0	100	0	0	0	100	100	100	
1"	25	59	41	6	100	0	0	100	0.0	0	100	0	0	39	61	0	6	94	90	100	
3/4"	19	38	21	3	83	17	5	100	0.0	0	100	0	0	22	18	0	8	86	79	92	
1/2"	12.5	12	26	4	35	48	14	100	0.0	0	100	0	0	18	3	0	17	69	58	81	
3/8"	9.6	3	9	1	9	26	7	95	4.7	1	100	0	0	11	7	0	9	60	47	75	
1/4"	6.35	0	3	0	2	6	2	58	37.8	6	100	0	0	8	3	0	8	51	36	65	
No. 4	4.75	0	0	0	1	1	0	27	30.0	5	99	1	0	7	1	0	6	46	30	58	
No. 10	2	0	0	0	0	1	0	5	22.2	4	60	39	16	5	2	0	20	26	17	42	
No. 20	0.85	0	0	0	0	0	0	2	3.7	1	35	26	11	4	1	0	11	15	9	31	
No. 40	0.43	0	0	0	0	0	0	0	1.4	0	20	15	6	3	1	0	6	8	5	24	
No. 60	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	16	4	2	3	0	0	2	7	4	19	
No. 100	0.15	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	10	6	2	1	2	0	2	4	2	14	
No. 200	0.075	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	5	5	2	0	0	0	2	2	1	7	
Pasa 200		0	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0	5	2	0	0	0	2	0			

Anexo 3. Tabla de dosificación de muestra de 1000 gramos por cada número de malla cuando hay 10% de toba volcánica

Muestreo de material →		Grava 1/2" Grako			Grava 3/4" Jovero			Sello 3/8" Jovero			Arena 3A Jovero			Toba Volcánica Residuos Jaramillo			Resultados									
Porcentaje →		5.00 %			27.84 %			16.66%			40.50%			10.00 %			100%									
Juego de mallas ↓		Diseño granulométrico																								
Malla	Abertura mm	% que pasa	% retenido	Equivalente de %retenido	% que pasa	% que retenido	% retenido	Equivalente de %retenido	% que pasa	% que retenido	% retenido	Equivalente de %retenido	% que pasa	% que retenido	% retenido	Equivalente de %retenido	% que pasa	% que retenido	Equivalente de %retenido	Suma	Combinación	Límite Inf.	Límite Sup.			
10% de Toba Volcánica	2"	50.8	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0	100.0		
	1 1/2"	37.5	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0	100.0		
	1"	25	59.0	41.0	2.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	39.2	60.8	6.1	8.1	91.9	90.0	0
	3/4"	19	38.1	21.0	1.0	83.3	16.7	4.7	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	21.6	17.6	1.8	7.5	84.4	79.0	92.0
	1/2"	12.5	12.4	25.7	1.3	35.2	48.1	13.4	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	18.2	3.4	0.3	15.0	69.4	58.0	81.0
	3/8"	9.6	3.3	9.1	0.5	8.8	26.4	7.3	95.3	4.7	0.8	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	11.3	6.9	0.7	9.3	60.1	47.0	75.0
	1/4"	6.35	0.0	3.3	0.2	2.4	6.4	1.8	57.5	37.8	6.3	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	8.0	3.3	0.3	8.6	51.6	36.0	65.0
	No. 4	4.75	0.0	0.0	0.0	1.3	1.1	0.3	27.5	30.0	5.0	99.1	0.9	0.4	6.9	1.1	0.1	5.8	45.8	30.0	58.0	30.0	58.0	58.0	58.0	
	No. 10	2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.4	5.2	22.2	3.7	60.5	38.7	15.7	4.7	2.3	0.2	19.9	25.8	17.0	42.0	17.0	42.0	42.0		
	No. 20	0.85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	3.7	0.6	34.7	25.8	10.4	3.8	0.9	0.1	11.1	14.7	9.0	31.0	9.0	31.0	31.0		
	No. 40	0.43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.4	0.2	20.1	14.7	5.9	3.0	0.8	0.1	6.2	8.5	5.0	24.0	5.0	24.0	24.0		
	No. 60	0.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	16.0	4.0	1.6	2.5	0.5	0.0	1.7	6.8	4.0	19.0	4.0	19.0	19.0		
	No. 100	0.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	10.2	5.8	2.4	0.7	1.8	0.2	2.6	4.2	2.0	14.0	2.0	14.0	14.0		
No. 200	0.07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	5.1	5.1	2.1	0.3	0.4	0.0	2.1	2.1	1.0	7.0	1.0	7.0	7.0			
Pasa	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.5	0.4	0.1	0.1	5.0	2.0	0.0	0.3	0.0	2.1	0.0	7.0	0.0	7.0	7.0	7.0			

Anexo 4. Dosificación de muestra de 1000 gramos por cada número de malla cuando hay 20% de toba volcánica

Muestreo de material →	Grava 1/2" Grako		Grava 3/4" Jovero		Sello 3/8" Jovero		Arena 3A Jovero		Toba Volcánica Residuos Jaramillo		Resultados										
	0.00%		22.51%		18.05%		39.44%		20.00%		100%										
Juego de mallas ↓	Diseño granulométrico																				
Malla	Abertura mm	% que pasa	% retenido	Equivalente de %retenido	% que pasa	% retenido	Equivalente de %retenido	% que pasa	% retenido	Equivalente de %retenido	% que pasa	% retenido	Equivalente de %retenido	% que pasa	% retenido	Equivalente de %retenido	Suma	Combinación	Límite Inf.	Límite Sup.	
20% de Toba Volcánica	2" 1	50.8	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0	
	1/2"	37.5	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0	
	1"	25	59.0	41.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.2	60.8	12.2	12.2	87.8	90.0	100.0	
	3/4"	19	38.1	21.0	0.0	83.3	16.7	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.6	17.6	3.5	7.3	80.5	79.0	92.0	
	1/2"	12.5	12.4	25.7	0.0	35.2	48.1	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	3.4	0.7	11.5	69.1	58.0	81.0	
	3/8"	9.6	3.3	9.1	0.0	8.8	26.4	5.9	95.3	4.7	0.8	0.0	0.0	11.3	6.9	1.4	8.2	60.9	47.0	75.0	
	1/4"	6.35	0.0	3.3	0.0	2.4	6.4	1.4	57.5	37.8	6.8	0.0	0.0	8.0	3.3	0.7	8.9	52.0	36.0	65.0	
	No. 4	4.75	0.0	0.0	0.0	1.3	1.1	0.2	27.5	30.0	5.4	99.1	0.9	0.3	6.9	1.1	0.2	6.2	45.7	30.0	58.0
	No. 10	2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.3	5.2	22.2	4.0	60.5	38.7	15.2	4.7	2.3	0.5	20.0	25.7	17.0	42.0
	No. 20	0.85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	3.7	0.7	34.7	25.8	10.2	3.8	0.9	0.2	11.0	14.7	9.0	31.0
	No. 40	0.43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.4	0.2	20.1	14.7	5.8	3.0	0.8	0.2	6.2	8.6	5.0	24.0
	No. 60	0.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	16.0	4.0	1.6	2.5	0.5	0.1	1.7	6.8	4.0	19.0
	No. 100	0.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	10.2	5.8	2.3	0.7	1.8	0.4	2.7	4.2	2.0	14.0
	No. 200	0.075	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	5.1	5.1	2.0	0.3	0.4	0.1	2.1	2.1	1.0	7.0
	Pasa 200		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.5	0.4	0.1	0.1	5.0	2.0	0.0	0.3	0.1	2.1	0.0		

