



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

EFFECTO DEL POLVO DE CAUCHO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Paul Alexander Cuatucuamba Araque
Ángel Andrés Fernández Chiluisa

TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Paul Alexander Cuatucuamba Araque con documento de identificación N° 1004862528 y Ángel Andrés Fernández Chiluisa con documento de identificación N° 1724864663; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 04 de marzo del 2024

Atentamente,



Paul Alexander Cuatucuamba Araque

1004862528



Ángel Andrés Fernández Chiluisa

1724864663

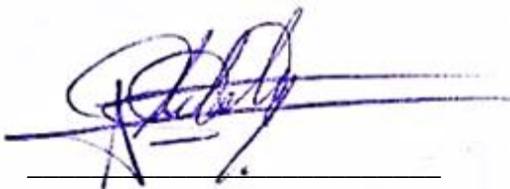
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Paul Alexander Cuatucuamba Araque con documento de identificación N° 1004862528 y Ángel Andrés Fernández Chiluisa con documento de identificación N° 1724864663; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Efecto del Polvo de Caucho en Mezclas Asfálticas Recicladas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad PolitécnicaSalesiana.

Quito, 04 de marzo del 2024

Atentamente,



Paul Alexander Cuatucuamba Araque
1004862528



Ángel Andrés Fernández Chiluisa
1724864663

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Francisco Roberto Ortiz Navas con documento de identificación N° 1717631244, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EFECTO DEL POLVO DE CAUCHO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS, realizado por Paul Alexander Cuatucuamba Araque con documento de identificación N° 1004862528 y por Ángel Andrés Fernández Chiluisa con documento de identificación N° 1724864663, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de marzo del 2024

Atentamente,



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD.

1717631244

EFFECTO DEL POLVO DE CAUCHO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

EFFECT OF RUBBER DUST IN ASPHALT MIXTURES RECYCLED

Paul Cuatucumbamba - Araque¹, Andrés Fernández - Chiluisa², Francisco Ortiz - Navas³

Resumen

En un contexto donde la sostenibilidad y la gestión de residuos son imperativos para la industria de la construcción y la ingeniería vial, se destaca la importancia de encontrar soluciones innovadoras. La reciclabilidad de materiales y la búsqueda de métodos para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas han llevado al interés especial en el polvo de caucho. Este componente, al integrarse en las mezclas, no solo aborda la gestión de residuos de neumáticos, sino que también busca mejorar las propiedades mecánicas y medioambientales de las carreteras. Este estudio investiga el papel del polvo de caucho derivado de neumáticos reciclados en la mejora de las mezclas asfálticas que contienen agregados reciclados y naturales. Se destaca la importancia de tamizar el asfalto fresado para facilitar la manipulación de los componentes durante la preparación de la mezcla. Se deduce que el polvo de caucho debe estar a la misma temperatura que los agregados reciclados antes de su incorporación. Se destaca la importancia de una cuidadosa selección del tamaño de partícula del polvo de caucho, evidenciando que diámetros superiores a 0.6 mm afectan la adherencia con los agregados y perjudican la compactación de la mezcla. Se confirma que el polvo de caucho actúa como modificador de la reología del asfalto, mejorando la resiliencia y flexibilidad del pavimento, lo que resulta en una

Abstract

In a context where sustainability and waste management are imperative for the construction and road engineering industry, the importance of finding innovative solutions is highlighted. The recyclability of materials and the search for methods to improve the properties of asphalt mixtures have led to special interest in rubber powder. This component, when integrated into the mixtures, not only addresses tire waste management, but also seeks to improve the mechanical and environmental properties of roads. This study investigates the role of rubber dust derived from recycled tires in improving asphalt mixtures containing recycled and natural aggregates. The importance of sieving the milled asphalt is highlighted to facilitate the handling of the components during the preparation of the mixture. It follows that the rubber powder must be at the same temperature as the recycled aggregates before incorporation. The importance of careful selection of the particle size of the rubber powder is highlighted, showing that diameters greater than 0.6 mm affect the adhesion with the aggregates and harm the compactness of the mixture. It is confirmed that rubber powder acts as a modifier of asphalt rheology, improving the resilience and flexibility of the pavement, resulting in a reduction in fatigue and cracks generated by aging. The study reveals that the rubber powder should be incorporated into the mixture when it is already

¹ Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador.

² Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador.

³ Docente de la Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador.

Autor para correspondencia: pcuatucumbamba@est.ups.edu.ec; afernandezc1@est.ups.edu.ec

reducción de la fatiga y las grietas generadas por el envejecimiento. El estudio revela que el polvo de caucho debe incorporarse en la mezcla cuando esta ya esté aglutinada y lista para la compactación, añadiéndolo lentamente y asegurando una buena adherencia entre los materiales. Los resultados muestran que el polvo de caucho, cuando se utiliza correctamente, puede ser un componente beneficioso para mejorar las propiedades mecánicas y medioambientales de las mezclas asfálticas recicladas.

Palabras Clave: sostenibilidad, residuos, fresado, polvo, caucho, reología, compactación, aglutinada.

agglutinated and ready for compaction, adding it slowly and ensuring good adhesion between the materials. The results show that rubber powder, when used correctly, can be a beneficial component in improving the mechanical and environmental properties of recycled asphalt mixtures.

Keywords: sustainability, waste, milling, powder, rubber, rheology, compactness, agglutinated.

1. Introducción

Las industrias de la construcción y la ingeniería vial están expuestas a desafíos continuos relacionados con la sostenibilidad y la gestión de residuos, lo que impulsa la necesidad de investigación innovadora [1]. En este contexto, la reciclabilidad de materiales y la mejora del rendimiento de las mezclas asfálticas han surgido como áreas cruciales de estudio. En particular, el polvo de caucho generado a partir de neumáticos reciclados ha capturado la atención debido a sus propiedades únicas y potenciales para mejorar las características de las mezclas asfálticas recicladas.

Como afirman, Méndez y Torres (2022), la utilización del asfalto reciclado ha emergido como una estrategia clave en la construcción de carreteras sostenibles y respetuosas con el medio ambiente [2]. El aprovechamiento de materiales reciclados, como mezclas asfálticas provenientes de pavimentos que han cumplido su vida útil, no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también ahorra recursos naturales y energía.

Desde el punto de vista de Restrepo y Stephens (2015), el polvo de caucho, derivado de neumáticos reciclados, ha surgido como un componente versátil y beneficioso en la mejora de mezclas asfálticas recicladas [3].

Al integrar el caucho en las mezclas asfálticas, se busca no solo abordar la problemática de gestión de residuos de neumáticos, sino también mejorar las propiedades mecánicas y medioambientales de las carreteras [4].

De acuerdo con Días y Castro (2017), los estudios han revelado que la inclusión de polvo de caucho puede tener un impacto positivo en la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, proporcionando una mayor capacidad para resistir deformaciones y cargas cíclicas [5]. Esta inclusión contribuye a la mejora de la durabilidad de las carreteras, ofreciendo un enfoque innovador y sostenible para la construcción de infraestructuras viales.

Al implementar el caucho en mezclas asfálticas fresadas se busca abordar dos problemas fundamentales: la gestión de residuos de

neumáticos y el fortalecimiento de las propiedades mecánicas y medioambientales de las carreteras [6].

Al agregar polvo de caucho reciclado a la mezcla asfáltica, se crea una sinergia entre la sostenibilidad ambiental y la eficiencia de la construcción de carreteras [7].

La modificación de los ligantes mediante la inclusión de polvo de caucho puede influir en la adhesión entre partículas, afectando así la resistencia de la mezcla asfáltica [8]. Este fenómeno es esencial para comprender cómo el polvo de caucho puede optimizar la respuesta estructural y funcional de las capas asfálticas recicladas.

La combinación de materiales reciclados con el asfalto plantea interrogantes cruciales en relación con la adherencia, la estabilidad y flujo [9]. Este estudio se propone abordar estas incógnitas mediante un enfoque integral que abarque pruebas de laboratorio y evaluación de desempeño.

Es fundamental destacar que la implementación exitosa del polvo de caucho en mezclas asfálticas recicladas no solo depende de la comprensión teórica de sus efectos, sino también de la viabilidad práctica y económica de su aplicación a gran escala [10]. Por lo tanto, es importante tener en cuenta los aspectos económicos para la exitosa viabilidad del proyecto.

A medida que enfrentamos la necesidad de soluciones sostenibles en el área de la ingeniería civil, esta investigación busca contribuir al conocimiento existente, proporcionando una visión clara sobre el impacto del polvo de caucho en las propiedades fundamentales de las mezclas asfálticas recicladas. Es por eso que, dentro del contexto planteado en el presente estudio se pretende informar las buenas e innovadoras prácticas de construcción vial, también podrían influir en las políticas medioambientales, respaldando un enfoque más sostenible y efectivo en el uso de recursos en la industria de la construcción vial.

La presente investigación se centra en explorar el efecto del polvo de caucho en mezclas que

incorporan agregados reciclados. Para esto se ha desarrollado una campaña experimental en donde primeramente se encontrará cual es el asfalto óptimo empleando la metodología Marshall. En base a esa mezcla optima se incorporará polvo de caucho en distintas gradaciones y se evaluará la estabilidad y flujo de dichas mezclas

2. Materiales y Métodos

Para el presente estudio, el material reciclado fue recolectado de las bodegas de la Empresa Publica Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (EPMOP). El material fue sometido a un proceso de tamizado a fin de poder seleccionar los diámetros necesarios para la presente investigación. Apreciando la Figura 1 se observa una fotografía de cómo se encuentra el material reciclado antes de ser procesado.



Figura 1. Material fresado estoqueado.

La fibra y polvo de caucho fue obtenida a partir de neumáticos reciclados que pasaron por un proceso de trituración dentro de una industria de reencauches. La máquina de trituración proporciona material con distintos tamaños de caucho en los cuales se encontró diámetros de hasta 4,75 mm. Debido a esto es necesario tamizar el material para poderlo llevar a las gradaciones en las cuales se centra el estudio.

Al trabajar con material reciclado es necesario someterlo a ensayos de laboratorio para determinar

las propiedades que mantiene dicho material. Estos materiales deben encontrarse en los rangos normados para que pueda ser considerados dentro de la mezcla asfáltica.

Debido a que la masa en bruto obtenida del fresado reciclado contiene un elevado nivel de asfalto, se hace imperativo emplear áridos naturales con el fin de regular los diversos porcentajes de contenido de ligante asfáltico. En este contexto, se optó por utilizar exclusivamente árido fino proveniente de las canteras de "Pintag" para tal propósito.

2.1 Asfalto Reciclado

Debido a que el fresado es un material que es extraído producto de la trituración del pavimento flexible deteriorado, se va a encontrar con abundante variedad de tamaños.

Se dispone de una distribución granulométrica que clasifica el material como un agregado grueso de acuerdo a la norma ASTM C136-06 [11], que presenta un tamaño máximo de partículas (TM) de 1/2" (12.7 mm) y un tamaño máximo nominal (TMN) de 3/8" (9.5 mm), como se aprecia en la Figura 2.

En cuanto al agregado fino, se destaca su clasificación basada en la granulometría, con un tamaño máximo de partículas (TM) de 3/8 (9,5 mm) y un tamaño máximo nominal (TMN) de (4,74 mm) tamiz N° 4 (Ver Figura 2). El hecho de que el material pueda pasar a través del tamiz N° 200 (0.075 mm) indica una finura considerable, lo que puede ser relevante debido a que el pasante de dicho tamiz se lo considera como "filler".

De acuerdo a la norma ASTM C127-15 [12] y ASTM C128-22 [13], el ensayo de gravedad específica de los agregados nos ayuda a la comprensión del comportamiento de sus densidades y lograr determinar un porcentaje de absorción, el cual se resume en la Tabla 1.

Al ser un asfalto fresado se debe corroborar el desgaste acumulado hasta el momento, con la ayuda del ensayo de abrasión del agregado grueso

según estipula la norma NTE INEN 860 [14], con el dato obtenido en la Tabla 1 se concluye si es reutilizable o desechable.

Tabla 1. Resultado de los diferentes tipos de agregados obtenidos en laboratorio

	Agregado Grueso Reciclado	Agregado Fino Reciclado	Agregado Fino Natural
Gravedad específica masiva	2.253	2.250	2.289
Gravedad específica sss	2.305	2.319	2.346
Gravedad específica aparente	2.377	2.416	2.433
Absorción [%]	2.306	3.059	2.275
Abrasión [%]	32	-	-
TMN [mm]	9.5	4.75	4.75
Peso unitario suelito [g/cm³]	1.259	1.253	1.224
Peso unitario varillado [g/cm³]	1.337	1.322	1.316

2.2. Agregado Natural

Ante la presencia de un elevado contenido de asfalto en el material fresado en comparación con las especificaciones del diseño, se torna necesario introducir material natural en la mezcla. Esta incorporación se convierte en un componente esencial para ejercer un control preciso sobre la composición y alcanzar el contenido de asfalto óptimo. En este contexto, se llevó a cabo un minucioso ensayo de granulometría en el agregado natural en base a la norma ASTM C136 [11], revelando un tamaño máximo (TM) de partículas de 3/8 (9.5 mm) y un tamaño máximo nominal (TMN) de 4.75 mm, como se detalla en la Figura 2.

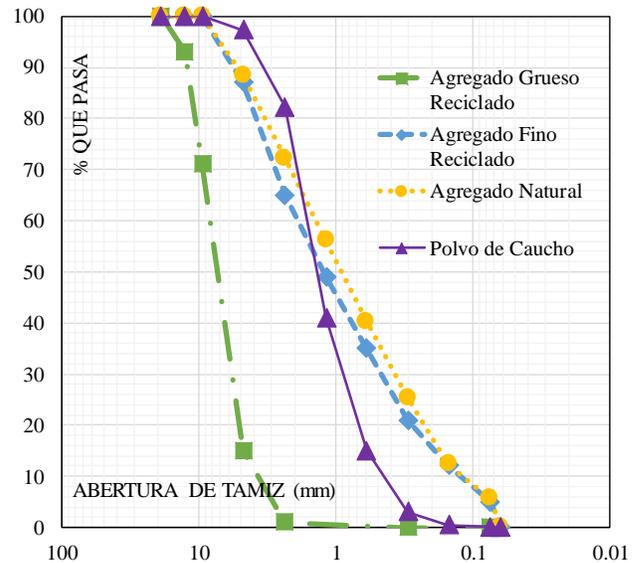


Figura 2. Curva granulométrica de los materiales.

Al ser un material que influirá directamente en la mezcla asfáltica es necesario obtener el análisis de su densidad y consecuentemente su porcentaje de absorción como detalla la Tabla 1.

2.3. Polvo de Caucho

Dado que el material recopilado exhibe partículas con variados diámetros, procedentes de la trituración de llantas recicladas. Se presenta una falta de uniformidad en cuanto al tamaño de las partículas. Por ello, se somete el material a un proceso de tamizado (Ver Figura 3).

Este proceso busca la separación del material (fibra) en polvo grueso y fino, estableciendo el rango del polvo grueso entre el pasante del tamiz N° 4 y el retenido en el tamiz N° 30. Este enfoque permite clasificar y caracterizar el material de manera más precisa, considerando las variaciones en el tamaño de las partículas resultantes de la trituración de llantas recicladas.

Mientras que para el denominado polvo fino se toma en cuenta desde el pasante del tamiz N° 30 en adelante. Dado que el pasante del tamiz N°200 se presenta de manera casi nula también es considerado como polvo fino.

Es imperativo tener en cuenta que el polvo de caucho al momento de ser incorporado en la mezcla debe tener una temperatura igual o superior a la de los agregados. Así pues, el mismo debe ser colocado una vez que la mezcla haya sido homogeneizada a la temperatura requerida de compactación (150° C).

2.4 Diseño de mezcla

Para el diseño de mezcla se procedió a mezclar las porciones asignadas por los cálculos donde el reto más importante en la investigación fue la incorporación del polvo de caucho. En un primer intento se lo incorporo a temperatura ambiente lo que permitió observar que la mezcla aun después de sobrepasar la temperatura de compactación los materiales no logran aglutinarse.

Como segundo intento se opta por mantener el polvo de caucho en el horno a la misma temperatura de los materiales listos para mezclar (190 °C), y se lo incorpora de un inicio en la balanza en un 1% luego se vertió en la olla eléctrica de mezclado, sin embargo, se aprecia que los agregados no se adhieren entre sí por la variación de material.

Teniendo en cuenta los errores anteriores se procede a calentar los agregados y el polvo de caucho a una temperatura de 190° C y mezclar solamente los agregados que contienen asfalto con la finalidad de tener la mezcla ya aglutinada para luego incorporar el polvo de caucho con mesura y sin dejar de batir la mezcla.

A partir del ensayo en el horno de ignición según la norma ASTM D6307-19 [15] se determina el contenido de asfalto del material fresado presente en la tabla 2. Es decir, la cantidad de ligante asfáltico representado como un tanto por ciento de la diferencia entre pesos de la muestra inicial y su posterior masa residual [16].

Tabla 2. Porcentaje de asfalto, ensayo en horno de ignición.

Peso de bandeja [g]	4577
Peso de muestra [g]	1988.5
Peso final [g]	1857.6
Pérdida de peso [g]	130.9
Asfalto [%]	6.57

Se cuantifica un porcentaje de asfalto de (6.57%).

En función de las granulometrías antes expuestas, se obtiene los porcentajes específicos de cada tamaño de abertura del material, obteniendo una mezcla de los dos tipos de materiales (Ver Tabla 3). Para la mezcla se busca los porcentajes óptimos, buscando que se encuentren dentro de los límites de las especificaciones de la normativa MOP-001-F-2002 [17], para un tamaño nominal de (3/8”) (Ver Figura 4).

Tabla 3. Graduación combinada de la mezcla.

Tamíz	% Grueso	% Fino
3/4	40.0	60.0
1/2	37.2	60.0
No. 4	6.0	52.2
No. 8	0.4	39.0
No. 50	0.0	12.6
No. 200	0.0	3.0
% Usado	40	60

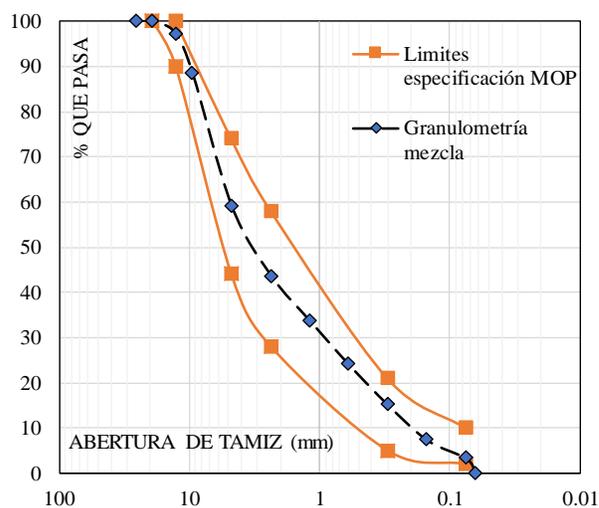


Figura 4. Curva granulométrica de la mezcla.

En cuanto al asfalto inicial para la mezcla se lo determina utilizando las ecuaciones (1) y (2) que estipula el método Marshall basado en la norma ASTM D1559-89 [18] en función de los porcentajes óptimos de la mezcla antes expuestos.

Debido a criterios de diseño, se recomienda un coeficiente de tráfico $M=4$.

$$P = M * S^{\frac{1}{5}} \quad (1)$$

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135 \quad (2)$$

Al comparar el porcentaje de asfalto inicial obtenido mediante fórmula (5.79%), con el porcentaje de asfalto producto del ensayo de ignición (6.57%). Se observa que el porcentaje con el que el material fresado cuenta es mayor al de diseño. En consecuencia, se procede a bajar el contenido de asfalto del material reciclado con la adición de material natural (arena) a la mezcla en porcentajes específicos, logrando así cumplir las condiciones de porcentajes de asfalto que requiere el método para generar las curvas de diseño, es decir, dos incrementos y decrementos del 0,5% del valor de partida.

Nota: Se recalca que el agregado natural (arena) tiene similar granulometría que el agregado fino reciclado a fin de que no altere el requerimiento de contenido de asfalto.

Una vez determinados los porcentajes y cantidades específicas de diseño se planifica la preparación y compactación de especímenes, exactamente 3 por cada porcentaje de asfalto requerido, es decir, 15 briquetas en total.

Cada briketa se elabora individualmente con 1200g de materiales granulares más el porcentaje de asfalto respectivo. Los agregados a utilizarse se calientan hasta una temperatura de 190 °C en

el horno a fin de lograr la disolución del asfalto presente en los materiales, posterior en la olla se mezcla los materiales hasta alcanzar una temperatura entre 130 °C a 160 °C para su compactación.

Al ser un diseño para tráfico pesado, el número de golpes es de 75 para cada briketa.

El método Marshall desarrolla el diseño de una mezcla asfáltica con criterio en dos aspectos fundamentales del pavimento; el análisis de vacíos, y la estabilidad y flujo de los especímenes compactados [19].

Se ensaya las muestras y se logra llegar a las condiciones que especifica la norma ASTM D1559-89 [18] para determinar la gravedad específica bulk y rice, reflejadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Gravedad específica bulk y gravedad específica teórica rice.

Asfalto [%]	Gravedad específica (BULK) [-]	Gravedad específica (RICE) [-]
6.8%	2.240	2.297
6.3%	2.235	2.355
5.8%	2.225	2.385
5.3%	2.164	2.322
4.8%	2.182	2.355

En la Tabla 5 se puede evidenciar un resumen de resultados relacionados con las propiedades de la mezcla asfáltica [20]. Lo que conlleva a la determinación de un porcentaje de asfalto óptimo para la mezcla.

Tabla 5. Resumen de las propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla asfáltica.

Asfalto [%]	Vacíos [%]			Estabilidad [lb]	Flujo [1/100"]
	VAM	VAE	Vv		
6.8%	7.2	65.6	2.4	3563	9
6.3%	6.9	27.2	5.0	3103	9
5.8%	6.8	2.9	6.6	2854	8
5.3%	8.9	24.1	6.8	2502	6
4.8%	7.7	5.0	7.3	2766	9

La fase inicial del diseño consiste en seleccionar el porcentaje de asfalto basado en el promedio de los límites de vacíos de aire, que es del 4% (Ver Figura 5).

Por lo tanto, todas las propiedades evaluadas son calculadas en relación a este contenido de asfalto (Ver Figuras 6)

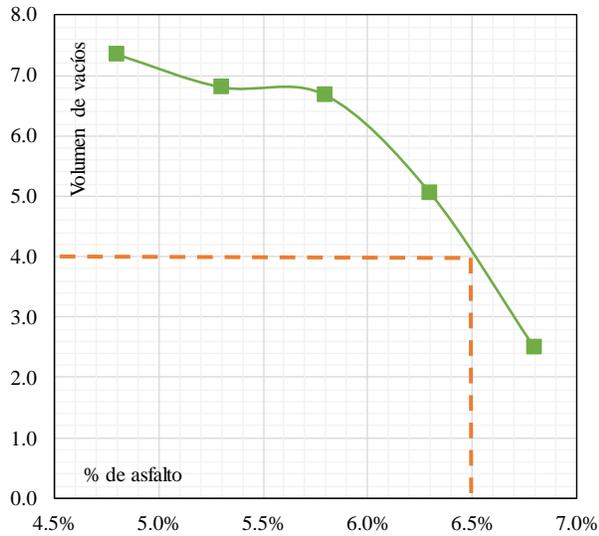
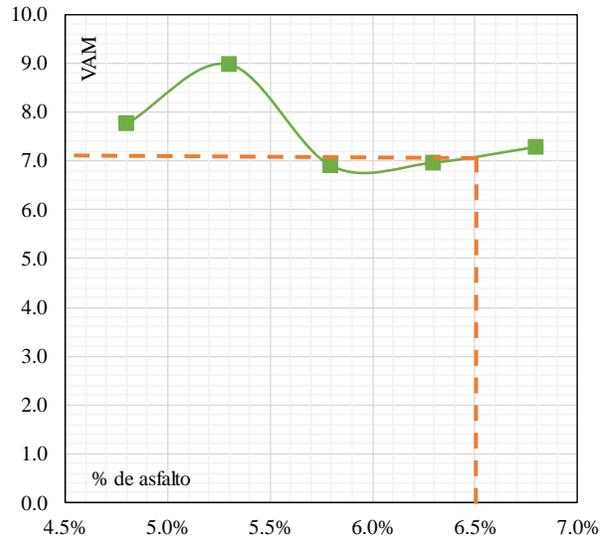
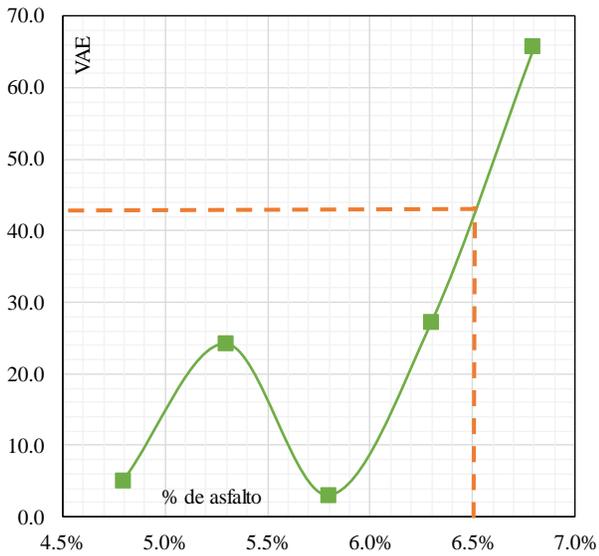


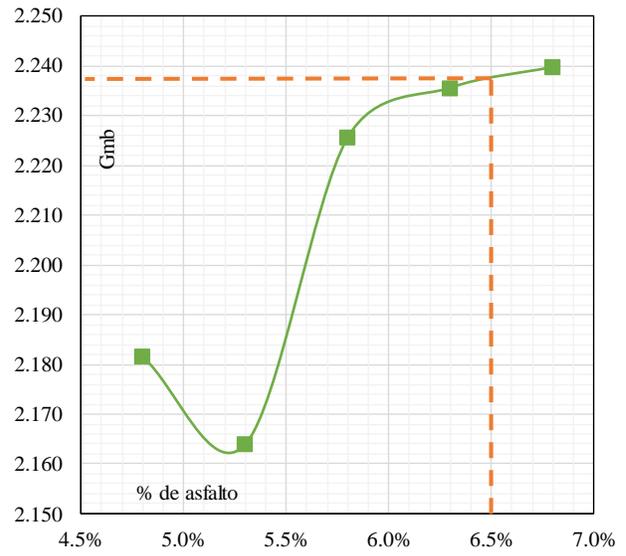
Figura 5. Volumen de vacíos vs porcentaje de asfalto.



a)



b)



c)

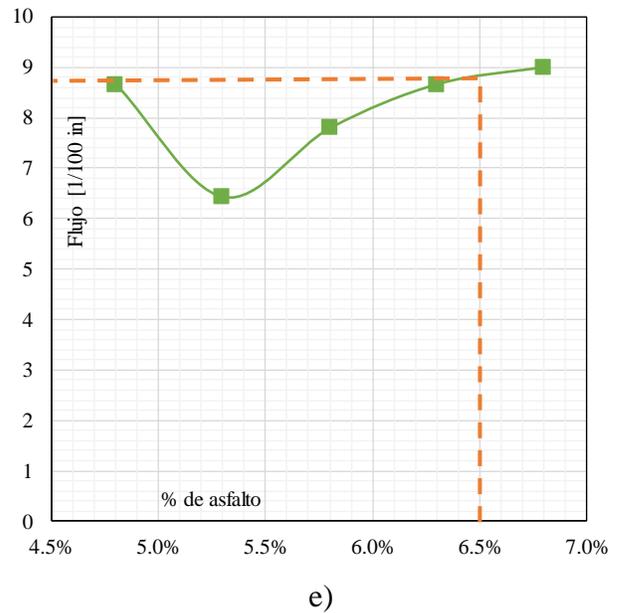
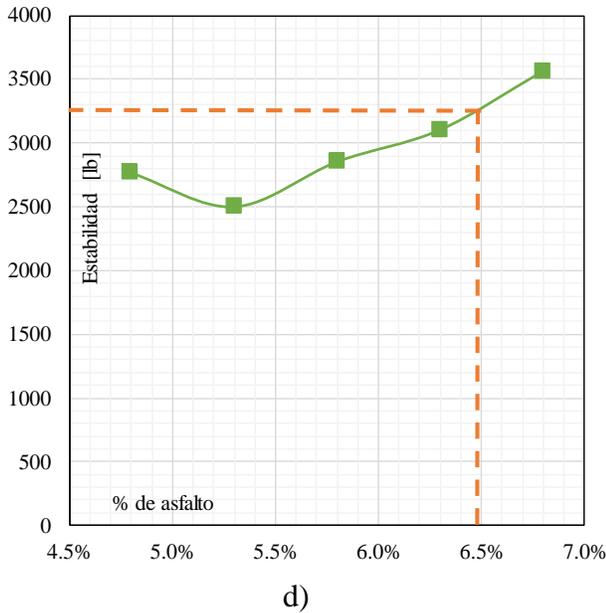


Figura 6. a) VAM vs porcentaje de asfalto, b) VAE vs porcentaje de asfalto, c) Gmb vs porcentaje de asfalto, d) Estabilidad vs porcentaje de asfalto, e) Flujo vs porcentaje de asfalto.

A través de la Tabla 6 se puede apreciar que las propiedades volumétricas y mecánicas cumplen con las especificaciones para un tráfico pesado establecidas por la norma MOP-001-F-2002 [18].

Tabla 6. Verificación de las especificaciones en los criterios Marshall.

Criterio Marshall	Valor	Especificación	Unidad
Estabilidad	9	8 - 14	lb
Flujo	3300	≥ 1800	1/100 "
% de vacíos	4	3 - 5	%
Gmb	2.238	-	adim.

Al obtener un asfalto óptimo de diseño de (6.5%) aproximadamente, se contempla que respecto al asfalto existente en el material fresado no existe una diferencia considerable, así que se adopta el (6.57%) como porcentaje de asfalto óptimo. Esto quiere decir que el material fresado adquirido es ideal para ser reutilizado sin necesidad de la incorporación de algún material natural.

2.5 Efecto del Polvo de Caucho

Se establece el porcentaje de polvo de caucho que será añadido a la mezcla, siendo el caso del 1% y 2% de polvo fino, y 1% y 2% de polvo grueso.

Se programa la elaboración de nuevos especímenes de control, con el fin de analizar y comparar su comportamiento en la mezcla asfáltica y posteriores cambios de las propiedades volumétricas y mecánicas. Por ende, se realiza 3 briquetas por cada porcentaje de polvo de caucho teniendo como resultado 15 briquetas a realizar (3 sin añadir polvo, 3 con 1% de polvo fino, 3 con 2% de polvo fino, 3 con 1% de polvo grueso, 3 con 2% de polvo grueso).

Cabe mencionar que durante el proceso de fabricación de los especímenes se visualiza diferente trabajabilidad del material, ya que al aplicar el polvo fino se adhiere muy bien a la mezcla a diferencia del polvo grueso que se aprecia a simple vista su falta de cohesión con la mezcla, complicando así su compactación.

En la Tabla 7 se puede apreciar el cambio de las propiedades volumétricas y mecánicas (estabilidad y flujo) en base a los porcentajes de polvo de caucho añadidos.

Tabla 7. Propiedades volumétricas, estabilidad y flujo en función del porcentaje de polvo de caucho.

Polvo de caucho [%]		Vacíos [%]			Estabilidad [lb]	Flujo [1/100in]
		VAM	VAE	Vv		
Fino	0%	13.58 (0.16)	28.64 (0.20)	9.69 (0.25)	3578 (0.08)	13 (0.04)
	1%	13.27 (0.15)	12.64 (0.17)	11.59 (0.18)	3852 (0.02)	17 (0.25)
	2%	14.05 (0.46)	3.97 (0.71)	13.50 (0.49)	4195 (0.01)	22 (0.12)
Grueso	0%	13.58 (0.16)	28.64 (0.20)	9.69 (0.25)	3578 (0.08)	13 (0.04)
	1%	15.91 (0.07)	17.86 (0.08)	13.07 (0.09)	3706 (0.11)	16 (0.04)
	2%	11.52 (0.07)	11.15 (0.07)	10.24 (0.08)	3901 (0.07)	14 (0.07)

Nota: Los números en paréntesis representan el coeficiente de variación.

3. Resultados y Discusión

3.1. Efecto del polvo de caucho en la mezcla

En concordancia con los datos obtenidos, se puede apreciar que el volumen de vacíos con respecto al polvo de caucho en los distintos porcentajes que fue agregado, se evidencia que en el caso del polvo de caucho fino presenta un crecimiento exponencial constante lo que nos indica que al volumen de vacíos es directamente proporcional a la cantidad de polvo de caucho que va siendo incorporado.

Así mismo al ir evaluando el polvo de caucho más grueso se puede evidenciar que no presenta una curva de crecimiento constante, por el contrario, al incorporar más del 1% de polvo de caucho esta empieza a disminuir como se evidencia en la Figura 11.

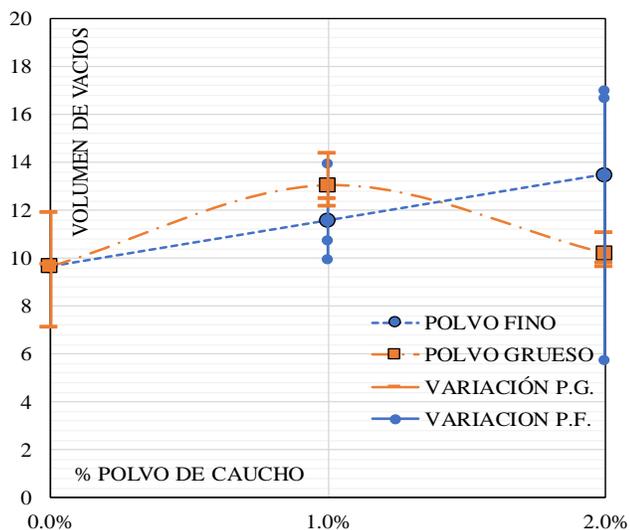


Figura 11. Volumen de vacíos vs porcentaje de polvo de caucho.

Al evaluar el volumen de vacíos de los agregados (VAM) es importante ser cautelosos para evidenciar que, en el caso del polvo de caucho fino la curva inicia con una decreción mínima, la misma que al agregar polvo de caucho en mayor porcentaje va tomando una tendencia a aumentar. Al contrario del polvo de caucho grueso la curva inicia con un crecimiento evidenciable, pero se puede notar que, al momento de incrementar el porcentaje de polvo de caucho incorporado en la mezcla, el valor del VAM empieza a disminuir, evidenciando así que mientras el diámetro de la partícula de la partícula de caucho es más grande y se aumenta la cantidad de polvo incorporado, el volumen de vacíos de los agregados disminuye. (Ver Figura 12).

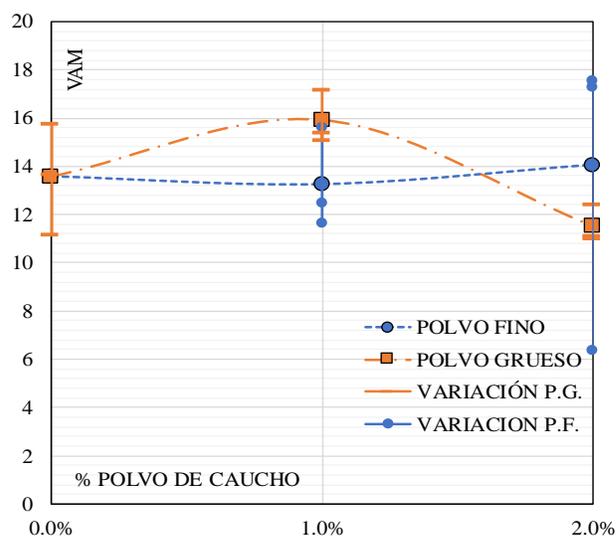


Figura 12. VAM vs porcentaje de polvo de caucho.

Una vez analizado el VAM, podemos inferir en la respuesta de los vacíos llenos de asfalto dado que es el porcentaje de VAM que contiene el ligante asfáltico, se puede evidencia que los valores decrecen debido a que el polvo de caucho incorporado ayuda llenar los vacíos que se producen por efecto del VAM (Ver Figura 13).

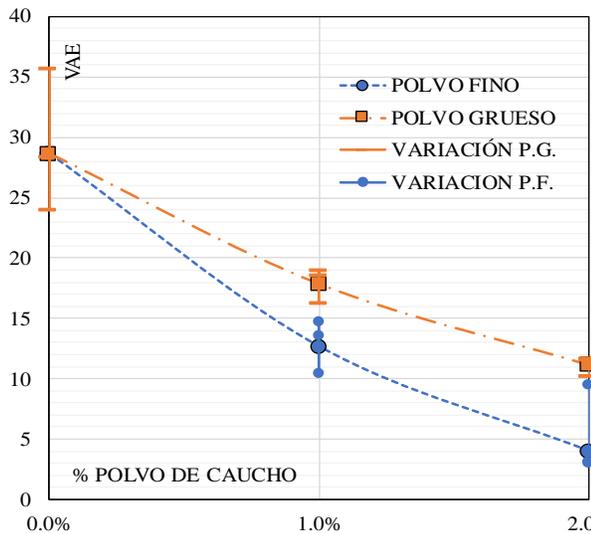


Figura 13. VAE vs porcentaje de polvo de caucho.

La incorporación del polvo de caucho en una mezcla asfáltica reciclada muestra una mejoría en la mezcla para soportar deformaciones, lo que evidencia que este tipo de material es apto para ayudar a la mezcla a mejorar ante este tipo de solicitaciones (Ver Figura 14). Al incorporar el caucho grueso en un 1% la estabilidad no varía mucho en comparación al polvo fino, pero al adicionar el polvo de caucho grueso en un porcentaje de 2% la estabilidad ya presenta una variación notable.

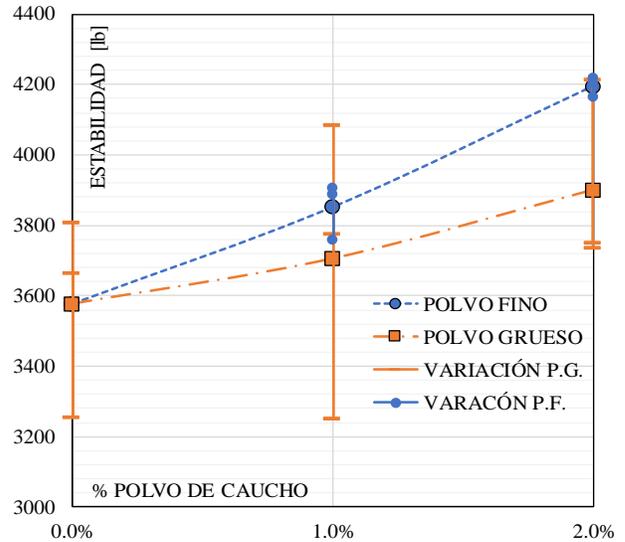


Figura 14. Estabilidad vs porcentaje de polvo de caucho.

De manera similar a lo observado con la estabilidad, se puede apreciar que al incorporar el polvo de caucho mas fino, la mezcla presenta una mejoría en relacion a la muestra ensayada con un porcentaje de polvo de caucho de 0%, pero tambien es apreciable que con el polvo de caucho mas grueso los valores de flujo disminuyeron (Ver Figura 15).

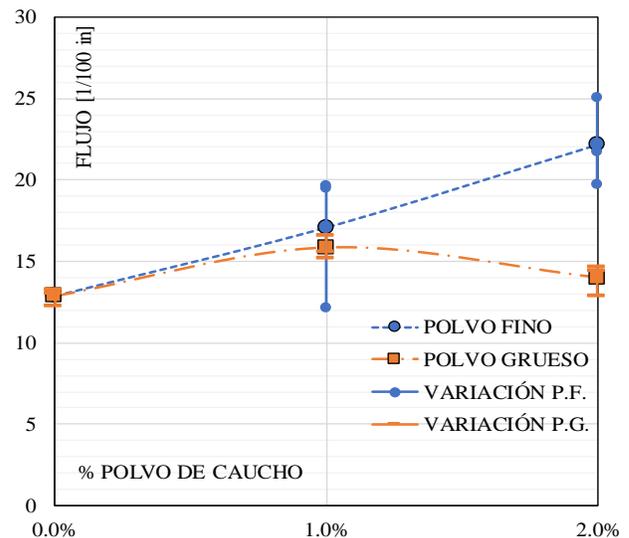


Figura 15. Flujo vs porcentaje de polvo de caucho.

4. Conclusiones

El presente artículo aborda la introducción del polvo de caucho en mezclas que comprenden tanto agregados reciclados como agregados naturales, con el propósito de evaluar su impacto tanto en la Estabilidad como en el Flujo de dichas mezclas. A través de la ejecución de diversos ensayos, se han obtenido resultados que permiten derivar las siguientes conclusiones.

La falta de un almacenamiento adecuado del asfalto fresado conlleva a la posibilidad de encontrar fragmentos de pavimento de considerable tamaño al momento de recolectar el material. Por esta razón, se requiere someter dicho material a un proceso de tamizado, con el propósito de obtener un material más manejable y fácil de controlar al realizar la mezcla de los agregados. Este procedimiento se vuelve esencial para optimizar la gestión y manipulación de los componentes durante la preparación de la mezcla.

Se concluye que el polvo de caucho antes de incorporarlo en la mezcla debe estar a una temperatura igual a la de los agregados reciclados (190°C), y previo a añadirlo, la mezcla debe estar ya aglutinada y lista para la compactación para luego el polvo de caucho irlo incluyendo a la mezcla lentamente sin dejar de batir y así lograr que todos los materiales queden bien adheridos y armonizados entre sí.

Con base a la experimentación se deduce que el polvo de caucho para ser considerado un material de mejoramiento para una mezcla asfáltica, el tamaño de diámetro de sus partículas no debe superar los 0.6 mm, ya que, al ser mayor afecta en su adherencia con los agregados, perjudicando su compacidad y resultados en los ensayos.

Se comprueba que, al incorporar el polvo de caucho en la mezcla, este actúa como un modificador de la reología del asfalto, lo que favorece significativamente al aumento de la resiliencia y flexibilidad del pavimento resultando

una disminución de fatiga a las cargas de tránsito y grietas generadas por envejecimiento.

El análisis de los porcentajes de polvo de caucho versus los diferentes coeficientes (Vv, VAM, VAE, Estabilidad y Flujo), muestra que la incorporación del polvo de caucho fino y grueso en un 1% presentan bajas variaciones, lo que no sucede con la incorporación del caucho grueso en un 2% el mismo que presenta saltos mayores entre especímenes.

Simbología

P: Porcentaje de asfalto de partida.

M: Coeficiente del tráfico (3.75 – 4.25).

S: Superficie específica de los áridos.

G: Porcentaje del peso retenido en el tamiz de 3/8”.

g: Porcentaje del peso retenido en el tamiz N°4 y que pasa el tamiz 3/8”.

A: Porcentaje del peso retenido en el tamiz N°50 y que el tamiz N°4.

a: Porcentaje del peso retenido en el tamiz N°200 y que pasa el tamiz N°50.

f: Porcentaje que pasa el tamiz N°200.

Vv: Volumen de vacíos.

VAM: Vacíos del agregado mineral.

VAE: Vacíos llenos de asfalto.

Referencias

- [1] A. Tasalloti *et al.*, “Physical and Mechanical Properties of Granulated Rubber Mixed with Granular Soils”, A Literature Review, 2021, 13, 4309. Available: <https://doi.org/10.3390/su13084309>. [Accesed: Abr 22,2023]
- [2]. J. Méndez, E. Torres, “Diseño de una mezcla asfáltica en frío reutilizando material asfáltico fresado (RAP) e incorporando fillers comerciales (cal hidratada / cemento) por vía seca” Proyecto de Titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2022. Available:

<http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/bitstream/25000/27245/1/FING-CICMENDEZ%20JONATHANTORRES%20EDWIN.pdf>

- [3]. H. Restrepo, S. Stephens, “Estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de pavimentos asfálticos” Proyecto de titulación, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia, 2015. Available: https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/2163/TG_EVT_13.pdf?q=uenc
- [4]. A. Al-Salih,, “Uso de caucho triturado para mejorar las mezclas bituminosas: investigación experimental del comportamiento de surcos de la mezcla asfáltica flexible para la construcción de carreteras”. Conferencia Internacional sobre Reología y Modelado de Materiales, 2020. doi: 10.1088/17426596/1527/1/012015
- [5] C. Díaz Claros y L. Castro Celis, “IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA 437 MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ”, monografía de grado, Universidad Santo Tomás, 2017 [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] C. Díaz Claros y L. Castro Celis, "IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA 437 MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ", monografía de grado, Universidad Santo Tomás, 2017 [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7]. C. Díaz Claros y L. Castro Celis, “IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA 437 MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ”, monografía de grado, Universidad Santo Tomás, 2017 [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8]R. López Tipo, “Reúso del asfalto fresado para la mitigación de partículas en suspensión producido por el tránsito de vehículos en calles no pavimentadas en poblaciones urbano marginales”, tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/46971>
- [9]M. Avellán Cruz, “Asfaltos Modificados con Polímeros”, tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2007 [En línea]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2705_C.pdf
- [10] .M. Sánchez Fernández, “Diseño y comparación del pavimento flexible mejorado 9por el método del reciclaje en la carretera Lima-Canta (km 78+000 al km 79+000)”, tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo, 2017 [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/19623/S%C3%A1nchez_FMY.pdf?sequence=4.

- [11] *Annual Book of American Society for Testing and Materials ASTM Standard*, Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates; ASTM designation: C136-06.
- [12] *Annual Book of American Society for Testing and Materials ASTM Standard*, Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate; ASTM designation: C127-15.
- [13] *Annual Book of American Society for Testing and Materials ASTM Standard*, Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate; ASTM designation: C128-22.
- [14] Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 0860:2011; Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles (2011). Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/860.pdf>.
- [15] *Annual Book of American Society for Testing and Materials ASTM Standard*, Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method; ASTM designation: D6307-19.
- [16] M. Córdova, C. Cornejo, “Manual de Laboratorio para los Ensayos de Vías y Pavimentos de Universidad Politécnica Salesiana”, Proyecto de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. Oct. 2019. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17930/1/UPS%20-%20ST004373.pdf>.
- [17] República del Ecuador, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002. Available: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf.
- [18] *Annual Book of American Society for Testing and Materials ASTM Standard*, Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus; ASTM designation: D1559-89.
- [19] P. Garnica, H. Delgado, C. Sandoval, “Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas”, Publicación Técnica, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Querétaro, México. 2005. Available: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>
- [20] O. Campaña, S. Galeas, V. Guerrero, “Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores”, Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador. Oct. 2015. Available: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/513/pdf