

Aprovechamiento de neumáticos reciclados como agregado para la fabricación sostenible de pavimento asfáltico

Use of recycled tires as an aggregate for the sustainable manufacture of asphalt pavement

Wilder Michel López Ponte^{1a,*} ; Alberto Huiman Cruz^{1b} 

^{1a}Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

^{1b}ahuimanc@unmsm.edu.pe

*Autor para correspondencia: mlopezponce@gmail.com (W. López)

DOI: [10.17268/rev.cyt.2024.04.11](https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2024.04.11)

RESUMEN

En la presente investigación, se evaluaron mezclas de material asfáltico con porcentajes de neumáticos en desuso en forma de caucho granulado al 1% y 2%, asimismo, se realizó una mezcla convencional de material asfáltico, utilizada como patrón dentro del estudio. La metodología de la investigación es de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y un diseño experimental puro. El método aplicado es deductivo a un nivel explicativo. En el proceso se consideran las cantidades necesarias de cada uno de los materiales, utilizando el Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas. Asimismo, las mezclas se sometieron a cambios de temperatura, alcanzando los 145 °C para poder ser moldeadas. En relación al porcentaje de vacíos, los tres diseños cumplen con las exigencias de la normativa EG-2013: (0%) = 4,3, (1%) = 4,4, (2%) = 3,8. Respecto a la estabilidad, la mezcla estándar presenta una estabilidad de 1918,7 kg; no obstante, la mezcla con la adición de 1% de caucho granulado alcanza una estabilidad de 1986,7 kg. Por lo tanto, la estabilidad de la muestra mejorada supera a la de la mezcla en 3.5%. Se concluye que el porcentaje óptimo de caucho granulado es del 2%.

Palabras clave: Neumáticos en desuso; caucho granulado; material asfáltico; mezcla convencional; pavimento asfáltico.

ABSTRACT

In the present investigation, mixtures of asphalt material with percentages of disused tires in the form of granulated rubber at 1% and 2% were evaluated. Likewise, a conventional mixture of asphalt material was made, used as a standard within the study. The research methodology is applied, with a quantitative approach and a pure experimental design. The method applied is deductive at an explanatory level. In the process, the necessary quantities of each of the materials are considered, using the Marshall Method for the design of asphalt mixtures. Likewise, the mixtures were subjected to temperature changes, reaching 145 °C in order to be molded. In relation to the percentage of voids, the three designs meet the requirements of the EG-2013 regulations: (0%) = 4.3, (1%) = 4.4, (2%) = 3.8. Regarding stability, the standard mixture has a stability of 1918.7 kg; however, the mixture with the addition of 1% granulated rubber reaches a stability of 1986.7 kg. Therefore, the stability of the improved sample exceeds that of the mixture by 3.5%. It is concluded that the optimal percentage of granulated rubber is 2%. It is concluded that the optimal percentage of granulated rubber is 2%.

Keywords: Disused tyres; granulated rubber; asphalt material; conventional mix; asphalt pavement.

1. INTRODUCCIÓN

Los neumáticos son parte esencial de la economía global, debido a que son imprescindibles en gran porcentaje de los vehículos usados para el transporte diario del ser humano, a través de carros, motos, buses, entre otros. En ese sentido, el crecimiento del parque automotor se puede traducir como un incremento en la economía del país. Sin embargo, no tener infraestructura vial desarrollada genera pérdidas económicas, debido a la congestión diaria en la que se pierde demasiado combustible por procesos de combustión (Coronel y Altamirano, 2022). Además, según cifras recientes, cada año se desechan millones de neumáticos en todo el mundo, con un impacto significativo en el medio ambiente. Estos neumáticos no valorizados generan



problemas graves, como la acumulación en vertederos, el riesgo de incendios, y la proliferación de enfermedades transmitidas por vectores que encuentran en los neumáticos un hábitat ideal para reproducirse (Flores y Escalón, 2016). En este contexto, el Decreto Legislativo N° 024-2021-MINAM establece directrices para la gestión integral de residuos sólidos, incluyendo neumáticos, promoviendo su valorización y reciclaje. Este marco normativo busca mitigar el impacto ambiental y fomentar prácticas sostenibles, como el uso de neumáticos reciclados en la fabricación de pavimentos asfálticos, una solución que contribuye a la economía circular y mejora la infraestructura vial del país. A su vez, se comienzan a generar una gran cantidad de neumáticos en desuso, los cuales terminan por lo general en botaderos o rellenos sanitarios clandestinos. Además, estos botaderos generan un alto impacto negativo en la salud pública, debido al almacenamiento de residuos biodegradables y neumáticos, entre otros residuos, los cuales generan las condiciones apropiadas para la proliferación de vectores y propagación de enfermedades, asimismo, la destrucción de los ecosistemas por la contaminación de las fuentes hídricas, el aire y el suelo. Estos espacios donde son acumulados los neumáticos en desuso, presentan similares características, debido al almacenamiento inadecuado, enterramiento y quema de las llantas a cielo abierto (Hidalgo y Alejandra, 2017).

Por otro lado, las dificultades que se presentan al gestionar el destino de los neumáticos por ser materiales no biodegradables, todo esto ha contribuido considerablemente en muchos problemas ambientales en los últimos años (Agudelo y Martínez, 2019)

El material residual generado por los neumáticos genera un impacto ambiental negativo anualmente en el ambiente, asimismo la producción de llantas genera emisiones de dióxido de carbono (CO₂) tanto en su producción como en su disposición final, lo que afecta al ecosistema y la salud (Segovia y Paco, 2020).

Según (Brito, 2021) los principales componentes de los neumáticos son los polímeros, los negros de humo y los plastificantes. Los plastificantes consisten principalmente en aceites de hidrocarburos aromáticos. Asimismo, el Revestimiento de goma interior, es un recubrimiento hermético de caucho sintético. Se encuentra en el núcleo del neumático y actúa como una cámara de aire (Maguiña, 2019).

Según lo indicado por (Bresi et al., 2019) el número de vehículos en los principales mercados del mundo está en constante y progresivo aumento. Por otro lado, el número de ventas de neumáticos retirados en está disminuyendo progresivamente. Eso significa que el interés por reciclar neumáticos para reconstruirlos está disminuyendo. Esto probablemente se deba al difícil y exigente proceso de recuperación y re vulcanización del caucho que se usa en los neumáticos nuevos. Por lo tanto, se deben considerar o mejorar otras soluciones para reciclar.

En el Perú, los neumáticos fuera de uso son un grave problema ambiental, ya que cada año se tiran miles de neumáticos sin un proceso técnico que ayude a tomar medidas que ayuden a tener una correcta disposición final de los neumáticos en desuso. En 1997, había 1,3 millones de coches en Perú que producían 1,6 millones de neumáticos usados, 800 000 de los cuales se concentraban en la ciudad de Lima. Se calcula que sólo el 5% de los neumáticos se recauchutan y el 2% se utiliza como combustible para la energía (Mantilla y Castañeda, 2019).

En ese sentido, los gránulos de caucho derivados de neumáticos reciclados se producen mediante el proceso de trituración de neumáticos desechados, considerando los diferentes tamaños de partículas, terminologías y propiedades necesarias. Este proceso se ajusta a las especificaciones de partículas de neumáticos reciclados establecidas por la norma ASTM D-6270 y la práctica estándar para la utilización de neumáticos desechados en aplicaciones de ingeniería civil (Alfayez et al., 2020).

El uso de residuos de caucho de neumáticos reciclados en pavimentos comenzó hace más de un siglo. La primera práctica de mezclar caucho natural y betún fue en la década de 1840. El propósito de este trabajo fue examinar la flexibilidad natural del caucho con el asfalto para crear una superficie de pavimento duradera. Durante la década de 1960, Charles H. McDonald desarrolló y exploró por primera vez el proceso de asfalto húmedo en el que el caucho de llanta reciclado reacciona parcialmente con el aglutinante de asfalto. Este trabajo mejoró significativamente las aplicaciones de asfalto de caucho para selladores de grietas, aplicaciones de rociado y aglutinantes de mezcla en caliente. En 1997, la American Society for Testing Materials propuso una especificación estándar, ASTM D6114-97, para el aglutinante de caucho y asfalto (Alfayez et al., 2020).

Según (Zhu et al., 2022) el asfalto de caucho, es un asfalto modificado que se prepara agregando caucho triturado a la matriz de asfalto. Según el origen del caucho, se puede dividir en caucho natural y caucho residual.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el laboratorio de suelos JCH S.A.C, especializado en ensayos y análisis técnicos. Se utilizaron agregados y neumáticos en desuso transformados en caucho granulado, necesarios para la preparación de material asfáltico. Los neumáticos reciclados pasaron por etapas de tratamiento para obtener caucho triturado y granulado, el cual se mezcló con material asfáltico en diferentes proporciones de 0%, 1% y 2%.

En la investigación se utilizaron tres muestras: una de control (Asfalto PEN 60/70) y dos experimentales (material asfáltico modificado con caucho granulado de neumáticos reciclados) con proporciones de 1% y 2% de caucho granulado. Para generar los especímenes de prueba y/o muestras experimentales, se realizó una mezcla de gránulos de caucho provenientes de neumáticos reciclados y material asfáltico, sometiéndola a altas temperaturas. El análisis de los resultados se realizó mediante el método analítico, para interpretar el impacto de la incorporación del caucho reciclado al material asfáltico.

El procedimiento de esta tesis siguió los siguientes pasos:

1. Recolección de neumáticos en desuso como materia prima para el pavimento asfáltico. Este material se llevó al laboratorio y se sometió a un proceso de trituración para obtener caucho granulado.
2. Medición de granulometría y pesos específicos, como ensayos primarios para determinar los parámetros de diseño Marshall al 0%, 1% y 2%. Todos los materiales a utilizar (agregados y moldes) se secaron en horno a 145 °C durante 24 horas, mientras que el asfalto se calentó por 12 horas.
3. Pesaje de diferentes proporciones de agregados y caucho granulado. Los materiales pesados se colocaron en un recipiente y se calentaron a 145 °C. Al alcanzar esta temperatura, la mezcla se vertió en un molde con dos caras visibles y se compactó con el martillo Marshall mediante 75 golpes por cada cara.
4. Enfriamiento de las muestras por 3 horas hasta que estuvieron frías. Estas se identificaron con un rotulado y se ordenaron por peso. Luego, se colocaron en una máquina extractora para sacar cada briqueta del molde. Se midió el diámetro con un pie de rey, se determinó el espesor, se pesó a condiciones normales, se sumergió en agua y se volvió a pesar. Finalmente, se secó a temperatura ambiente.
5. Las briquetas se colocaron en un baño maría a 60 °C durante 30 minutos. Luego, pasaron por la mordaza Marshall y finalmente a una prensa hidráulica para obtener los valores de estabilidad y flujo.

En esta investigación se utilizó el Método Marshall, según lo indicado en el Manual de Transportes y Carreteras.

En relación a las pruebas estadísticas, para la estabilidad se utilizó la prueba ANOVA. La finalidad es determinar las diferencias significativas, ya que el valor de significación para cada tratamiento es superior a 0,05 y presenta una distribución normal. Por otro lado, como la significación para el flujo también es superior a 0,05, se utilizó la prueba ANOVA para identificar las características importantes de los datos, que tienen una distribución normal. En el caso de la relación estabilidad/flujo los tratamientos tienen significancias mayores a 0.05 por lo que los datos presentan distribución normal. Asimismo, se utilizó la prueba post hoc de tukey para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de los grupos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La implementación de neumáticos reciclados como agregado en la fabricación de pavimento asfáltico ha mostrado resultados prometedores en diversos aspectos. Este enfoque ha permitido reciclar grandes cantidades de neumáticos, reduciendo significativamente los residuos en vertederos y mitigando los riesgos ambientales asociados. Los estudios y ensayos realizados, que incluyen pruebas de porcentaje de vacíos, estabilidad y flujo, han demostrado que los pavimentos con neumáticos reciclados presentan una durabilidad y resistencia al desgaste superiores, prolongando su vida útil. Además, la incorporación de neumáticos reciclados ha contribuido a la reducción de los costos de producción.

Granulometría:

La curva granulométrica presenta el porcentaje de combinación de cada uno de los agregados, asimismo, muestra resultados óptimos de acuerdo al tamizaje realizado previamente para cernir el material de arena y piedra chancada que se han utilizado como agregados (Ver Figura 1). Asimismo, a partir del tamiz Numero 4 se retienen una mínima cantidad de partículas y pasa toda la arena que pueda estar contenida en alguno de los dos agregados. Luego, se tiene que la curva esta entre los valores esperados para tener un producto que pueda

generar las condiciones apropiadas para realizar la mezcla para el pavimento asfáltico, como se aprecia en la Figura 01 el gráfico de análisis granulométrico de la mezcla 0% de caucho granulado

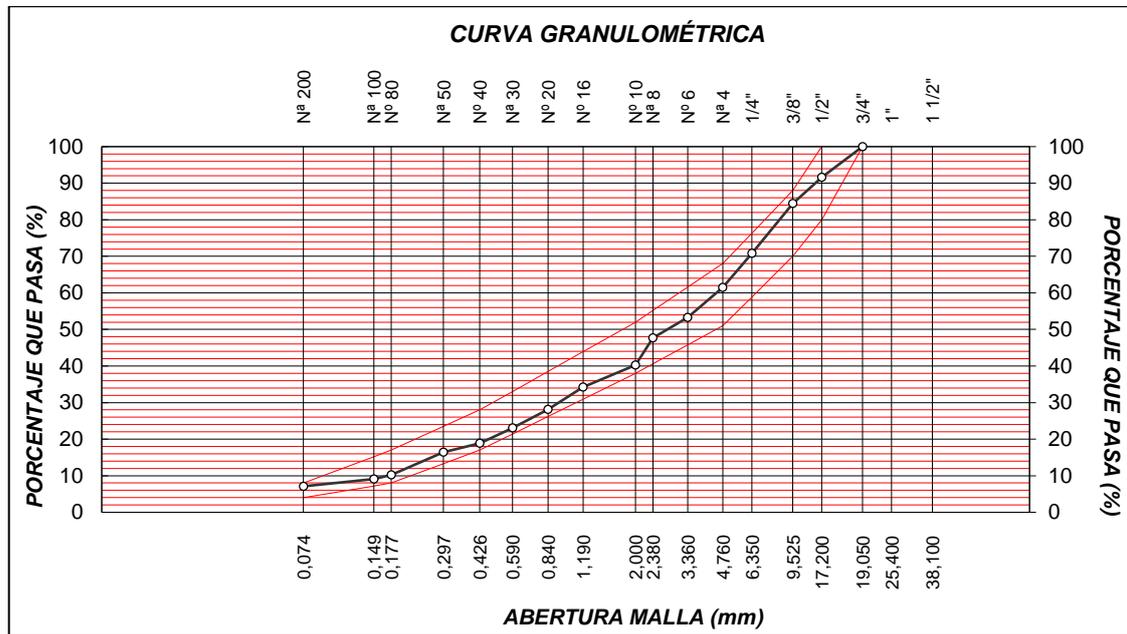


Figura 1. Resumen de resultados gráficos de mezcla al 0% de caucho granulado

Se aprecia de la figura la curva granulométría el porcentaje que pasa por el tamiz Nro. 200 es de 9% así mismo, para la malla Nro. 4 tiene 53.3% y finalmente la malla 3/4” con un 100%.

A continuación, la siguiente Tabla 1 proporciona un resumen detallado de la distribución del tamaño de las partículas en una combinación específica de agregados. A continuación, se presenta la tabla y su interpretación:

Tabla 1. Mezcla de agregados en el cálculo de la granulometría

Resumen de ensayo	
Proporciones de mezcla de agregados	
(1) Cant. Dorita - Piedra chancada 1/2"	0,3
(2) Cant. Dorita - Arena chancada	0,7
Proporciones en la mezcla resultante	
- Agregado grueso	0,39
- Agregado fino	0,61

Fuente: MTC E – 504 (MTC, 2013) Ensayo de resistencia de mezclas bituminosas mediante el empleo del dispositivo Marshall.

Se aprecia de la tabla las proporciones de mezcla de agregados de la Cant. Dorita – Piedra chancada un 30% y la Cant. Dorita Arena chancada un 70%, de lo mencionado las proporcionados en el mezcal resultante las proporciones fueron las siguientes 39% de agregado grueso y 61% de agregado fino.

A continuación, se presentan los gráficos de los resultados de los ensayos realizados a las muestras evaluadas, enfocándose en diversos parámetros críticos que determinan la calidad y el desempeño de la mezcla asfáltica sin la adición de caucho granulado. Estos ensayos incluyen mediciones de peso específico, estabilidad,

volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA), porcentaje de vacíos, flujo y vacío llenado con ligante asfáltico (VL).

A continuación, se presenta la Figura 2 en el cual se muestra el resumen de resultados de gráficos de mezcla al 0% de caucho granulado.

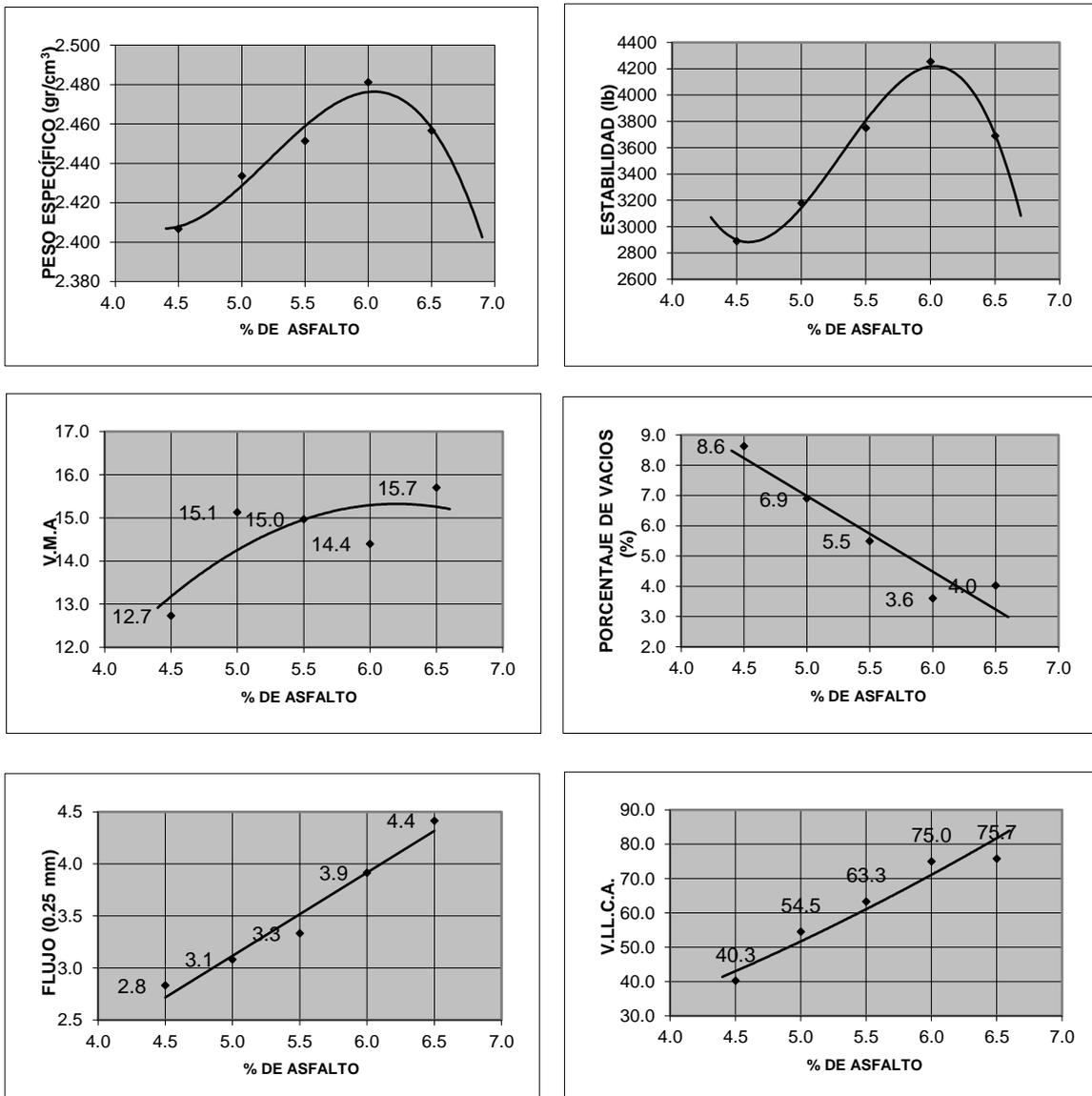


Figura 2. Resumen de resultados gráficos de mezcla al 0% de caucho granulado

En la Figura 3 se presentan los resultados correspondientes a la mezcla con un 0% de caucho granulado, donde se observan las siguientes características según el porcentaje de asfalto añadido:

- **Peso específico:**
 - 4,5% de asfalto: 2.410 gr/cm³
 - 5,0% de asfalto: 2.438 gr/cm³
 - 5,5% de asfalto: 2.448 gr/cm³
 - 6,0% de asfalto: 2.480 gr/cm³
 - 6,5% de asfalto: 2.459 gr/cm³
- **Estabilidad (en libras):**
 - 4,5% de asfalto: 2900 lb
 - 5,0% de asfalto: 3200 lb

- 5,5% de asfalto: 3780 lb
- 6,0% de asfalto: 4220 lb
- 6,5% de asfalto: 3700 lb
- **V.M.A.** (Voids in Mineral Aggregate, en %):
 - 4,5% de asfalto: 12.7%
 - 5,0% de asfalto: 15.1%
 - 5,5% de asfalto: 15.0%
 - 6,0% de asfalto: 14.4%
 - 6,5% de asfalto: 15.7%
- **Porcentaje de vacíos:**
 - 4,5% de asfalto: 8.6%
 - 5,0% de asfalto: 6.9%
 - 5,5% de asfalto: 5.5%
 - 6,0% de asfalto: 3.6%
 - 6,5% de asfalto: 4.0%
- **Flujo** (en mm):
 - 4,5% de asfalto: 2.8 mm
 - 5,0% de asfalto: 3.1 mm
 - 5,5% de asfalto: 3.3 mm
 - 6,0% de asfalto: 3.9 mm
 - 6,5% de asfalto: 4.4 mm

Los resultados para las mezclas con un 1% de caucho granulado son resumidos en gráficos adicionales en la mencionada figura.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que la mezcla con 1% de caucho granulado presenta los siguientes valores de peso específico: 2,405 gr/cm³ para el 4,5% de asfalto, 2,467 gr/cm³ para el 5,0% de asfalto, 2,456 gr/cm³ para el 5,5% de asfalto, 2,476 gr/cm³ para el 6,0% de asfalto y 2,438 gr/cm³ para el 6,5% de asfalto.

En el ensayo de estabilidad, los valores registrados fueron: 3442,3 lb para el 4,5% de asfalto, 4034,1 lb para el 5,0% de asfalto, 4925,1 lb para el 5,5% de asfalto, 4403,7 lb para el 6,0% de asfalto y 3683,5 lb para el 6,5% de asfalto.

Respecto al V.M.A. (volumen de vacíos en los agregados minerales), los resultados fueron: 12,7 para el 4,5% de asfalto, 14,0 para el 5,0% de asfalto, 14,8 para el 5,5% de asfalto, 14,6 para el 6,0% de asfalto y 16,3 para el 6,5% de asfalto.

En cuanto al porcentaje de vacíos, se obtuvieron los siguientes valores: 5,1% para el 5,0% de asfalto, 4,8% para el 5,5% de asfalto, 3,3% para el 6,0% de asfalto y 3,8% para el 6,5% de asfalto.

Finalmente, en el ensayo de flujo, los resultados fueron: 3,2 para el 4,5% de asfalto, 3,4 para el 5,0% de asfalto, 3,4 para el 5,5% de asfalto y 3,9 para el 6,0% de asfalto.

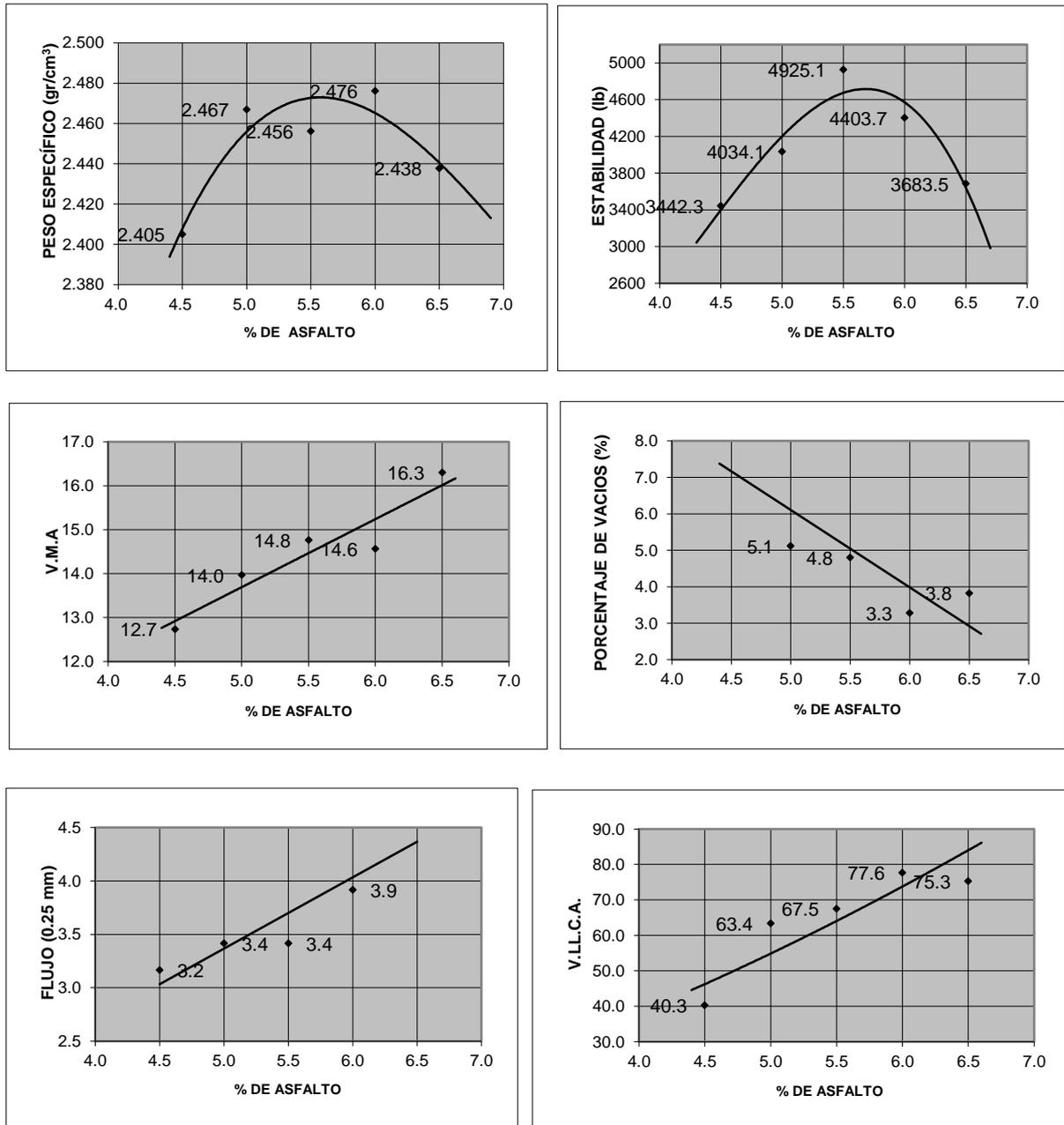


Figura 3. Resumen de resultados gráficos de mezcla al 1 % de caucho granulado

A continuación, se presenta la Figura 4, la cual muestra un resumen de los resultados gráficos para la mezcla con 2% de caucho granulado.

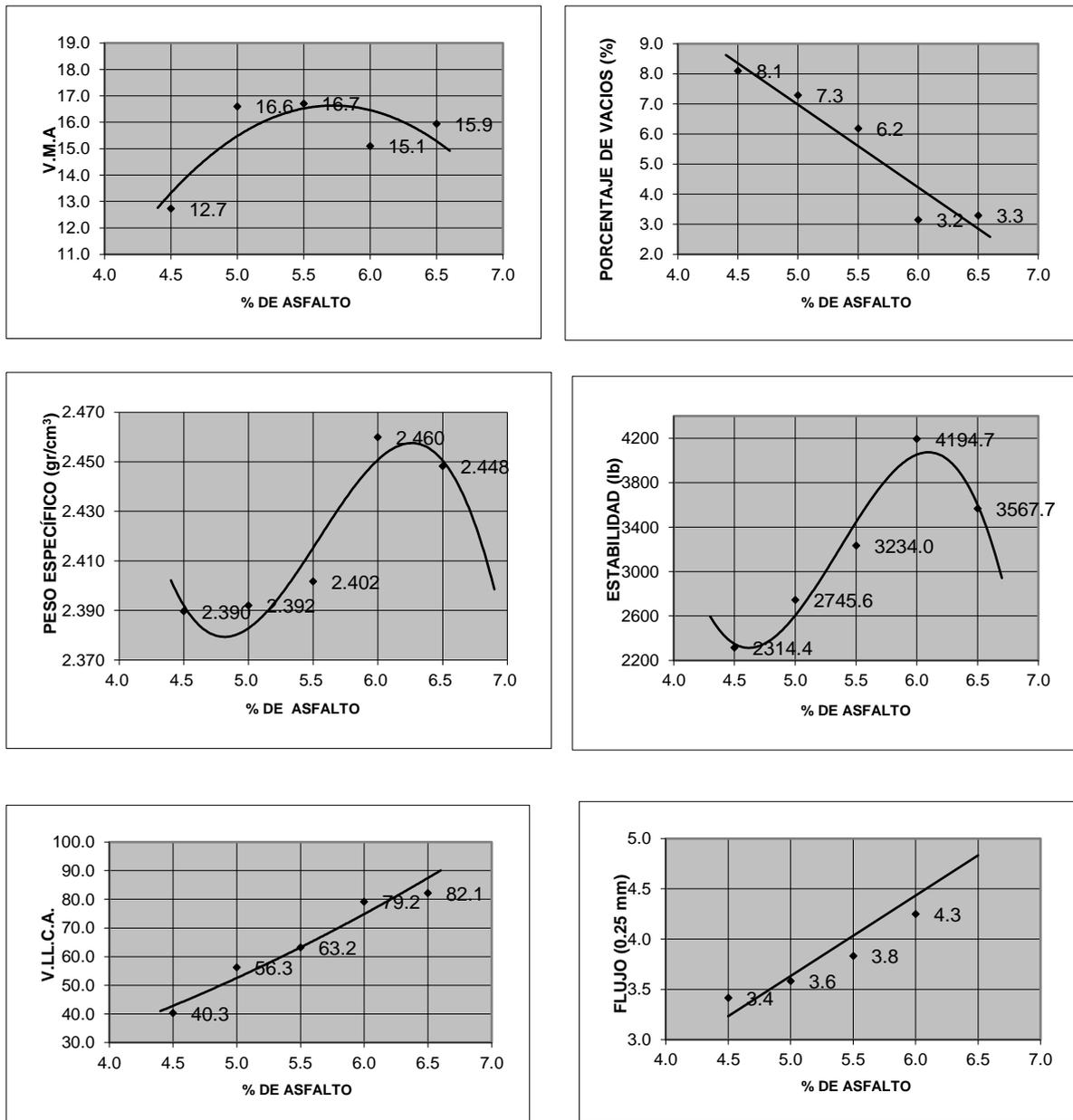


Figura 4. Resumen de resultados gráficos de mezcla al 2% de caucho granulado

De los resultados obtenidos se aprecia que, para la mezcla con 2% de caucho granulado, los valores de peso específico fueron los siguientes: para el 4,5% de asfalto, 2,390 gr/cm³; para el 5,0% de asfalto, 2,392 gr/cm³; para el 5,5% de asfalto, 2,402 gr/cm³; para el 6,0% de asfalto, 2,460 gr/cm³; y para el 6,5% de asfalto, 2,448 gr/cm³. En el ensayo de estabilidad, los valores obtenidos fueron: para el 4,5% de asfalto, 2314,4 lb; para el 5,0% de asfalto, 2745,6 lb; para el 5,5% de asfalto, 3234,0 lb; para el 6,0% de asfalto, 4194,7 lb; y para el 6,5% de asfalto, 3567,7 lb. En el ensayo de V.M.A., los resultados fueron: para el 4,5% de asfalto, 12,7; para el 5,0% de asfalto, 16,6; para el 5,5% de asfalto, 16,7; para el 6,0% de asfalto, 15,1; y para el 6,5% de asfalto, 15,9. Respecto al porcentaje de vacíos, los valores fueron: para el 4,5% de asfalto, 8,1%; para el 5,0% de asfalto, 7,3%; para el 5,5% de asfalto, 6,2%; para el 6,0% de asfalto, 3,2%; y para el 6,5% de asfalto, 3,3%. En el ensayo de flujo, se obtuvieron los siguientes resultados: para el 4,5% de asfalto, 3,4; para el 5,0% de asfalto, 3,6; para el 5,5% de asfalto, 3,8; y para el 6,0% de asfalto, 4,3.

Según los resultados obtenidos, en los tres casos de porcentajes de caucho (0%, 1% y 2%), tanto los flujos como los vacíos tienden a aumentar. Por lo tanto, la mezcla con 2% de caucho reciclado presenta mayores

condiciones de durabilidad en comparación con el material convencional. Asimismo, los valores de estabilidad tienden a aumentar inicialmente y luego disminuyen, lo que indica una buena cohesión y una mayor resistencia a las deformaciones en la mezcla con 2% de caucho reciclado. Finalmente, el índice de rigidez (relación estabilidad-flujo) aumenta significativamente en el material asfáltico mezclado con 2% de caucho granulado, según los datos obtenidos.

En la presente investigación, los resultados para la mezcla con 0% de caucho granulado muestran una tendencia predecible en las propiedades del pavimento asfáltico a medida que se incrementa el contenido de asfalto. El peso específico varía ligeramente, aumentando con el contenido de asfalto hasta alcanzar un punto máximo antes de disminuir levemente. La estabilidad también presenta un aumento hasta el 6,0% de asfalto, después de lo cual disminuye. El valor máximo de estabilidad registrado fue de 4220 lb con un 6,0% de asfalto. En cuanto al V.M.A. (volumen de vacíos en los agregados minerales), los resultados varían, pero se observan valores más altos en mezclas con mayor contenido de asfalto. El porcentaje de vacíos disminuye a medida que se incrementa el contenido de asfalto, mientras que el flujo aumenta de forma constante.

Para la mezcla con 1% de caucho granulado, se observan varios cambios significativos en las propiedades del pavimento. El peso específico es ligeramente menor que en la mezcla sin caucho, con un máximo de 2,476 gr/cm³. La estabilidad muestra una tendencia general de incremento con el aumento del contenido de asfalto, alcanzando un máximo de 4925,1 lb con un 5,5% de asfalto, superior a la mezcla sin caucho. Esto sugiere que la adición de caucho mejora la estabilidad del pavimento asfáltico. Los resultados de V.M.A. son relativamente similares a los de la mezcla sin caucho, mientras que el porcentaje de vacíos y el flujo aumentan ligeramente con el contenido de asfalto.

En la mezcla con 2% de caucho granulado, el peso específico es ligeramente menor en comparación con las otras mezclas, con un máximo de 2,460 gr/cm³. La estabilidad muestra un aumento significativo, alcanzando un máximo de 4194,7 lb con un 6,0% de asfalto, aunque este valor es inferior al de la mezcla con 1% de caucho. El V.M.A. tiende a ser más alto en esta mezcla, lo que indica una mejor distribución de los vacíos en los agregados minerales. El porcentaje de vacíos disminuye con el incremento del contenido de asfalto, mientras que el flujo es ligeramente mayor que en las otras mezclas, con un máximo de 4,3.

Estos resultados coinciden con los antecedentes de Navarrete (2019) y Maguiña (2019), quienes también encontraron mejoras en las propiedades del pavimento asfáltico al incorporar caucho granulado. Navarrete evidenció que la adición de caucho granulado mejora el flujo, la estabilidad y el porcentaje de vacíos del pavimento asfáltico, reportando valores de flujo de 14,44, 14,56, 14,89 y 15,33 para proporciones de 4%, 8%, 12% y 16% de residuos de caucho granulado, respectivamente. Para el porcentaje de vacíos, se obtuvieron 4,73%; 4,60%; 4,46% y 4,64%, y una estabilidad de 2785,78 lb, 2883,15 lb, 3018,59 lb y 2472,87 lb, respectivamente. Se concluye que la integración de caucho reciclado aumenta las características de porcentaje de vacíos, estabilidad y flujo, mejorando la eficacia de las propiedades del pavimento a medida que se incrementa la dosificación de caucho.

Maguiña (2019) encontró que la proporción del 3% de caucho reciclado en la mezcla mejora las propiedades físicas y mecánicas del asfalto convencional. Aunque nuestros resultados no incluyen una mezcla con exactamente 3% de caucho, la mezcla con 2% de caucho ya muestra mejoras significativas en términos de estabilidad y flujo, lo que sugiere que un aumento adicional de caucho podría seguir mejorando estas propiedades.

Ambos estudios previos concluyen que la integración de caucho reciclado mejora la eficacia y las propiedades del pavimento asfáltico, un hallazgo respaldado por nuestros resultados. La incorporación de caucho no solo mejora la estabilidad y el flujo del pavimento, sino que también reduce el porcentaje de vacíos, lo cual es crucial para la durabilidad del pavimento.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los diseños evaluados demuestran su conformidad con las especificaciones del Manual de Carreteras EG-2013 en términos de porcentaje de vacíos, estabilidad y flujo. La estabilidad más alta se registró a un nivel de 4649 lb en el tratamiento con 1% de caucho granulado, superando los tratamientos con 0% y 2%, donde este último presentó 3983 lb, el valor más bajo. En relación al flujo, el tratamiento con 1% mostró el menor valor, 3,9 mm, siendo superior al tratamiento con 0% y significativamente más bajo que el tratamiento con 2% de caucho granulado, que alcanzó 4,63 mm.

Adicionalmente, al evaluar la relación estabilidad/flujo, el tratamiento con 1% resultó ser el más eficiente, seguido por el de 0% y el de 2% con un valor de 3916 kg/cm. Sin embargo, considerando los criterios del

Manual de Carreteras que especifican un rango óptimo de 1700 a 4000 kg/cm para la combinación de concreto bituminoso, el tratamiento con 2% de caucho granulado emerge como el más adecuado. Esto demuestra que la incorporación de 2% de caucho granulado optimiza la relación estabilidad/flujo, cumpliendo efectivamente con las demandas normativas para la mezcla de concreto bituminoso.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo científico fue realizado gracias al apoyo brindado por la Dra. María Aliaga y sus asesorías técnicas en todo momento, la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y la Universidad Nacional de Trujillo por sus acertados aportes para el artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, C. M., & Martínez, G. S. (2019). *Estudio comparativo del envejecimiento a largo plazo de una mezcla con asfalto modificado con grano de caucho reciclado*. Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/93538fd6-51b7-4e30-974e-c1dd0a4fdaa9>
- Alfayez, S. A., Suleiman, A. R., & Nehdi, M. L. (2020). Reciclaje de Caucho de Neumáticos en Pavimentos Asfálticos: Estado del Arte. *Sostenibilidad*, 12(21), 1-15. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/9076>
- Bresi, S., Fiorentini, N., Huangy, J., & Losa, M. (2019). Modificador de caucho desmenuzado en pavimentos asfálticos para carreteras: estado del arte y estadísticas. *Recubrimientos*, 9(6), 1-22. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/6/384>
- Brito, R. J. (2021). *USO DE CAUCHO DE DESECHO EN LA ELABORACIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/1444/BIRLDP06T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Coronel, Y., & Altamirano, L. (2022). Cenizas y fibras utilizadas en la elaboración de concreto ecológico: una revisión de la literatura. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 25(49), 321-329. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.20814>
- Flores, C., & Escalón, L. (2016). Factibilidad del aprovechamiento energético de neumáticos usados en la gran minería del cobre mediante pirólisis. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 19(38), 11-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i38.13561>
- Hidalgo, J., & Alejandra, N. (2017). *Métodos de reutilización de llantas usadas: Selección y elaboración de nuevos productos*. Bogotá, Colombia. <http://bibliotecavirtualoducal.uc.cl:8081/handle/123456789/1548263>
- Maguiña, W. (2019). *Caucho reciclado de llantas en la mezcla de Asfalto a Compresión para mejorar las Propiedades Mecánicas [Tesis para maestría]*. Lima. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma. https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/2919/T030_31605837_M%20Magui%20c3%b1a%20Salazar%20Walther%20Te%20c3%b3filo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mantilla, F. J., & Castañeda, P. E. (2019). Estudio experimental del efecto del caucho reciclado y la asfaltita en el desempeño del asfalto. *DYNA*, 86(263), 257-263. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/69400/70009>
- MTC, N. (2013). *Manual de carreteras: Especificaciones Técnicas generales para construcción*. Lima -Perú. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf
- Navarrete, G. (2019). Diseño de mezclas asfálticas integrando residuos sólidos de la industria automovilística (elastómero) y de vías (pavimento asfáltico envejecido) en Manabí, Ecuador. *Industrial data*, 1-9. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15381/idata.v22i1.16523>
- Segovia, C. E., & Paco, M. A. (2020). *Análisis del aprovechamiento de neumáticos reciclados usados como aditivo en el asfalto*.
- Zhu, Y., Xu, G., & Ma, T. (2022). Prestaciones del asfalto caucho con contenido medio/alto de caucho triturado de neumáticos de desecho. *Construcción y Materiales de Construcción*, 335. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822011655>