



Estabilidad y flujo en una mezcla asfáltica con sustitución parcial en el agregado pétreo por desechos de toba volcánica

Stability and flow in an asphalt mix with partial substitution in the stone aggregate by volcanic tuff waste

Cardona-Moncada Víctor Hugo

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

División de Posgrado

Correo: vcardona227@alumnos.uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1084-6523>

López-Lara Teresa

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

División de Posgrado

Correo: lolte@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4314-3848>

Horta-Rangel Jaime Moisés

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

División de Posgrado

Correo: horta@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4314-3848>

Hernández-Zaragoza Juan Bosco

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

División de Posgrado

Correo: bosco@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3680-7573>

Resumen

Los desechos de toba volcánica son agregados pétreos generados por procesos de corte y tallado en los bancos de material, los cuales al sustituirse parcialmente en la granulometría de una mezcla asfáltica se convierten en agregados sustentables, así que la investigación presente tiene por objetivo reducir el uso de agregado pétreo basáltico en una mezcla asfáltica manteniendo los valores límite de estabilidad y flujo. Se realizó un diseño Marshall para evaluar la volumetría, la estabilidad y el flujo, realizándose 36 muestras (pastillas) al sustituir 0, 10 y 20 % de agregado pétreo basáltico por desechos de toba volcánica. Los resultados mostraron que el contenido de vacíos de aire (VA) aumentó conforme se agregó más deshecho de toba volcánica, y el flujo disminuyó debido a que la toba volcánica tuvo mayor capacidad de absorción de asfalto en la granulometría con 10 y 20 % de desechos de toba volcánica. Lo anterior, generó que la capa superficial de asfalto que recubre las partículas del agregado se adelgazara y el contacto entre ellas fuera mayor, por lo tanto, cuando la sustitución parcial fue de 10 %, la estabilidad aumentó respecto a la muestra de control (0 % de sustitución), en cambio, con 20 % comenzó a decrecer porque la resistencia a la abrasión de la toba fue de 28.26 %. Por último, se obtuvo que el contenido óptimo de asfalto para 0 % de sustitución fue de 4.55 %, para 10 % de sustitución de 4.63 % y para 20 % de sustitución de 4.83 %, esto reflejó que se requiere mayor contenido de asfalto cuando se agrega la sustitución parcial de desechos de toba volcánica, sin embargo, el aumento de asfalto de 0.08 y 0.28 % fue mínimo respecto al contenido óptimo de asfalto de la mezcla control. Por lo tanto, la sustitución parcial con desecho de toba volcánica con mejores resultados fue de 10 %, dicha sustitución generó mayor estabilidad y menor flujo respecto a la muestra de control, estos siendo resultados más favorables que solo haberlos mantenido igual que la muestra control como lo mencionaba el objetivo.

Descriptores: Toba volcánica, sustitución parcial, estabilidad, flujo, mezcla asfáltica, diseño Marshall.

Abstract

Volcanic tuff wastes are stone aggregates generated by cutting and carving processes in the material banks, which, when partially replaced in the granulometry of an asphalt mixture become sustainable aggregates, so the present research aims to reduce the use of basaltic stone aggregate in an asphalt mixture maintaining the limit values of stability and flow. A Marshall design was carried out to evaluate the volumetry, stability and flow, making 36 samples (pill) by substituting 0, 10 and 20 % of basaltic stone aggregate for volcanic tuff waste. The results showed that the content of air voids (VA) increased as more volcanic tuff waste was added, and the flow decreased because the volcanic tuff had a greater capacity to absorb asphalt in the granulometry with 10 and 20 % waste of volcanic tuff. The foregoing caused the surface layer of asphalt that covers the aggregate particles to become thinner and the contact between them to be greater, therefore, when the partial substitution was 10 %, the stability increased in comparison to the control sample (0 % substitution), on the other hand, with 20 % it began to decrease because the abrasion resistance of the tuff was 28.26 %. Finally, it was obtained that the optimum asphalt content for 0 % substitution was 4.55 %, for 10 % substitution 4.63 % and for 20 % substitution 4.83 %, this reflected that a higher asphalt content is required when adds the partial substitution of volcanic tuff waste, however, the asphalt increase of 0.08 and 0.28 % was minimal with respect to the optimal asphalt content of the control mix. Therefore, the partial substitution with volcanic tuff waste with better results was 10 %, this substitution generated greater stability and less flow with respect to the control sample, these being more favorable results than just keeping them the same as the control sample as mentioned by the objective.

Keywords: Volcanic tuff, waste, partial substitution, stability, flow, asphalt mixture, Marshall design.

INTRODUCCIÓN

Existen diferentes tipos de rocas que se clasifican por sus minerales, por compuestos químicos presentes o por el tamaño de partículas cementadas. Es decir, solo algunos de los diferentes tipos son óptimos para pavimentos como las rocas basálticas que son usadas convencionalmente. Por eso, es importante conocer que las rocas son una materia prima que una vez extraídas y utilizadas no se renuevan en su lugar de origen, generando a su vez la necesidad de explorar nuevos materiales de reciclaje. Ya que en el proceso de extracción y trituración de la roca se genera contaminación que para el sector transporte representa aproximadamente 15 % de las emisiones globales de gases efecto invernadero (GEI). En adición, ya sea por la construcción o por demolición, la industria de la construcción genera en países desarrollados desechos de entre 520 y 760 kg/persona/año (Plati, 2009; Martinho *et al.*, 2018; Jiménez *et al.*, 2018).

En la actualidad es común que los desechos de la construcción se desechen en vertederos. En otros casos, el desecho se ha incorporado de manera parcial o total en las diferentes capas de un pavimento como: Terraplén, subbase, base o capas superficiales con ligantes hidráulicos o asfálticos (Figura 1) causando un efecto positivo en el medio ambiente (Cardoso *et al.*, 2015).

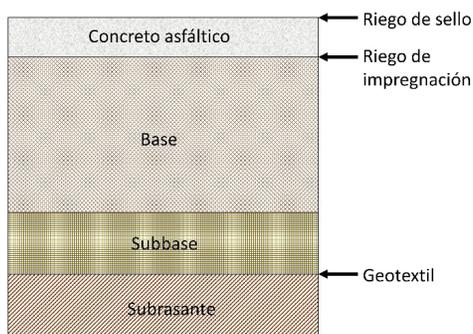


Figura 1. Sección transversal típica de un pavimento flexible (AASHTO, 1993)

La sostenibilidad, como concepto, ha tenido complicaciones para 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 cumple el siguiente parámetro: Cubrir las necesidades actuales, pero cuidando que las generaciones futuras puedan satisfacer sus necesidades para tener un desarrollo sostenible. Es decir, para que un pavimento pueda ser sostenible, con la intención de generar un impacto positivo al medio ambiente, deberá cumplir con el concepto del “tríptico de triple resultado

final” el cual engloba tres condiciones que se requieren mejorar: El medio ambiente, la economía y la sociedad (PIARC, 2019).

Ahora bien, Arroyo *et al.* (2016) encontró, en el caso de los bancos de material de toba volcánica, que al realizar corte y laminado en las rocas de toba volcánica para generar piezas ornamentales, se generan aproximadamente 41 % de desechos. Estos pueden utilizarse en la industria de construcción para evitar la sobreacumulación y la apertura de nuevos depósitos, aquí es donde comienza el desarrollo de pavimentos sostenibles que buscan satisfacer demandas sociales, a través de materiales alternativos o técnicas nuevas, pero cumpliendo con los tres aspectos fundamentales: Social, medio ambiente y económico. Es decir, evitar la producción de los agregados pétreos basálticos que son empleados convencionalmente en un pavimento, los cuales se extraen desde bancos de materiales con grandes macizos rocosos que luego se trituran para generar agregados de algún tamaño en específico. Mientras que los desechos de toba volcánica son aquellos que fueron producto del corte y laminado de piezas ornamentales, es decir, el objetivo principal de extraer macizos rocosos de toba volcánica fue para la elaboración de productos, mientras que los desechos se almacenaban en vertederos de grandes superficies, los cuales crecen día con día, entonces al usar estos desechos se busca subsanar esta problemática.

Por lo que una manera de conseguir disuadir la sobreacumulación de desechos mencionada es de las granulometrías estandarizadas existentes para una mezcla densa, generar una granulometría de material basáltico que se le sustituya parcialmente por desechos de canteras y logre satisfacer la calidad requerida para una mezcla asfáltica, es decir, que mantenga o mejore los valores de calidad que se obtuvieron con la mezcla de granulometría basáltica (muestra de control), ya que es necesario dar un correcto y fundamentado segundo uso a los desechos (Cardoso *et al.*, 2015; Putra *et al.*, 2018). Además, Putra *et al.* (2018) mencionan que dichos materiales reciclados pueden mejorar la resistencia y durabilidad de los pavimentos. Por consiguiente, los parámetros de calidad resultantes se compararán respecto a normativas vigentes para que demuestren que la sustitución parcial está teniendo un resultado óptimo. En el caso de las mezclas asfálticas, los resultados deben mantenerse dentro de los límites establecidos de diseño para los siguientes parámetros: Volumetría, Estabilidad y Flujo Marshall, al haber encontrado el contenido óptimo de asfalto.

MARCO TEÓRICO

El pavimento flexible está compuesto por varias capas que incluyen agregados pétreos, de estas, la de rodadura está compuesta por 95 % de agregado, mientras que 5 % corresponde al aglutinante, generalmente asfalto con aditivos (Martinho *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2020; Valdés *et al.*, 2019).

AGREGADO PÉTRICO

Las rocas pueden identificarse como ígneas, sedimentarias o metamórficas de acuerdo con sus procesos de formación. En el caso de las rocas ígneas, según Orozco *et al.* (2014), serán aquellas que se forman cuando el magma que se encuentra en el interior de la Tierra se solidifica internamente (intrusivas o plutónicas), externamente (efusivas o volcánicas) o externamente después de una actividad volcánica explosiva (piroclásticas) y se clasificarán de acuerdo con la información que se tenga recabada como se muestra en la Tabla 1.

AGLUTINANTE

Asfalto

El asfalto como tal es un sistema coloidal, en el cual se tienen compuestos químicos de alto peso molecular llamados micelas de asfaltenos, los cuales a su vez se encuentran dispersos en compuestos de menor peso molecular, llamados maltenos que 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 (Paliukaitė *et al.*, 2014). Básicamente 5 % de aglutinante según Loaiza & Colorado (2018) de un cemento asfáltico típico contiene: 2 % de saturados, 73 % de aromáticos, 7 % de resinas y 18 % de asfaltenos.

Estabilidad y Flujo Marshall de mezclas asfálticas

Para obtener un contenido de asfalto óptimo se requiere usar el Método Marshall de acuerdo con Asi (2007). Los parámetros por medir con la prueba Marshall son: Estabilidad, flujo, gravedad específica a granel, densidad, porcentaje de vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y vacíos rellenos con asfalto. Es importante co-

nocer que los resultados dependerán del acomodo y uso de dos variables principales: el agregado y el aglutinante (Loaiza & Colorado, 2018; Aksoy *et al.*, 2012; Miller, 1988). De los parámetros más importantes a considerar se encuentra la Estabilidad, la cual se define como la máxima resistencia que tendrá el espécimen al aplicarse una carga en Newtons o libras. El otro será el Flujo, que se define como la deformación que se genera en unidades de 0.25 mm o 1/100 pulgadas (Asphalt Institute, 2014). Entre mayor sea la estabilidad significa que la mezcla resistirá esfuerzos de mayor magnitud (empujes) y a su vez, menores desplazamientos ocasionados por el flujo (deformaciones). Con esto, se reducirá la aparición de surcos y el pavimento se adaptará a movimientos graduales sin agrietarse bajo la acción del tráfico (Aksoy *et al.*, 2012).

Sustituciones parciales

Los agregados pétreos, según sea su clasificación geológica y geotécnica, tienen una gran variabilidad en sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, se puede interactuar con estos agregados para generar combinaciones granulométricas de distintas calidades y ciertos tamaños de partícula, con el objetivo de conocer su comportamiento en una mezcla (Martinho *et al.*, 2018). Además, los reemplazos pueden ser de un mismo material en términos geológicos, pero con diferentes características físicas como su textura, color, tamaño y forma, entre otras. Así también, se puede probar el agregar otro material que cumpla con la mayoría de las características como para integrarse a una capa de pavimento.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

AGREGADO PÉTRICO

Basalto

Es una roca ígnea que por su composición mineralógica es máfica, mientras que por su textura es porfídica, cuyos cristales la hacen tener una matriz fuerte (Castro, 2015). Sin embargo, para Le Maitre *et al.* (2002), de acuerdo con el diagrama de clasificación, por su nombre en inglés, "Total Alkali-Silica" (TAS), sí se tienen

Tabla 1. Clasificación de las rocas volcánicas con base en la información existente (Le Maitre *et al.*, 2002)

Información existente	Forma de clasificación
Sí se conocen los modos minerales	Usar clasificación QAPF
Se desconocen los modos minerales, pero se conoce un análisis químico	Clasificación TAS
Se desconoce el modo mineral y el análisis químico	Simplificación del diagrama QAPF

valores entre 45 % y 52 % de SiO₂ se le conoce como basalto (Figura 2).

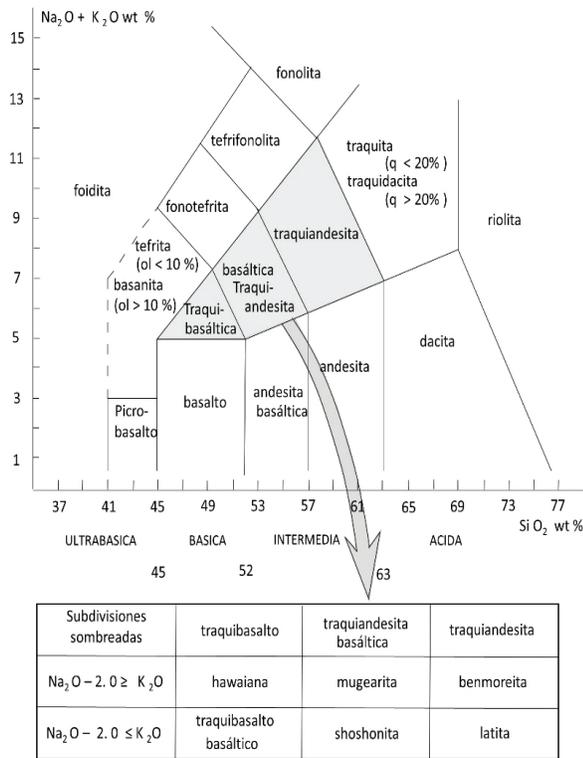


Figura 2. Clasificación química de rocas volcánicas usando el diagrama TAS (Le Maitre *et al.*, 2002)

Toba volcánica

Es una roca ígnea con textura piroclástica que recibe el nombre de toba por el tamaño de sus depósitos, si estos son soldados recibirá el nombre de toba soldada. El término volcánico surge porque la roca fue resultado directo de la acción volcánica, en este caso, de la explosión volcánica (Barbuta & Toma, 2015; Le Maitre *et al.*, 2002). Para este estudio, de acuerdo con Ortiz *et al.* (2018), el banco de material de donde se extrajeron los desechos de cantera resultó tener en los macizos rocosos una composición química de: 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 tiene que se le identificaría también como riolita.

El macizo rocoso basáltico se trituró por una empresa privada. El material triturado presentó cuatro diferentes tamaños de clasificación granulométricas: Grava con tamaño nominal de 1", grava con tamaño nominal de 3/4", grava con tamaño nominal de 3/8" (sello 3/8") y arena. Las curvas granulométricas de cada material se muestran en la Figura 3 y se obtuvieron siguiendo la normativa de la ASTM C136.

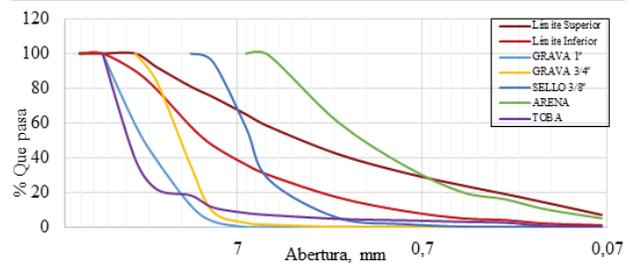


Figura 3. Resultados del análisis granulométrico para diferentes muestras

Una vez obtenida la granulometría de cada muestra se continuó con las siguientes pruebas de caracterización ASTM: Densidad del grueso, densidad del fino, absorción del grueso y absorción del fino conforme al método de prueba estándar de densidad relativa y absorción de agregado grueso y fino (ASTM C127 y C128, 2014); abrasión de Los Ángeles conforme a la prueba de resistencia a la degradación de agregados gruesos de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina Los Ángeles (ASTM C131, 2014); partículas aplanadas y alargadas conforme a la norma de partículas planas y alargadas en agregado grueso (ASTM D4791, 2019), y equivalente de arena, en el agregado fino, con el método de prueba estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregados finos (ASTM D2419, 2014).

En la Tabla 2 se puede observar un resumen de los resultados de las pruebas de caracterización, ahí se muestra que los valores obtenidos cumplen con la calidad deseada al encontrarse dentro de los límites permisibles. Cabe resaltar que el valor de la abrasión (28.26 %) de los desechos de toba volcánica se encuentra dentro de los límites establecidos.

AGLUTINANTE

Asfalto

El asfalto funciona como un aglutinante entre partículas, por lo que deberá cubrir con una capa delgada todas las superficies de cada agregado pétreo (gravas, arenas y finos). Sin embargo, cierta temperatura será indispensable en una mezcla asfáltica para que se logre el recubrimiento uniforme, es decir, la temperatura óptima para mezclar el asfalto con los agregados pétreos será cuando la viscosidad oscila entre 0.17±0.02 Pa*s y entre 0.28 ± 0.03 Pa*s para compactar.

Ahora bien, si la viscosidad se encuentra por debajo de estos valores, las superficies no quedan cubiertas de manera homogénea; luego, si la viscosidad fuera mucho mayor, el asfalto tendería a escurrir y no se generaría una adhesión entre partículas. Por lo tanto, es necesario medir la viscosidad del aglutinante a diferentes tempe-

Tabla 2. Caracterización de los materiales pétreos usados para el diseño de una mezcla densa

Caracterización del material	Grava		Sello	Arena	Toba volcánica	Promedio	Límites
	1 "	3/4"	3/8"				
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

Nota: En la sección de límites donde se muestra un guion (-) es porque la normativa no establece alguno.

raturas y usar el viscosímetro Brookfield (ASTM-D4402, 2015) para lograrlo; este aparato se puede programar para que pueda leer la viscosidad en Pascales por segundo (Pa*s) entre el rango de 135 °C y 175 °C (Luo *et al.*, 2021).

En este estudio, el asfalto utilizado tiene como nombre EKBE y cumple con los parámetros mostrados en la Tabla 3, que de acuerdo con su caracterización, el grado de desempeño es 64-22.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para conocer el número de especímenes a realizar, se consideró la norma ASTM D6926 (2020) que menciona elaborar al menos 3 especímenes para cada combinación de granulometría y contenido de asfalto (para nuestro caso será 3.5, 4, 4.5 y 5 %). Por ejemplo, en la Tabla 4 cuando se tiene 0 % de sustitución parcial por desecho de toba volcánica (muestra de control), se requirieron 12 muestras en total por los porcentajes de asfalto utilizados. De la misma manera se requerirán 12 muestras para 10 y 20 % de sustitución.

ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA MARSHALL

Después de definir las dosificaciones de los especímenes de material pétreo basáltico y volcánico, así como los contenidos asfálticos mostrados en la Tabla 4, el siguiente paso es, que con las sustituciones parciales de basalto por desechos de toba volcánica de 0, 10 y 20 % se generen nuevas granulometrías al mezclar los materiales teóricamente. Por ende, también se espera que los porcentajes que pasan por cada malla granulométrica de agregado se comporten adecuadamente de acuerdo con los límites establecidos en la N.CMT.4.04/17 (2017) para una granulometría densa, requerida para realizar especímenes Marshall. Con lo anterior, se aprovecha un material de desecho que con sus respectivas combinaciones cumpliría con los lineamientos granulométricos, así se evitaría la extracción de agregados nuevos que generarían contaminación y la explotación de nuevos bancos de material. El método Marshall estándar es aplicable para valores de agregados con tamaño máximo de 1 pulgada, en el caso de esta investigación, aunque existe otro método llamado Marshall modificado,

Tabla 3. 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	D4402	Máximo 3000	488
Viscosidad absoluta a 60 °C	Poises	D2171	Informar	2136
Temperatura de inflamación Cleveland copa abierta	°C	D92	230 mínimo	326
Solubilidad en tricloroetileno	% masa	D2042	99 mínimo	99.91
Módulo de corte dinámico (Asfalto original)	kPa	D7175	Mínimo 1.00	1.14
Pérdida por calentamiento	% masa	D2872	Máximo 1.000	-0.466
Módulo de corte dinámico (Asfalto después de RTFO)	kPa	D7175	Mínimo 2.20	2.37
Módulo de corte dinámico (Asfalto después de PAV)	kPa	D7175	Máximo 5000	1430
Pendiente de deformación (m)	-	D6648	Mínimo 0.30	0.318
Rigidez a la deformación (s)	MPa	D6648	Máximo 300	127

Tabla 4. Diseño experimental de la sustitución parcial por desechos de toba volcánica en % para prueba Marshal

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

que usa tamaños máximos de 1.5 pulgadas en granulometrías densas (Asphalt Institute, 2014).

De esta forma, con las combinaciones de material, se podrá continuar con el diseño Marshall, el cual se refiere a la norma ASTM D6926 (2020) y D6927 (2015) donde se generan pastillas de aproximadamente 102 mm de diámetro y 64 mm de altura como se muestra en la Figura 4.

En la norma ASTM D6926 (2020) se explica el procedimiento de preparación de las muestras granulométricas. El proceso comienza una vez que se obtiene la granulometría deseada: Se extrae una muestra y se seca hasta peso constante para luego someterlas a la misma temperatura de mezclado del asfalto que se obtiene con la prueba de ASTM D4402 (2015) ya mencionada antes. Cuando el agregado y el asfalto alcanzan la temperatura de mezclado que especifica la norma ASTM D6926 (2020), se agregan las diferentes dosificaciones de asfalto para poder realizar la mezcla de los materiales hasta que el total de las partículas se encuentren cubiertas de asfalto, después meter la mezcla en un horno y alcanzar la temperatura de compactación.

Las muestras de la mezcla se colocan en los moldes Marshall para ser compactados por un martillo con un peso de 4.53 kg, el cual se deja caer desde una altura de 45.72 cm, donde la cantidad de golpes aplicados dependerá del tráfico vehicular de diseño. Por último, la norma ASTM D6927 (2015) menciona el proceso de acondicionamiento de la muestra, la cual consiste en sumergir los especímenes compactados en un baño de agua a 60 ± 1 °C por un tiempo de 30 a 40 minutos. Después de compactar el espécimen se lleva a cabo la prueba Marshall en una máquina de compresión, la cual someterá el espécimen a una carga con velocidad de 50.8 mm/min para medir la estabilidad y flujo. (Aksoy *et al.*, 2012).



Figura 4. Especímenes compactados de mezcla asfáltica con los diferentes contenidos de asfalto propuestos

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

DISEÑO MARSHALL

Combinaciones de material

Tal como se observa en la Tabla 5, los desechos de toba volcánica con 0, 10 y 20 % fueron los datos de partida. El resto de los porcentajes se establecieron después de varias combinaciones hasta que la granulometría cumpliera con los lineamientos de la norma N.CMT.4.04/17 (2017).

Además, se establece en la Tabla 5 que a mayor porcentaje de desechos de toba volcánica, los porcentajes de grava de 1 y 3/4" disminuyen notablemente. Lo anterior, es porque los desechos de toba volcánica tam-

bién son de tamaño nominal de 1". Sin embargo, la toba volcánica, en su estructura granulométrica de origen, tiene bajos porcentajes de arena y finos mientras que la grava de 1" no los contiene. Por último, cabe resaltar que el incremento de desechos de toba volcánica no será mayor a 20 %, ya que a partir de este porcentaje la granulometría comienza a salirse de los límites del comportamiento denso adaptado para una mezcla asfáltica destinada a valoración de Prueba Marshall.

En el diseño granulométrico 1 (muestra de control, es decir, sin sustitución) solamente con agregado convencional (basáltico) funcionará para comparar los resultados de las pruebas mecánicas de calidad cuando se evalúen las sustituciones del diseño 2 y 3 (con sustitución), esto para garantizar la viabilidad y factibilidad de la sustitución de un material.

Como la grava de tamaño nominal de 1" y los desechos de toba volcánica presentan aproximadamente la misma distribución granulométrica, las combinaciones

de la Tabla 5 se interpretarán como sustitución de un material con una distribución granulométrica, por otro que presenta idéntica composición granulométrica, respectivamente. Esto es porque en la estructura granulométrica de origen de la grava 1" y los desechos de toba volcánica la mayor parte del material retenido se encuentra entre las mallas de 1" y 3/4", por lo tanto, cuando se comienzan a aumentar los porcentajes de desechos de toba en la Tabla 5 los porcentajes de basalto (grava) de 1" comienzan a disminuir hasta convertirse en cero, esto hará que la granulometría resultante de los diseños se parezca entre sí.

Por lo tanto, en la Tabla 6, las configuraciones granulométricas son iguales en los tres diseños a partir de la malla con abertura de 12.5 mm. Por esta razón, en la Figura 5 las curvas granulométricas con sustitución parcial de 0 %, 10 % y 20 % de deshecho de toba volcánica se observan como una sola línea a partir de la malla con abertura de 12.4 mm hasta la malla que pasa 0.075

Tabla 5. Propuestas de combinaciones granulométricas con 0 %, 10 % y 20 % de desecho de toba (diseño 1, 2 y 3, respectivamente)

Tipo de material	Diseño		
	1	2	3
Grava 1"	14.21 %	5 %	0 %
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 %	10 %	20 %
Total	100 %	100 %	100 %

Tabla 6. Distribuciones granulométricas resultantes de las combinaciones generadas (diseño 1, 2 y 3, respectivamente)

Malla	Abertura mm	Diseño granulométrico		
		1	2	3
% de 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
Pasa #200		0	0	0

mm. Además, se observan en color rojo los límites superior e inferior establecidos, de acuerdo con la norma (N.CMT.4.04/17, 2017) para una mezcla densa.

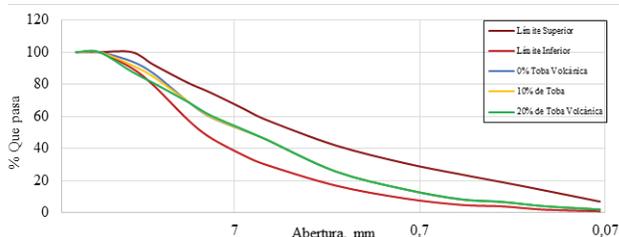


Figura 5. Distribución granulométrica resultante después de sustituir parcialmente basalto por desechos de toba volcánica

DOSIFICACIÓN DE MUESTRAS PARA ESPÉCIMENES MARSHALL

Para lograr tener una altura en el espécimen de 63.5 mm como lo indica la norma ASTM D6926 (2020) fue necesaria la experimentación con pruebas piloto de 1200 g y 1100 g, sin embargo, se obtuvo una variación de altura ± 4 mm, es decir, entre 59.5 y 67.5 mm. Al final las muestras con peso de 1000 g cumplieron con el parámetro de altura porque se llegaron a medidas más aproximadas de 63.5 mm. Cabe mencionar que al ser medidas aproximadas será necesario hacer una corrección de la estabilidad que dependerá de la variación mínima de la altura siguiendo el procedimiento mencionado en la normativa ASTM D6927 (2015).

TEMPERATURA DEL ASFALTO

El resultado para la temperatura de mezclado fue de $165.70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que para compactación fue de $158\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.10\text{ }^{\circ}\text{C}$, estos valores se obtuvieron de la Figura 6.

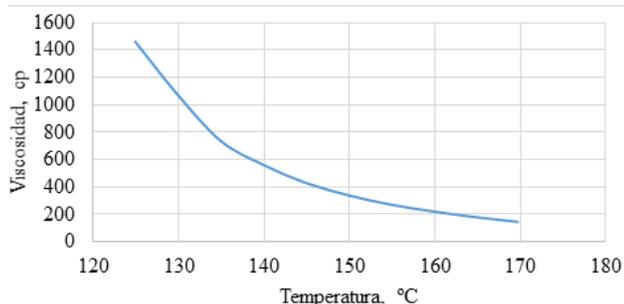


Figura 6. Carta de viscosidad para el asfalto Ekbe PG 64-22

VOLUMETRÍA, ESTABILIDAD Y FLUJO

Para poder elegir el contenido óptimo de asfalto es necesario generar la volumetría de las pastillas ensayadas,

así como su estabilidad y flujo, los resultados se presentan en la Tabla 7.

Cando hay 0 % de sustitución por desechos de toba volcánica se observa cómo la estabilidad va aumentando poco a poco, hasta llegar a 4.5 % donde disminuye, pero el flujo continúa aumentando sus valores. Sin embargo, la mayoría de estos valores se encuentran en los límites de entre 3 y 5, aun así, se toma el punto más alto menor a 5 de la curva de flujo, donde en este caso, se tuvo un contenido de asfalto de 4.55 %. Los vacíos del agregado mineral (VAM) se refieren al espacio intergranular ocupado por asfalto y aire, por lo que entre menor sea, indica que la muestra se ha compactado correctamente; mientras que los vacíos llenos con asfalto (VFA) representan aquel porcentaje de VMA que es asfalto en ese volumen, donde para obtener estos datos es necesario tener la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (Gmb). De la misma manera, las proporciones en volumen por cada variable fueron una relación del porcentaje de asfalto respecto al peso de la mezcla con el Gmb entre la densidad de la variable en cuestión, ya sea asfalto o del promedio de los agregados.

Por otro lado, la estabilidad es aquel valor máximo que se obtuvo de la aplicación de una carga como se observa en la Figura 7, que se refleja en la capacidad de resistencia del espécimen.



Figura 7. Prueba de estabilidad y flujo

Ahora bien, de la Tabla 7 con la muestra de 10 % de desechos de toba volcánica, la estabilidad aumentó respecto a la muestra de control de 0 % debido a que la

Tabla 7. Promedios de resultados de las pastillas por diseño Marshall con 0, 10 y 20% de toba volcánica

Toba	Núm. 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

toba tiene mayor absorción que el basalto. En consecuencia, el flujo disminuye, esto se debe a que la absorción de las gravas de toba genera que se incremente el contacto entre partículas y se reduzca el flujo.

Por último, de la Tabla 7, al tener 20 % de sustitución de toba volcánica, la estabilidad sigue siendo mayor respecto a la muestra de control (0 % de sustitución), pero disminuyó respecto a la estabilidad resultante de la sustitución de 10 %, esto es porque se tiene mayor cantidad de toba volcánica, en el cual su elevado grado de abrasión comienza a hacer efecto. Por lo tanto, los valores del flujo disminuyen aún más.

Ahora bien, en la Figura 8 se muestra el comportamiento de los vacíos de aire (Va) de las diferentes mezclas. Aquí se observa que los vacíos de aire (Va) son mayores cuando se tiene toba volcánica, esto es porque al tener menor peso específico cuando se elaboran las muestras, se agregarán más partículas de grava para cumplir con la granulometría y el peso, generando mayor cantidad de vacíos entre partículas.

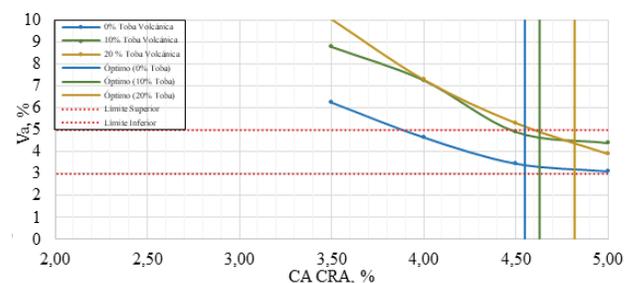


Figura 8. Resultados volumétricos de vacíos de aire vs contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

Tanto en la Figura 9 como en la Figura 10 se vuelven a representar de manera visual las diferencias resultantes de la prueba Marshall para distintos porcentajes de sustitución. Se interpreta que el VAM es menor para la muestra de control, es decir, cuando se tiene 0 % de sustitución existe mayor grado de compactación y los valores de VFA se elevan, ya que se tienen menores vacíos de aire. Aun así, los valores para 10 % y 20 % siguen estando dentro de los límites normados, solo que se encuentran desfasados de la curva de la muestra de control. Estos dos tipos de vacíos se obtienen principalmente a través del Gmb.

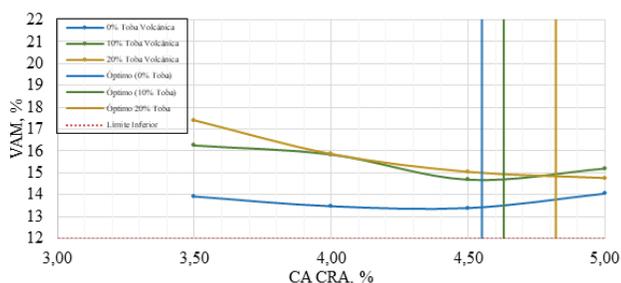


Figura 9. Resultados volumétricos de vacíos del agregado mineral vs contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

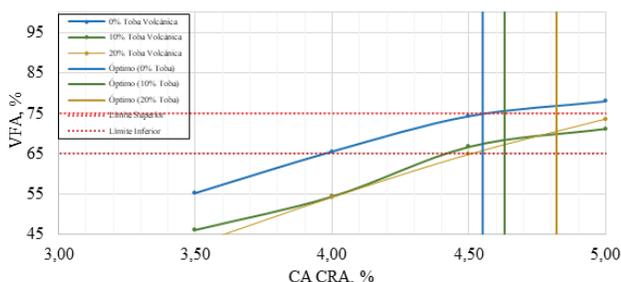


Figura 10. Resultados volumétricos de vacíos llenados con asfalto vs contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

En la Figura 11, la estabilidad aumenta cuando se tiene 10 % de toba volcánica, también cuando se tiene 20 %, pero si se tomara como referencia el valor más alto de estabilidad los demás parámetros no resultarían estar dentro de los límites establecidos. Por lo tanto, todos los resultados de la prueba Marshall deberán cumplir con los estándares marcados por la normativa vigente. Enseguida, en la Figura 12 se observa que, entre mayor cantidad de desechos de toba existen mayor absorción y menor flujo, pero aun así individualmente el flujo tiene la tendencia a incrementar conforme adquieren mayor cantidad de asfalto.

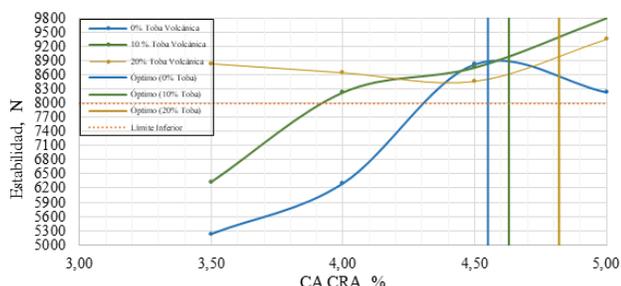


Figura 11. Resultados Marshall de estabilidad vs contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

En la Figura 13 se puede visualizar que la curva de peso específico (Gmb) en sustituciones de 10 % y 20 % comienzan a comportarse de la misma manera, pero con valores menores a la que tiene basalto solamente (mues-

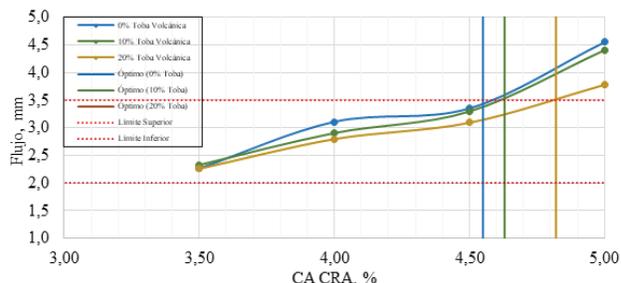


Figura 12. Resultados Marshall de flujo vs contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

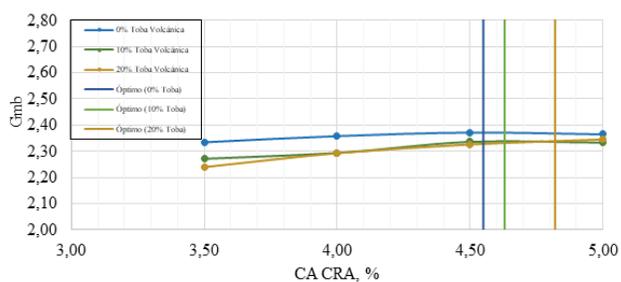


Figura 13. Resultados volumétricos de gravedad específica neta vs contenido de asfalto (Contenido Respecto al Agregado)

tra control) debido a que la gravedad específica del basalto es mayor que de la toba.

En la Tabla 8 se muestran los resultados de volumetría, estabilidad y flujo de los especímenes ensayados para los diferentes porcentajes de sustitución de desechos de toba volcánica, cuando se tienen los mismos contenidos de asfalto. Ahí se observa que cuando se tiene 10 % de sustitución la estabilidad es mayor con 9358.76 N que cuando no hay sustitución con 8976.86 N, por lo que se considera que hubo una mejora considerable.

Tabla 8. Resultados volumétricos, estabilidad y flujo cuando se tiene un mismo contenido de asfalto

Propiedades volumétricas y prueba 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 9 se tienen los contenidos óptimos con base en los límites establecidos para que se cumplan los parámetros de calidad con base en la nor-

mativa (N.CMT.4.05.003/16, 2016). Se consideran como óptimos, ya que cumplen con todos los parámetros en sus mínimos o máximos más convenientes cuando se tienen contenidos de asfalto de 4.55 %, 4.63 % y 4.82 %.

Tabla 9. Resultados volumétricos, estabilidad y flujo para los contenidos óptimos de cada sustitución

Sustitución parcial con toba volcánica	0 %	10 %	20 %	Límite superior	Límite inferior
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	-	-

CONCLUSIONES

Se considera que el uso de desechos de toba volcánica es una de muchas alternativas sustentables en pavimentos flexibles para mejorar su capa superficial. Lo anterior surgió cuando se incluyó un material sustentable en la estructura granulométrica de la superficie de rodadura, evitándose así la extracción y trituración de materiales nuevos (vírgenes).

El resultado promedio de estabilidad, cuando se evaluaron las sustituciones parciales con un mismo contenido de asfalto, resultó de 8976.87 N con 0 % de sustitución, mientras que con 10 % de sustitución fue de 9358.76 N y, por último, con 20 % de sustitución resultó de 8871.84 N. Esto significa que la estabilidad aumentó porque la grava de toba volcánica al ser más ligera que el basalto, en cada tamaño de agregado, fueron incorporadas más rocas de desecho de toba volcánica ya que cada muestra debía pesar lo mismo. Sin embargo, con 20 % de sustitución la estabilidad disminuyó respecto al resultado del 10 % de sustitución, esto porque a pesar de que varias citas bibliográficas mencionaban que la toba volcánica era una material blando y poroso, se comprobó en primera estancia con la prueba de resistencia a la abrasión que tenía un desgaste de 28.8 % cumpliendo con los estándares para una mezcla asfáltica, sin embargo, un 20 % de sustitución resultó ser el límite máximo para darle uso como sustitución parcial.

Por lo tanto, se establece que la mejor opción de sustitución es 10 %, porque la estabilidad, como resultado más importante, tiene el valor más alto comparado con el diseño de la muestra de control. Además el flujo es de 3.36, es decir, otro resultado favorable porque el valor

es menor respecto al del diseño de la muestra de control con 3.40. Ahora bien, el contenido óptimo de asfalto resultó para el diseño con 10 % de sustitución por desechos de toba volcánica de 4.63 % y cuando hay 20 % de sustitución de 4.82 %. Es decir, cuando se tienen desechos de toba volcánica el contenido óptimo de asfalto aumenta respecto al de la muestra de control en mínimas cantidades (aumenta 0.08 % y 0.27 %, respectivamente). Por lo anterior, el uso de un material de desecho como la toba volcánica es viable porque al sustituir un agregado de calidad, muestra mejoras en las pruebas mecánicas y el aumento de asfalto es mínimo.

Así que la toba volcánica cumple con el triple resultado de la sustentabilidad: En primer lugar se está subsanando una problemática de acumulación de desechos y ocupación de nuevas superficies que pueden tener otros usos productivos; en segundo lugar, es más económico sustituir la granulometría de las carpetas asfálticas que suministrar todo el material nuevo; y en tercer lugar, que es el ambiental, se mejoran las carpetas asfálticas con desechos en lugar de basalto nuevo triturado, estableciendo así una alternativa de reducción de desechos sólidos.

REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.091>
- Arroyo-Rodríguez, F., Ávila-García, E., & Flores-Hernández, E. (2016). El costo oculto de scrap en la reproducción de laminado de cantera. *Iberoamericana de Ciencias*, 3(7), 12-17.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.036>
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix design methods*. USA: Asphalt Institute.
- ASTM-C127. (2014). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.
- ASTM-C131. (2014). Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.
- ASTM-D2419. (2014). Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate.
- ASTM-D4402. (2015). Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.

- ASTM-D4791. (2019). Standard test method for flat particles elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate.
- ASTM-D6926. (2020). Standard practice for preparation for asphalt mixture specimens using marshall apparatus.
- ASTM-D6927. (2015). Standard test method for marshall stability and flow of bituminous mixtures.
- Barbuta, M., & Toma, L. (2015). Experimental evaluation of strength and elastic properties of polymer concrete with different volumes of volcanic tuff acting as filler. *Materials in civil engineering*, 27(6), 1-8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001155](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001155)
- 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.
- Castro, A. (2015). *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Paraninfo.
- Jiménez, L., Domínguez, J., & Vega Azamar, R. (2018). Carbon footprint of recycled aggregate concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2018/7949741>
- 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.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.012>
- Luo, H., Huang, X., Rongyan, T., Ding, H., Huang, J., Wang, D., . . . Hong, Z. (2021). Advanced method for measuring asphalt viscosity: Rotational plate viscosity: Rotational plate viscosity method and its application to asphalt construction temperature prediction. *Construction and building materials*, 301, 1-15.
- Martinho, F., Picado-ñ, L., & Capitão, S. (2018). Feasibility assessment of the use of recycled aggregates for asphalt mixtures. *Sustainability*, 10(6).
- Miller C, F. (1988). Pavement densification related to asphalt mix characteristics. *Transportation Research Record*, (1178), 9-15.
- N.CMT.4.04/17. (2017). Características de los materiales. Materiales pétricos para mezclas asfálticas. SCT.
- N.CMT.4.05.003/16. (2016). Características de los materiales. Calidad de mezclas asfálticas para carreteras.
- Orozco, W., Branch, J., & Jiménez, J. (2014). Classification of fine-grained igneous, sedimentary and metamorphic rocks through structured programming. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 36, 5-9. <http://dx.doi.org/10.15446/rbct.n36.44037>
- Ortiz, R., Navarro, M., López, T., Hernández, J., & Gómez, D. (2018). Alternativas sustentables para uso de residuos de explotación de tobas volcánicas en materiales de construcción. *Gestión I+D*, 3(1), 56-81.
- Paliukaité, M., Vaitkus, A., & Zofka, A. (2014). Evaluation of vitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology. *Environmental Engineering*, 1-8.
- PIARC. (2019). *Reducción de la huella de carbono del ciclo de vida de los pavimentos: Comité Técnico D.2 Pavimentos*. Francia: World Road Association.
- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Construction and building materials*, 211, 539-555. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>
- Putra, R., Rosli, M., Abdul, N., Yaacob, H., Khairul-Idham M. S., Naquiuddin M., . . . Irwan, N. (2018). Marshall stability properties of asphalt mixture incorporating black rice husk ash. *Materials today: Proceedings*, 5(10), 22056-22062.
- 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.
- Valdes, G., Calabi, A., Sánchez, E., & Miró, R. (2019). Effect of aggregate type on the fatigue durability of asphalt mixtures. *Construction and building materials*, 224, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.064>

Cómo citar:

Cardona-Moncada, V. H., López-Lara, T., Horta-Rangel, J. M., & Hernández-Zaragoza, J. B. (2023). Estabilidad y flujo en una mezcla asfáltica con sustitución parcial en el agregado pétrico por desechos de toba volcánica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24 (01), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.1.003>