

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil



INFLUENCIA DEL CAUCHO MOLIDO EN LAS PROPIEDADES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Rodrigo Alonso Dulanto Hugo

Código 20163047

Renzo Antonio Saldaña Arevalo

Código 20163565

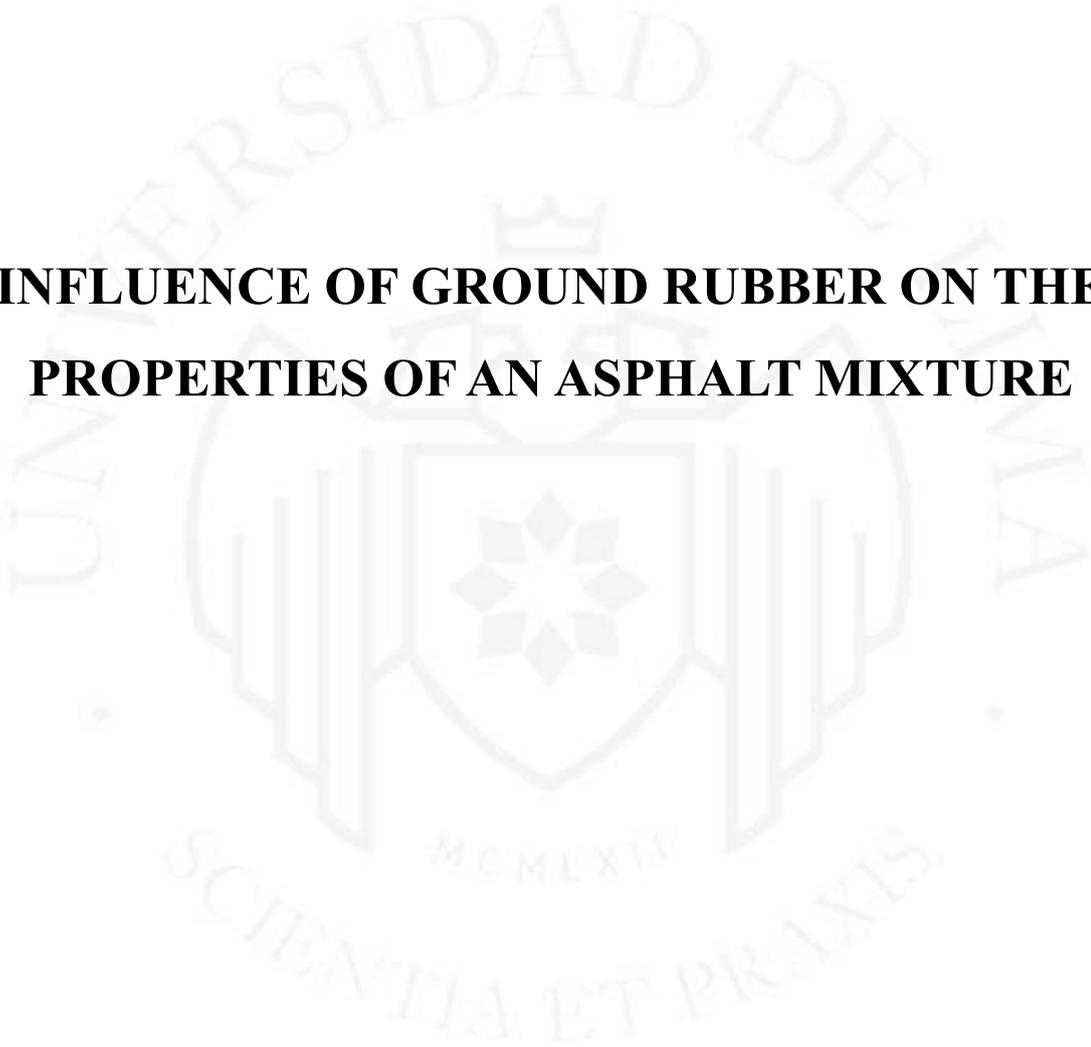
Asesor

Manuel Ricardo Madrid Argomedo

Lima – Perú

Junio de 2024





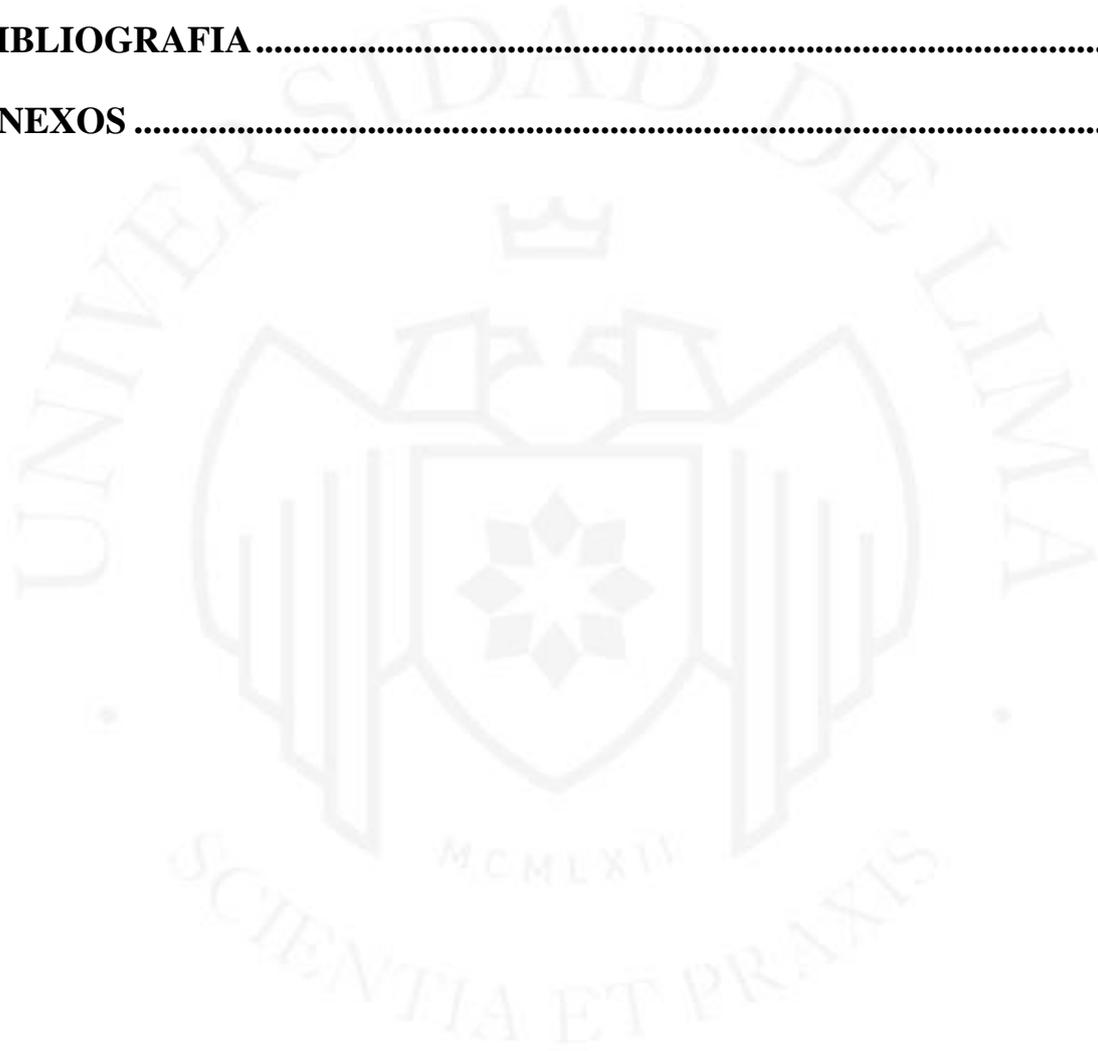
**INFLUENCE OF GROUND RUBBER ON THE
PROPERTIES OF AN ASPHALT MIXTURE**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema.....	1
1.3. Hipótesis.....	2
1.4. Justificación.....	2
1.5. Objetivos	3
1.6. Organización de la tesis	3
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Investigaciones a nivel nacional.....	5
2.2. Investigaciones a nivel internacional	6
2.3. Análisis del estado del arte.....	11
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	15
3.1. Aspectos relacionados a los asfaltos	15
3.1.1. Cemento asfáltico.....	15
3.1.2. Módulo de corte complejo	15
3.1.3. Viscosidad	15
3.1.4. Angulo de fase.....	16
3.2. Neumáticos en desuso	16

3.3. Mezcla asfáltica.....	16
3.3.1. Características físicas de la mezcla asfáltica	16
3.3.2. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas	18
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	19
4.1. Características de los materiales	19
4.1.1. Agregados pétreos.....	19
4.1.2. Caucho molido	21
4.1.3. Cemento asfáltico.....	23
4.2. Programa de ensayos.....	25
4.2.1. Ensayos de viscosidad y módulo de corte complejo.....	25
4.2.2. Ensayos Marshall	25
4.3. Equipos y procedimientos de ensayos	26
4.3.1. Ensayos de viscosidad y modulo	27
4.3.2. Equipo Marshall	28
4.4. Métodos de análisis de datos e interpretación.....	29
4.5. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.....	32
4.6. Determinación del porcentaje óptimo de caucho.....	33
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
5.1. Efecto del caucho molido en las propiedades reológicas del asfalto	35
5.1.1. Influencia del caucho en la estabilidad de la mezcla	39
5.1.2. Influencia del caucho en el flujo de la mezcla.....	41
5.1.3. Influencia del caucho en el VTM.....	42
5.1.4. Influencia del caucho en el VMA	43

5.1.5. Influencia del caucho en el VFA	44
5.1.6. Influencia del caucho en la densidad de la mezcla	45
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
6.1. Conclusiones	47
6.2. Recomendaciones.....	49
BIBLIOGRAFIA.....	50
ANEXOS	54



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Curva granulométrica de mezcla convencional.	20
Figura 4.2 Caucho molido.	22
Figura 4.3 Granulometría del caucho.	22
Figura 4.4 Cemento asfáltico PEN 60-70.	23
Figura 4.5 Equipo reómetro.	27
Figura 4.6 Muestra de asfalto y su placa de medición.	27
Figura 4.7 Inserción de muestra de asfalto en el reómetro.	28
Figura 4.8 Rotura de briquetas en prensa Marshall.	29
Figura 4.9 Rotura de briquetas después de Marshall.	29
Figura 5.1 Viscosidad en función de tiempo	36
Figura 5.2 Módulo de corte complejo en función de la temperatura.	37
Figura 5.3 Angulo de cambio de fase en función de temperatura.	39
Figura 5.4 Estabilidad y porcentaje de ligante.	40
Figura 5.5 Flujo y porcentaje de ligante.	41
Figura 5.6 VTM y porcentaje de ligante.	42
Figura 5.7 VMA y porcentaje de ligante	43
Figura 5.8 VFA y porcentaje de ligante.	44
Figura 5.9 Densidad y porcentaje de ligante	45

ÍNDICE DE TABLAS

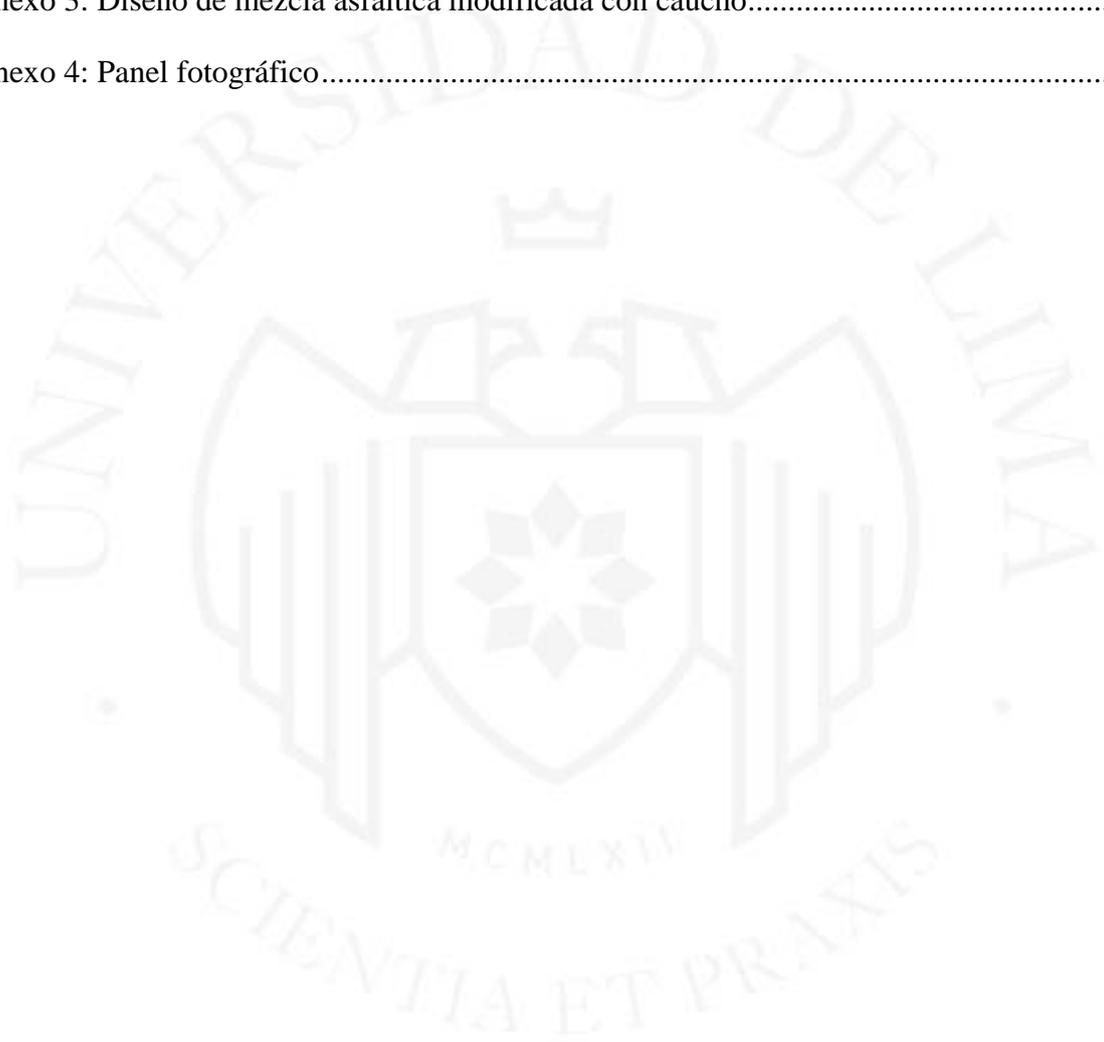
Tabla 2.1 Investigaciones revisadas.	13
Tabla 3.1 Selección de tipo de cemento asfáltico.....	15
Tabla 4.1 Gradación para Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC).	19
Tabla 4.2 Requerimientos para los agregados gruesos.....	20
Tabla 4.3 Requerimientos para los agregados finos.....	21
Tabla 4.4 Resultados de viscosidad mezcla convencional	24
Tabla 4.5 Resultados de módulo de corte complejo mezcla convencional.	24
Tabla 4.6 Resultados de ángulo de cambio de fase mezcla convencional.	24
Tabla 4.7 Cantidad de muestras de viscosidad y módulo de corte complejo.	25
Tabla 4.8 Cantidad de muestras para el asfalto óptimo por prensa Marshall	25
Tabla 4.9 Cantidad de muestras para el caucho óptimo por prensa Marshall.	26
Tabla 4.10 Requisitos para mezcla de concreto bituminoso	30
Tabla 4.11 Requisitos para porcentajes de vacíos agregados minerales (VMA)	30
Tabla 4.12 Requisitos mezcla asfáltica vacíos llenos con asfalto (VFA).....	31
Tabla 4.13 Parámetros de una mezcla asfáltica método Marshall.....	31
Tabla 4.14 Muestras para la estimación del óptimo porcentaje de asfalto	32
Tabla 4.15 Resultados de ensayos realizados con diferentes porcentajes de asfalto.....	32
Tabla 4.16 Verificación de criterio para obtención de asfalto óptimo.	33
Tabla 4.17 Porcentaje de caucho en diferentes proporciones.....	33
Tabla 4.18 Resultados de cada briqueta con diferentes porcentajes de caucho.	34
Tabla 4.19 Verificación de criterio para obtención de caucho óptimo.....	34
Tabla 5.1 Resultados de ensayo de viscosidad	36
Tabla 5.2 Resultados de módulo de corte complejo.....	37

Tabla 5.3 Resultados de ángulo de cambio de fase.	38
Tabla 5.4 Análisis comparativo de resultados de mezcla modificada.....	40
Tabla 5.5 Tabla de diseño de mezcla asfáltica con caucho	46



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Ensayos de caracterización de agregados	55
Anexo 2: Diseño de mezcla asfáltica convencional	67
Anexo 3: Diseño de mezcla asfáltica modificada con caucho.....	70
Anexo 4: Panel fotográfico.....	74



RESUMEN

La buena ejecución de las obras de construcción vial es fundamental para el progreso de un país en vías de desarrollo, ya que trae consigo una mejor conectividad, mayor crecimiento económico, integración regional, mayor acceso a los servicios sociales y una disminución de la pobreza. Por ello, resulta esencial garantizar la durabilidad de las carreteras con el fin de reducir los costos de mantenimiento y maximizar los beneficios a largo plazo, generando un impacto positivo tanto en el desarrollo sostenible como en el bienestar poblacional. En el Perú, los proyectos de infraestructura vial son ejecutados por manuales técnicos específicos. Sin embargo, carece de directrices detalladas sobre la implementación del caucho granulado de neumáticos en mezclas asfálticas modificadas, a pesar del impacto positivo en la durabilidad y la capacidad para mantener su forma frente a fuerzas exógenas. En adición, el uso de caucho molido en las mezclas asfálticas permite reducir el impacto medioambiental que los desechos de neumáticos generan anualmente. La presente investigación tiene como propósito analizar el desempeño de una mezcla asfáltica modificada, incorporando caucho granulado de neumáticos reciclado. Empleando el equipo Marshall se estableció el contenido óptimo de asfalto para la mezcla convencional. Se prepararon probetas con distintos porcentajes de caucho (0.5%, 1% y 1.5%) respecto al peso de la mezcla asfáltica y a partir de estos resultados se estableció el diseño óptimo de la mezcla con caucho. La mezcla asfáltica así diseñada está compuesta por asfalto tipo PEN 60/70, con caucho molido reciclado de un tamaño menor a 1.8 mm. Los resultados indican que la mezcla modificada con caucho óptimo cumple con los criterios de diseño, presentando mejor estabilidad y flujo respecto a la mezcla convencional, lo que contribuye a un mejor desempeño.

Palabras clave: Asfalto modificado, caucho molido, Marshall, módulo de corte complejo, viscosidad.

ABSTRACT

The successful execution of road construction projects is fundamental for the progress of a developing country, as it brings better connectivity, increased economic growth, regional integration, greater access to social services, and reduced poverty. Therefore, it is essential to ensure the durability of roads to reduce maintenance costs and maximize long-term benefits, generating a positive impact on sustainable development and population well-being. In Peru, road infrastructure projects are executed according to specific technical manuals. However, there is a lack of detailed guidelines on the implementation of crumb rubber from tires in modified asphalt mixtures, despite its positive impact on durability and its ability to maintain shape under external forces. Additionally, the use of ground rubber in asphalt mixtures helps reduce the environmental impact caused by the annual generation of tire waste. This research aims to analyze the performance of a modified asphalt mixture incorporating crumb rubber from recycled tires. Using the Marshall equipment, the optimal asphalt content for the conventional mixture was established. Specimens were prepared with different percentages of rubber (0.5%, 1%, and 1.5%) by weight of the asphalt mixture, and from these results, the optimal design of the rubber-modified mixture was determined. The designed asphalt mixture consists of PEN 60/70 type asphalt with recycled ground rubber smaller than 1.8 mm. The results indicate that the optimally modified mixture with rubber meets the design criteria, showing better stability and flow compared to the conventional mixture, contributing to improved performance.

Keywords: Complex shear modulus, ground rubber, Marshall, modified asphalt, viscosity.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La disposición final de los neumáticos o llantas desechados es un grave problema para el medioambiente. Por ejemplo, en el año 2016 el parque automotriz del Perú generó alrededor de 1,750,000 neumáticos desechados, los cuales equivalen a 45,000 toneladas de residuos sólidos contaminantes (Ramirez et al., 2018). Esos neumáticos no son desechados de manera adecuada, terminando en botaderos informales, los cuales, se contabilizan alrededor de 1585 a nivel nacional según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

Por otro lado, de acuerdo a Campaña et al. (2015) el asfalto modificado con caucho mejora la durabilidad de la mezcla porque evita el agrietamiento del asfalto a temperaturas elevadas y; mejora la adherencia en superficies mojadas, disminuyendo los accidentes de tránsito.

En esta investigación se emplea la prensa Marshall, para obtener el óptimo porcentaje de agregados y asfalto, que produzca un diseño de mezcla de características adecuadas. Según Sequeira y Cervantes (2014) la metodología de diseño Marshall permite determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados y asfalto.

1.2. Planteamiento del problema

Los neumáticos usados representan un problema para el medio ambiente debido a que están compuestos por materiales no biodegradables. En el territorio peruano, durante el año 2014, se incorporaron al parque vehicular 55,673 toneladas de llantas según el MINAM (2021). Para el año 2018, esta cantidad ascendió a 92,629 toneladas, las cuales eventualmente se transformarán en neumáticos fuera de uso.

Asimismo, el neumático al ser altamente inflamable, presenta un peligro para los lugares de acopio de desechos y en el caso de un posible incendio provocaría la emisión de gases nocivos para el ser humano y en el medio que nos rodea.

1.3. Hipótesis

El uso de caucho triturado de neumáticos reciclados en la mezcla asfáltica mejorará sus propiedades físicas, incrementando su resistencia a la deformación permanente. Por lo tanto, se espera que el caucho triturado tenga un impacto positivo en la estabilidad y el flujo de la mezcla asfáltica.

1.4. Justificación

En el Perú, el uso de caucho molido en mezclas asfálticas se ha limitado a temas de estudio. Esta investigación propone una forma de aprovechar los residuos que el caucho de neumáticos en desuso genera, lo que contribuye al incremento del reciclaje en la industria, y a su vez proporciona una mezcla asfáltica alternativa con características físicas beneficiosas para su desempeño en proyectos de construcción vial. Entre las características más destacadas de una mezcla asfáltica se incluye viscosidad, que señala la adherencia del asfalto a los agregados; el módulo de corte complejo, que refleja la resistencia a la deformación; estabilidad, indica la resistencia al desplazamiento y deformación ante las cargas del tránsito; y el flujo, que muestra el potencial de deformación permanente en las mezclas.

La norma peruana MTC EG-2013 no presenta un amplio desarrollo sobre la implementación del caucho en las mezclas asfálticas, únicamente presenta una sección de especificaciones del cemento asfáltico modificado con caucho, la cual, brinda los parámetros de penetración, viscosidad, punto de inflamación, recuperación elástica y resiliencia, pero no menciona el porcentaje de caucho a emplear o su granulometría. A diferencia de la norma mexicana, la cual, en su libro Características de los Materiales (2006) presenta en el capítulo 2 (Calidad de Materiales Asfálticos Modificados), definen, clasifican y presentan los requisitos de cemento asfáltico, AC-5 y AC-20 modificados con caucho, como viscosidad, ángulo de fase, penetración, módulo de corte dinámico y granulometría del caucho. También, EE. UU tiene la norma ASTM D6114/D6114M: *Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder* (2019), la cual presenta la viscosidad y penetración que debe tener el asfalto con caucho y que en esta no debe haber partículas de caucho retenido en la malla N°8. En Colombia su norma y especificaciones, (Instituto nacional de vías 2012), presenta el artículo 413-13, suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado, el cual brinda información sobre los requerimientos que debe tener el grano de caucho, humedad, contenido de polvo mineral

y su gradación. También las especificaciones físicas del asfalto modificado con caucho, la viscosidad, penetración, punto de ablandamiento, resiliencia y tamaño del caucho (malla que pasa). Estos países han empleado el caucho en las mezclas asfálticas, debido a la mejora que proporciona el uso del caucho en su estabilidad, proporcionando mayor capacidad de resistencia al desplazamiento, disminuyendo el vacío de los agregados y el flujo de la mezcla convencional tiende a ser más rígido que la mezcla modificada.

Esta investigación también contribuye con el objetivo 11 de los ODS (objetivos y metas de desarrollo sostenible), en la medida que los resultados permitieron reducir el impacto ambiental producto de los desechos municipales y de otro tipo proveniente de las ciudades.

1.5. Objetivos

El objetivo general es determinar el porcentaje de asfalto óptimo de una mezcla asfáltica y evaluar la influencia en sus propiedades (estabilidad y flujo) al modificarla con diferentes porcentajes de caucho (0.5%, 1% y 1.5%) empleando la prensa Marshall y el reómetro, además de comparar los resultados con otras investigaciones.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Evaluar el efecto del caucho molido en la viscosidad y módulo de corte complejo del asfalto.
- Evaluar el efecto del caucho molido en la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica mediante la prensa Marshall.
- Describir una mezcla asfáltica modificada con caucho molido, definiendo sus parámetros de diseño para su implementación en la pavimentación vial.

1.6. Organización de la tesis

La investigación realizada se ha estructurado en 6 capítulos.

El capítulo 1: Introducción; presenta la importancia de esta investigación, la problemática planteada, su justificación y los objetivos desarrollados.

El capítulo 2: Estado del arte; es la recopilación de fuentes bibliográficas, investigaciones y ensayos existentes relacionados con el tema de estudio.

En el capítulo 3: Marco Teórico; es la sección que detalla las propiedades reológicas del asfalto como ángulo de fase, el módulo de corte complejo y la viscosidad. Las propiedades y características físicas de la mezcla asfáltica para su diseño.

En el capítulo 4: Caracterización de materiales y programa experimental; se describe las características de los materiales empleados como el asfalto, agregados y caucho. El programa de ensayos a realizar para obtener el porcentaje de asfalto óptimo y el caucho óptimo. También se describe los equipos utilizados y los procedimientos realizados para el equipo Marshall y el reómetro. Finalmente, se describe el método de análisis e interpretación de los resultados.

En el capítulo 5: Discusión y análisis de resultados; en este capítulo se describen los resultados obtenidos del equipo Marshall y del equipo reómetro para obtener las propiedades reológicas del asfalto. Se presenta una discusión crítica de los resultados y se compara con otras investigaciones.

En el capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones; la tesis finaliza estableciendo un conjunto de conclusiones y recomendaciones, que responden a los objetivos de investigación planteados. Asimismo, se sugiere la elaboración de mezclas con otros porcentajes de caucho en función de ampliar los alcances de la investigación, y la inclusión de una sección de características y parámetros a considerar en la elaboración de mezclas asfálticas modificadas con caucho en la normativa peruana.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1. Investigaciones a nivel nacional

En la ingeniería vial, diversas investigaciones Granados (2017), Godoy (2020), Villagaray (2017), Contreras y Mamani (2019) se han centrado en mejorar las características físicas de la mezcla asfáltica, explorando el uso de caucho proveniente de neumáticos como elemento modificador. Este breve análisis expone cuatro tesis desarrolladas por autores peruanos, que investigan la comparación entre el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas tradicionales y las modificadas con caucho.

La tesis de Granados (2017), titulada *Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional*, tiene como objetivo determinar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada con caucho en comparación con la mezcla tradicional. Tanto para la mezcla tradicional como para la modificada, el contenido óptimo de asfalto fue del 5.5%, siendo del 0.5% el contenido de caucho para la mezcla modificada. Los resultados del equipo Marshall muestran que la estabilidad de la mezcla convencional (1350 kg) es menor que la de la modificada (2175 kg), y que el flujo de la mezcla modificada con caucho (3.45 mm) es mayor al de la mezcla convencional (3.33 mm), concluyendo que la mezcla asfáltica modificada tiene una mayor resistencia a la deformación.

En la tesis de Godoy (2020), titulada *Influencia mecánica del polvo de caucho procedente de neumáticos en la pavimentación de carreteras en la ciudad de Lima*, la investigación se enfocó en determinar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica mediante la incorporación de caucho utilizando el ensayo Marshall. Tanto para la mezcla tradicional como para la modificada, el contenido óptimo de asfalto fue del 5.2%, incluyendo un 0.5% de caucho para la mezcla modificada. Los resultados del equipo Marshall indican que la estabilidad de la mezcla convencional (1252 kg) es menor que la de la modificada (2001 kg), y que el flujo de la mezcla modificada con caucho (3.43 mm) es mayor que el de la mezcla convencional (3.33 mm), concluyendo que la mezcla asfáltica modificada

presenta una mayor resistencia a la deformación, lo que sugiere una influencia positiva de los gránulos de caucho en la mezcla asfáltica.

La tesis de Villagaray (2017), titulada *Aplicación de caucho reciclado en un diseño de mezcla asfáltica para el tránsito vehicular de la avenida trapiche-comas (remanso) 2017*, tuvo como objetivo determinar la aplicación del caucho reciclado como material para la mezcla asfáltica, diseñando una mezcla más flexible y duradera. Se prepararon mezclas asfálticas con tres porcentajes de caucho (0.5%, 1% y 1.5% respecto al peso de la mezcla) y con un contenido óptimo de asfalto del 5.6%, siendo del 0.5% el porcentaje óptimo de caucho. Los resultados de estabilidad de la mezcla modificada con el caucho óptimo (1440.4 kg) fueron mayores que los de la mezcla convencional (1389.4 kg), demostrando cómo la adición del caucho contribuye a la resistencia ante deformaciones permanentes.

La tesis de Contreras y Mamani (2019), titulada *Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con mezcla asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados*, tuvo como objetivo promover el uso del caucho granular como componente en el diseño de mezclas asfálticas. El porcentaje óptimo de asfalto fue del 6.5% y se emplearon tres porcentajes de caucho (0.5%, 1% y 1.5% respecto al peso de la mezcla), obteniendo el porcentaje óptimo de caucho (1%) mediante el equipo Marshall. La mezcla asfáltica modificada con caucho presentó mejoras en sus propiedades físicas.

2.2. Investigaciones a nivel internacional

Las diversas investigaciones internacionales Pineda y Rey (2012), Rondon et al. (2009), Ramirez (2006), Ismail et al. (2022), Li et al. (2022) Alsheyab et al. (2023), Almusawi et al. (2020), Siswanto et al. (2017), Qadr y Talabany (2023), Wulandari y Tjandra, 2017; Issa, 2016; Khalilia et al. (2019), Li et al. (2020), Khalaf et al. (2023), Gawdzik et al. (2020) realizadas sobre las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas modificadas con caucho han abordado el impacto de los diferentes porcentajes de caucho en el comportamiento y rendimiento del asfalto. Dichos estudios revelan patrones significativos respecto a los porcentajes de caucho adicionados, debido a que un exceso de caucho podría comprometer la estabilidad y viscosidad de la mezcla.

La investigación de Ramirez (2006), *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*, empleó tres porcentajes de caucho (0.5%, 1% y 1.5% respecto al peso de la mezcla) para mezclas con

porcentajes de asfalto de 5.5%, 6% y 6.5%. Se encontró que el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla convencional fue del 5.5%, mientras que para la mezcla con 0.5% de caucho fue del 5.7%, para la mezcla con 1% de caucho fue del 5.9%, y para la mezcla con 1.5% de caucho los porcentajes de asfalto estaban fuera del rango óptimo. Se observó que el porcentaje óptimo de asfalto aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de caucho molido.

La investigación de Rondó et al. (2009), titulada *Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos* evaluó con el equipo Marshall el cambio que experimentan las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. El porcentaje óptimo de asfalto fue 5.5% y se emplearon tres porcentajes de caucho (0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% respecto al peso de la mezcla). La mezcla modificada con 0.5% de caucho mostró la mayor estabilidad (1390 kg), mientras que la mezcla convencional con el porcentaje óptimo de asfalto tuvo una estabilidad menor (890 kg). Además, la rigidez de la mezcla modificada (420 kg/mm) presentó un mayor flujo respecto a la mezcla convencional (250 kg/mm), concluyendo que la adición de caucho mejora las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

La investigación de Pineda y Rey (2012), *Mezcla asfálticas drenante modificada con grano de caucho reciclado*, utilizó tres porcentajes distintos de caucho (10%, 14% y 18%) respecto al peso del asfalto en una mezcla asfáltica con 6% de asfalto óptimo. Utilizando el equipo Marshall, encontraron que la estabilidad de la mezcla modificada con 18% de caucho (2480 kg) es mayor que la de la mezcla tradicional (1650 kg). Además, en los ensayos de adherencia, la mezcla con 18% de caucho mostró mayor adherencia sobre sus agregados.

El artículo realizado por Ismail et al. (2022), titulado *Rheological properties of rubber modified asphalt binder in the UAE (University of Sharjah)*, empleó cinco porcentajes de caucho (5%, 10%, 15%, 20% y 25% respecto al peso de la mezcla) y un 10.7% de asfalto óptimo. Realizaron ensayos para obtener la viscosidad y viscosidad rotacional. Sus resultados mostraron un aumento proporcional en la viscosidad respecto al mayor porcentaje de caucho. Sin embargo, aumentar el CR (*Crumb Rubber*) más allá del 10% no logra alcanzar los requisitos de viscosidad de un máximo de 3 Pa.s.

Li et al. (2022), en su artículo *Study on rheological properties of Graphene oxide/rubber crowd Composite - modified asphalt*, investigaron la influencia reológica del caucho (0.55% respecto al asfalto) en el asfalto. Los resultados mostraron que el

módulo complejo a 45°C del asfalto con caucho (35 kPa) es mayor que el del asfalto solo (26 kPa). Además, al aumentar gradualmente la temperatura, se observa que el módulo complejo del asfalto con caucho y el asfalto tienden a disminuir. Sin embargo, el asfalto con caucho presenta un valor mayor que el asfalto solo. Concluyeron que la adición del caucho al asfalto mejora la resistencia a altas temperaturas.

El artículo de Alsheyab et al. (2023), titulado *Effect of waste tire rubber on properties of asphalt cement and asphalt concrete mixtures: state of the art*, abordaron el efecto de la adición del caucho molido en la mezcla asfáltica. Empleando 5 porcentajes de caucho (0%, 5%, 10%, 15% y 20% respecto al peso de la mezcla), la viscosidad del asfalto aumentó respecto a la cantidad de caucho añadido, pero aumentó rápidamente cuando el porcentaje de caucho fue de 0.83%. Asimismo, al emplear el equipo Marshall, sus resultados mostraron un aumento de estabilidad al incrementar el contenido de caucho hasta 0.83%, siendo su estabilidad de 1600 kg y la mezcla convencional tuvo una estabilidad de 1300 kg. Llegaron a la conclusión de que el mejor rendimiento de la mezcla asfáltica modificada es con 0.55% de caucho.

El trabajo de Almusaw et al. (2019), titulado *Effects of crumb rubber size and concentration on Marshall parameters of rubberized asphalt mixture*, se enfocó en la influencia del caucho en la mezcla asfáltica empleando el equipo Marshall. Se utilizaron cinco porcentajes de asfalto (4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%) y tres porcentajes de caucho (0%, 1.5% y 2.5% respecto al peso de la mezcla asfáltica), siendo el diseño óptimo de la mezcla asfáltica el de 0.25% de caucho con 5% de asfalto. Los resultados del Marshall mostraron que la estabilidad y la densidad decrecen con el incremento de porcentaje de caucho, porque el caucho granular tiene comportamiento elástico dificultando la densificación de masa mediante la compactación reduciendo la densidad de la mezcla, además la estabilidad de la mezcla asfáltica depende de la cohesión del asfalto, y el caucho tiende a reducir la estabilidad de la mezcla debido a las propiedades elásticas de las partículas del caucho. Concluyendo que la estabilidad de la mezcla depende de la cohesión del asfalto y que emplear porcentajes caucho mayores a 1.5% tiende a reducir la estabilidad de la mezcla asfáltica.

El estudio de Siswanto et al. (2017), titulado *Marshall properties of asphalt concrete using crumb rubber modified of motorcycle tire waste*, se centró en explicar el efecto del caucho granular proveniente de neumáticos de motocicletas en la mezcla asfáltica, utilizando el equipo Marshall. Se emplearon siete contenidos de caucho (0%,

0.5%, 1%, 1.5%, 3%, 4.5% y 6% respecto al peso de la mezcla) con un contenido de asfalto de 5.6%. Los resultados mostraron que la mayor estabilidad fue de 1390 kg con un 1% de caucho. Además, la adición de caucho de más de 1.5% en la mezcla provocó un flujo mayor de 4.5 mm.

El artículo de Qadr y Talabany (2023), titulado *Compaction effort evaluation of crumb rubber modified hot mix asphalt*, se enfocó en el estudio para obtener el mismo rendimiento de una mezcla asfáltica elaborada con Marshall que de un asfalto elaborado con un compactador giratorio Superpave. Sus resultados mostraron que el porcentaje óptimo de asfalto para Marshall varió entre 4.3% y 4.5%, y para Superpave entre 4.30% y 4.50%. Además, la mezcla asfáltica de Superpave mostró una mayor estabilidad, siendo esta mezcla más económica. Para encontrar el contenido de caucho óptimo para ambos, emplearon cuatro porcentajes de caucho (6%, 9%, 12% y 15% respecto al peso del asfalto). La mezcla con 9% de caucho mostró una máxima estabilidad, siendo la seleccionada como óptima. Concluyeron que el diseño de la mezcla Superpave proporcionó mayores resistencias a la tracción y a la compresión que el diseño de la mezcla Marshall para las mezclas modificadas y convencionales, mientras que las mezclas modificadas proporcionaron mayores resistencias a la tracción y a la compresión que las mezclas convencionales.

El artículo de Wulandari y Tjandra (2017), titulado *Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete mixture*, tuvo como objetivo investigar el efecto del caucho en la mezcla asfáltica. Utilizaron dos porcentajes de caucho (1% y 2% respecto al peso de la mezcla) provenientes de dos mallas diferentes (#40 y #80). Además, el porcentaje óptimo de asfalto empleado en la mezcla convencional fue del 6% y en las mezclas modificadas fue del 5.5%. Según los resultados del Marshall, la mezcla con 2% de caucho y más fino obtuvo una estabilidad mayor en comparación con las otras muestras. Los resultados de flujo mostraron que las mezclas con 2% de caucho presentaron un flujo menor que las demás, mientras que las mezclas con 1% de caucho tuvieron un flujo similar a la mezcla convencional. Los autores recomiendan la adición de caucho como aditivo a la mezcla asfáltica, ya que los resultados cumplen con los requisitos estándar.

El estudio de Issa (2016), titulado *Effect of adding waste tires rubber to asphalt mix*, se centra en el cambio de las propiedades de la mezcla asfáltica después de agregarle caucho granular proveniente de neumáticos. Realizaron ensayos con tres porcentajes de asfalto (4.5%, 5% y 5.55%) y cuatro porcentajes de caucho (0%, 5%, 10% y 20% respecto

al peso de asfalto). Utilizando el equipo Marshall, determinaron que la estabilidad es mayor con un 10% de caucho. Concluyeron que es recomendable el uso de caucho de neumáticos en pavimentos asfálticos, y que la cantidad adecuada de caucho añadido es del 10% en peso de asfalto.

El artículo de Khalilia et al. (2019), titulado *Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method*, se enfoca en la influencia del caucho en la mezcla asfáltica empleando tres porcentajes de caucho (10%, 15% y 20% respecto al peso de la mezcla), dos medidas de malla (#20 y #40) y tres tipos de asfalto (AC20, PG64-16 y PG58-22). Utilizaron el método de Proceso de Jerarquía Analítica para determinar la mejor combinación de asfalto y caucho granulado, basándose en las propiedades reológicas. Observaron que la viscosidad aumentó con el incremento del caucho, así como la temperatura de falla, que también aumentó. Concluyeron que el rango óptimo de caucho en el asfalto está entre el 10% y el 15% respecto al peso del asfalto, y que la mezcla modificada con asfalto AC20 y PG64-16 tiene mejores propiedades que la mezcla con asfalto PG58-22.

El artículo de Li, et al. (2020), titulada *Analysis of the influence of production method, crumb rubber content and stabilizer on the performance of asphalt rubber*, evaluó la influencia del caucho en la mezcla asfáltica. Emplearon cinco porcentajes de asfalto (15%, 17.5%, 20%, 22.5% y 25% respecto al peso del asfalto). Después de utilizar el equipo Marshall, concluyeron que el porcentaje óptimo de caucho varía entre el 20% y el 25% respecto al peso de la mezcla. Además, afirmaron que la adición de caucho granulado mejora significativamente el rendimiento del asfalto a altas temperaturas y su resistencia al agrietamiento y a la formación de rodaduras.

El artículo de Khalaf et al. (2023), titulado *The Impact of crumb-rubber on the mechanical characteristics of modified asphalt Mixture*, se centró en el efecto del caucho en la mezcla asfáltica y cómo afectaba sus propiedades reológicas y físicas. Para encontrar el asfalto óptimo, realizaron muestras con cuatro porcentajes de asfalto (4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%), y para encontrar el caucho óptimo, emplearon cuatro porcentajes de caucho (5%, 10%, 15% y 20% respecto al peso del asfalto). Descubrieron que agregar caucho al concreto asfáltico aumenta su estabilidad, pero reduce su flujo. Además, la viscosidad aumenta con el incremento del caucho. Esto indica que el uso de caucho puede ayudar a que las mezclas asfálticas resistan la deformación permanente.

El artículo de Gawdzik et al. (2020), titulado *The use of de-vulcanized recycled rubber in the modification of road bitumen* determinó las propiedades de la mezcla modificada a altas temperaturas de 190 °C o 220 °C para obtener sus características, utilizando asfalto 50-70. Sus resultados mostraron que la estabilidad mejora a los 220 °C. Estos datos indican que la adición de caucho y la temperatura de modificación tienen un impacto significativo en la calidad del betún. Se obtuvieron estructuras homogéneas y espacialmente estables cuando se añadió un 10% de caucho a 220 °C. Es importante destacar que estos betunes contenían solo un 2% de SBS y que el caucho era responsable de sus propiedades.

El artículo de Al-Fayyadh y Al-Mosawe (2023), titulado *The effect of rubber crumbs on Marshall properties for warm mix asphalt* determinó que de los 3 porcentajes de caucho (1%, 1.5% y 2% respecto al peso de la mezcla) el que presentó mejores resultados respecto a la mezcla asfáltica convencional fue la mezcla con 1% de caucho, mejorando la estabilidad y el flujo de la mezcla. En sus ensayos empleó asfalto 40/50 y un caucho que pasa la malla N°40.

2.3. Análisis del estado del arte

Las investigaciones concluyen que adicionar el caucho a las mezclas asfálticas mejora sus propiedades mecánicas y su resistencia a la deformación. Sin embargo, el porcentaje óptimo de caucho puede variar según la metodología y los objetivos específicos de cada estudio. Además, estas investigaciones tienen porcentajes de caucho Respecto al Peso del Asfalto (RPA) o Respecto al Peso de la Mezcla (RPM).

En el ámbito nacional, la tesis de Granados (2017) concluye que la mezcla asfáltica modificada con (0.5%) caucho (RPM) tiene mayor estabilidad y resistencia a la deformación que la convencional. Godoy (2020) muestra resultados similares, indicando que la mezcla modificada con (0.5%) caucho (RPM) presenta mayor estabilidad y resistencia a la deformación. Villagaray (2017) demuestra que la adición de caucho con (0.5%) caucho (RPM) contribuye a la resistencia ante deformaciones permanentes. Asimismo, Contreras y Mamani (2019) concluyen que la mezcla asfáltica modificada con caucho con (0.5%) caucho (RPM) presenta mejoras en sus propiedades físicas de estabilidad y flujo.

Por otro lado, las investigaciones internacionales revelan un patrón consistente. Ismail et al. (2022) demuestran que un aumento en el porcentaje de caucho afecta la viscosidad y

viscosidad rotacional del asfalto. Li et al. (2022) concluyen que la adición de 0.55% de caucho (RPM) mejora la resistencia a altas temperaturas. Alsheyab et al. (2023) sugieren que el mejor rendimiento de la mezcla asfáltica modificada se logra con un 0.55% de caucho (RPM). Almusaw et al. (2019) indican que la estabilidad de la mezcla disminuye con el aumento del porcentaje de caucho. Siswanto et al. (2017) demuestran que el porcentaje óptimo de caucho es del 1% (RPM). Qadr y Talabany (2023) comparan el rendimiento de las mezclas asfálticas elaboradas con Marshall, concluyendo que Superpave proporciona mayores resistencias. Wulandari y Tjandra (2017) sugieren que la adición de caucho es deseable, y Issa (2016), quien trabajó con porcentajes de caucho respecto al peso del asfalto, indica que el 10% de caucho (RPA) mejora la estabilidad. Khalilia et al. (2019) concluyen que el rango óptimo de caucho está entre el 10% y el 15% (RPA). Li et al. (2020) sugieren que el porcentaje óptimo de caucho varía entre el 20% y el 25% (RPA). Khalaf et al. (2023) encuentran que la adición de caucho aumenta la estabilidad y reduce el flujo de la mezcla asfáltica. Además, Gawdzik et al. (2020) demuestran que la estabilidad mejora a temperaturas más altas con la adición de caucho. Finalmente Al-Fayyadh y Al-Mosawe (2023) demostraron que la mezcla con 1% de caucho presentó mejor estabilidad y flujo respecto a la mezcla convencional.

La Tabla 2.1 compila los datos de los investigadores anteriormente mencionados a lo largo del estado del arte, tales como porcentaje de caucho molido empleado en la mezcla asfáltica modificada, y el porcentaje y tipo de asfalto presente en la mezcla.

Los porcentajes de caucho en esta tesis se refieren al peso total de la mezcla, no al del asfalto. Por ejemplo, 0.5% de caucho en la mezcla equivale al 10% respecto al asfalto; 1% equivale al 20%, y 1.5% equivale al 30%

Tabla 2.1
Investigaciones revisadas.

Investigador	Año	% Caucho	% Asfalto	Tipo Asfalto	Ubicación
Rodríguez y Moreno	2012	10%, 14% y 18% (RPA)	6%	PEN 60-70	Colombia
Quintana et al.	2009	0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% (RPM)	6.50%	MDC-2	Colombia
Nayade Ramirez	2006	0.5%, 1% y 1.5% (RPM)	5.5%, 6% y 6.5%	CA 60/80	Santiago de Chile
José Luis Granados	2017	0.5%, 1%, 1.5% y 2% (RPM)	5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%	PEN 60-70	Perú
Nefi Godoy	2020	0.5%, 1% y 2.5% (RPM)	4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%	PEN 60-70	Perú
Edwin Villagaray	2017	0.5%, 1% (RPM)	4.5%, 5%, 6%, 6.5%	PEN 60-70	Perú
Contreras y Mamani	2019	0.5%, 1% y 1.5% (RPM)	6.50%	PEN 120/150	Perú
Ismail et al.	2022	5%, 10%, 15%, 20% y 25% (RPA)	-----	PEN 60-70	UAE
Li et al.	2022	0.55% (RPM)	-----	A-grade 70#	China
Alsheyab et al.	2023	5%, 10%, 15% y 20% (RPA)	-----	-----	China
Almusawi et al.	2020	1.5% y 2.5% (RPM)	4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%	AC14	Turquía
Siswanto et al.	2017	0.5%, 1%, 1.5%, 3%, 4.5%, y 6% (RPM)	5.60%	PEN60/70	Indonesia
Qadr y Talabany	2023	6%, 9%, 12% y 15% (RPA)	4.3% a 4.5%	PG 70-16	Iraq
Wulandari y Tjandra	2017	1% y 2% (RPM)	5.50%	PEN 60/70	Indonesia
Yazan Issa	2016	5%, 10% y 20% (RPA)	4.5%, 5% y 5.55%	PEN 70/80	Arabia Saudita
Khalilia et al.	2019	10%, 15% y 20% (RPA)	-----	AC20 y PG64-16	USA
Li et al.	2020	15%, 17.5%, 20%, 22.5% y 25% (RPA)	-----	SK90#, SK70# y AH70#	China
Khalaf et al.	2023	5%, 10%, 15% y 20% (RPA)	4, 4.5, 5, 5.5, y 6.0%	40-50	Iraq

(continúa)

(continuación)

Gawdzik et al.	2020	10% y 15% (RPA)	-----	50/70	Polonia
Al-Fayyadh y Al-Mosawe	2023	1%, 1.5% y 2% (RPM)	4, 4.3, 4.6 y 4.9%	40-50	Iraq

Nota: RPA: Respecto al Peso del Asfalto y RPM: Respecto al Peso de la Mezcla.



CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1. Aspectos relacionados a los asfaltos

3.1.1. Cemento asfáltico

El asfalto según Villafana y Ramírez (2019) es un compuesto derivado del petróleo que está constituido por hidrocarburos densos y se presenta de color negro. A temperatura ambiente, puede variar en consistencia entre sólido y semisólido. Sin embargo, al calentarse a temperaturas altas, el asfalto se vuelve líquido, lo que facilita su unión a los agregados. El asfalto muestra una excelente capacidad para adherirse a las partículas de los agregados y funciona eficazmente como agente impermeabilizante. Además, tienen gran resistencia a los ácidos, álcalis, bases y sales.

De acuerdo a la Tabla 3.1, el cemento asfáltico que se debe usar para una zona como Lima es el PEN60-70, lo cual significa que tiene una penetración entre 60 a 70 décimas por milímetro.

Tabla 3. 1

Selección de tipo de cemento asfáltico.

Temperatura media anual			
24°C o más	24°C-15°C	15°C-5°C	Menos de 5°C
40-50 o 60-70 modificado	60-70	85-100 y 120-150	Asfalto modificado

Fuente: Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (Ministerio de transportes y comunicaciones EG-2013)

3.1.2. Módulo de corte complejo

Según el AASHTO T315-19, el módulo de corte complejo (G^*) es un indicador de la rigidez o resistencia del ligante asfáltico a la deformación bajo carga.

3.1.3. Viscosidad

Según el estándar AASHTO T316-13, la relación entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de corte se denomina coeficiente de viscosidad. Este coeficiente es una medida

de la resistencia al flujo del líquido. Comúnmente se le llama viscosidad. La unidad en el sistema internacional es el Pascal por segundo (Pa.s).

3.1.4. Angulo de fase

Según el AASHTO T315-19, es el ángulo de fase (δ) en radianes entre una deformación sinusoidal aplicada y la tensión sinusoidal resultante en un modo de prueba de deformación controlada, o entre las tensiones aplicadas y la deformación resultante en un modo de prueba de tensión controlada.

3.2. Neumáticos en desuso

Los neumáticos en desuso según Correa (2018) son materiales fundamentales utilizados en la fabricación de neumáticos incluyen caucho natural, así como cauchos sintéticos como el *SBS* (estireno butadieno estireno) y el *SBR* (caucho estireno y butadieno). Además, de estos componentes bases, emplean otros materiales como acero, materiales textiles y una variedad de aditivos. Estos aditivos abarcan el humo negro, aceites, dióxido de titanio, sílice, sulfuro y ácidos grasos.

3.3. Mezcla asfáltica

3.3.1. Características físicas de la mezcla asfáltica

De acuerdo con el Instituto del Asfalto (1982), una muestra de mezcla asfáltica preparada en el laboratorio puede analizarse para evaluar su efectividad potencial en el diseño de pavimentos. Este análisis se centra en cuatro características de la mezcla y su posible influencia en su comportamiento general. Estas características incluyen:

1. Densidad de la mezcla: Este factor es crucial, ya que una alta densidad en el pavimento final es fundamental para lograr una durabilidad óptima. Además, la densidad de la mezcla está influenciada por la cantidad de vacíos presentes, ya que a medida que aumenta el porcentaje de vacíos, la densidad de la mezcla tiende a disminuir.

$$Densidad \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Peso \text{ del espécimen}(g)}{Volumen \text{ del espécimen} (cm^3)} \quad (3.1)$$

2. Porcentaje de Vacíos del Aire o Vacíos del Total de la Mezcla (VTM): Son pequeños espacios de aire que se encuentran entre los agregados recubiertos en la mezcla compactada. Es esencial que la mezcla gradada tenga cierto nivel de vacíos para permitir el flujo adecuado del asfalto durante la compactación final.

Se establece un rango de porcentaje de vacíos aceptable, que oscila entre el 3 y el 5 por ciento. Un nivel inferior al 3% puede resultar en exudación de asfalto, donde el exceso de este se expulsa hacia la superficie de la mezcla. Por otro lado, un contenido por encima del 5% puede ocasionar la formación de aberturas en la mezcla, lo que permite la entrada de agua y aire, conduciendo al deterioro.

$$VTM = \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) * 100 \quad (3.2)$$

Donde Gmb es la gravedad específica bulk de la mezcla compactada y Gmm es la gravedad específica Rice de la mezcla

3. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA): Son los espacios de aire presentes entre las partículas de agregado en la mezcla, los cuales incluyen tanto los espacios vacíos como aquellos llenos de asfalto. Mantener valores mínimos adecuados de VMA es crucial para garantizar un espesor duradero de la película de asfalto.

$$VMA = \left(1 - \frac{Gmb * (1 - Pb)}{Gsb}\right) \quad (3.3)$$

Donde Gsb es la gravedad específica bulk de los agregados y Pb es el contenido de asfalto por peso de mezcla total

4. Contenido de asfalto: Es fundamental determinar con precisión la proporción de asfalto en la mezcla tanto en el laboratorio como en la obra. El contenido ideal de asfalto en una mezcla varía según las propiedades del agregado, como su granulometría y capacidad de absorción.
5. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA): El porcentaje de vacíos llenos con asfalto, conocido como VFA, representa la proporción de los espacios entre las partículas de agregado (VMA) que están ocupados por asfalto. VFA excluye el asfalto que ha sido absorbido por el agregado.

$$VFA = \left(\frac{VMA - VTM}{VMA}\right) * 100 \quad (3.4)$$

3.3.2. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Según el Instituto del Asfalto (1982), las mezclas asfálticas en caliente son efectivas cuando se diseñan, producen y colocan para lograr las propiedades deseadas. Diversas propiedades influyen en la calidad de los pavimentos de mezcla en caliente, como la estabilidad, que es la capacidad de resistir el movimiento y la deformación causados por las cargas de tráfico. Los recubrimientos estables mantienen su forma después de usos repetidos, mientras que los inestables pueden desarrollar ondulaciones. La durabilidad es la capacidad de resistir el deterioro de los agregados, los cambios en las propiedades del asfalto y la delaminación debido a la exposición al clima y al tráfico. La impermeabilidad es la capacidad de resistir el paso de aire y agua a través de la mezcla, relacionada con la porosidad de la mezcla compactada. La trabajabilidad se refiere a la facilidad de colocación y compactación de la mezcla del pavimento, mejorable ajustando el diseño de la mezcla, el tipo de agregado o el tamaño de partícula. La flexibilidad es la capacidad de la superficie asfáltica para soportar movimientos y asentamientos graduales de la capa base sin agrietarse.

La resistencia a la fatiga es la capacidad de soportar el desgaste repetitivo causado por el tráfico y está influenciada por la proporción de huecos y la viscosidad del asfalto. A mayor proporción de poros, menor resistencia a la fatiga. La resistencia al deslizamiento es la capacidad de la superficie de la carretera para minimizar el deslizamiento de las ruedas, especialmente en condiciones húmedas, lograda con áridos de grano grueso. El flujo representa la deformación vertical total de la muestra bajo carga máxima, indicando la posibilidad de deformación permanente en mezclas densas.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Características de los materiales

4.1.1. Agregados pétreos

Los agregados empleados en la mezcla tienen características granulométricas definidas del Manual de Carreteras del MTC (EG-2013) tipo MAC-2 (ver Tabla 4.1). La curva granulométrica de los agregados empleados se muestra en la Figura 4.1, se observa que se encuentra dentro del uso granulométrico indicado. Para un análisis más detallado se presenta otras tablas y figuras en el Anexo A.

Tabla 4.1

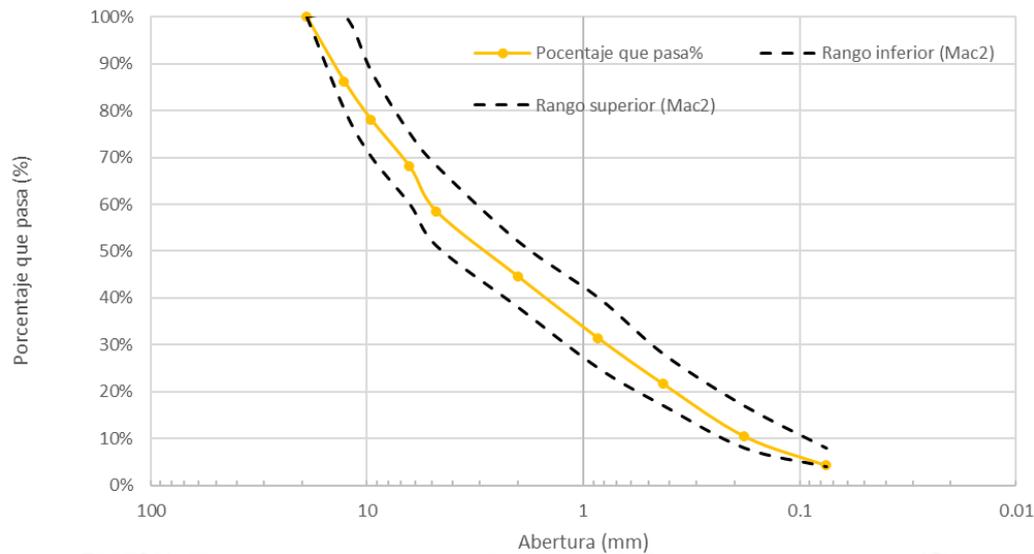
Gradación para Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC).

Tamiz	Porcentaje que pasa			Agregados empleados	Caucho empleado
	MAC-1	MAC-2	MAC-3		
25.0 mm (1")	100				
19.0mm (3/4")	80-100	100		100.00%	
12.5mm (1/2")	67-85	80-100		86.16%	
9.50mm (3/8")	60-77	70-88	100	77.99%	
6.35mm (1/4")				68.02%	
4.75mm (N.º4)	43-54	51-68	65-87	58.38%	
2.36mm (N.º8)					99.08%
2.00 mm (N.º10)	29-45	38-52	43-61	44.58%	97.26%
1.18 mm (N.º16)					92.30%
0.85 mm (N.º20)				31.39%	
0.6 mm (N.º30)					11.38%
0.425 mm (N.º40)	14-25	17-28	16-29	21.58%	4.49%
0.3 mm (N.º50)					1.58%
0.25 mm (N.º60)					0.86%
0.18 mm (N.º80)	8-17	8-17	9-19	10.46%	
0.075 mm (N.º200)	4-8	4-9	5-10	4.21%	

Nota: Adaptado de Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (Ministerio transporte y comunicaciones EG-2013).

Figura 4.1

Curva granulométrica de mezcla convencional.



En las Tablas 4.2 y 4.3 se muestra la lista de los ensayos que se realizaron a los agregados junto con el valor necesario que el agregado debe cumplir para que se permita su uso en una mezcla asfáltica. En el Anexo D se puede observar la realización de los ensayos de agregados.

Tabla 4.2

Requerimientos para los agregados gruesos.

Ensayo	Norma	Requerimiento Altitud (msnm)		Resultados propios
		< 3000	> 3000	
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.	---
Abrasión los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.	11.76%
Adherencia	MTC E 517	95	95	---
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% máx.	35% máx.	---
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.	2.90%
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70	6.27/93.7
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.	---
Absorción	MTC E 206	1.0% máx.	1.0% máx.	1.00%

Nota: Adaptado de Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (Ministerio transporte y comunicaciones EG-2013).

Tabla 4.3*Requerimientos para los agregados finos.*

Ensayo	Norma	Requerimiento Altitud (msnm)		Resultados propios
		< 3000	> 3000	
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40	---
Equivalente de arena	MTC E 114	60	70	---
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 min	35 min	---
Índice de Plasticidad (malla N°200)	MTC E 111	4 máx.	NP	3.38
Absorción	MTC E 205	0.5% máx.	0.5% máx.	0.5%
Azul metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.	---
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.	---
Durabilidad (al sulfato de magnesia)	MTC E 209	--	18% máx.	---

Nota: Adaptado de Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (Ministerio transporte y comunicaciones EG-2013).

4.1.2. Caucho molido

El caucho reciclado usado, obtenido mediante trituración mecánica y separación de materiales de neumáticos usados, fue tamizado a través de un tamiz de tamaño N°16 (1.18 mm), tal como se muestra en la Figura 4.2. La Figura 4.3 muestra la distribución de tamaños del caucho molido. El caucho se obtuvo de la distribuidora industriales Ramos de caucho granular, la cual tritura de manera mecánica los neumáticos usados para obtener el caucho granular.

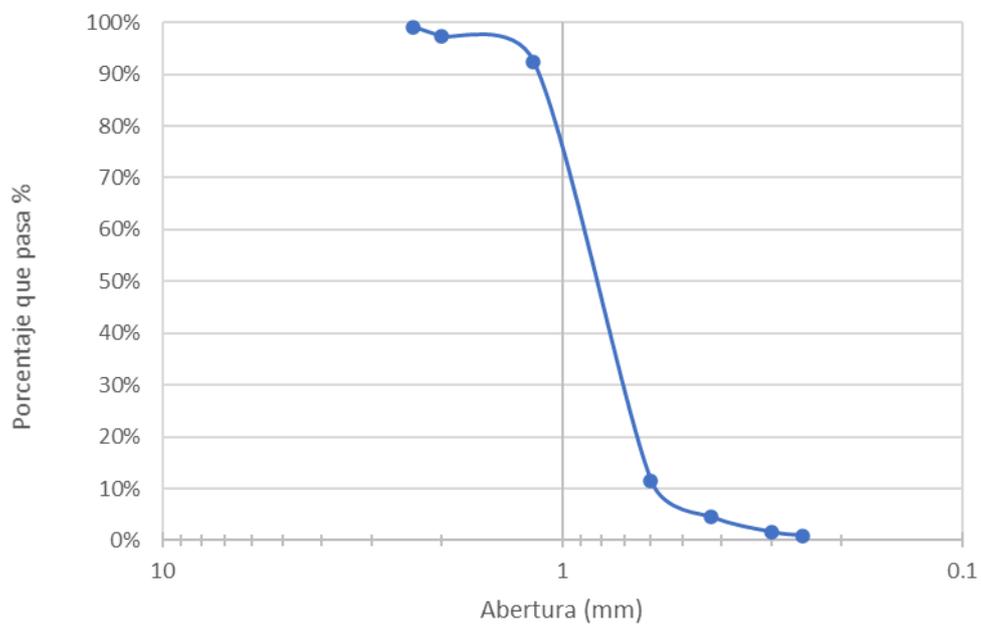
Figura 4.2

Caucho molido



Figura 4.3

Granulometría del caucho

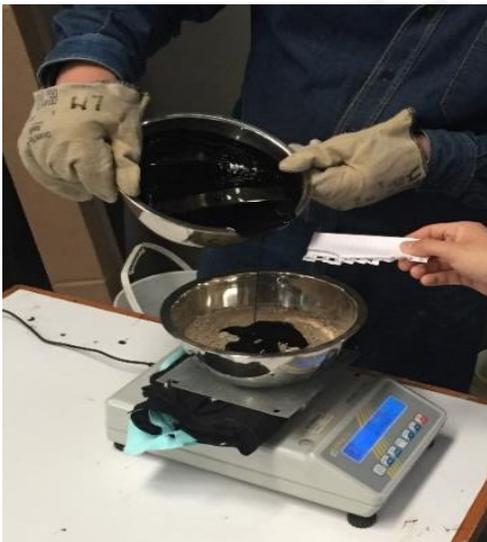


4.1.3. Cemento asfáltico

El tipo de asfalto a usar es el PEN 60-70. Este material fue adquirido de INDUSTRIAS K&C S.A.C que se dedica a la venta y distribución asfalto. Este mismo asfalto se empleó para Marshall, el cual se puede ver en la Figura 4.4, siendo añadido a los agregados. Durante la mezcla el asfalto se calentó a una temperatura de 150°C.

Figura 4.4

Cemento asfáltico PEN 60-70



Las características reológicas se enfocan en el funcionamiento interno de los materiales cuando estos se deforman por la aplicación de un esfuerzo. El reómetro se utiliza para determinar la deformación y el comportamiento de flujo de todo tipo de materiales. Los dos tipos de pruebas más usuales son de rotación para obtener la viscosidad y la oscilación para obtener el módulo de corte complejo.

Los resultados de las pruebas de viscosidad del asfalto empleada en la investigación se presentan en la tabla 4.4. La viscosidad promedio obtenida de los ensayos realizados es 1.256 Pa.s.

Tabla 4.4*Resultados de viscosidad mezcla convencional*

	Velocidad rotacional	Viscosidad	Torque	Temperatura	Tasa de corte	Esfuerzo de corte
Símbolo	n	h	M	T	g	t
Unidad	[1/min]	[Pa·s]	[mN·m]	[°C]	[1/s]	[Pa]
Prueba 1	20	1.211	0.097	135	26.2	31.715
Prueba 2	20	1.288	0.104	135	26.2	33.739
Prueba 3	20	1.209	0.097	135	26.2	31.667
Prueba 4	20	1.315	0.106	135	26.2	34.433
Promedio	20	1.256	0.101	135	26.2	32.888

Cada tipo de asfalto tiene una resistencia a la deformación bajo carga, es decir un módulo de corte. Se realizó un ensayo reológico para su obtención, a la vez se obtuvo el del Angulo de fase, el cual varía entre 0° a 90° grados Celsius, entre más alto sea, mayor será su viscosidad. En las tablas 4.5 y 4.6 se presentan el módulo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) del asfalto, respectivamente.

Tabla 4.5*Resultados de módulo de corte complejo mezcla convencional.*

Temperatura (C°)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio (kPa)
64	2.4323	3.044	2.754	2.744
70	1.229	1.547	1.389	1.388
76	0.644	0.809	0.719	0.724

Tabla 4.6*Resultados de ángulo de cambio de fase mezcla convencional.*

Temperatura (C°)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
64	77.337	77.350	76.820	77.169
70	78.902	78.862	78.492	78.752
76	79.319	79.509	79.390	79.406

4.2. Programa de ensayos

4.2.1. Ensayos de viscosidad y módulo de corte complejo

Para obtener la viscosidad se realizó 3 ensayos con asfalto solo y otros 3 ensayos con asfalto con caucho, lo mismo para el módulo de corte. En la Tabla 4.7 se muestra las cantidades totales de muestras ensayadas. Los porcentajes ensayados corresponden al diseño óptimo tanto de la mezcla asfáltica convencional como de la modificada. Estos fueron seleccionados porque cumplen con los parámetros para una mezcla asfáltica conforme lo indica la tabla 4.9, la cual está más adelante.

Tabla 4.7

Cantidad de muestras de viscosidad y módulo de corte complejo.

Cantidad de muestras	3	3
Asfalto (%) + Caucho (%)	5%	
Porcentaje de caucho	0%	0.5%
Porcentaje de asfalto	5%	4.5%

Nota: Los porcentajes son respecto al peso total de la mezcla.

4.2.2. Ensayos Marshall

Este estudio contempla dos etapas de trabajo, en la primera se desarrolló un diseño de mezcla asfáltica en caliente de empleando la prensa Marshall. A partir, de los resultados del diseño de mezcla, se obtiene el contenido óptimo de asfalto. En esta etapa se elaboraron 12 probetas. En la Tabla 4.8 se muestra la cantidad de probetas correspondientes a cada porcentaje de asfalto. En esa tabla se presenta los porcentajes respecto al peso de la mezcla, la cual es de 1200 g.

Tabla 4.8

Cantidad de muestras para el asfalto óptimo por prensa Marshall

Cantidad de muestras	3	3	3	3
Porcentaje de asfalto	4.5%	5%	5.5%	6%

En la segunda etapa se evalúa la influencia del caucho molido, en el comportamiento de la mezcla asfáltica. En esta etapa se trabaja con mezcla asfáltica que contiene el porcentaje de asfalto óptimo obtenido en la etapa anterior. Se preparó 9 probetas y fueron sometidas a pruebas de estabilidad y fluencia empleando la prensa Marshall. Los porcentajes escogidos fueron seleccionados en función de los valores empleados en

investigaciones de otros autores. Se observó que los porcentajes de caucho utilizados oscilaban entre 0.5% y 2.5% respecto al peso de total de la mezcla, así como también los valores cuyos porcentajes eran mayores al 2% estaban fuera de los rangos establecidos.

En la Tabla 4.9 se presenta la cantidad de probetas que se realizaron para determinar el efecto del caucho molido en la mezcla asfáltica modificada y poder compararla con los resultados de una mezcla convencional. En esa tabla se presenta los porcentajes respecto al peso total de la mezcla (la cual es de 1200 g).

Tabla 4.9

Cantidad de muestras para el caucho optimo por prensa Marshall.

Cantidad de muestras	3	3	3
Asfalto (%) + Caucho (%)		5%	
Porcentaje de caucho	0.5%	1%	1.5%
Porcentaje de asfalto	4.5%	4%	3.5%

4.3. Equipos y procedimientos de ensayos

Los ensayos se ejecutaron en el Laboratorio de pavimentos de la Universidad de Lima. Todos los equipos se encuentran en perfecto estado y debidamente calibrados. Los ensayos se han realizado siguiendo cuidadosamente los siguientes procedimientos de ensayo.

- AASHTO- T316-13- Método Estándar de Prueba para la Determinación de la Viscosidad del Ligante Asfáltico Utilizando un Viscómetro Rotacional.
- AASHTO- T315-19- Método Estándar de Prueba para Determinar E las Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico un Reómetro de Cizalla Dinámica (DSR).
- MTC E 504-Resistencia de Mezclas Bituminosas empleando el aparato Marshall.

4.3.1. Ensayos de viscosidad y modulo

El tipo de reómetro que se utilizo fue de la marca SmartPave 102 de Anton Paar, como se observa en la Figura 4.5. El cual tiene un rango de temperatura de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Su torque mínimo de rotación es de $5\mu\text{ Nm}$ y de oscilación $2\mu\text{ Nm}$, en ambos casos su máximo torque es de $200\mu\text{ Nm}$.

Figura 4.5

Equipo reómetro



Para la preparación del asfalto se calentó a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ para luego colocarlo en los moldes 25 mm de diámetro. En la Figura 4.6 se observa del lado izquierdo la placa de medición para el módulo de corte y en la derecha la placa para obtener la viscosidad.

Figura 4.6

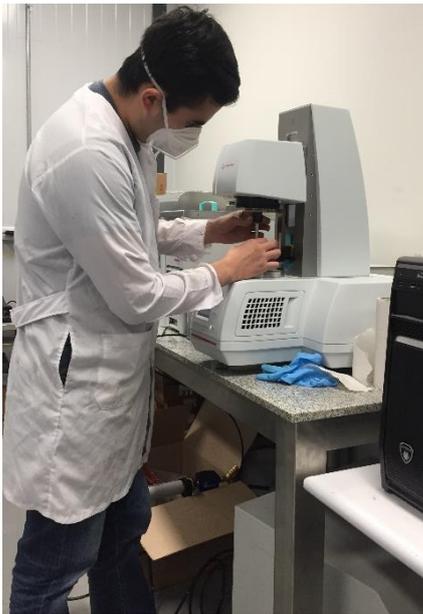
Muestra de asfalto y su placa de medición



Para el ensayo se procedió a calentar el asfalto hasta alcanzar un nivel de fluidez que permita verter en los moldes. Una vez que la muestra alcance la suficiente rigidez para poder ser desmoldada, se procedió a colocarlo en el porta muestras precalentado del equipo como se observa en la Figura 4.7.

Figura 4.7

Inserción de muestra de asfalto en el reómetro.



4.3.2. Equipo Marshall

La prensa Marshall, modelo HM-503.3F fabricado por la compañía Humboldt, ha sido diseñado específicamente para laboratorios de pruebas de suelo que realizan múltiples operaciones de prueba, también es perfecto para ejecutar pruebas de asfalto Marshall. Su diseño resistente y el control preciso del motor paso a paso brindan una plataforma estable, lo que permite que el HM-503.3F realice cualquier prueba requerida hasta su capacidad de carga de 11000 lbf (50 kN). Con rangos de velocidad de 0 - 75,0000 mm/min (0 a 1905 mm).

El procedimiento del ensayo empezó con el secado de los agregados al horno un día previo al ensayo. Una vez sacados del horno deben ser mezclados con el asfalto, el cual llega a los 110°C. Luego de mezclar, se colocó en un molde cilindro de compactación. Seguidamente, con el martillo de compactación se realizó 75 golpes a ambas caras de la muestra y se dejó enfriar por un día. Por último, se desmoldo la muestra y dejo en baño

maría durante 30 minutos antes de colocar la muestra en la prensa Marshall, como se observa en la Figura 4.8. Luego de configurar y realizar el equipo Marshall a una velocidad y carga constantes de 50 mm/min y 0.045 kN respectivamente, obteniendo las gráficas de desplazamiento en función de la carga aplicada a la muestra. La Figura 4.9 muestra los especímenes luego de ensayar en la prensa Marshall.

Figura 4.8

Rotura de briquetas en prensa Marshall.



Figura 4.9

Rotura de briquetas después de Marshall.



4.4. Métodos de análisis de datos e interpretación

El diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall permite determinar el contenido óptimo de asfalto de la mezcla, por medio de preparación y compactación de muestras de mezcla asfáltica, calcular sus parámetros como Vacíos llenos de asfalto (VFA), Vacíos

del agregado mineral (VMA), Estabilidad, Vacíos de total de mezcla (VTM) y flujo. El diseño de una mezcla asfáltica consiste en seleccionar la granulometría y un porcentaje de asfalto que cumpla con los requerimientos necesarios, como se ve en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10

Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Parámetros de Diseño	Clase de mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1.Compactacion, numero de golpes por lado	75	75	75
2.Estabilidad (mínimo)	8.15 kN	5.44 kN	4.53kN
3.Flujo 0.01" (0.25 mm)	8-14	8-16	8-20
4.Porcentaje de vacíos con aire (MTC E 505)	3-5	3-6	3-7
Inmersion-Compresion (MTC E 518)			
R1. Resistencia a la compresión MPa (mínimo)	2.1	2.1	1.4
2.Resistencia retenida % (mínimo)	75	75	75
Relación Polvo-asfalto	0.6-1.3	0.6-1.3	0.6-1.3
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	1700-4000		
Relación conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 min.		

Nota: Adaptado de Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (Ministerio transporte y comunicaciones EG-2013).

Debido de las muestras de agregados gruesos presentan piedras que quedan en el tamiz $\frac{3}{4}$ ", el VMA a elegir será mínimo 14% como se observa en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11

Requisitos para porcentajes de vacíos agregados minerales (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	Marshall	Supervave
2.36mm (N.º8)	21	-
4.75mm (N.º4)	18	-
9.50mm (3/8")	16	15
12.5mm (1/2")	15	14
19.0mm (3/4")	14	13
25.0 mm (1")	13	12
37.5mm (1 1/2")	12	11
50.0 (2")	11.5	10.5

Nota: Adaptado de Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (Ministerio transporte y comunicaciones EG-2013).

Respecto a los resultados obtenidos del equipo Marshall el porcentaje de asfalto optimo (5.0%) tiene un VFA de 73.91% y del porcentaje de cauchos 69.10% (0.5% caucho),

69.19% (1.0% caucho) y 69.35% (1.5% caucho) de VFA. Viendo la Tabla 4.12 las mezclas asfálticas diseñadas se emplearon para un tráfico de entre 0.3-3 millones de ejes, el cual es un tráfico pesado.

Tabla 4.12

Requisitos mezcla asfáltica vacíos llenos con asfalto (VFA).

Trafico (millones de ejes equivalentes)	VFA
≤ 0.3	70-80
> 0.3-3	65-78
> 3	65-75

Nota: Adaptado de Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción (Ministerio transporte y comunicaciones EG-2013).

Se elaboró una tabla para representar los datos recopilados de los ensayos realizados mediante el método Marshall aplicado a muestras de mezclas que contienen caucho granulado con diferente contenido de asfalto. La Tabla 4.13 muestra el formato para analizar los datos y los criterios necesarios para lograr un contenido óptimo de asfalto.

Tabla 4.13

Parámetros de una mezcla asfáltica método Marshall

Parámetros de diseño de mezcla asfáltica	Requerimientos
Granulometría	Huso D-5 (ASTM D3515)
Marshall MTC E 504	
1. Compactación, numero de golpes por lado	75
2. Densidad (g/cm ³)	--
3. Estabilidad (mínimo) (kg.)	831kg
4. Flujo (0.01"/0.25mm)	8-14/3-5
5. Relación estabilidad-flujo (kg/cm)	1700-4000
6. Porcentaje de vacíos con aire (%)	3%-5%
7. Vacíos en el agregado mineral (%)	14% mínimo
8. Relación polvo-asfalto	0.6-1.3
Inmersión - compresión MTC E 518	
1. Resistencia a la compresión (mpa)	2.1 mínimo
2. Resistencia retenida (%)	75% mínimo
Índice de compactibilidad	
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80% mínimo

Nota. Adaptado de Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional. Granados (2017)

4.5. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

Para la estimación del porcentaje de asfalto óptimo se empleó la prensa Marshall, se preparó 3 briquetas para cada porcentaje de asfalto (4.5%, 5%, 5.5%, 6%). En la Tabla 4.14 se aprecia las cantidades de asfalto y agregados para cada muestra.

Tabla 4.14

Muestras para la estimación del óptimo porcentaje de asfalto

Cuadro de diseño – cantidad de asfalto óptimo				
Cantidad de muestras	3	3	3	3
Porcentaje de asfalto	4.5%	5%	5.5%	6%
Asfalto (g)	54	60	66	72
Agregado grueso (g)	458.4	456	453.6	451.2
Agregado fino (g)	687.6	684	680.4	676.8
Total (g)	1200	1200	1200	1200

La Tabla 4.15, muestra los resultados de los ensayos Marshall. De acuerdo con los estándares definidos en la Sección 4.4, se lleva a cabo una verificación de estos resultados, como se ilustra en la Tabla 4.16. El porcentaje óptimo es aquel que satisface todos los criterios establecidos; en este caso, se encontró que las muestras con un 5% de asfalto cumplen con estos criterios. Este valor fue finalmente seleccionado para las pruebas con caucho. Para un análisis más detallado, se presenta otras tablas y figuras en el Anexo B.

Tabla 4.15

Resultados de ensayos realizados con diferentes porcentajes de asfalto.

% Asfalto en la mezcla	4.5%	5%	5.5%	6%
Estabilidad corregida (kN)	14.61	15.94	17.65	14.69
Flujo (mm)	2.38	2.04	2.87	2.82
Porcentaje de vacíos del total de la mezcla (VTM)	5.41	4.01	3.28	2.42
Porcentajes de vacíos del agregado mineral (VMA)	15.3	15.18	15.62	15.98
Porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA)	64.61	73.91	79.23	84.95
Densidad de cada espécimen Marshall (g/cm ³)	2.39	2.40	2.40	2.40

Tabla 4.16*Verificación de criterio para obtención de asfalto optimo.*

	Criterio	Porcentajes de asfalto en la mezcla			
		4.5%	5%	5.5%	6%
Estabilidad (kN)	≥ 8.15	14.61 cumple	15.94 cumple	17.65 cumple	14.69 cumple
Flujo (mm)	2 a 3.5	2.38 cumple	2.04 cumple	2.87 cumple	2.82 cumple
Porcentaje de vacíos del total de la mezcla (VTM)	3 a 5	5.41 no cumple	4.01 cumple	3.28 cumple	2.42 no cumple
Porcentajes de vacíos del agregado mineral (VMA)	≥ 14	15.3 cumple	15.18 cumple	15.62 cumple	15.98 cumple
Porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA)	65 a 75	64.61 no cumple	73.91 cumple	79.23 no cumple	84.95 no cumple

4.6. Determinación del porcentaje óptimo de caucho

Para la estimación del porcentaje de caucho optimo, se empleó la prensa Marshall. Se elaboraron 3 juegos de briquetas con distintos porcentajes de caucho molido. Los porcentajes de caucho usados fueron 0.5%, 1% y 1.5% respecto al peso total de la muestra. En todas las muestras se mantiene constante el porcentaje de ligante (5%), tal como se indica en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17*Porcentaje de caucho en diferentes proporciones.*

Cuadro de diseño: Cantidad de caucho con asfalto 5%			
Cantidad de muestras	3	3	3
Asfalto (%) + Caucho (%)		5%	
Porcentaje de caucho en la mezcla	0.5%	1%	1.5%
Porcentaje de asfalto en la mezcla	4.5%	4%	3.5%
Asfalto(g) + Caucho(g)	60	60	60
Asfalto (g)	54	48	42
Caucho (g)	6	12	18
Agregado grueso (g)	456	456	456
Agregado fino (g)	684	684	684
Total (g)	1200	1200	1200

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.18, con relación al contenido de caucho usado en la mezcla. Debido al caucho incorporado en la mezcla, la cantidad de asfalto disminuye según los porcentajes indicados en la tabla. Para un análisis más detallado se presenta otras tablas y figuras en el Anexo C.

Tabla 4.18

Resultados de cada briqueta con diferentes porcentajes de caucho.

% Caucho en la mezcla	0%	0.5%	1%	1.5%
% Asfalto en la mezcla	5%	4.5%	4%	3.5%
Estabilidad (kN)	15.94	18.84	11.57	8.61
Flujo (mm)	2.04	2.55	2.93	2.82
VTM	4.01	4.91	5.02	5.10
VMA	15.18	15.90	16.31	16.64
VFA	73.91	69.10	69.19	69.35
Densidad de cada espécimen Marshall (g/cm ³)	2.40	2.380	2.376	2.375

Los resultados obtenidos han sido validados utilizando los mismos estándares que se emplearon para determinar el contenido de asfalto óptimo, y estos se presentan en la Tabla 4.19. De acuerdo con estos resultados, se observa que la mezcla conteniendo un 0.5% de caucho y 4.5% de asfalto, cumple con los criterios adoptados.

Tabla 4.19

Verificación de criterio para obtención de caucho optimo.

	Criterio	Porcentaje de caucho en la mezcla			
		0%	0.5%	1%	1.5%
Estabilidad (kN)	≥8.15	15.94	18.84	11.57	8.61
		cumple	cumple	cumple	cumple
Flujo (mm)	2 a 3.5	2.04	2.55	2.93	2.82
		cumple	cumple	cumple	cumple
		4.01	4.91	5.02	5.10
VTM	3 a 5	cumple	cumple	no cumple	no cumple
VMA	≥14	15.18	15.90	16.31	16.64
		cumple	cumple	cumple	cumple
(VFA)	65 a 75	73.91	69.10	69.19	69.35
		cumple	cumple	cumple	cumple

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Efecto del caucho molido en las propiedades reológicas del asfalto

Usando el reómetro de corte dinámico, se evaluó la viscosidad y el módulo de corte complejo del asfalto y asfalto con caucho. Para realizar estos ensayos se usaron las mismas proporciones de asfalto y caucho empleado en el equipo Marshall, es decir, asfalto modificado con 0.5% de caucho respecto al peso de la muestra. Con relación a la temperatura de ensayo con el reómetro, la norma AASHTO T 316-13 (2018) señala que se debe emplear una temperatura de 135°C en todos los ensayos. La Tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos del asfalto con caucho con 9.765 Pa.s de viscosidad y del asfalto 1.256 Pa.s. Se observa que la viscosidad del asfalto con caucho molido es mayor al asfalto. En la Figura 5.1 se aprecia la diferencia de viscosidad.

Según Ismail et al. (2022) la viscosidad del asfalto modificado con CR (polvo de neumático) es mayor al asfalto no modificado. Además, el aumento gradual de caucho en el asfalto aumentara el valor de la viscosidad. Pero el aumento de temperatura provocara que el valor de la viscosidad del ligante tienda disminuir (p. 1094). Ismail et al. (2022) ensayaron con asfalto tipo PEN 60/70, 5 contenidos diferentes de CR (5%, 10%, 15%, 20% y 25%) respecto al peso del asfalto y a temperaturas de 110 °C, 135 °C, 150 °C y 165 °C. Además, la modificación del aglutinante con 5% y 10% CR casi no mostró cambios notables en los resultados de las pruebas de penetración y punto de reblandecimiento.

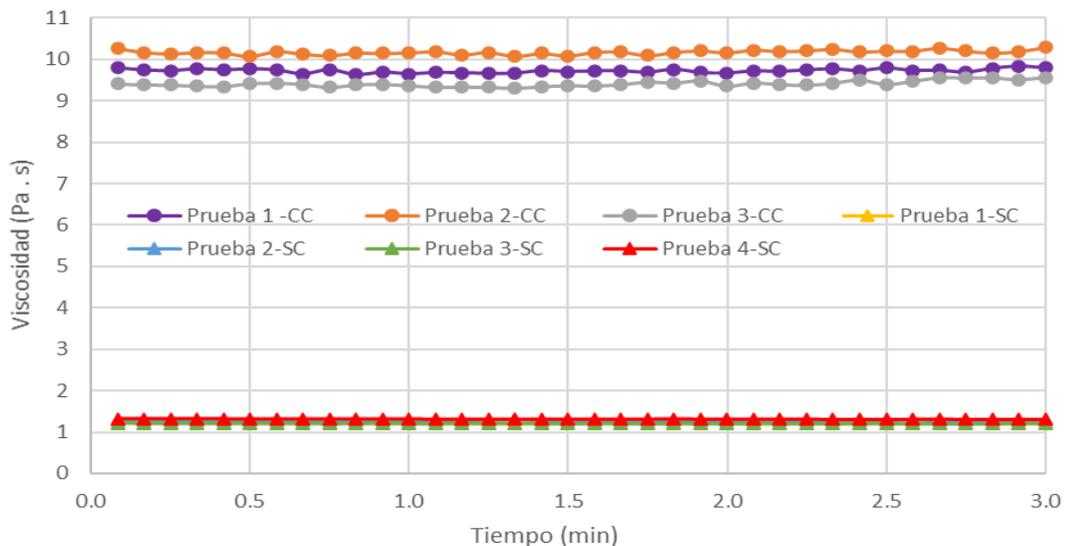
Tabla 5.1

Resultados de ensayo de viscosidad

		Velocidad rotacional	Viscosidad	Torque	Temp.	Tasa de corte	Esfuerzo de corte
	Símbolo	N	h	M	T	g	t
	Unidad	[1/min]	[Pa·s]	[mN·m]	[°C]	[1/s]	[Pa]
Asfalto 0%	Prueba 1	20	1.211	0.097	135	26.2	31.715
	Prueba 2	20	1.288	0.104	135	26.2	33.739
	Prueba 3	20	1.209	0.097	135	26.2	31.667
	Prueba 4	20	1.315	0.106	135	26.2	34.433
	Promedio	20	1.256	0.101	135	26.2	32.888
Asfalto 0.50% caucho	Prueba 1	20	9.721	0.78226	135	26.2	254.987
	Prueba 2	20	10.169	0.89875	135	26.2	292.849
	Prueba 3	20	9.406	0.75689	135	26.2	246.849
	Promedio	20	9.765	0.813	135	26.2	264.895

Figura 5.1

Viscosidad en función de tiempo



Nota: Sin caucho (SC) y Con caucho (CC)

De la Tabla 5.2 se observa los resultados del módulo de corte complejo, los cuales según la norma AASHTO T315-19, deben estar en un rango entre 0.1 kPa a 10000 kPa. La muestra de asfalto llegó a su máxima temperatura de 76 C° con un módulo de corte de 0.724 KPa y el asfalto con caucho llegó a 76 C° con un módulo de corte de 1.913 KPa. Estos resultados demuestran que el asfalto con caucho a la misma temperatura del asfalto

tiene mayor resistencia a la deformación bajo carga. Además, como se ve en la Figura 5.2 las muestras con caucho presentan un módulo de corte complejo mayor al asfalto desde el inicio del ensayo, logrando el asfalto con caucho llegar hasta 88C° antes de que su módulo sea inferior a 0.1 kPa. Según Li et al. (2022), el módulo complejo tiende a decrecer con el aumento de temperatura. Además, si ambas muestras de asfalto y asfalto con caucho están a la misma temperatura el módulo complejo que predominará será el del asfalto con caucho. Por lo tanto, el rendimiento a alta temperatura del asfalto modificado con caucho es mejor que el asfalto no modificado (p. 6).

Tabla 5.2

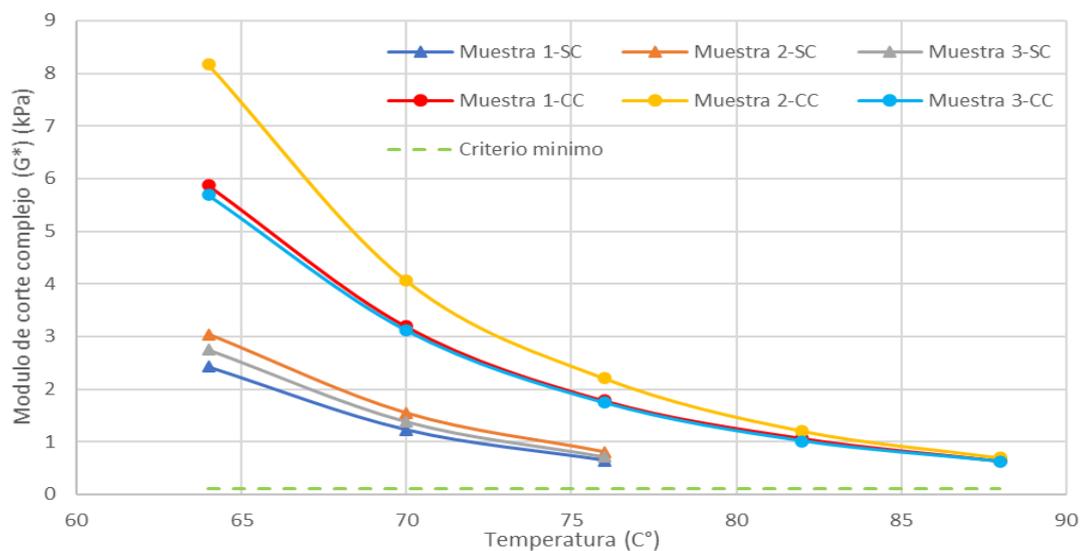
Resultados de módulo de corte complejo

	Temperatura (C°)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio (kPa)
Asfalto + 0% caucho	64	2.4323	3.044	2.754	2.744
	70	1.229	1.547	1.389	1.388
	76	0.644	0.809	0.719	0.724
Asfalto + 0.5% caucho	64	5.878	8.172	5.693	6.581
	70	3.194	4.067	3.116	3.459
	76	1.785	2.212	1.741	1.913
	82	1.069	1.209	1.013	1.097
	88	0.640	0.7	0.623	0.654

Nota: 100Pa a 10 MPa es igual a 0.1 kPa a 10000 kPa

Figura 5.2

Módulo de corte complejo en función de la temperatura



Nota: Sin caucho (SC) y Con caucho (CC)

El rango aceptable, según AASHTO T315-19, del ángulo de fase es de 0° a 90° grados, si el ángulo de fase es cercano a 0° el asfalto es más elástico siendo capaz de recuperar su forma y si es cercano a 90° será más fluido. En la Tabla 5.3 se observa los resultados de ángulo de fase de las muestras de asfalto con 79.406° de ángulo de fase a una temperatura de 76C° y asfalto con caucho con 78.129° de ángulo a 76C°, lo cual indica que a la misma temperatura el asfalto es más fluido que el asfalto con caucho. Cabe destacar que estos resultados se obtienen del módulo de corte. Además, como se ve en la Figura 5.3 el ángulo de fase del asfalto con caucho presenta mayor elasticidad respecto al asfalto convencional porque su ángulo tiende a ser más cercano al 0°.

Según Li et al. (2022), el ángulo de fase aumenta gradualmente con la temperatura. Además, a la misma temperatura de prueba, el asfalto modificado con caucho exhibe un ángulo de fase menor que el asfalto convencional, lo que indica que el primero tiene mejores propiedades elásticas y la capacidad de resistir la deformación permanente a temperatura elevada. Li et al. (2022) realizaron pruebas utilizando una proporción de 0,55% en peso de una mezcla de caucho y asfalto pasando a través de una malla 40. Obtuvieron un ángulo de fase de 74° a 65°C y cuando la temperatura se incrementó a 85°C, el ángulo de fase es de 82°. Por el contrario, el betún no modificado registró ángulos de fase de 87° a 65°C y 89° a 85°C.

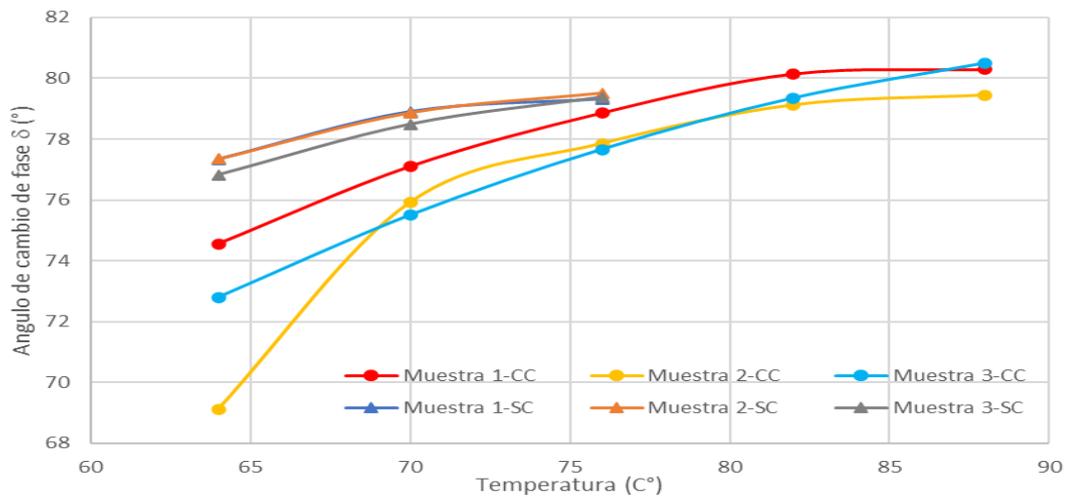
Tabla 5.3

Resultados de ángulo de cambio de fase.

	Temperatura (C°)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Asfalto + 0% caucho	64	77.337	77.350	76.820	77.169
	70	78.902	78.862	78.492	78.752
	76	79.319	79.509	79.390	79.406
Asfalto + 0.5% caucho	64	74.563	69.117	72.799	72.159
	70	77.108	75.920	75.503	76.177
	76	78.868	77.855	77.665	78.129
	82	80.154	79.123	79.354	79.543
	88	80.300	79.446	80.503	80.083

Figura 5.3

Angulo de cambio de fase en función de temperatura.



Nota: Sin caucho (SC) y Con caucho (CC)

5.1.1. Influencia del caucho en la estabilidad de la mezcla

La Tabla 5.4 muestra el resumen de los resultados obtenidos por distintos autores en comparación con los resultados de este trabajo de investigación. Los mismos resultados se presentan en forma gráfica en la Figura 5.4, en la cual se compara el porcentaje de ligante total entre la estabilidad de la mezcla. En todos los casos, los valores de estabilidad fueron superiores a 8.15 kN, cumpliendo así con los requisitos mínimos establecidos por la norma MTC E 504. Es importante destacar que la estabilidad de la mezcla asfáltica modificada, con 18.84 kN, supera a la de la mezcla convencional, que registró 15.94 kN. Manteniendo un porcentaje constante de caucho (0.5%), Granados (2017) logró una estabilidad de 21.33 kN, mientras que Godoy (2020) obtuvo 19.62 kN.

Según Issa (2016), la estabilidad de las mezclas asfálticas modificadas tiende a aumentar cuando el contenido de caucho oscila entre el 0.25% y el 0.5% del peso total de la mezcla, disminuyendo a porcentajes más elevados. Issa (2016) investigó cuatro niveles diferentes de contenido de caucho (0%, 0.25%, 0.5% y 1% del peso total de la mezcla) y tres porcentajes de asfalto (4.5%, 5% y 5.5%). Se encontró que la mezcla con 0.5% de caucho exhibió la mayor estabilidad. Además, de acuerdo con Al-Fayyadh y Al-Mosawe (2023), las mezclas asfálticas modificadas con caucho granular demostraron un aumento significativo en la estabilidad al emplear un 1% de caucho en peso total de la mezcla. Este incremento se atribuye al aumento de la viscosidad del asfalto, lo que mejora la

adherencia entre las partículas de agregado. Sin embargo, a medida que aumenta el porcentaje de caucho en la mezcla, se observa una degradación de propiedades mecánicas del asfalto, como la adherencia y estabilidad. Ellos probaron tres niveles distintos de contenido de caucho (1%, 1.5% y 2%) en relación al peso de la mezcla, encontrando que la mezcla con 1% de caucho presentaba la mayor estabilidad.

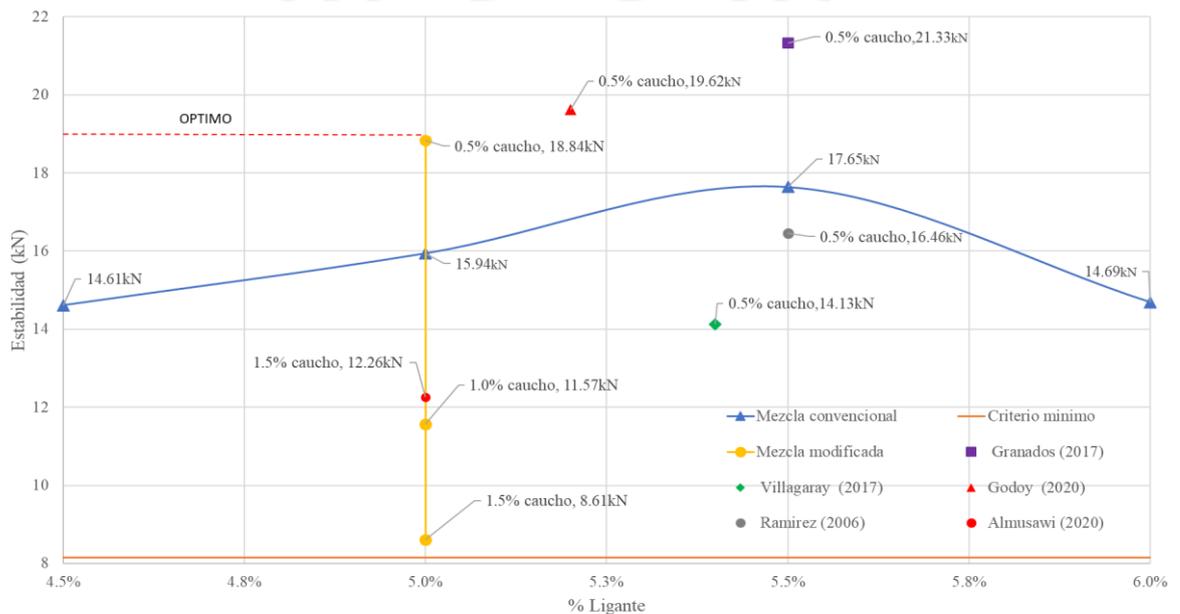
Tabla 5.4

Análisis comparativo de resultados de mezcla modificada.

Autores	Resultados propios		Granados	Villagaray	Godoy	Ramírez	Almusawi et al.
Ubicación	Peru	Peru	Peru	Peru	Peru	Chile	Turkia
Año	2022	2022	2017	2017	2020	2006	2020
Codigo	Mezcla Modificada	Mezcla Convencional	Granados	Villagaray	Godoy	Ramirez	Almusawi et al.
Temp mezcla °C	150	150	170	145	158	170	
% Asfalto optimo	5.0%	5.0%	5.5%	5.4%	5.2%	5.5%	5.0%
% Caucho en la mezcla	0.5%	0.0%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	1.5%
Tipo de asfalto	60/70	60/70	60/70	60/70	60/70	60/80	80/100
% Agregados que pasa malla 1/2"	85.5%	85.5%	95.5%	84.4%	93.8%	88.0%	-----
% Agregados que pasa malla N°200	4.2%	4.2%	6.4%	7.4%	5.7%	4.0%	-----
Malla que pasa caucho	N°16 (1.18mm)	-----	N°16 (1.18mm)	N°20 (0.84mm)	N°16 (1.18mm)	N°30 (0.63 mm)	entre N°16 (1.18mm) a N°6 (3.35mm)
Estabilidad (KN)	18.84	15.94	21.33	14.13	19.62	16.46	12.26
Flujo (mm)	2.55	2.04	3.45	3.3	3.43	3.0	-----
VTM (%)	4.91%	4.01%	4.70%	4.40%	3.90%	5.40%	6.50%
VMA (%)	15.90%	15.81%	16.50%	17.30%	14.60%	17.20%	-----
VFA (%)	69.10%	73.91%	71.00%	74.40%	-----	-----	65.00%
Densidad promedio de briquetas (gr/cm3)	2.38	2.40	2.352	2.452	2.42	2.29	2.27
Relacion estabilidad flujo (kg/cm)	7527.00	7985.03	6304.41	4366.17	5842.34	5594.75	-----

Figura 5.4

Estabilidad y porcentaje de ligante.



5.1.2. Influencia del caucho en el flujo de la mezcla

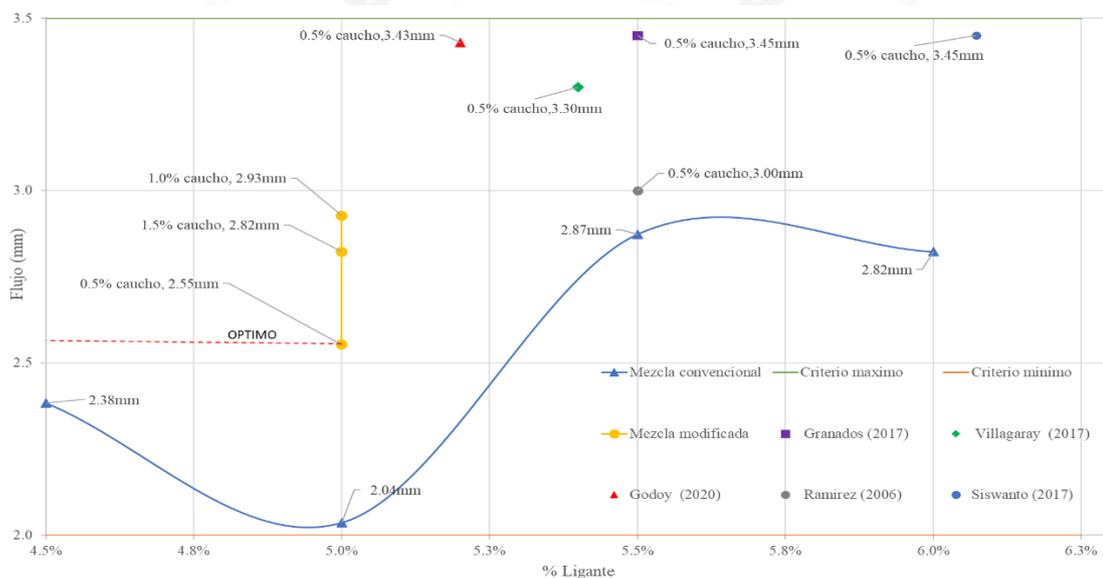
La Figura 5.5 presenta la variabilidad del flujo tanto para la mezcla convencional como para la mezcla modificada con caucho y compara los resultados obtenidos con investigaciones previas de otros autores. La mezcla modificada con caucho óptimo (0.5%) registró el menor valor de flujo alcanzando los 2.55 mm respecto a las mezclas modificadas; así mismo, las mezclas realizadas con 1% y 1.5% de caucho tuvieron un flujo de 2.93 mm y 2.82 mm respectivamente. Sin embargo, el valor de flujo más elevado en este análisis fue de 3.45 mm, obtenido por Granados (2017) con una mezcla de 0.5% de caucho y un 5.5% de asfalto, seguido de Godoy (2020) con 3.43mm con una mezcla de 0.5% caucho y 5.2% de asfalto. Estos resultados se deben a que las muestras de estos otros autores contienen un mayor porcentaje de asfalto, lo que las hace más rígidas. Además, se afirma que la adición del caucho entre 0.5% a 1% aumenta el flujo de la mezcla asfáltica pero un porcentaje de 1.5% lo disminuye.

Por otro lado, la mezcla convencional con 5% de asfalto, siendo el de diseño óptimo, presentó un flujo de 2.04 mm siendo la más rígida entre los resultados presentados.

Según Siswanto et al. (2017) la adición de caucho disminuye el flujo de la mezcla a un nivel del 1.5% y 3% de adición, pero lo incrementa con el resto de las adiciones de caucho. Además, el flujo de la mezcla de asfalto está influenciado por el contenido de ligante y puede ser aumentado mediante el incremento de dicho contenido.

Figura 5.5

Flujo y porcentaje de ligante.



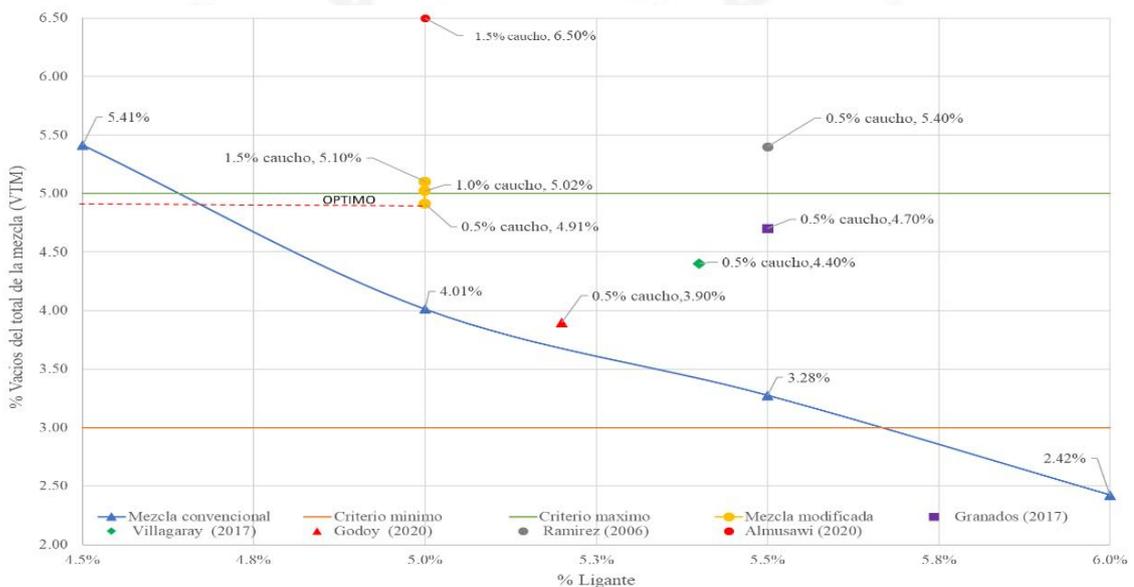
5.1.3. Influencia del caucho en el VTM

La Figura 5.6 presenta la variabilidad del VTM tanto para la mezcla convencional como para la mezcla modificada con caucho y compara los resultados obtenidos con investigaciones previas de otros autores. De los resultados obtenidos, la mezcla convencional registró valores de VTM de 4.01% (5% de asfalto) y 3.28% (5.5% de asfalto), en la gráfica se observa como esta mezcla tiende a disminuir con el aumento de asfalto debido a que este tiende a llenar los vacíos de la muestra. Por otro lado, la mezcla modificada con un contenido de caucho del 0.5% mostró un valor de VTM de 4.91%, siendo este el único valor de las muestras ensayadas con caucho que se sitúa dentro del rango permitido. De la misma manera, otros autores que utilizaron un contenido de caucho del 0.5% dentro del rango como Granados (2017) con 4.70% de VTM y Villagaray (2017) con 4.40% de VTM. Esta diferencia en los valores de VTM se debe a que los otros autores emplearon un mayor porcentaje de ligante. Este patrón también se observa en los resultados de la mezcla convencional siendo el de mayor VTM la muestra con 4.5% de ligante y la de mayor VTM con 6% de ligante.

Según Almusawi et al. (2020) cuanto mayor sea el contenido del ligante en la mezcla, menor será el valor de VTM en el diseño de mezcla. Además, el bajo contenido de VTM reduce el efecto de envejecimiento de la membrana asfáltica y también minimiza el riesgo de que el agua penetre en la mezcla asfáltica.

Figura 5.6

VTM y porcentaje de ligante.



5.1.4. Influencia del caucho en el VMA

La Figura 5.7 exhibe los valores de VMA (Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral) tanto para la mezcla convencional como para la mezcla modificada con caucho, comparándolos con los resultados obtenidos en estudios previos realizados por otros autores.

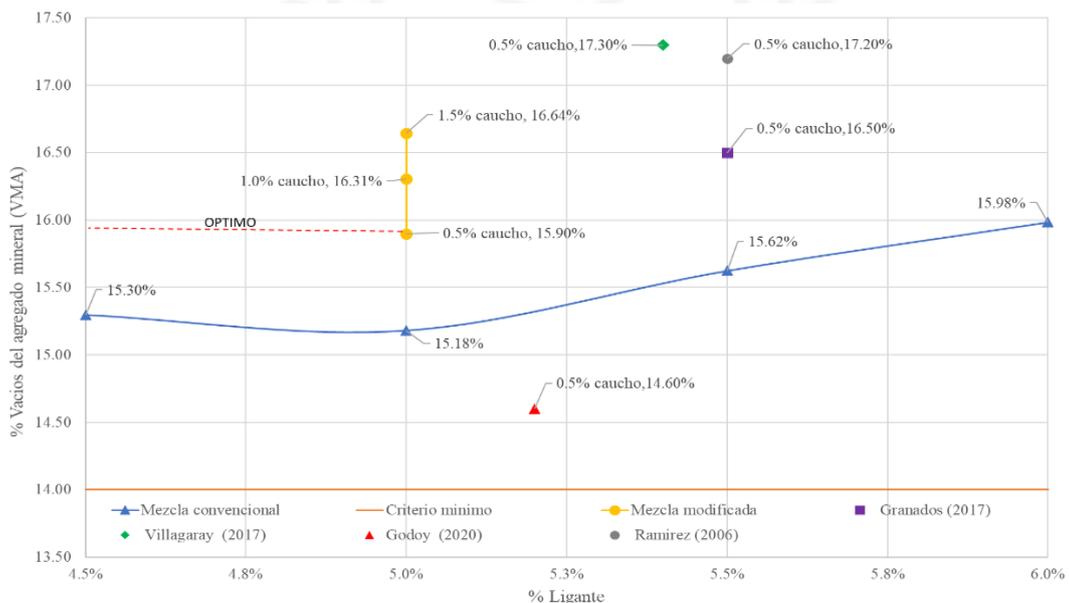
El valor de VMA obtenido de la mezcla asfáltica modificada con 1.5% de caucho fue de 16.64%, el de la mezcla con 1.0% de caucho, de 16.31% y el de la mezcla con 0.5% de caucho fue de 15.90%. De ello se observa una relación en la que el incremento del VMA depende de la cantidad de caucho empleada.

Por otro lado, de los otros autores se observa que el incremento en el porcentaje de ligante también influye en el incremento de VMA, a excepción de Godoy (2020) quien tuvo 14.60% con 0.5% de caucho. Esto se debe a su diseño de mezcla con 5.2% de ligante y 93.8% de agregados que pasan la malla ½”.

Según Alsheyab et al. (2023), la inclusión de caucho de neumáticos en la mezcla asfáltica conduce a un incremento en el valor de VMA. Además, al introducir caucho de neumáticos en el aglutinante asfáltico se observó que el valor de VMA aumenta proporcionalmente con la cantidad de caucho de neumáticos en la mezcla.

Figura 5.7

VMA y porcentaje de ligante



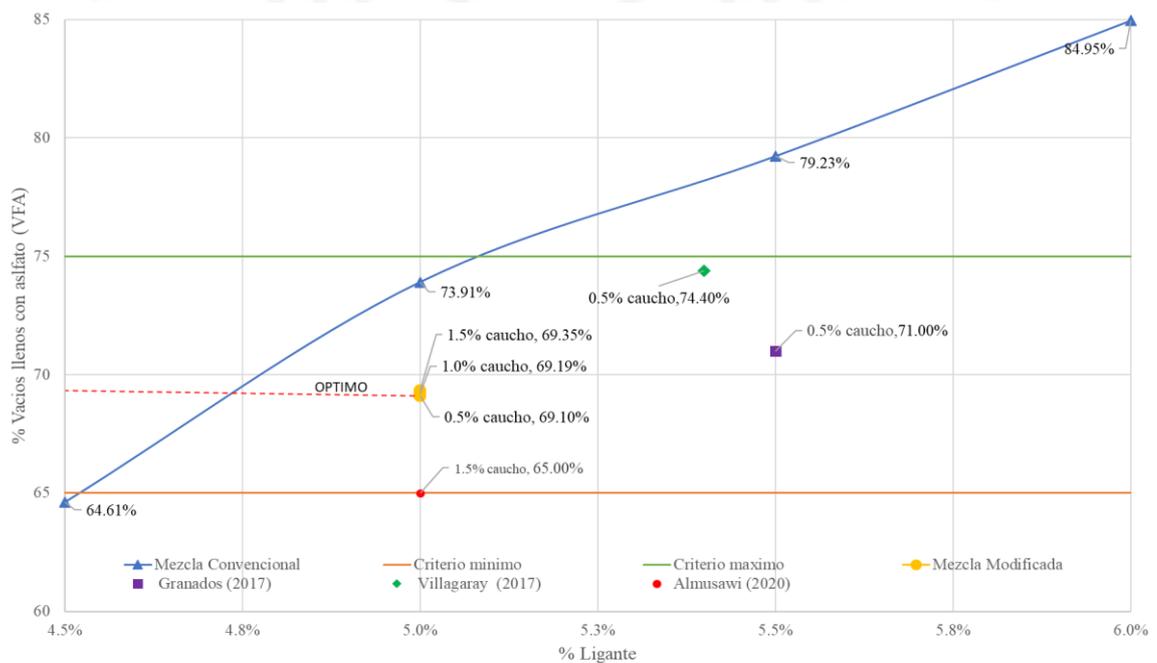
5.1.5. Influencia del caucho en el VFA

En la Figura 5.8 se presenta el valor del VFA (Porcentaje de Vacíos Llenos con Asfalto) tanto para la mezcla convencional como para la mezcla modificada con caucho, comparándolos con los resultados obtenidos en investigaciones previas realizadas por otros autores. Los hallazgos de la investigación indicaron que la mezcla modificada con un 0.5% de caucho logró un VFA del 69.1%. Por otro lado, Villagaray (2017) obtuvo un 74.4% de VFA (con un 5.4% de asfalto), mientras que Granados (2017) alcanzó un 71% de VFA (con un 5.5% de asfalto). Estas diferencias en los resultados se atribuyen a factores como la temperatura de compactación y el porcentaje de asfalto empleado en las muestras. Además, se observa que las mezclas convencionales sin caucho, con porcentajes de asfalto de 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, tienden a aumentar el valor de VFA en comparación con las proporciones de asfalto utilizadas.

Según Alsheyab et al. (2023), la inclusión de caucho de neumáticos en la mezcla asfáltica gradualmente aumenta los valores de VFA a medida que se incrementa el contenido de caucho en la mezcla. Esto se debe a que la película de asfalto alrededor de las partículas de agregado es más gruesa de lo necesario, lo que resulta en menos vacíos. Con un aumento en la cantidad efectiva de ligante, la mezcla se vuelve más fluida y menos rígida.

Figura 5.8

VFA y porcentaje de ligante.



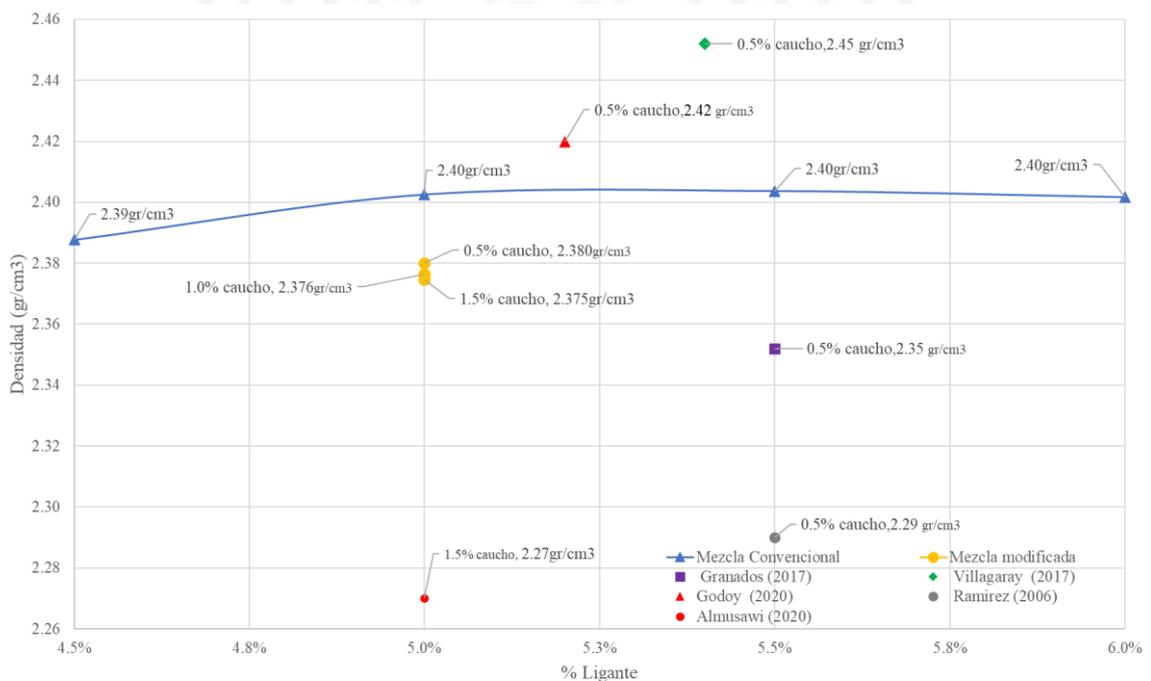
5.1.6. Influencia del caucho en la densidad de la mezcla

La Figura 5.9 exhibe la densidad tanto de la mezcla convencional como de la mezcla modificada con caucho, contrastando los resultados con investigaciones previas realizadas por otros autores.

La densidad de la muestra de Ramírez (2006) alcanzó un valor de 2.29 g/cm^3 , Villagaray (2017) de 2.45 g/cm^3 , Godoy (2020) de 2.42 g/cm^3 , Granados (2017) 2.35 g/cm^3 y la densidad alcanzada por la muestra propia con 0.5% de caucho fue de 2.38 g/cm^3 . Estas variaciones se deben al uso de diferentes proporciones de agregados en todos los casos, la temperatura al compactar, la dimensión del caucho y porcentaje de asfalto realizada en cada investigación influyó en la variación del tamaño de las muestras y resultados. Comparando la densidad (2.38 g/cm^3) de la muestra con caucho optimo con la de Almusawi et al. (2020) se observa como el porcentaje de caucho influye, el tipo de asfalto y la dimensión del caucho influye en su densidad. De acuerdo con Qdar y Talabany (2023), la densidad de la mezcla modificada tiende a ser menor a la mezcla convencional, esto se debe al efecto de peso ligero del caucho que se utiliza en lugar del asfalto.

Figura 5.9

Densidad y porcentaje de ligante



En cuanto a los resultados obtenidos, surge la discusión sobre el uso del equipo Marshall en mezclas asfálticas modificadas con un porcentaje de caucho que oscila entre el 0.5% y el 1.0% respecto al peso total de la mezcla. Esto se debe a que los valores de estabilidad en este rango son de 18.84 kN y 11.57 kN respectivamente, los cuales están próximos al valor de estabilidad obtenido por la mezcla convencional de asfalto óptimo al 5% (15.94 kN).

Por otro lado, se plantea que el porcentaje de vacíos totales de la mezcla (VTM) también juega un papel crucial en la determinación del límite del contenido máximo de caucho que se puede emplear sin exceder el límite permitido (5% VTM). Esto se debe a que los resultados de VTM se encuentran dentro del rango entre el 0.5% (4.91% VTM) y el 1.0% (5.02% VTM), lo que sugiere que este parámetro podría servir como un indicador para establecer la cantidad máxima de caucho que se puede utilizar sin comprometer la calidad de la mezcla.

También evitar el uso de caucho granulado en proporciones superiores al 1% respecto al peso total de la mezcla. Esto se debe a que se observa una afectación en las características físicas de la mezcla asfáltica en estas condiciones. Se ha observado que tanto la estabilidad como el flujo disminuyen al emplear proporciones de caucho por encima del 1.0%. Además, se nota un aumento en el porcentaje de vacíos totales de la mezcla (VTM) en función de un mayor contenido de caucho granulado en la mezcla asfáltica.

Por último, se debería incluir en la normativa peruana una sección de características y parámetros a considerar en la elaboración de mezclas asfálticas (asfalto PEN 60/70) modificadas con caucho, en la siguiente tabla 5.5 se muestra la propuesta de diseño.

Tabla 5.5

Tabla de diseño de mezcla asfáltica con caucho

Parámetros	Requerimientos
Porcentaje de caucho	*0.5%-1%
Malla retenida	≤N°16
Porcentaje de asfalto	5.0%
Estabilidad (kN)	≥16
Flujo (mm)	2-3

Nota: *Porcentaje respecto al peso de la mezcla

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

La red vial nacional, constituida por más de 25 mil kilómetros, está construida a base de mezcla asfáltica convencional. Esto genera dificultades a largo plazo por lo demandante que resulta el mantenimiento de carreteras. La investigación ha demostrado que el diseño de una mezcla asfáltica modificada con caucho muestra mejoras en sus características físicas en comparación con una mezcla convencional. Dentro de ellas, la estabilidad presenta un aumento del 18.20% (15.94kN a 18.84kN), el cual mejora su capacidad de resistencia al desplazamiento y deformación, así también el flujo con un aumento del 25% (2.04mm a 2.55mm) que permite una mejor trabajabilidad de la mezcla asfáltica.

Los agregados empleados en esta investigación se ajustan a la granulométrica correspondiente a una mezcla MAC-2. Asimismo, estos cumplen con los requisitos de calidad de la misma norma. En la Tabla 4.4 y Tabla 4.5 se presenta un resumen de los ensayos de calidad realizados. Con el fin de obtener el porcentaje óptimo de asfalto (5%) se empleó la norma MTC E 504-Resistencia de Mezclas Bituminosas empleando la prensa Marshall, el cual indica el mínimo de especímenes, método de compactación, temperatura del horno, equipos a emplear y el procedimiento para hacer el ensayo. Para determinar el porcentaje óptimo de caucho, se realizó el mismo procedimiento usado en la obtención del óptimo porcentaje de asfalto.

Los resultados de los ensayos permiten obtener las siguientes conclusiones:

- Empleando el reómetro se obtuvo que a una temperatura de 64°C (Norma AASHTO- T315-19) la muestra de asfalto con adición de caucho granulado posee un Módulo de corte complejo (6.581 kPa) mayor al de la muestra de asfalto solo (2.744 kPa). Con los resultados obtenidos se observó como el módulo complejo tiende a decrecer con el aumento de temperatura. Por lo tanto, se demuestra que el rendimiento a altas temperaturas del asfalto modificado con caucho es superior al del asfalto no modificado, tal como también fue comprobado en la investigación de Guo et al. (2022). Para obtener la

viscosidad del asfalto solo y asfalto con caucho se ensayaron tres muestras en el reómetro de corte a una temperatura de 135°C (AASHTO- T316-13). Siendo la viscosidad de la muestra de asfalto con caucho mayor (9.765 Pa·s) a la del asfalto sin caucho (1.256 Pa·s). De los resultados obtenidos se observó cómo el aumento gradual de caucho en el asfalto aumenta el valor de la viscosidad, tal como verificó Ismail et al. (2022) en su investigación.

- El valor de la estabilidad tiende a incrementarse con la adición de caucho en la mezcla asfáltica, dado que los ensayos con mezcla asfáltica convencional alcanzaron una estabilidad de 15.94 kN y los ensayos a base de una mezcla modificada con 0.5% de caucho respecto al peso total de la mezcla, alcanzaron valores de estabilidad de 18.84 kN. El flujo de la mezcla asfáltica, según lo especificado en la normativa MTC E 504 sobre Resistencia de Mezclas Bituminosas y evaluado mediante el método del aparato Marshall, debe situarse en el rango de 2.00mm a 3.50mm. Si el valor es inferior, se considera que la mezcla es demasiado rígida, mientras si es superior, se la considera demasiado inestable. En este sentido, se registró un flujo de 2.04 mm en las muestras de mezcla convencional con un 5% óptimo de asfalto, y de 2.55 mm en la mezcla modificada con un 0.5% de caucho respecto al peso total de la mezcla. Ambos resultados cumplen con los criterios establecidos por la normativa mencionada. Por lo tanto, podemos concluir que la adición de caucho en la mezcla de asfalto mejora su flexibilidad y trabajabilidad.

- El diseño de la mezcla con asfalto (PEN 60/70) modificado con caucho resulta beneficioso para el mantenimiento y desarrollo de infraestructura vial, siempre que el caucho granulado se encuentre entre los valores de 0.5% y 1%. Si el porcentaje es menor, sus propiedades beneficiosas son mínimas, y si es mayor, influye negativamente en el porcentaje de vacíos de la mezcla. Así como este, otros parámetros indicados en la tabla 5.5 podrían contribuir al desarrollo de su implementación en proyectos a nivel nacional.

6.2. Recomendaciones

En esta sección, brindamos recomendaciones basadas en nuestras observaciones y conclusiones para resaltar las mejores prácticas e identificar áreas de mejora.

A continuación, detallaremos las recomendaciones:

- En futuras investigaciones se pueden considerar otros tipos de asfalto (asfalto PEN 100/120, por ejemplo).
- La investigación realizada puede complementarse con ensayos de Rueda de Hamburgo.
- La investigación se podría analizar considerando caucho de diferente dimensión al empleado.
- La investigación se puede extender reemplazando el agregado fino por caucho.
- Se puede complementar la investigación, si se considera las gradaciones MAC-1 y MAC-3.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO T 315-19. (2019). Determining the Rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR). *American Association of the State Highway and Transportation Officials*, 1-8.
- AASHTO T 316-13. (2018). Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer (AASHTO T 316-13). *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1-5.
- Almusawi, A., Abdulrahman, H., Shakhan, M., & Dogaroglu, B. (2020). Effects of crumb rubber size and concentration on Marshall parameters of rubberized asphalt mixture. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 3-4.
- Alsheyab, M., Khedaywi, T., & Ogiliat, O. (2023). Effect of Waste Tire Rubber on Properties of Asphalt Cement and Asphalt Concrete Mixtures: State of the Art. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4-8.
- Asphalt Institute. (1982). *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*. EEUU.
- ASTM INTERNATIONAL. (2019). *ASTM D6114/D6114M: Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*. EEUU.
- Campaña Cruz, K. O., Galeas Hurtado, S., & Guerrero Barragán, V. H. (2015). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. *Revista Politécnica*, 1-6.
- Contreras Martínez, C. H., & Mamani Vilcatoma, D. P. (2019). *Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con mezclas asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados*[Tesis de Pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. <http://hdl.handle.net/10757/651885>

- Correa Lesmes, C. A. (2018). *Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio San Carlos de la localidad de Tunjuelito [Tesis de Maestría, Universidad Militar Nueva Granada]*. <http://hdl.handle.net/10654/20506>
- Gawdzik, B., Matynia, T., & Błazejowski, K. (2020). The Use of De-Vulcanized Recycled Rubber in the Modification of Road Bitumen. *Materials*.
- Godoy Salcedo, N. M. (2020). *Influencia mecánica del polvo de caucho procedente de neumaticos en la pavimentación de carreteras en la ciudad de Lima [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]*. <https://hdl.handle.net/11537/25493>
- Granados Noa, J. (2017). *Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional [Tesis de Maestría, Universidad Ricardo Palma]*. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/1572>
- Instituto mexicano de transporte. (2006). Calidad de materiales asfálticos modificados. En *Características de los materiales*.
- Instituto nacional de vías. (2012). Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado. En *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Colombia.
- Ismail, M., A. Zeiada, W., Al-Khateeb, G., & Ezzat, H. (2022). Rheological Properties of Rubber Modified Asphalt Binder in the UAE. *Springer International Publishing*, 1083-1097.
- Issa , Y. (2016). Effect of Adding Waste Tires Rubber to Asphalt Mix. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, 61-68.
- Khalaf, S., Yousif, R. A., Tayh, S. A., & Jasim, A. F. (2023). The Impact of Crumb-Rubber on the Mechanical Characteristics of Modified Asphalt Mixture. *EDP Sciences*.
- Khalili, M., Jadidi, K., Karakouzian, M., & Amirghanian, S. (2019). Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method. *Case Studies in Construction Materials*.
- Li, H., Li, W., Abdulakeem Temitope, A., Zhao, D., Zhao, G., & Ma, Q. (2020). Analysis of the Influence of Production Method, Crumb Rubber Content and Stabilizer on the Performance of Asphalt Rubber. *Applies sciences*.

- Li, Z., Guo, T., Chen, Y., Dong, L., Chen, Q., Hao, M., . . . Liu, J. (2022). Study on Rheological Properties of Graphene Oxide/Rubber Crowd Composite-Modified Asphalt. *Materials*, 1-20.
- MINAM. (17 de 10 de 2021). *Régimen Especial de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)*.
- Ministerio de transportes y comunicacione EG-2013. (s.f.). *Manual de carreteras: Especificaciones tecnicas generales para construccion*. Lima.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2017). MTC E 504 Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall. En *Manual de ensayo de materiales* (págs. 583-593). Lima: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Pineda Rodriguez, Y. A., & Rey Moreno, A. F. (2012). *Mezclas asfalticas dranante modificada con grano de caucho reciclado [Tesis de Pregrado, Universidad Piloto de Colombia]*. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/1452>
- Qdar, D., & Talabany, A. (2023). Compaction Effort Evaluation of Crumb Rubber Modified Hot Mix Asphalt. *Sustainability*, 2-3.
- Ramirez Palma, N. I. (2006). *Estudio de la utilizacion de caucho de neumaticos en mezcla asfalticas en caliente mediante proceso seco [Tesis Pregrado, Universidad de Chile]*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104457>
- Ramirez Velarde, J. A., Gómez Lazarte, C. E., & Donoso Rodriguez, J. (2018). *Plan de negocio para la implementación de una planta de reciclaje de llantas usadas mediante el proceso de Pirolisis [Tesis de Maestría, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]*. <http://hdl.handle.net/10757/624919>
- Rondón Quintana, H., Moreno Anselmi, L., Rodríguez Urrego, D., & Lee Mariño, J. (2009). Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos. *Ingeniería*, vol. 14, núm. 2, , pp. 19-33.
- Sequeira Rojas, I., & Cervantes Calvo, I. (2014). *Consistencia de los diseños de mezcla segun la metodologia Marshall [Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica]*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/889>
- Siswanto, H., Supriyanto, B., Rizky Chandra, P., & Rahman Hakim, A. (2017). Marshall Properties of Asphalt Concrete Using Crumb Rubber Modified of Motorcycle Tire Waste. *AIP Conference Proceedings*, 1-4.

- T. Al-Fayyadh, Z., & M. Al-Mosawe, H. (2023). The Effect of Rubber Crumbs on Marshall Properties for Warm Mix Asphalt. *Journal of Engineering*, 46-59.
- Villafana Huamán, G. L., & Ramírez Villanueva, R. M. (2019). *Análisis del comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímeros sbs betutec ic y una mezcla asfáltica convencional 60/70 [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]*. <https://hdl.handle.net/11537/21259>
- Villagaray Medina, E. J. (2017). *Aplicacion de caucho recilado de un diseño de mezcla asfáltica para el transito vehicular de la avenida trapiche-comas(remanso) 2017 [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]*. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/1535>
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2017). Use of Crumb Rubber as an Additive in Asphalt Concrete Mixture. *Procedia Engineering*.



ANEXOS

Anexo 1: Ensayos de caracterización de agregados

Tabla 1.1

Ensayos realizados con sus normas.

Ensayo	Norma
Granulometría	MTC EG-2013
Abrasión los Ángeles	MTC E 207
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791
Caras fracturadas	MTC E 210
Absorción	MTC E 206
Índice de Plasticidad (malla N°200)	MTC E 111
Absorción	MTC E 205
Resistencia de Mezclas Bituminosas empleando el aparato Marshall	MTC E 504

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS (Norma de referencia: NTP 339.128)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 07/04/22
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:

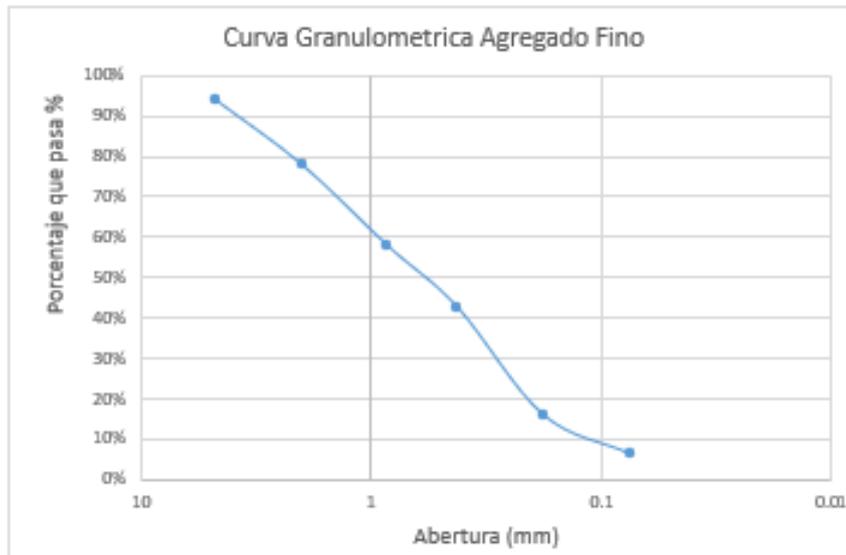
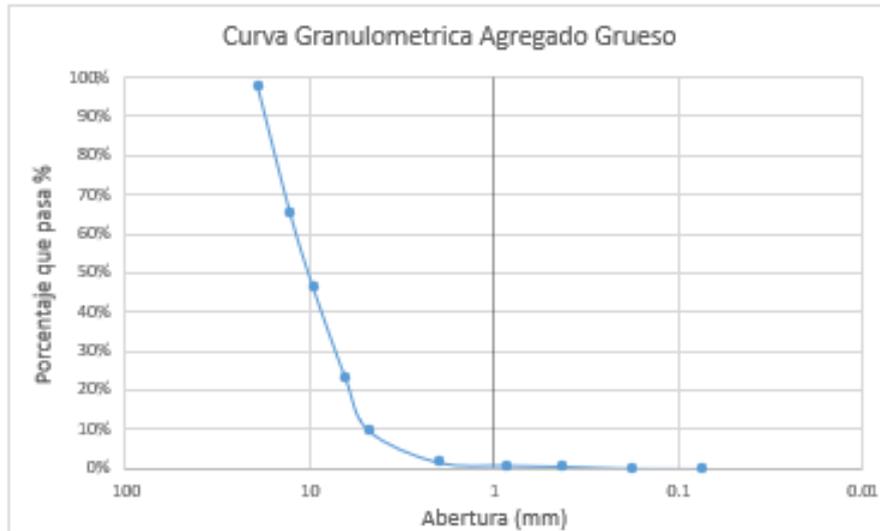
DATOS DEL LABORATORIO	
Alumnos: Rodrigo Alonso Dulanto Hugo y Renzo Antonio Saldaña Arevalo	
Nombre del proyecto: Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica	
Fecha: 05/11/2021	

EQUIPO DE ENSAYO	
Balanza: UL-90277217	

ENSAYO								
i	Tamiz	Diámetro (mm)	Peso retenido (g)	Parcial retenido (%)	Retenido acumulado (%)	% que pasa acumulado		Peso inicial: _____ Bandeja N° _____ Separado en tamiz N° 10 Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Peso mayor que el tamiz N° 10: _____
1	3/4"	19.05	187.8	6.39	1.86%	98.14%		
2	1/2"	12.7	3266.2	111.16	32.34%	65.80%		
3	3/8"	9.53	1926.4	65.56	19.08%	46.72%		
4	1/4"	6.35	2353.6	80.10	23.31%	23.41%		
5	N°4	4.75	1369.5	46.61	13.56%	9.85%		
6	N°10	2	828.82	28.21	8.21%	1.65%		
7	N°20	0.85	76.11	2.59	0.75%	0.89%		
8	N°40	0.425	30.19	1.03	0.30%	0.59%		
9	N°80	0.18	50.82	1.73	0.50%	0.09%		
10	N°200	0.075	7.08	0.24	0.07%	0.02%		
Bandeja			2					Peso seco mayor que el tamiz N° 10 después del tamizado: _____
Suma			10098.52					
i	Tamiz	Diámetro (mm)	Peso retenido (g)	Parcial retenido (%)	Retenido acumulado (%)	% que pasa acumulado		Peso menor que el tamiz N° 10 utilizado en granulometría: _____ Peso seco menor que el tamiz N° 10 después del lavado: _____
1	N° 4	4.750	30.8	5.97%	5.97%	94.03%		
2	N° 10	2.000	82.65	16.03%	22.01%	77.99%		
3	N° 20	0.850	103.3	20.04%	42.05%	57.95%		
4	N° 40	0.425	77.75	15.08%	57.13%	42.87%		
5	N° 80	0.180	137.28	26.63%	83.76%	16.24%		
6	N° 200	0.075	49.98	16.25%	100%	6.55%		
Bandeja			33.75					
Suma			515.51					

Toda copia de este documento fuera del entorno de la RED es una COPIA NO CONTROLADA, a excepción de que haya sido sellada como COPIA CONTROLADA

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS (Norma de referencia: NTP 339.128)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 07/04/22
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:



Toda copia de este documento fuera del entorno de la RED es una COPIA NO CONTROLADA, a excepción de que haya sido sellada como COPIA CONTROLADA

 UNIVERSIDAD DE LIMA	RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE AGREGADOS PEQUEÑOS POR ABRASIÓN E IMPACTO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (Norma de referencia: ASTM C131/ASTM C131M-20)			Proceso: Extensión y desarrollo social Subproceso: Consultoría empresarial
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 24/11/2020
	CIV	CIV	CIV	Versión: 01
	A. Domínguez	I. Montoya	J. Salinas	Código: EDS-2-FIA/CIV-R-014

DATOS DEL PROYECTO

Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica

Id. proyecto : **Informe N° : U - 0**
 Solicita : Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

EQUIPOS DE ENSAYO

Balanza : UL-90277217
 Equipo de abrasión : UL-90277223

DATOS DE LA MUESTRA

Id. Muestra : Fecha de recepción : 12/11/2021
 Método cuarteo (NTP 339.089) : B Fecha de ensayo : 12/11/2021

ENSAYO DE ABRASIÓN E IMPACTO

Id.	Ensayo N°	Descripción
1	Gradación de la muestra	B
2	Carga abrasiva (N° de esferas)	11
3	Masa de la muestra antes del ensayo (g)	5,010.0
4	Masa de muestra retenida por el tamiz N° 12 (g)	4,420.6
5	Pérdida por abrasión e impacto (%)	12

Job N° _____ Laboratorio N°: _____ Laboratorista : Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Nombre del proyecto: Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica Fecha: 12/11/2021

a. Partículas chatas (relación 1:3).

Tamaño de agregado		A	B	C	D	E	Total E
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	(g)	(g)	(B / A * 100)	%	C x D	Total D
1"	3/4"	138.60	23.70	17.10	3.82	65.29	24.8
3/4"	1/2"	1537.40	364.20	23.69	58.68	1389.99	
1/2"	3/8"	853.50	232.80	27.28	37.51	1023.01	
Total		2529.50	620.70		100.00	2478.29	

b. Partículas alargadas (relación 1:3).

Tamaño de agregado		A	B	C	D	E	Total E
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	(g)	(g)	(B / A * 100)	%	C x D	Total D
1"	3/4"	138.60	38.60	27.85	13.11	365.03	13.4
3/4"	1/2"	1537.40	136.70	8.89	46.42	412.73	
1/2"	3/8"	853.50	119.20	13.97	40.48	565.28	
Total		2529.50	294.50		100.00	1343.04	

a. Partículas chatas y alargadas (relación 1:3).

Tamaño de agregado		A	B	C	D	E	Total E
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	(g)	(g)	(B / A * 100)	%	C x D	Total D
1"	3/4"	138.60	6.50	4.69	9.56	44.83	2.9
3/4"	1/2"	1537.40	34.00	2.21	50.00	110.58	
1/2"	3/8"	853.50	27.50	3.22	40.44	130.30	
Total		2529.5	68		100.00	285.71	

a. Partículas no chatas y no alargadas.

Tamaño de agregado		A	B	C	D	E	Total E
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	(g)	(g)	(B / A * 100)	%	C x D	Total D
1"	3/4"	138.60	69.80	50.36	4.51	227.33	61.6
3/4"	1/2"	1537.40	1002.50	65.21	64.83	4227.54	
1/2"	3/8"	853.50	474.00	55.54	30.65	1702.39	
Total		2529.5	1546.3		100.00	6157.26	

A : Peso de la muestra, g.

B : Peso del material con caras fracturadas, g.

C : Porcentaje de caras fracturadas.

D : Porcentaje retenido gradación original.

E. Promedio de caras fracturadas.

Hecho Por: Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Fecha: 12/11/2021



UNIVERSIDAD
DE LIMA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES

- CARAS FRACTURADAS-
MTC E 210

Laboratorio N° : _____ Laboratorista : Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña Fecha : 15/11/2021

Nombre del proyecto: Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica

a. Con una cara fracturada

Tamaño de agregado	*	A	B	C	D	E	
Pasa tamiz	Ret. en tamiz	(und)	(g)	(g)	(B/A * 100)	%	C x D
3/4" (19mm)	1/2" (12.5mm)		1200.2	54.80	4.57	80.0	365.3
1/2" (12.5mm)	3/8" (9.5mm)		300	39.40	13.13	20.0	262.6
Total			1500.2	94.2		100	627.916
Porcentaje con una cara fracturada =				$\frac{\text{Total E}}{\text{Total D}}$	=	6.3	

b. Con dos o más caras fracturadas

Tamaño de agregado	*	A	B	C	D	E	
Pasa tamiz	Ret. en tamiz	(und)	(g)	(g)	(B/A * 100)	%	C x D
3/4" (19mm)	1/2" (12.5mm)		1200.2	1145.4	95.43	80.0	7635.0
1/2" (12.5mm)	3/8" (9.5mm)		300	260.6	86.87	20.0	1737.1
Total			1500.2	1406		100	9372.084
Porcentaje con dos o mas cara fracturada =				$\frac{\text{Total E}}{\text{Total D}}$	=	93.7	

A : Peso de la muestra, g.

B : Peso del material con caras fracturadas, g.

C : Porcentaje de caras fracturadas.

D : Porcentaje retenido gradación original.

E. Promedio de caras fracturadas.

OBSERVACIONES:

Hecho Por: Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Fecha: 15/11/2021



 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (Norma de referencia: NTP 400.021)			Proceso: Extensión y desarrollo social Subproceso: Consultoría empresarial	
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 19/03/2020	
	CIV	CIV	CIV	Versión: 01	
A. Domínguez	I. Montoya	J. Salinas	Código: FA-2-FIA/CIV/L-G-005		
DATOS DEL PROYECTO					
Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica					
Id. proyecto		: Agregado Grueso (Gs y absorcion)		Informe N° : : U - 0	
DATOS DE LA MUESTRA					
Id. Muestra		:		Fecha de muestreo : 17/11/2021	
Fuente		:		Fecha de recepción : 17/11/2021	
Muestra		: Agregado grueso		Fecha de ensayo : 17/11/2021	
Método de reducción de muestra : B					
ENSAYO (PROCEDIMIENTO GRAVIMÉTRICO)					
Descripción	Unidad	Símbolo	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Masa del agregado seco (OD)	g	A	2057.8	2062.5	2041.7
Masa del agregado en condición saturada superficialmente seca (SSD)	g	B	2079.3	2085.5	2063.8
Masa aparente del agregado en sumergido en agua	g	C	1310.1	1313.3	1299.8
Gravedad específica (OD)	s/u	---	2.68	2.68	2.67
Gravedad específica (SSD)	s/u	---	2.70	2.70	2.70
Gravedad específica aparente	s/u	---	2.75	2.75	2.75
Absorción	%	---	1.04	1.04	1.08
Gravedad específica (OD) promedio	s/u	---	2.67		
Gravedad específica (SSD) promedio	s/u	---	2.70		
Gravedad específica aparente promedio	s/u	---	2.75		
Absorción promedio	%	---	1.06		

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO (Norma de referencia: NTP 400.022)			Proceso: Extensión y desarrollo social Subproceso: Consultoría empresarial	
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 19/03/2020	
	CIV	CIV	CIV	Versión: 01	
	A. Domínguez	I. Montoya	J. Salinas	Código: FA-2-FIA/CIV/L-G-004	
DATOS DEL PROYECTO					
Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica					
Id. proyecto		: Agregado fino (Gs y absorción)		Informe N° : : U - 0	
DATOS DE LA MUESTRA					
Id. Muestra		:		Fecha de muestreo : 17/11/2021	
Fuente		:		Fecha de recepción : 17/11/2021	
Muestra		: Arena		Fecha de ensayo : 17/11/2021	
Método de reducción de muestra : B					
ENSAYO (PROCEDIMIENTO GRAVIMETRICO)					
Descripción	Unidad	Símbolo	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Pícnómetro N°	- - -	n	P1	P1	P1
Masa del agregado seco	g	A	497.4	501.7	511.6
Masa del picnómetro y el agua hasta marca de calibración	g	B	968.4	971.8	960.6
Masa del picnómetro, el agregado y el agua hasta marca de calibración	g	C	1,151.2	1,157.0	1,151.2
Masa del agregado en condición saturada superficialmente seca	g	S	500.0	504.4	514.4
Gravedad específica (OD)	s/u	- - -	1.57	1.57	1.58
Gravedad específica (SSD)	s/u	- - -	1.58	1.58	1.59
Gravedad específica aparente	s/u	- - -	1.58	1.59	1.59
Absorción	%	- - -	0.52	0.54	0.55
Gravedad específica (OD) promedio	s/u	- - -	1.57	- - -	- - -
Gravedad específica (SSD) promedio	s/u	- - -	1.58	- - -	- - -
Gravedad específica aparente promedio	s/u	- - -	1.59	- - -	- - -
Absorción promedio	%	- - -	0.54	- - -	- - -

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (Norma de referencia: NTP 339.129)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 26/04/22
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:

DATOS DEL LABORATORIO	
Tesis: Rodrigo Alonso Dulanto Hugo y Renzo Antonio Saldaña Arevalo	
Nombre del proyecto: Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica	
Fecha: 25/03/2022	

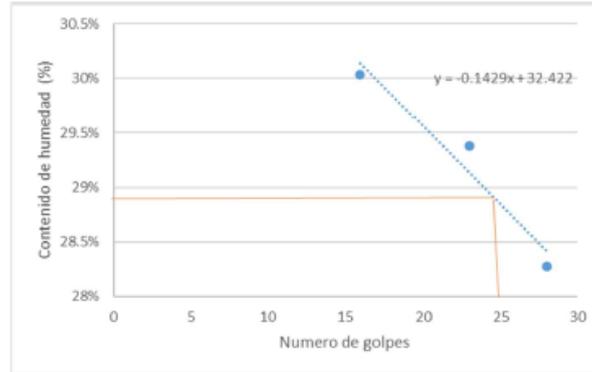
EQUIPO DE ENSAYO	
Balanza: UL-90277217	Copa Casagrande: UL-90277380

ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO							
--------------------------	--	--	--	--	--	--	--

Descripción	Unidad	Símbolo	Límite líquido			Límite plástico	
			1	2	3	1	2
Vasija	---	---	R1	R5	R4	30	32
Número de golpes	---	N	16	23	28	-	-
Masa de la vasija	g	M _v	22.86	22.9	22.69	23.57	24.44
Masa del suelo húmedo y vasija	g	M _{wh}	34.81	33.38	33.26	30.42	31.24
Masa del suelo seco y la vasija	g	M _{cs}	32.05	31	30.93	29.2	29.7
Masa del agua	g	M _w	2.76	2.38	2.33	1.22	1.54
Masa del suelo seco	g	M _s	9.19	8.1	8.24	5.63	5.26
Contenido de agua	%	w	30.03	29.38	28.28	21.67	29.28

Toda copia de este documento fuera del entorno de la RED es una COPIA NO CONTROLADA, a excepción de que haya sido sellada como COPIA CONTROLADA

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (Norma de referencia: NTP 339.129)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 26/04/22
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:



- Método B (un solo punto):

$$LL = W \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$$

LL = 28.85	LP = 25.47	IP = 3.38
LL ≈ 29	LP ≈ 25	IP ≈ 3

"Toda copia de este documento fuera del entorno de la RED es una COPIA NO CONTROLADA, a excepción de que haya sido sellada como COPIA CONTROLADA"



LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES

- PESO UNITARIO VOLUMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESO -
ASTM C 29

Laboratorio Nº : Materiales

Laboratorista : Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Fecha : 12/11/2021

Proyecto Nº : _____

Nombre del proyecto : Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica

PESO UNITARIO SUELTO

	# ENSAYO	1	2	3
[1]	CAPACIDAD DE LA MEDIDA (m ³)	0.0067	0.0067	0.0067
[2]	PESO DE LA MEDIDA VACÍA (g)	5460	5460	5460
[3]	PESO DE LA MEDIDA + AGREGADO (g)	19060	18980	19070
[4] = (3) - (2)	PESO DEL AGREGADO (g)	13600	13520	13610
[5] = (4) / (1)	PESO DEL AGREGADO POR UNIDAD DE VOLUMEN (Kg/m ³)	2026.253	2014.334	2027.743

PESO UNITARIO PROMEDIO = 2022.777 Kg/m³

PESO UNITARIO VARILLADO

	# ENSAYO	1	2	3
[1]	CAPACIDAD DE LA MEDIDA (m ³)	0.0067	0.0067	0.0067
[2]	PESO DE LA MEDIDA VACÍA (g)	5460	5460	5460
[3]	PESO DE LA MEDIDA + AGREGADO (g)	20200	20420	20380
[4] = (3) - (2)	PESO DEL AGREGADO (g)	14740	14960	14920
[5] = (4) / (1)	PESO DEL AGREGADO POR UNIDAD DE VOLUMEN (Kg/m ³)	2196.101	2228.878	2222.919

PESO UNITARIO PROMEDIO = 2215.966 Kg/m³

OBSERVACIONES:

Realizado por : Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Fecha : 15/11/2021

SCIENTIA ET PRAXIS

LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES

- PESO UNITARIO VOLUMÉTRICO DE AGREGADOS FINO -
ASTM C 29

Laboratorio N° : Materiales

Laboratorista : Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Fecha : 12/11/2021

Proyecto N° : _____

Nombre del proyecto: Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica

PESO UNITARIO SUELTO

# ENSAYO		1	2	3
[1]	CAPACIDAD DE LA MEDIDA (m ³)	0.0033	0.0033	0.0033
[2]	PESO DE LA MEDIDA VACÍA (g)	2604	2604	2604
[3]	PESO DE LA MEDIDA + AGREGADO (g)	7447	7425.2	7453.13
[4] = (3) - (2)	PESO DEL AGREGADO (g)	4843	4821.2	4849.13
[5] = (4) / (1)	PESO DEL AGREGADO POR UNIDAD DE VOLUMEN (kg/m ³)	1452.379	1445.841	1454.217

PESO UNITARIO PROMEDIO = 1450.812 kg/m³

PESO UNITARIO VARILLADO

# ENSAYO		1	2	3
[1]	CAPACIDAD DE LA MEDIDA (m ³)	0.0033	0.0033	0.0033
[2]	PESO DE LA MEDIDA VACÍA (g)	2604	2604	2604
[3]	PESO DE LA MEDIDA + AGREGADO (g)	8264.2	8259	8258.4
[4] = (3) - (2)	PESO DEL AGREGADO (g)	5660.2	5655	5654.4
[5] = (4) / (1)	PESO DEL AGREGADO POR UNIDAD DE VOLUMEN (kg/m ³)	1697.451	1695.891	1695.712

PESO UNITARIO PROMEDIO = 1696.351 kg/m³

OBSERVACIONES:

Realizado por : Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Fecha : 15/11/2021

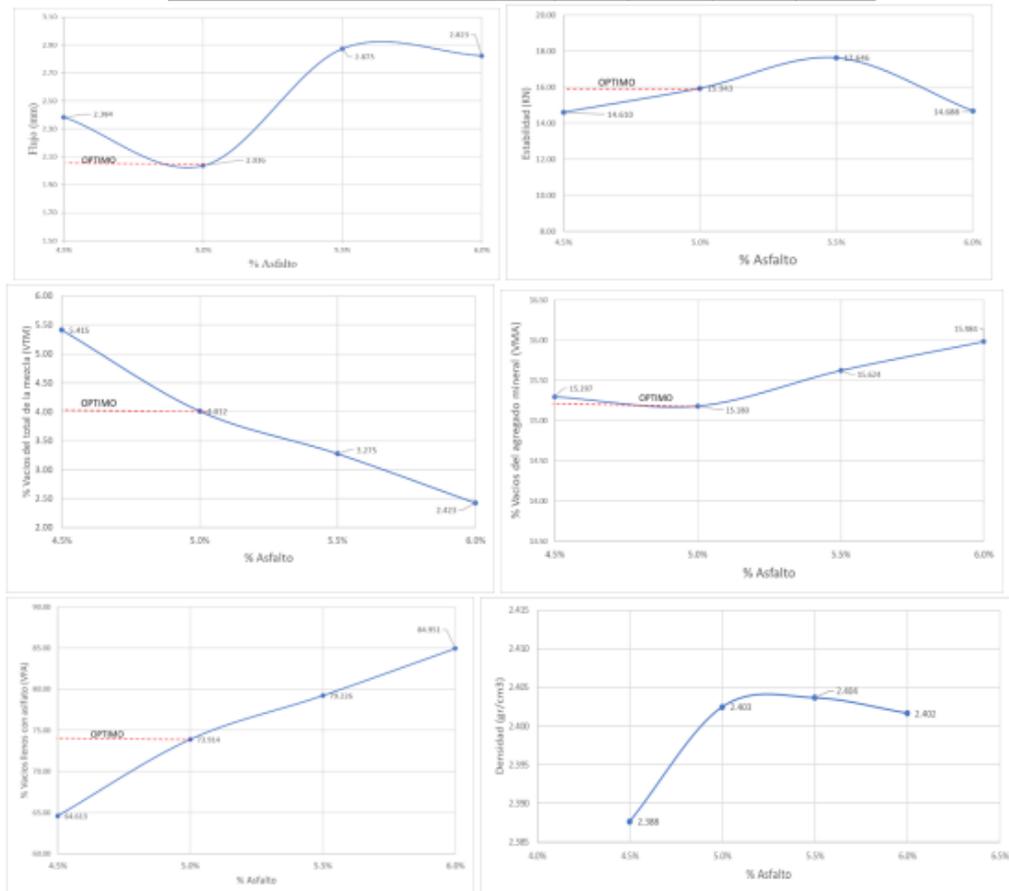
SCIENTIA ET PRA

Anexo 2: Diseño de mezcla asfáltica convencional

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO MARSHALL (Norma de referencia: MTC E-504)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 26/04/22
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:

DATOS DEL LABORATORIO	
Tesisistas: Rodrigo Alonso Dulanto Hugo y Renzo Antonio Saldaña Arevalo	
Nombre del proyecto: Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica	
Fecha: 22/11/2021	Tipo: Asfalto PEN 60/70
ENSAYO MARSHALL	

% Asfalto en la mezcla	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%
Nº de golpes por cara	75	75	75	75
Estabilidad (kN)	14.61	15.94	17.646	14.688
Flujo (mm)	2.38	2.04	2.873	2.823
Porcentaje de vacíos del total de la mezcla, VTM	5.41	4.01	3.275	2.423
Porcentajes de vacíos del agregado mineral, VMA	15.30	15.18	15.624	15.984
Porcentaje de vacíos llenos con asfalto, VFA	64.61	73.91	79.226	84.951
Densidad de cada espécimen Marshall (gr/cm ³)	2.39	2.40	2.404	2.402



 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO MARSHALL (Norma de referencia: MTC E-504)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 26/04/22
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:

DATOS DEL LABORATORIO													
Testistas: Rodrigo Alonso Dulanto Hugo y Renzo Antonio Saldaña Arevalo													
Nombre del proyecto: INFLUENCIA DEL CAUCHO MOLIDO EN LAS PROPIEDADES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA													
Fecha: 10/03/2022						Tipo: Asfalto PEN 60/70							
ENSAYO MARSHALL CON CAUCHO													
% Asfalto en la mezcla		4.50%			5.00%			5.50%			6.00%		
% Agregado grueso		38.20%			38.00%			37.80%			37.60%		
% Agregado fino		57.30%			57.00%			56.70%			56.57%		
Nº	Nº de Especimen	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	% Cemento Asfáltico en peso de la mezcla (Pb)	4.5	4.5	4.5	5	5	5	5.5	5.5	5.5	6	6	6
2	% Agregado grueso en peso de la mezcla (Ps)	38.2	38.2	38.2	38	38	38	37.8	37.8	37.8	37.6	37.6	37.6
3	% Agregado fino en peso de la mezcla	57.3	57.3	57.3	57	57	57	56.7	56.7	56.7	56.57	56.57	56.57
4	% Filler en peso de la mezcla (P _s)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Gravedad Específica Aparente (G _{sa}) Cemento Asfáltico	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	Gravedad Específica Seca Bulk (G _{sb}) agregado grueso	2.68	2.67	2.67	2.675	2.671	2.672	2.675	2.671	2.672	2.675	2.671	2.672
7	Gravedad Específica Seca Bulk (G _{sb}) agregado fino	2.72	2.71	2.68	2.721	2.709	2.684	2.721	2.709	2.684	2.721	2.709	2.684
8	Gravedad Específica Seca Bulk (G _{sb}) filler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Gravedad Específica seca Aparente (G _{sa}) agregado grueso	2.75	2.75	2.75	2.752	2.753	2.752	2.752	2.753	2.752	2.752	2.753	2.752
10	Gravedad Específica seca Aparente (G _{sa}) agregado fino	2.76	2.75	2.72	2.760	2.749	2.724	2.760	2.749	2.724	2.760	2.749	2.724
11	Gravedad Específica Seca Aparente (G _{sa}) filler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Promedio A=(G _{sa} + G _{sb})/2 del agregado grueso A=(6+9)/2	2.714	2.712	2.712	2.714	2.712	2.712	2.714	2.712	2.712	2.714	2.712	2.712
13	Promedio B=(G _{sa} + G _{sb})/2 del agregado grueso B=(7+10)/2	2.741	2.729	2.704	2.741	2.729	2.704	2.741	2.729	2.704	2.741	2.729	2.704
14	Promedio C=(G _{sa} + G _{sb})/2 del agregado grueso C=(8+11)/2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Altura promedio del especimen (cm)	63.605	64.05	64.585	65.09	62.855	62.535	61.855	62.035	64.7	63.755	62.71	62.975
16	Gravedad Específica Seca Bulk de la combinación de agregados G=(2+3+4)/((2/6)+(3/7)+(4/8))	2.703	2.694	2.679	2.703	2.694	2.679	2.703	2.694	2.679	2.703	2.694	2.679
17	Gravedad Específica Seca aparente de la combinación de agregados G=(2+3+4)/((2/9)+(3/10)+(4/11))	2.757	2.751	2.735	2.757	2.751	2.735	2.757	2.751	2.735	2.757	2.751	2.735
18	Peso del especimen al aire. gr (W _d)	1188.09	1176.6	1171.7	1175.7	1195.14	1176.9	1178.01	1181.74	1167.7	1190.76	1189.78	1183.87
19	Peso en el aire del especimen con superficie seca. gr (W _{pD})	1192.2	1179	1176.5	1180.9	1198	1179.1	1180	1185.1	1169.7	1194.9	1193	1187.4
20	Peso sumergido del especimen parafinado. gr (W _{pSub})	692.8	683.8	676.7	681.9	700.2	690.1	691.5	693.5	673.6	692.2	694.1	692.1

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO MARSHALL (Norma de referencia: MTC E-504)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución			
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 26/04/22			
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0			
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:			

21	Volumen del espécimen parafinado, WpD-Wypsub (19-20) cm³	499.4	495.2	499.8	499	497.8	489	488.5	491.6	496.1	502.7	498.9	495.3
22	Peso de la parafina, Wpd-Wd (19-18) gr	4.11	2.4	4.8	5.2	2.86	2.2	1.99	3.36	2	4.14	3.22	3.53
23	Volumen de la parafina (22/yp) cm³	4.835	2.824	5.647	6.118	3.365	2.588	2.341	3.953	2.353	4.871	3.788	4.153
24	Volumen del espécimen (21-23) cm³	494.565	492.376	494.153	492.882	494.435	486.412	486.159	487.647	493.747	497.829	495.112	491.147
25	Gravedad específica bulk del espécimen Gmb=18/24	2.402	2.39	2.371	2.385	2.417	2.42	2.423	2.423	2.365	2.392	2.403	2.41
26	Gravedad específica teórica máxima Gm=(100)/((1/5)+(2/12)+(3/13)+(4/14))	2.533	2.526	2.514	2.512	2.506	2.494	2.493	2.487	2.475	2.469	2.463	2.452
27	Porcentaje de vacíos del total de la mezcla VTM=(1-25/26)*100	5.172	5.384	5.688	5.056	3.551	2.967	2.808	2.573	4.444	3.119	2.436	1.713
28	Densidad de cada espécimen Marshall (25) gr/cm³	2.402	2.39	2.371	2.385	2.417	2.42	2.423	2.423	2.365	2.392	2.403	2.41
29	% de vacíos del agregado mineral, VMA VMA=1-((25x1*/100)/16)x100	15.1347	15.2765	15.4795	16.1765	14.7680	14.1844	15.2891	15.0061	16.5761	16.6650	16.0020	15.2857
30	% de vacíos llenos con asfalto VFA=(29-27)/29)x100	65.827	64.756	63.255	68.745	75.955	79.083	81.634	82.854	73.19	81.284	84.777	88.793
31	Gravedad específica efectiva Gse=(100-1)/((100/26)-(1/5))	2.730	2.722	2.707	2.729	2.722	2.707	2.730	2.723	2.707	2.724	2.717	2.702
32	Gravedad específica aparente de la combinación de agregados (Gsa), 17	2.757	2.751	2.735	2.757	2.751	2.735	2.757	2.751	2.735	2.757	2.751	2.735
33	Gravedad específica bulk de la combinación de agregados (Gsb), 16	2.703	2.694	2.679	2.703	2.694	2.679	2.703	2.694	2.679	2.703	2.694	2.679
34	Si Gsa>Gse>Gsb, continuar con la verificación	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
35	Gravedad específica teórica máxima, 26	2.533	2.526	2.514	2.512	2.506	2.494	2.493	2.487	2.475	2.469	2.463	2.452
36	Gravedad específica teórica máxima Gmm=(25/(100-27))x100	2.533	2.526	2.514	2.512	2.506	2.494	2.493	2.487	2.475	2.469	2.463	2.452
37	Si 35=36, continuar con la verificación	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
38	% de vacíos del agregado mineral, VMA, 29	15.1347	15.2765	15.4795	16.1765	14.7680	14.1844	15.2891	15.0061	16.5761	16.6650	16.0020	15.2857
39	% de vacíos del agregado mineral, VMA=100-(((2+3+4)x25)/16)	15.1347	15.2765	15.4795	16.1765	14.7680	14.1844	15.2891	15.0061	16.5761	16.6650	16.0020	15.2857
40	Si 38=39, concluye con la verificación	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
41	Estabilidad sin corregir (KN)	13.264	13.005	13.943	14.704	15.625	14.55	16.094	16.715	15.757	13.898	14.046	13.126
42	Factor de Estabilidad	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.04	1.09
43	Estabilidad corregida (41x12) (KN)	14.45776	14.17545	15.19787	16.02736	17.03125	15.8595	17.54246	18.21935	17.17513	15.14882	14.60784	14.30734
44	Estabilidad corregida promedio (KN)		14.610			15.943		17.646				14.688	
45	Flujo (mm)	2.934	1.926	2.292	2.177	2.695	1.895	2.69	2.6	3.33	2.762	2.851	2.855
46	Flujo promedio (mm)		2.38			2.04		2.873			2.823		
47	Densidad de cada espécimen Marshall, promedio (gr/cm³)		2.39			2.40		2.404			2.402		
48	Porcentaje de vacíos del total de la mezcla, VTM		5.41			4.01		3.275			2.423		
49	Porcentajes de vacíos del agregado mineral, VMA		15.30			15.18		15.624			15.984		
50	Porcentaje de vacíos llenos con asfalto, VFA		64.61			73.91		79.226			84.951		

Anexo 3: Diseño de mezcla asfáltica modificada con caucho



LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES
- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO -
 ASTM D 422

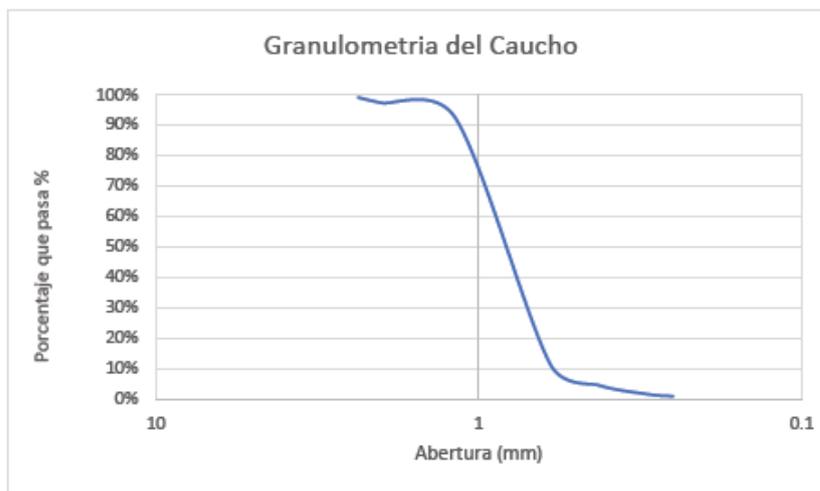
Laboratorio : Geotecnia

Laboratoristas: Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Fecha : 7/03/2022

Nombre del proyecto: Influencia del caucho molido en las propiedades de una mezcla asfáltica

Tamices		Peso Retenido (g)	Peso Retenido Acumulado Global (g)	Porcentaje	
plg	mm			Retenido	Pasa
#8	2.360	18.17	18.17	0.92%	99.08%
#10	2.000	36.18	54.35	2.74%	97.26%
#16	1.180	98.39	152.74	7.70%	92.30%
#30	0.600	1,604.32	1,757.06	88.62%	11.38%
#40	0.420	136.62	1,893.68	95.51%	4.49%
#50	0.300	57.65	1,951.33	98.42%	1.58%
#60	0.250	14.30	1,965.63	99.14%	0.86%
FONDO	-----	17.1	1,982.73	100.00%	0.00%



OBSERVACIÓN :

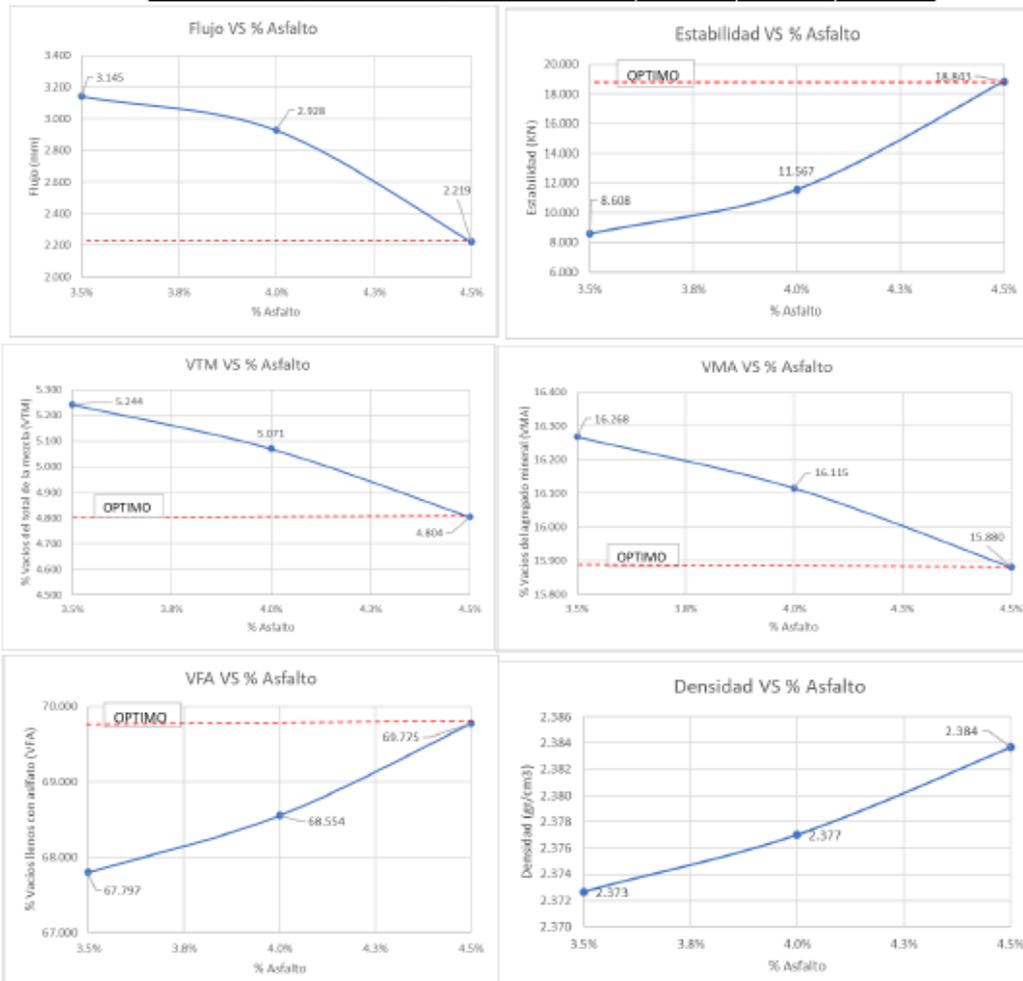
Realizado por : Rodrigo Dulanto y Renzo Saldaña

Fecha : 7/03/2022

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO MARSHALL (Norma de referencia: MTC E-504)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 26/04/22
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:

DATOS DEL LABORATORIO	
Tesistas: Rodrigo Alonso Dulanto Hugo y Renzo Antonio Saldaña Arevalo	
Nombre del proyecto: Análisis del comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con caucho molido	
Fecha: 10/03/2022	Tipo: Asfalto PEN 60/70 agregado con caucho granular
ENSAYO MARSHALL CON CAUCHO	

	4.50%	4.00%	3.50%
% Asfalto en la mezcla	4.50%	4.00%	3.50%
% Asfalto en la mezcla + caucho	5.00%	5.00%	5.00%
Estabilidad (KN)	18.84	11.57	8.61
Flujo (mm)	2.22	2.93	3.14
Porcentaje de vacíos del total de la mezcla, VTM	4.80	5.07	5.24
Porcentajes de vacíos del agregado mineral, VMA	15.88	16.12	16.27
Porcentaje de vacíos llenos con asfalto, VFA	69.78	68.55	67.80
Densidad de cada espécimen Marshall (gr/cm ³)	2.384	2.377	2.373



 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO MARSHALL (Norma de referencia: MTC E-504)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 26/04/22
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:

DATOS DEL LABORATORIO	
Tesistas: Rodrigo Alonso Dulanto Hugo y Renzo Antonio Saldaña Arevalo	
Nombre del proyecto: INFLUENCIA DEL CAUCHO MOLIDO EN LAS PROPIEDADES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	
Fecha: 10/03/2022	Tipo: Asfalto PEN 60/70 con caucho
ENSAYO MARSHALL CON CAUCHO	

% Asfalto en la mezcla	4.50%			4.00%			3.50%			
% Agregado grueso	38.00%			38.00%			38.00%			
% Agregado fino	57.00%			57.00%			57.00%			
Nº	Nº de Especimen	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	% Cemento Asfáltico en peso de la mezcla (Pb)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	% Agregado grueso en peso de la mezcla (Ps)	38	38	38	38	38	38	38	38	38
3	% Agregado fino en peso de la mezcla	57	57	57	57	57	57	57	57	57
4	% Filler en peso de la mezcla (Pc)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Gravedad Específica Aparente (Gsa) Cemento Asfáltico	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	Gravedad Específica Seca Bulk (Gsb) agregado grueso	2.675	2.680	2.677	2.675	2.678	2.679	2.675	2.671	2.672
7	Gravedad Específica Seca Bulk (Gsb) agregado fino	2.701	2.702	2.684	2.705	2.709	2.690	2.721	2.709	2.684
8	Gravedad Específica Seca Bulk (Gsb) filler	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150
9	Gravedad Específica seca Aparente (Gsa) agregado grueso	2.752	2.753	2.752	2.752	2.753	2.752	2.752	2.753	2.752
10	Gravedad Específica seca Aparente (Gsa) agregado fino	2.760	2.749	2.724	2.730	2.749	2.730	2.730	2.749	2.730
11	Gravedad Específica Seca Aparente (Gsa) filler	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
12	Promedio A=(Gsa + Gsb)/2 del agregado grueso A=(6+9)/2	2.714	2.716	2.714	2.714	2.715	2.715	2.714	2.712	2.712
13	Promedio B=(Gsa + Gsb)/2 del agregado grueso B=(7+10)/2	2.731	2.726	2.704	2.718	2.729	2.710	2.726	2.729	2.707
14	Promedio C=(Gsa + Gsb)/2 del agregado grueso C=(8+11)/2	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075
15	Altura promedio del especimen (cm)	63.50	62.98	62.78	62.73	62.39	62.54	63.50	63.07	63.25
16	Gravedad Específica Seca Bulk de la combinación de agregados G=(2+3+4)/((2/6)+(3/7)+(4/8))	2.691	2.693	2.681	2.693	2.697	2.702	2.705	2.707	2.707
17	Gravedad Específica Seca aparente de la combinación de agregados G=(2+3+4)/((2/9)+(3/10)+(4/11))	2.757	2.751	2.735	2.739	2.751	2.739	2.739	2.751	2.739
18	Peso del especimen al aire, gr (Wd)	1181.8	1181.3	1181.7	1184.5	1184.1	1184.9	1184.1	1184.8	1184.9
19	Peso en el aire del especimen con superficie seca, gr (WpD)	1185.7	1184.5	1185.6	1187.2	1187.5	1188.1	1187.3	1187.5	1187.2
20	Peso sumergido del especimen parafinado, gr (Wpssub)	684.5	684.2	684.8	685.5	685.8	685.2	685.1	684.8	685.9
21	Volumen del especimen parafinado, WpD-Wpssub (19-20) cm³	501.2	500.3	500.8	501.7	501.7	502.9	502.2	502.7	501.3
22	Peso de la parafina, Wpd-Wd (19-18) gr	3.9	3.2	3.9	2.7	3.4	3.2	3.2	2.7	2.3
23	Volumen de la parafina (22/yp) cm³	4.588	3.765	4.588	3.176	4.000	3.765	3.765	3.176	2.706
24	Volumen del especimen (21-23) cm³	496.612	496.535	496.212	498.524	497.700	499.135	498.435	499.524	498.594
25	Gravedad específica seca bulk del especimen Gmb=18/24	2.38	2.379	2.381	2.376	2.379	2.374	2.376	2.372	2.376

 UNIVERSIDAD DE LIMA	ENSAYO MARSHALL (Norma de referencia: MTC E-504)			Proceso: Formación académica Subproceso: Ejecución	
	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha de vigencia: 26/04/22	
	CIV	CIV	CIV	Versión: 1.0	
	A. Domínguez	M. López	J. Salinas	Código:	

26	Gravedad específica teórica máxima $G_m = (100) / ((1/5) + (2/12) + (3/13) + (4/14))$	2.508	2.506	2.495	2.501	2.507	2.498	2.505	2.506	2.496
27	Porcentaje de vacíos del total de la mezcla $VTM = (1 - 25/26) * 100$	5.104	5.068	4.569	4.998	5.106	4.964	5.15	5.347	4.808
28	Densidad de cada espécimen Marshall (25) gr/cm ³	2.38	2.379	2.381	2.376	2.379	2.374	2.376	2.372	2.376
29	% de vacíos del agregado mineral, VMA $VMA = (1 - ((25 * (1 * 100)) / 16)) * 100$	15.9792	16.0769	15.6304	16.1827	16.2013	16.5322	16.5545	16.7566	16.6162
30	% de vacíos llenos con asfalto $VFA = ((29 - 27) / 29) * 100$	68.058	68.476	70.768	69.115	68.484	69.974	68.891	68.09	71.064
31	Gravedad específica efectiva $G_{se} = (100 - 1) / ((100/26) - (1/5))$	2.724	2.722	2.708	2.716	2.723	2.712	2.72	2.722	2.709
32	Gravedad específica aparente de la combinación de agregados (G _{sa}), 17	2.757	2.751	2.735	2.739	2.751	2.739	2.739	2.751	2.739
33	Gravedad específica bulk de la combinación de agregados (G _{sb}), 16	2.691	2.693	2.681	2.693	2.697	2.702	2.705	2.707	2.707
34	Si G _{sa} > G _{se} > G _{sb} , continuar con la verificación	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
35	Gravedad específica teórica máxima, 26	2.508	2.506	2.495	2.501	2.507	2.498	2.505	2.506	2.496
36	Gravedad específica teórica máxima, $G_{mm} = (25 / (100 - 27)) * 100$	2.508	2.506	2.495	2.501	2.507	2.498	2.505	2.506	2.496
37	Si 35=36, continuar con la verificación	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
38	% de vacíos del agregado mineral, VMA, 29 % de vacíos del agregado mineral,	15.9792	16.0769	15.6304	16.1827	16.2013	16.5322	16.5545	16.7566	16.6162
39	$VMA = 100 - (((2 + 3 + 4) * 25) / 16)$	15.9792	16.0769	15.6304	16.1827	16.2013	16.5322	16.5545	16.7566	16.6162
40	Si 38=39, concluye con la verificación	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
41	Estabilidad sin corregir (KN)	17.869	18.365	18.12	12.127	11.982	11.077	9.711	9.104	8.66
42	Factor de Estabilidad	1.04	1.04	1.04	0.96	1	1	0.93	0.96	0.93
43	Estabilidad corregida (41x42) (KN)	18.58376	19.0996	18.8448	11.64192	11.982	11.077	9.03123	8.73984	8.0538
44	Estabilidad corregida promedio (KN)		18.843			11.567			8.608	
45	Flujo (mm)	2.368	2.312	2.978	2.981	2.82	2.982	2.762	2.851	2.855
46	Flujo promedio (mm)		2.553			2.928			2.823	
47	Densidad de cada espécimen Marshall, promedio (gr/cm ³)		2.380			2.376			2.375	
48	Porcentaje de vacíos del total de la mezcla, VTM		4.914			5.023			5.102	
49	Porcentajes de vacíos del agregado mineral, VMA		15.895			16.305			16.642	
50	Porcentaje de vacíos llenos con asfalto, VFA		69.101			69.191			69.348	

Anexo 4: Panel fotográfico

Figura 4. 1

Colocación de la muestra en la máquina de Los Ángeles



Figura 4. 2

Ensayo de las partículas chatas y alargadas



Figura 4. 3

Ensayo de caras fracturadas



Figura 4. 4

Ensayo de caras fracturadas muestras utilizadas



Figura 4.5

Muestra de agregado grueso secada al horno para el ensayo de gravedad específica y absorción



Figura 4.6

Cesta de alambre para determinar el peso sumergido del agregado grueso



Figura 4.7

Ensayo gravedad especifica y absorción del agregado fino



Figura 4.8

Muestras para determinar la gravedad específica y absorción del agregado fino



Figura 4.9

Ensayo limite plástico



Figura 4.10

Ensayo limite líquido



Figura 4.11

Ensayo de peso unitario agregado grueso



Figura 4.12

Ensayo de peso unitario agregado grueso compactación



Figura 4.13

Ensayo de peso unitario agregado fino



Figura 4.14

Ensayo de peso unitario agregado fino compactación



INFLUENCIA DEL CAUCHO MOLIDO EN LAS PROPIEDADE...

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.usmp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
2	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
4	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
5	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
6	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
7	link.springer.com Fuente de Internet	<1 %
8	www.mdpi.com Fuente de Internet	<1 %
9	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

10	inteinsapavimentos.com.co Fuente de Internet	<1 %
11	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
12	docslide.us Fuente de Internet	<1 %
13	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
14	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
15	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
16	patents.google.com Fuente de Internet	<1 %
17	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	García, . "Monitoring, inspection and diagnoses activities", Dam Maintenance and Rehabilitation II, 2010. Publicación	<1 %
20	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1 %

21	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
22	repositorio.uptc.edu.co Fuente de Internet	<1 %
23	vdocumento.com Fuente de Internet	<1 %
24	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %
25	"Rutilo en polvo y en adición a pasta de cemento : procesos fotocatalíticos para la descontaminación de agua", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2021 Publicación	<1 %
26	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet	<1 %
27	catalogo-gy.ucab.edu.ve Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
29	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
30	accedacris.ulpgc.es Fuente de Internet	<1 %
31	fr.scribd.com Fuente de Internet	<1 %

32	Submitted to Account Universidad Mariana Trabajo del estudiante	<1 %
33	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
34	geox.udistrital.edu.co Fuente de Internet	<1 %
35	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.uho.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
37	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	<1 %
38	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
39	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
40	repository.unimilitar.edu.co Fuente de Internet	<1 %
41	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
42	gcris.iyte.edu.tr Fuente de Internet	<1 %
43	repositorio.ulatina.ac.cr	

Fuente de Internet

<1 %

44

www.joe.uobaghdad.edu.iq

Fuente de Internet

<1 %

45

doczz.es

Fuente de Internet

<1 %

46

Submitted to Instituto Tecnologico de Costa Rica

Trabajo del estudiante

<1 %

47

Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana

Trabajo del estudiante

<1 %

48

Submitted to Universidad Santo Tomas

Trabajo del estudiante

<1 %

49

Submitted to Universidad de Huanuco

Trabajo del estudiante

<1 %

50

doaj.org

Fuente de Internet

<1 %

51

dspace.uui.ac.id

Fuente de Internet

<1 %

52

nanopdf.com

Fuente de Internet

<1 %

53

repositorio.puce.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

54 Submitted to Corporacion Mexicana de Investigacion en Matriales S.A. de C.V. (COMMIMSA) Trabajo del estudiante <1 %

55 Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Ecuador - PUCE Trabajo del estudiante <1 %

56 Submitted to Universidad Militar Nueva Granada Trabajo del estudiante <1 %

57 pubmed.ncbi.nlm.nih.gov Fuente de Internet <1 %

58 repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet <1 %

59 repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet <1 %

60 repository.ugc.edu.co Fuente de Internet <1 %

61 transparencia.mtc.gob.pe Fuente de Internet <1 %

62 www.facet.unt.edu.ar Fuente de Internet <1 %

63 repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet <1 %

repositorio.utea.edu.pe

Excluir citas Activo

Excluir coincidencias < 10 words

Excluir bibliografía Activo