



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la
incorporación de caucho como parte del agregado fino
para la ciudad de Piura**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Hildebrando Manuel Sánchez Córdova

Asesora:
Mgtr. Ing. Mariana del Socorro Ferrer Sancarranco

Piura, marzo de 2021

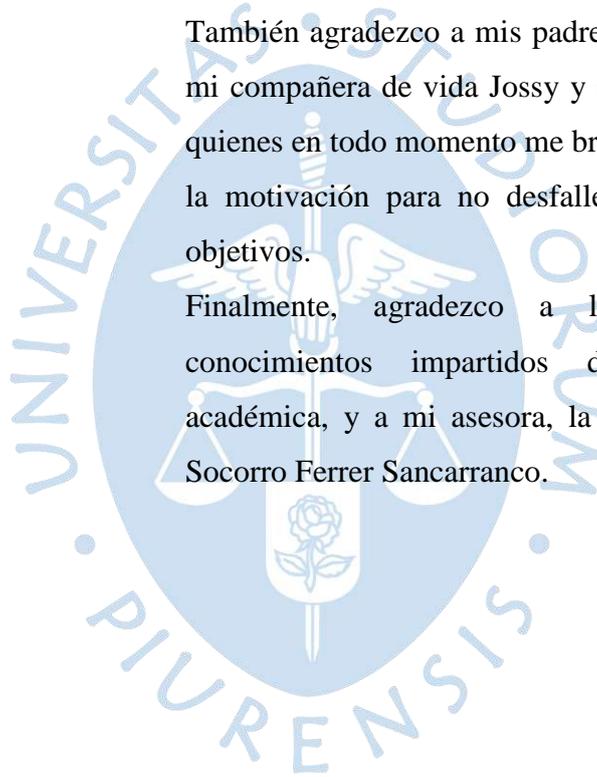


Dedicatoria

La presente tesis no hubiera sido posible sin el favor de Dios, quien gracias a su infinita sabiduría guio mis pasos.

También agradezco a mis padres Anita e Hildebrando, a mi compañera de vida Jossy y a mi hermana Ana Rosa, quienes en todo momento me brindaron su amor, apoyo y la motivación para no desfallecer en el logro de mis objetivos.

Finalmente, agradezco a los docentes por los conocimientos impartidos durante mi formación académica, y a mi asesora, la Mgtr. Ing. Mariana Del Socorro Ferrer Sancarranco.





Resumen Analítico-Informativo

Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino para la ciudad de Piura.

Sánchez Córdova Hildebrando Manuel.

Asesora: Mgtr. Ing. Mariana del Socorro Ferrer Sancarranco.

Tesis.

Ingeniero Civil.

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, marzo de 2021

Palabras claves: Caucho/mezclas asfálticas/Marshall/Lottman modificado/ Creep estático.

Introducción: Resulta lamentable observar el mal estado de las pistas de la ciudad de Piura, aun cuando han sido refaccionadas recientemente. Esta tesis nace frente a la necesidad de construir calzadas con innovaciones tecnológicas que mejoren las propiedades mecánicas; que disminuyan la susceptibilidad al agua y los niveles de deformación.

Metodología: Con la finalidad de establecer el porcentaje de caucho reciclado idóneo que debe ser considerado dentro del peso total de los áridos, se procedió a preparar las probetas, las cuales estaban en función a 3 tipos de mezclas asfálticas: las convencionales, las mejoradas con 1% y las que contenían el 2% de caucho, las mismas que fueron expuestas a 3 ensayos: Marshall, Lottman Modificado y Creep estático para medir propiedades mecánicas, susceptibilidad al agua y nivel de deformación respectivamente, evaluando además el cumplimiento de las normas establecidas.

Resultados: La mezcla asfáltica con 1% de caucho cumple con los parámetros Marshall establecidos en las normas MTC E 504 y 505, no se excede o aleja en el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, posee mayor estabilidad, cumple con el porcentaje mínimo requerido según AASHTO T 283, supera en resistencia a la tracción indirecta a las mezclas mejoradas con 2% de caucho y, reduce la deformación unitaria.

Conclusión: Se concluye que la mezcla asfáltica con 1% de caucho es la óptima para reemplazar la convencional. Sin embargo; es importante seguir utilizando el ensayo de tracción indirecta para la evaluación de la adherencia en la mezcla asfáltica, porque además de la obtención del porcentaje de resistencia conservada requisito en la evaluación de las mezclas densas en caliente, el ensayo permite analizar visualmente el comportamiento del agregado cuando es sometido en inmersión como un todo.

Fecha de elaboración del resumen: 03 de setiembre de 2020.

Analytical- informative abstract

Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino para la ciudad de Piura.

Sánchez Córdova Hildebrando Manuel.

Asesora: Mgtr. Ing. Mariana del Socorro Ferrer Sancarranco.

Tesis.

Ingeniero Civil.

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, marzo 2021.

Keywords: Rubber/ Asphalt Mixes/ Marshall/ Modified Lottman/ Static Creep.

Introduction: It is unfortunate to observe the poor condition of the tracks in the city of Piura, even though they have recently been refurbished. This thesis was born from the need to build roads with technological innovations that improve the mechanical properties; that decrease the susceptibility to water and the levels of deformation.

Methodology: In order to establish the ideal recycled rubber percentage that should be considered within the total weight of the aggregates, the test tubes were prepared, which were based on 3 types of asphalt mixtures: conventional ones, those improved with 1% and those that contained 2% rubber, the same ones that were exposed to 3 tests: Marshall, Modified Lottman and static Creep to measure mechanical properties, water susceptibility and level of deformation respectively, also evaluating compliance with the established standards.

Results: The asphalt mix with 1% rubber meets the Marshall parameters established in the MTC E 504 and 505 standards, does not exceed or deviate from the optimum percentage of asphalt cement, has greater stability, meets the minimum percentage required according to AASHTO T 283, outperforms 2% rubber-enhanced blends in indirect tensile strength and reduces strain.

Conclusions: It is concluded that the asphalt mix with 1% rubber is the optimal one to replace the conventional one. However; It is important to continue using the indirect tensile test for the evaluation of adhesion in the asphalt mix, because in addition to obtaining the percentage of conserved strength required in the evaluation of dense hot mixes, the test allows to visually analyze the behavior of the aggregate when it is submerged as a whole.

Summary date: September 3rd, 2020.

Tabla de contenido

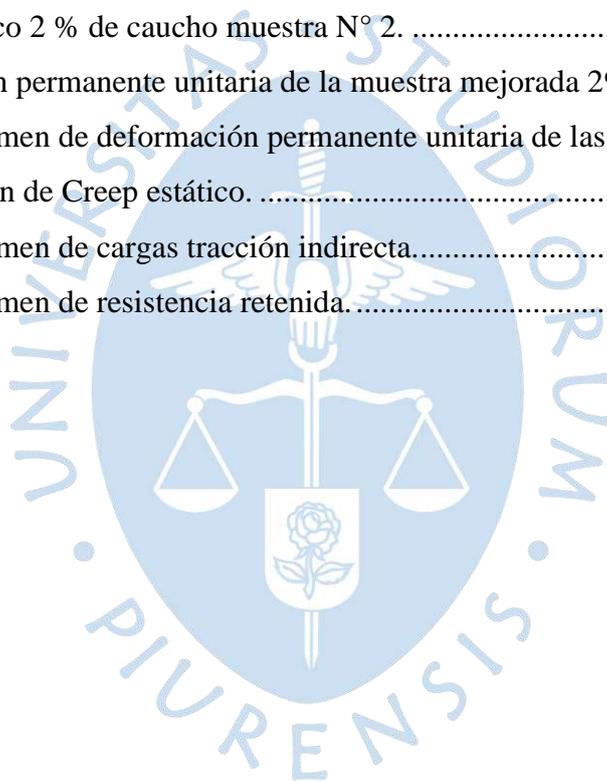
Introducción	1
Capítulo 1. Planteamiento del problema	3
1.1. Formulación del problema	4
1.2. Hipótesis	4
1.3. Operacionalización de las variables	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. General	5
1.4.2. Específicos	5
Capítulo 2. Marco teórico	7
2.1. Mezcla asfáltica	7
2.1.1. Clasificación de las mezclas asfálticas	7
2.1.2. Comportamiento de las mezclas asfálticas	8
2.1.3. Propiedades consideradas en el diseño	9
2.1.3.1. Durabilidad	9
2.1.3.2. Estabilidad	10
2.1.3.3. Flexibilidad	11
2.1.3.4. Resistencia a la fatiga	11
2.1.3.5. Impermeabilidad	11
2.1.3.6 Resistencia al deslizamiento	12
2.1.3.7. Trabajabilidad	12
2.1.4. Componentes de la mezcla asfáltica	13
2.1.4.1. Agregados pétreos	14
2.1.4.2. Ligante asfáltico	16
2.1.4.3. Caucho	18
2.2. Problemática con mezclas convencionales	22

2.2.1. Deformaciones plásticas en los pavimentos asfálticos.....	22
2.2.2. Hidrofilia en los pavimentos asfálticos	24
2.3. Métodos de diseño	24
2.3.1. Método Marshall	24
2.3.2. Proceso por vía seca	25
2.3.3. Proceso por vía húmeda	27
2.3.4. Ensayo Lottman test modificado.....	28
2.3.4.1. Lottman	29
2.3.4.2. Lottman Modificado (AASHTO T283):	30
2.3.5. Ensayo Creep estático	30
Capítulo 3. Desarrollo experimental	31
3.1. Materiales	31
3.2. Descripción de ensayos.....	34
3.2.1. Método Marshall.....	34
3.2.2. Preparación de la mezcla mediante proceso seco.....	36
3.2.3. Ensayo Creep estático	37
3.2.4. Ensayo tracción indirecta o Lottman Test modificado.....	39
Capítulo 4. Discusión de resultados	41
Conclusiones	53
Recomendaciones.....	55
Referencias bibliográficas	57
Apéndices	61
Anexos.....	91

Lista de tablas

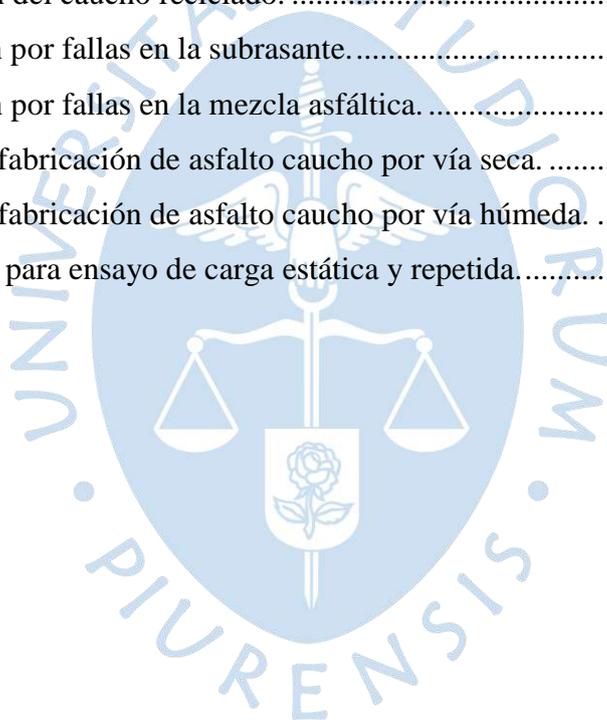
Tabla 1. Operacionalización de variables	4
Tabla 2. Clasificación de mezclas asfálticas en caliente según su granulometría.....	8
Tabla 3. Causas y efectos de una poca durabilidad.....	10
Tabla 4. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento	10
Tabla 5. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga	11
Tabla 6. Causas y efectos de la permeabilidad.....	11
Tabla 7. Causa y efecto de poca resistencia al deslizamiento.....	12
Tabla 8. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad.....	13
Tabla 9. Elementos obtenidos del análisis químico del neumático.....	19
Tabla 10. Cuadro comparativo.....	20
Tabla 11. Tecnología asociada con el uso del grano de caucho reciclado (GCR)	21
Tabla 12. Curva granulométrica MAC 1.....	31
Tabla 13. Resultado de ensayos para el agregado grueso.....	32
Tabla 14. Resultado de ensayos para el agregado fino.....	32
Tabla 15. Resultado de Granulometría de los agregados pétreos utilizados.....	32
Tabla 16. Diseño de mezcla de los agregados.....	33
Tabla 17. Resultado: Granulometría de la mezcla utilizada en esta investigación.....	33
Tabla 18. Resultado: Granulometría del caucho utilizado en esta investigación.....	33
Tabla 19. Requerimiento para mezclas de concreto bituminoso según EG 2013.....	35
Tabla 20. Requerimiento de vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)	35
Tabla 21. Diseño Marshall convencional.....	35
Tabla 22. Diseño Marshall con 1% de caucho.....	37
Tabla 23. Diseño Marshall con 2% de caucho.....	37
Tabla 24. Resultados Marshall de vacíos con aire.....	43
Tabla 25. Resultados Marshall vacíos en el agregado mineral.....	43
Tabla 26. Resultados Marshall de flujo 0.01”.....	43

Tabla 27. Resultados Marshall de estabilidad lb.....	43
Tabla 28. Resultados Marshall peso unitario.	44
Tabla 29. Cuadro resumen del ensayo Marshall.	44
Tabla 30. Creep estático convencional muestra N° 1.....	45
Tabla 31. Creep estático convencional muestra N° 2.....	46
Tabla 32. Deformación permanente unitaria de la muestra convencional.	46
Tabla 33. Creep estático 1 % de caucho muestra N° 1.	47
Tabla 34. Creep estático 1 % de caucho muestra N° 2.	47
Tabla 35. Deformación permanente unitaria de la muestra mejorada 1% de caucho.	47
Tabla 36. Creep estático 2 % de caucho muestra N° 1.	48
Tabla 37. Creep estático 2 % de caucho muestra N° 2.	49
Tabla 38. Deformación permanente unitaria de la muestra mejorada 2% de caucho.	49
Tabla 39. Cuadro resumen de deformación permanente unitaria de las muestras.	50
Tabla 40. Recuperación de Creep estático.	50
Tabla 41. Cuadro resumen de cargas tracción indirecta.....	51
Tabla 42. Cuadro resumen de resistencia retenida.....	52



Lista de figuras

Figura 1. Representación de los volúmenes de las mezclas asfálticas	9
Figura 2. Clasificación según distribución de granos.	15
Figura 3. Compuestos del asfalto.	16
Figura 4. Destilación del crudo del petróleo.	18
Figura 5. Composición del caucho reciclado.	18
Figura 6. Deformación por fallas en la subrasante.	23
Figura 7. Deformación por fallas en la mezcla asfáltica.	24
Figura 8. Esquema de fabricación de asfalto caucho por vía seca.	27
Figura 9. Esquema de fabricación de asfalto caucho por vía húmeda.	28
Figura 10. Dispositivo para ensayo de carga estática y repetida.	38





Introducción

Actualmente, ante la creciente demanda de construcción de carreteras en el departamento de Piura, han surgido nuevas investigaciones tecnológicas orientadas a la disminución del tiempo y costo de elaboración. Sin embargo, aún existen algunos inconvenientes vinculados a la calidad de las pistas, puesto que los materiales utilizados presentan serias deficiencias que entorpecen su funcionalidad, reflejadas en las fallas de la carpeta asfáltica.

Algunas de las deficiencias son la baja resistencia a la variación térmica y deformación; al respecto resulta necesaria la implementación de nuevas tendencias de diseño que mejoren la calidad de la mezcla asfáltica, a través de la incorporación de insumos que potencien sus propiedades. Dicha situación podría ser superada con la adición de caucho como parte del peso del agregado; un claro ejemplo de ello puede resultar la investigación realizada en el año 2002 en la ciudad de Bogotá - Colombia, donde se concluyó entre otras cosas, que el uso de caucho reciclado incrementaba la vida útil del pavimento.

Desde esta perspectiva, se pretende investigar las características de los agregados utilizados, y la mejora de los mismos, con la adición del caucho como parte del peso del agregado; en especial, la susceptibilidad al agua de los áridos, ya que es una de las principales causas del mal estado de las pistas y carreteras de la ciudad de Piura. Finalmente, se buscará comprobar la efectividad del caucho, para aumentar la durabilidad y conservación del pavimento; así también, la relación beneficio- costo.

Existen dos formas de incorporar el caucho molido a la mezcla asfáltica; por vía húmeda, donde se mezcla el caucho directamente con el ligante y; en la metodología por vía seca, donde se añade el caucho molido como parte del agregado fino. Este último es el estudiado en el presente trabajo de investigación, mediante ensayos de laboratorio y haciendo una comparativa con las mezclas convencionales.



Capítulo 1

Planteamiento del problema

En el año 2018 el estado peruano destinó un total de 68 millones de soles para la reconstrucción de 14 caminos, en los distritos de Tambogrande, Huancabamba, Sechura y Morropón; S/. 52 millones de un total de S/. 293 millones, para el inicio de las carreteras de Buenos Aires- Canchaque - Huancabamba y Piura - Bayoyar. Finalmente, se transfirieron cerca de S/ 21 millones para la reconstrucción de nueve pistas y veredas en Sullana y Piura (Perú. Presidencial de Consejo de Ministros, 2018). Todos estos sectores se vieron fuertemente afectados por el fenómeno “El Niño Costero” del año 2017 cuya intensidad sobrepasó la estimación de lluvias que se espera para cada verano, las cuales por sí mismas ya causaban daños importantes a las pistas, afectando la transitabilidad de las personas y generando el aislamiento de las poblaciones, crisis económicas, sociales y sanitarias.

Sin embargo, reconstruir sin innovaciones en las mezclas asfálticas, significa esfuerzos en vano y soluciones transitorias que con el paso del tiempo terminarán con los mismos resultados. Lo ideal sería, incluir elementos que ayuden a mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, los cuales complementarían los sistemas de drenaje, alcantarillado y badenes.

Para esta tesis, se toma como referencia el estudio de Instituto de Desarrollo Urbano de la Alcaldía Mayor de Bogotá. (2002) en la que se concluyó que la incorporación del 1 o 2 % de caucho, incrementa en más del 50% la vida útil de los pavimentos.

Finalmente, la escasa información y difusión sobre el tipo de mezcla asfáltica con residuo de caucho nos ha colocado en un retraso significativo en relación con los demás países de Latinoamérica, a pesar de los grandes beneficios que se obtendrían. De este modo, surge la necesidad de evaluar y analizar su comportamiento físico-mecánico, comparándolo con la mezcla asfáltica convencional, situación que será descrita en el presente documento y que sentaría las bases para su consideración en la construcción o mejoramiento de las pistas.

1.1. Formulación del problema

La región Piura se caracteriza por sus altas temperaturas, y en los meses de verano por su proceso lluvioso que deteriora significativamente las pistas, sobre todo cuando se presenta el fenómeno “El Niño”. La presente investigación busca establecer el porcentaje de caucho óptimo para mejorar las propiedades mecánicas, susceptibilidad al agua y nivel de deformación de las mezclas asfálticas según lo dispuesto por Perú. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016), en los Manuales de ensayos de materiales 504 “Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall” y 505 “Porcentaje de vacío de aire en mezclas asfálticas compactadas, densas y abiertas” (MTC E 504 y 505).

1.2. Hipótesis

Las mezclas asfálticas mejoradas con 1 o 2% de caucho presentan menor susceptibilidad al agua, mejores propiedades mecánicas y disminuye el nivel de deformación que presentan las mezclas asfálticas convencionales.

1.3. Operacionalización de las variables

Esta investigación incluye el estudio de los indicadores involucrados en el funcionamiento y durabilidad de los pavimentos. Ver tabla 1.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Indicador	Medición
Propiedades mecánicas	Ensayo Marshall
Susceptibilidad al agua	Ensayo Lottman Modificado
Deformación	Creep Estático
Mezcla asfáltica convencional	Contenido óptimo de asfalto
Mezcla asfáltica mejorada con 1% de caucho	Contenido óptimo de asfalto
Mezcla asfáltica mejorada con 2% de caucho	Contenido óptimo de asfalto

Fuente: Elaboración propia.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Establecer el porcentaje de caucho reciclado idóneo que debe ser considerado dentro del peso total de los áridos para su incorporación, como parte del agregado fino en una mezcla asfáltica mejorando sus propiedades.

1.4.2. Específicos

1. Determinar si la mezcla asfáltica convencional elaborada con los agregados de la ciudad de Piura, cumple con los parámetros Marshall establecidos en las normas MTC E 504 y 505.
2. Determinar si las mezclas asfálticas con 1% y 2% de caucho elaboradas con los agregados de la ciudad de Piura, cumplen con los parámetros Marshall establecidos en las normas MTC E 504 y 505.
3. Determinar, considerando las propiedades mecánicas, si la mezcla asfáltica que contiene el 1% de caucho es la óptima para reemplazar a la convencional, o lo es la que posee el 2%.
4. Determinar si la mezcla asfáltica convencional y las que tienen el 1% y 2% de caucho, cumplen con el porcentaje mínimo requerido de resistencia retenida según la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials), más conocida por sus siglas en inglés AASHTO, en la T 283 (mínimo 80%), a fin de evitar los daños prematuros atribuidos a la presencia del agua.
5. Determinar, en relación a la susceptibilidad al agua de los agregados, si la mezcla asfáltica con 1% de caucho es la óptima para reemplazar la convencional o lo es la que contiene el 2%.
6. Determinar si las mezclas asfálticas con 1% y 2% de caucho, reducen su deformación con relación a la mezcla convencional y cuál de ellas es la óptima para reemplazarla.



Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica es la unión entre materiales pétreos y asfalto, uniformemente combinados, en proporciones previamente especificadas. Las cantidades relativas de estos materiales, determinan las propiedades y características de la mezcla.

El proceso se realiza en una planta asfáltica, y luego se transporta el producto al sitio de trabajo y se coloca por medio de una pavimentación o finisher, asegurándose que la superficie se encuentre preparada correctamente. Una vez extendida, se somete a un proceso de compactación, que hace que esta mezcla tenga propiedades resistentes al desgaste producido por el paso de los vehículos, y a su vez, pueda traspasar la solicitación del peso de ellos hacia las capas más profundas, absorbiendo una parte de esta solicitación. A través de este proceso, se obtiene una superficie suave y bien consolidada.

2.1.1. Clasificación de las mezclas asfálticas

De acuerdo al proceso constructivo se clasifican en mezclas asfálticas en caliente o en mezclas asfálticas en frío. Esto depende del ligante puesto que será en caliente con el uso del cemento asfáltico de petróleo (CAP) calentados a altas temperaturas junto a los agregados o en frío mediante el uso de emulsión asfáltica de petróleo (EAP). A su vez, se pueden clasificar por su granulometría, basada en la definición del tipo de gradación de acuerdo a la cantidad de partículas que pasan por el tamiz N°8, tal como se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de mezclas asfálticas en caliente según su granulometría

Tipo de Graduación	Porcentaje que pasa el tamiz N° 8
Abiertas	05 – 20
Gruesa	20 – 35
Semi Densa	28 – 42
Densa	35 – 50
Fina	>50

Fuente: Paz (2017).

2.1.2. Comportamiento de las mezclas asfálticas

El posible desempeño del pavimento se puede determinar mediante el análisis del comportamiento en muestras de mezclas asfálticas estudiadas en laboratorios. Las mezclas asfálticas dependen principalmente de cuatro características:

- Densidad de la mezcla (D): se define como la masa de un volumen específico de la mezcla. Sus características son fundamentales para obtener un rendimiento duradero en el pavimento.
- Vacíos de aire (V_a): son los volúmenes totales de pequeñas bolsas de aire entre partículas de agregado cubiertas con asfalto, expresado como porcentaje de volumen total de la mezcla compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional a producirse debido al tráfico y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos varía entre 3 y 5 por ciento, según describe Paz (2017):

$$V_a = (D_{mm} - D/D_{mm}) * 100 \quad (1)$$

Donde:

- ✓ D_{mm} es la densidad máxima de la mezcla o gravedad específica Bulk.
- ✓ D es la densidad de la mezcla compactada.
- ✓ Vacíos en el agregado mineral (VAM): Es el volumen de vacíos que existen entre las partículas de los agregados de una mezcla compactada; incluye el vacío de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen.
- Contenido de asfalto: es la cantidad óptima de asfalto que debe ser añadida a los áridos para obtener las propiedades deseadas en la mezcla asfáltica y ésta depende en gran parte

de las características de los agregados, tales como la granulometría y la capacidad de absorción.

Por su parte el contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado que forma una película ligante sobre las superficies de los agregados. Ver figura 1.

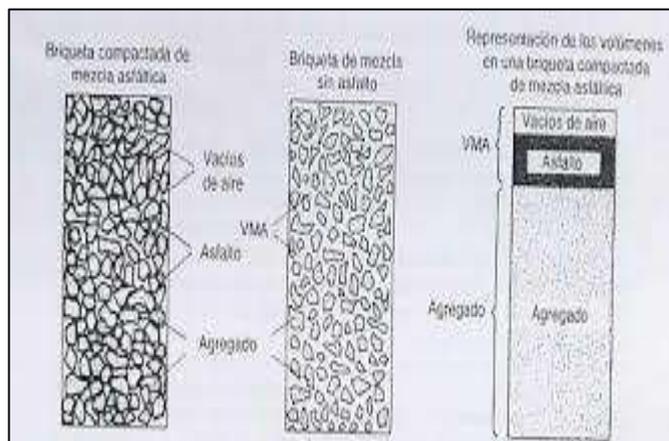


Figura 1. Representación de los volúmenes de las mezclas asfálticas

Fuente: Fajardo y Vergaray (2014).

2.1.3. Propiedades consideradas en el diseño

Para el diseño de la mezcla asfáltica se deben considerar ciertas propiedades que se describen a continuación:

2.1.3.1. Durabilidad

Capacidad de resistir una vida de servicio sin perder propiedades aglutinantes, o adquirir endurecimiento y vejez debido al tránsito, clima u otras causas. Ver Tabla 3.

Tabla 3. Causas y efectos de una poca durabilidad.

Causas	Efecto
Bajo contenido de asfalto.	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregado susceptible al agua.	Películas de asfalto se desprende del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado.

Fuente: Instituto del Asfalto (1982).

2.1.3.2. Estabilidad

Capacidad de la mezcla asfáltica de resistir esfuerzos sin presentar deformaciones ante los diversos estímulos.

Esta propiedad depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas), está relacionada con características del agregado, tales como la forma y textura superficial. Entre más angular sea la forma de las partículas de agregado, y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla asfáltica. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

Causas	Efecto
Exceso de asfalto en la mezcla.	Ondulaciones, ahuellamiento y exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla.	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado.	Ahuellamiento y canalización.

Fuente: Instituto del Asfalto (1982).

2.1.3.3. Flexibilidad

Capacidad de la mezcla asfáltica de acomodarse sin presentar grietas debido a los asentamientos o deformaciones de la subrasante, subbase o base. La flexibilidad aumenta a mayor contenido de asfalto.

2.1.3.4. Resistencia a la fatiga

Capacidad de la mezcla asfáltica de resistir esfuerzos repetidos, provocados por la carga vehicular. Ver Tabla 5.

Tabla 5. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

Causas	Efecto
Bajo contenido de asfalto.	Agrietamiento por fatiga.
Vacíos altos de diseño.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

Fuente: Instituto del Asfalto (1982).

2.1.3.5. Impermeabilidad

Es la resistencia del paso de algún fluido superficial para evitar pérdida de propiedades en la carpeta asfáltica. Ver tabla 6.

Tabla 6. Causas y efectos de la permeabilidad.

Causas	Efecto
Bajo contenido de asfalto.	Las películas delgadas de asfalto causaran, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.

Fuente: Instituto del Asfalto (1982).

2.1.3.6 Resistencia al deslizamiento

Capacidad de la mezcla asfáltica de presentar resistencia al patinaje o hidroplaneo de los vehículos. Ver tabla 7.

Tabla 7. Causa y efecto de poca resistencia al deslizamiento.

Causas	Efecto
Exceso de asfalto.	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Agregado mal graduado o con mala textura.	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo.
Agregado pulido en la mezcla.	Poca resistencia al deslizamiento.

Fuente: Instituto del Asfalto (1982).

2.1.3.7 Trabajabilidad

Se refiere a la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada, evitando los efectos negativos. Ver Tabla 8.

Tabla 8. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad.

Causas	Efecto
Tamaño máximo de partícula: grande.	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso.	Puede ser difícil de compactar.
Temperatura muy baja de la mezcla.	Agregado si revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio.	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral.	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral.	Mezclas muy viscosas, difícil de manejar; poco durable.

Fuente: Instituto del Asfalto (1982).

El objetivo principal en el diseño de mezclas asfálticas es encontrar la combinación más económica de agregados y asfalto, que le otorgue las propiedades antes vistas y le asigne las siguientes características:

1. Adecuada cantidad de asfalto capaz de recubrir totalmente los agregados asegurando la durabilidad de la carpeta asfáltica.
2. Adecuada estabilidad para asegurar los índices de servicio requeridos para los distintos tipos de pavimentos.
3. Optimo porcentaje de huecos capaz de absorber el continuo aglutinamiento de los agregados producto del continuo tránsito.
4. Adecuada trabajabilidad para poder colocar y compactar la mezcla asfáltica con facilidad.

2.1.4. Componentes de la mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos gruesos y finos, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en algunos de ellos afectará al conjunto. Así tenemos:

2.1.4.1. Agregados pétreos

Son aquellos fragmentos de roca que proceden de canteras de explotación a cielo abierto, su diversidad depende directamente de su ubicación geográfica y se pueden estudiar y clasificar mediante el tipo litológico que compone el agregado pétreo, puesto que permite predecir su comportamiento en función a la aplicación en la que sea utilizado.

En relación a ello también es importante estudiar la composición química, granulometría, grado de alteración, su abrasión y potencial de adherencia con el ligante asfáltico puesto que esto conlleva a determinar su uso particular en los diferentes tipos de mezclas asfálticas. Es así que los agregados se pueden clasificar según su naturaleza, tamaño y distribución de granos.

a) Según su naturaleza se puede tener agregados:

- Naturales: obtenidos por procesos convencionales de desmonte y excavación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas en depósitos continentales, marinos y ríos.
- Artificiales: obtenidos por procesos industriales con la finalidad de obtener un alto rendimiento como es el caso de la arcilla calcinada. El tipo de agregado artificial más común en los pavimentos son las escorias de acero que dan alta resistencia a la fricción, aunque pueden presentar problemas de expansibilidad o heterogeneidad.
- Reciclados: obtenidos de la reutilización de agregados naturales o artificiales. Actualmente está incrementándose la reutilización de los agregados utilizados en las mezclas asfálticas por las restricciones ambientales en la explotación de agregados naturales.

b) Según su tamaño podemos tener agregados:

- Agregado grueso, son los áridos mayores al tamiz de abertura de 4.75 mm (malla #4).
- Agregado fino, son los áridos menores al tamiz de abertura de 4.75 mm (malla #4) y estos a la vez se pueden subdividir en :
 - ✓ Arena gruesa: es la que sus granos pasan por un tamiz de abertura 4.75 mm y son retenidos por otro de 2.5 mm.
 - ✓ Arena media: es aquella cuyos granos pasan por un tamiz de abertura de 2.5 mm y son retenidos por otro de 1 mm.
 - ✓ Arena fina: es la que sus granos pasan por un tamiz de abertura de 1 mm y son retenidos por otro de 0.25 mm.
- Filler, son partículas que pasan el tamiz de apertura de 75 μm (malla #200).

El tamaño máximo (menor abertura de malla a través de la cual pasan el 100% de las partículas de la muestra de agregado) y las proporciones del agregado afectan directamente a

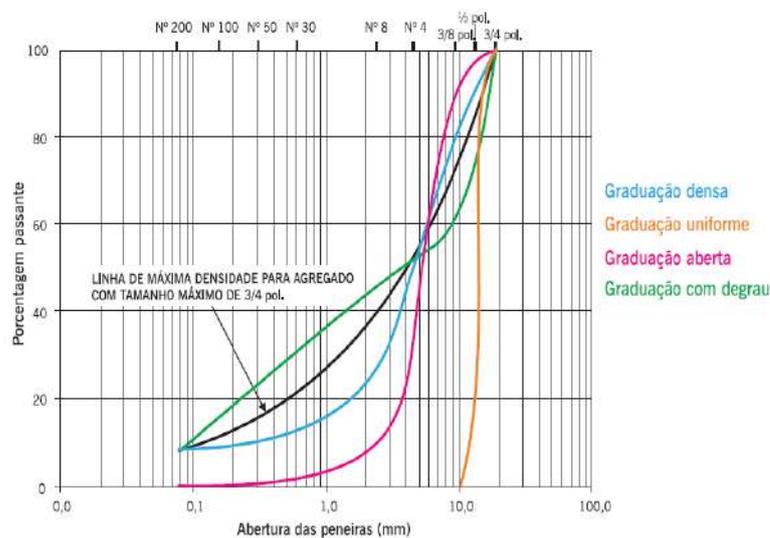
las mezclas asfálticas en su estabilidad, trabajabilidad, segregación. Es por eso que tenemos una tercera clasificación más específica de la granulometría de los agregados.

c) Según su distribución de granos podemos tener agregados:

- Graduación abierta también es de distribución granulométrica continua, pero con insuficiente material fino (inferior a 0.075 mm)
- Graduación uniforme presenta la mayoría de sus partículas con tamaños en una franja bastante estrecha dando como resultado un gráfico muy empinado.
- Graduación escalonada o discontinua la cual presenta pequeñas cantidades de agregados con tamaños intermedios, este tipo de agregados son muy propensos a la segregación.

La distribución granulométrica de los agregados se determina mediante tamizado, este análisis se realiza tomando una muestra seca de agregados fraccionándolos mediante tamizados estandarizados y así determinar la masa de las fracciones retenidas en cada tamiz y se compara con la masa total de la muestra expresándose como porcentaje en masa.

Los resultados se expresan en forma de tablas y gráficos, la distribución granulométrica densa o también llamada bien graduada se asemeja a una línea recta que inicia desde cero y termina en su tamaño máximo del agregado muy cerca a la distribución ideal de densidad máxima. Ver figura 2.



(a) Representação convencional de curvas granulométricas

Figura 2. Clasificación según distribución de granos.

Fuente: Huamán (2011).

2.1.4.2. Ligante asfáltico

El uso de este material para pavimentos es muy importante, así como antiguo. Actualmente es de uso intensivo puesto que actúa como ligante que proporciona una fuerte unión de los agregados, permite un buen control en la flexibilidad, es impermeabilizante, resistente a la acción de la mayoría de ácidos y se puede usar en caliente o emulsificado con amplias combinaciones de material pétreo.

El ligante asfáltico se puede definir como el material aglutinante cuya composición química está compuesta por hidrocarburos (hidrógeno y carbono) como principales elementos y pequeñas cantidades de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros compuestos químicos. Cuando el asfalto es diluido en heptano, se observan principalmente dos compuestos: la fracción pesada llamada asfaltenos cuyo peso molecular es alto y los máltenos que poseen uno bajo, considerándose la fracción ligera. Ésta puede dividirse en tres fracciones principales: saturados, resinas y aceites aromáticos. (Ver figura 3).

- **Asfaltenos y saturados:** proporcionan la dureza al asfalto, intervienen directamente en sus propiedades mecánicas, pero no en la adherencia de los materiales pétreos.
- **Resinas:** es la parte de los máltenos que proporcionan las características cementantes o aglutinantes.
- **Aceites:** generan la deformabilidad del asfalto, y en grandes proporciones daría al asfalto el comportamiento de un fluido viscoso.

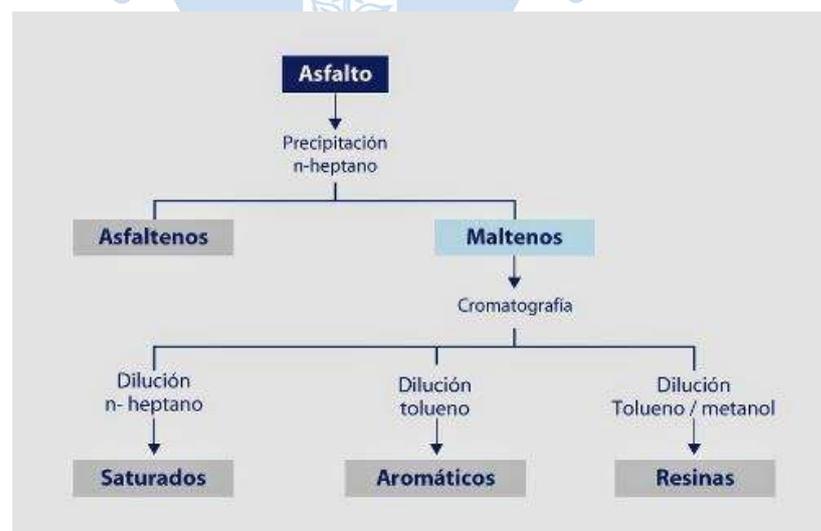


Figura 3. Compuestos del asfalto.

Fuente: Sobero (2016).

El ligante asfáltico es elaborado a partir del residuo proveniente de la destilación del crudo del petróleo en diferentes etapas (Figura 4):

- Destilación primaria: Se usa para extraer los componentes livianos del petróleo a presión cercana a la atmosférica, a temperaturas aproximadamente de 375°C, donde hierven hasta esta temperatura y se transforman en vapor, para luego pasar a una columna fraccionada y a medida que se condensan, salen por tuberías laterales.
- Destilación al vacío: etapa más compleja donde se utilizan equipos especiales para aumentar el vacío en las columnas fraccionadas, logrando que los productos más pesados hiervan a menor temperatura que a presión atmosférica. Dependiendo de la cantidad de vacío que se aplica, se obtienen distintos tipos de residuos asfálticos, que pueden ser utilizados como ligante.
- Extracción con solvente: el residuo de vacío tiene asfaltenos y una forma de separarlos es disolverlo en gas licuado (propano o butano líquido) a presión alta y temperatura entre 70°C y 120°C.

Este ligante tiene propiedades físicas asociadas directamente a su temperatura. Así se puede notar que, en muy bajas temperaturas, sus moléculas no tienen condiciones de moverse unas en relación a otras provocando una elevada viscosidad; a altas temperaturas la viscosidad baja provocando un comportamiento líquido.

Uno de los criterios más utilizados de clasificación para los ligantes es la evaluación de la susceptibilidad térmica por medio del ensayo de penetración que se relaciona con su viscosidad a diferentes temperaturas; se mide la profundidad en décimas de milímetro con una aguja de masa estandarizada (100g) que penetra un volumen también estandarizado de ligante asfáltico en un tiempo de 5 segundos a la temperatura de 25 °C dando como resultado una clasificación de cementos asfálticos de petróleo de determinada penetración (CAP – PEN).

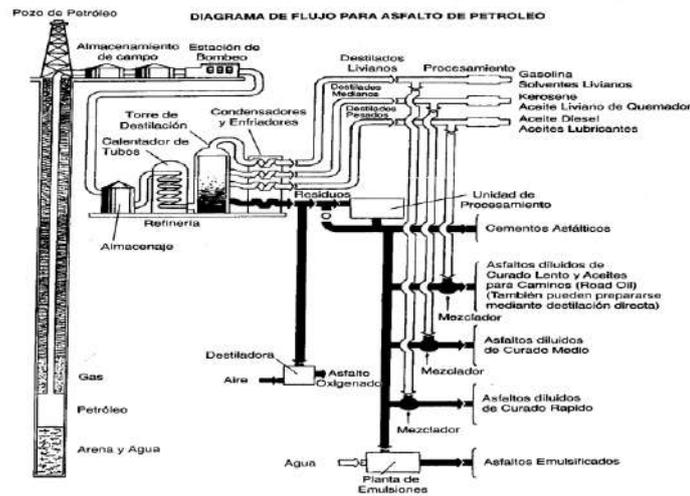


Figura 4. Destilación del crudo del petróleo.

Fuente: Instituto del asfalto (1982).

2.1.4.3. Caucho

Para efectos de esta investigación se propone incorporar el caucho a las mezclas para mejorar sus características, pudiéndose extraer a partir de las llantas recicladas, considerando su composición ver Figura 5 y Tabla 9. Para definir las características de las llantas, es importante conocer las principales materias primas utilizadas en su fabricación, las mismas que incluyen el caucho natural, también conocido como estireno-butadieno-estireno o SBS, el Styrene-Butadiene Rubber, sintético o simplemente SBR; en menor cantidad, acero, textiles y aditivos, entre los que destacan el negro humo, aceites, óxido de zinc activado con cadmio, dióxido de titanio, sulfuro, silica, resinas fenólicas y ácidos grasos.



Figura 5. Composición del caucho reciclado.

Fuente: Tirel (2017).

Tabla 9. Elementos obtenidos del análisis químico del neumático.

Elemento	Porcentaje
Carbono (C)	70
Hidrogeno (H)	7
Azufre (S)	1 – 3
Cloro (Cl)	0.2 – 0.6
Fierro (Fe)	15
Óxido de Zinc (ZnO)	2
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	5
Cromo (Cr)	97 ppm
Níquel (Ni)	77 ppm
Plomo (Pb)	60 – 760 ppm
Cadmio	5 – 10
Talio	0.2 – 0.3 ppm

Fuente: Tirel (2017).

La elaboración del caucho parte del látex, sustancia blanca o amarillenta que se obtiene al "sangrar", mediante incisiones angulares en V, el tronco del *hevea brasiliensis*, más conocida como árbol del caucho, siringa o seringueira. Dicho látex es una dispersión acuosa que contiene entre 30 y 36% de hidrocarburo del caucho, 0,5% de cenizas, 1,5% de proteínas, 2% de resina y 0,5% de quebrachitol.

A partir de ello se desprenden ciertas cualidades, las mismas que están en función a la maleabilidad, gran resistencia mecánica y adherencia sobre cualquier tipo de superficie. Todas estas características logran que hoy en día, el caucho natural siga siendo un elemento indispensable para la industria de las llantas.

Por su parte, el caucho sintético fue desarrollado en los años 30, para contrarrestar la falta de caucho natural. Puede ser hecho a partir de la polimerización de una variedad de monómeros incluyendo al isopreno, butadieno, cloropreno e isobutileno; éstos y otros monómeros pueden ser mezclados en varias proporciones deseables para ser copolimerizados para un amplio rango de características físicas, mecánicas y químicas.

Es así que el caucho es un elastómero pues posee la propiedad mecánica de sufrir mucha más deformación elástica bajo estrés que la mayoría de los materiales y, aun así, regresar a su tamaño previo sin deformación permanente.

En general, las propiedades del caucho natural y sintético son similares, pero éste último presenta mayor resistencia a la abrasión y temperatura, así como alta adherencia al suelo.

a) Diferencias entre el Caucho SBR y el Caucho Natural

El SBR posee mayor permeabilidad, resistencia al calor y desgaste que el caucho natural. A altas temperaturas no presenta solubilidad y atrae componentes livianos que ayuda a mejorar la resistencia al fisuramiento.

También el caucho SBR, por sus componentes como el negro de humo y aminas aromáticas mejora las propiedades del ligante como las del envejecimiento y la pérdida de elasticidad respectivamente.

Por otro lado, el caucho natural posee una mayor resistencia a la tracción y a la rotura que el SBR. Ver cuadro comparativo Tabla 10:

Tabla 10. Cuadro comparativo.

Propiedades	Caucho Natural	SBR
Rango de Dureza	20-90	40-90
Resistencia a la rotura	Buena	Regular
Resistencia abrasiva	Excelente	Buena
Resistencia a la compresión	Buena	Excelente
Permeabilidad a los gases	Regular	Regular

Fuente: Castro (2008).

b) Aplicación del polvo de caucho en los pavimentos

El uso del caucho en las mezclas asfálticas tiene su origen en países como Estados Unidos, quienes, al buscar un segundo uso de sus llantas, realizaron estudios que demostraron mejoras significativas en el pavimento gracias a la adhesión del grano de caucho reciclado (GCR).

Según el Instituto de Desarrollo Urbano de la Alcaldía Mayor de Bogotá. (2002), el caucho proveniente de los neumáticos ya desechados puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes: Proceso por Vía Húmeda y por Vía Seca.

En el proceso húmedo, el caucho actúa modificando el cemento asfáltico, mientras que, en el proceso seco, es usado como una porción del agregado fino mejorando la mezcla asfáltica. Por ello se muestran las diferentes tecnologías para cada proceso en la tabla 11:

Tabla 11. Tecnología asociada con el uso del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas.

Material	Proceso	Tecnología	Producto
GCR	Húmedo	Bachadas	Asfalto modificado con caucho
		Continua	
		Terminal	
	Seco	Plusride	Mezclas asfálticas mejoradas con caucho
		Genérica	
		Convencional	

Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano de la Alcaldía Mayor de Bogotá. (2002).

El costo de las mezclas mejoradas o modificadas con caucho es mayor que las convencionales, puesto que en las mezclas mejoradas se utilizará mayor cantidad de ligante y un mayor tiempo de compactación en obra y en las mezclas modificadas se necesitará de una modificación de los equipos de planta.

El proceso en refinería es el tercer método para incorporar el caucho proveniente de los neumáticos en las mezclas asfálticas. En este proceso, la composición del caucho molido y el cemento asfáltico se ejecuta en la refinería fabricante del asfalto.

Este tercer método brinda un cemento asfáltico con mayor viscosidad, permitiendo que a bajas temperaturas la mezcla asfáltica sea más flexible y menos plástica a altas temperaturas.

c) Proceso para la obtención del caucho

Para utilizar el caucho como parte de las mezclas asfálticas, debe ser triturado mecánicamente. Las técnicas de molienda más comunes son el proceso ambiental y criogénico.

1. Proceso ambiental

Una forma de obtención del caucho es por medio de cuchillas dentro de un granulador. El tamaño es controlado mediante el uso de tamices de diferente abertura, otra forma es el uso de molinos que operan mediante rodillos dentados usados de dos a tres veces según se necesite reducir el tamaño del caucho provocando partículas limpias de impurezas, alargadas, angostas y con alta área superficial que facilita el uso en nuevos procesos y aplicaciones.

2. Proceso criogénico

Este proceso se refiere al empleo de nitrógeno líquido u otros materiales o métodos para congelar trozos de llanta o grano de caucho antes de la reducción de tamaño, haciéndolo frágil

y quebradizo como un cristal a temperatura por debajo de -80°F (-62°C).

El acero es separado mediante el empleo de imanes, y la fibra, por medio de aspiración y selección. El material resultante presenta aspecto brillante y limpio, con superficies fracturadas debido a la fragmentación que ocurre por las uniones entre la fibra, el acero, y el caucho.

El empleo de temperaturas criogénicas puede ser aplicado en cualquier etapa para la reducción en tamaño de los trozos de neumáticos.

Normalmente el tamaño del material a ser triturado es un nominal de 2 pulgadas, el cual es congelado en una cámara o sumergido en un baño de nitrógeno líquido para reducir la temperatura y posteriormente ser triturado en una unidad de reducción por medio de impacto en un molino de martillo. Este proceso reduce el caucho a partículas entre tamaños de $\frac{1}{4}$ " a mínimo tamiz número 30 (0.6mm).

La trituración criogénica da como resultado partículas lisas a diferencia de trituración ambiental cuyas partículas resultantes son irregulares en forma y textura con una alta área superficial lo cual es conveniente para facilitar la reacción con el ligante (cemento asfáltico).

Otro material usado para la fabricación de las llantas, es el negro humo (elemento que le da el color negro característico a las llantas), formado por partículas muy pequeñas de carbono, alcanzado por la combustión inconclusa de gases naturales; aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste. Finalmente, como ya se mencionó el negro de humo mejora en el ligante la propiedad cohesiva por lo cual disminuye el tiempo de envejecimiento haciendo a la mezcla asfáltica más durable.

2.2. Problemática con mezclas convencionales

Una vez realizado un pavimento, se muestran diversos estados de servicios en sitios puntuales debido a una mala base granular, pobre contenido de asfalto, inadecuada práctica de colocación o bases saturadas, por lo que siempre resulta necesario un control de calidad o en su defecto un posterior mantenimiento para garantizar la vida útil del pavimento. También se pueden presentar ahuellamientos y desprendimientos del ligante producto de la mala calidad de la mezcla asfáltica.

2.2.1. Deformaciones plásticas en los pavimentos asfálticos

Ondulaciones que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de la vía, producto de las cargas provenientes de los vehículos, tipo de ligante, composición granulométrica y calidad de los agregados y gradientes de temperatura. Las deformaciones plásticas se

caracterizan por el cambio de posición original transversal considerándose un tipo de deterioro más preocupante para las mezclas asfálticas en caliente.

Las deformaciones permanentes representan una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irre recuperable debido a las aplicaciones de cargas, existiendo principalmente dos tipos de deformaciones:

- Deformaciones producto de fallas en la subrasante, estas deformaciones se dan debido a un excesivo esfuerzo en las capas inferiores de la carpeta asfáltica (base y sub base) las cuales no logran evitar transmitir el esfuerzo hacia la subrasante por lo cual se le considera un problema estructural. Ver Figuras 6 y 7.
- Deformaciones producto de fallas en la capa de rodadura, estas deformaciones se dan debido a la poca capacidad portante de la mezcla asfáltica, produciendo periódicamente pequeñas deformaciones plásticas con una inclinación y deslizamiento lateral característico. Una solución es utilizar asfaltos que se comporten como sólidos elásticos a altas temperaturas. Otra solución sería utilizar agregados con alto grado de fricción interna, de superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula, para que ante una solicitud de carga las partículas de los agregados se cierren volviéndose una unidad la cual volverá a su estado original sin acumular deformaciones permanentes.

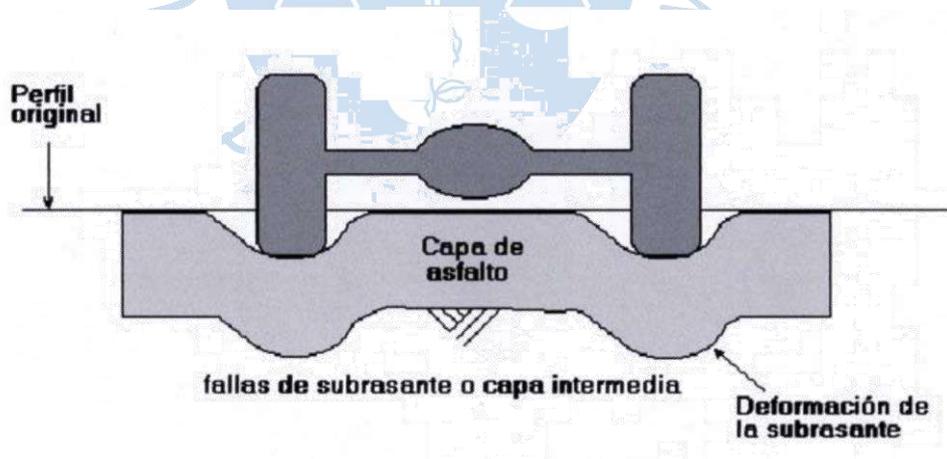


Figura 6. Deformación por fallas en la subrasante.

Fuente: Huamán (2011).

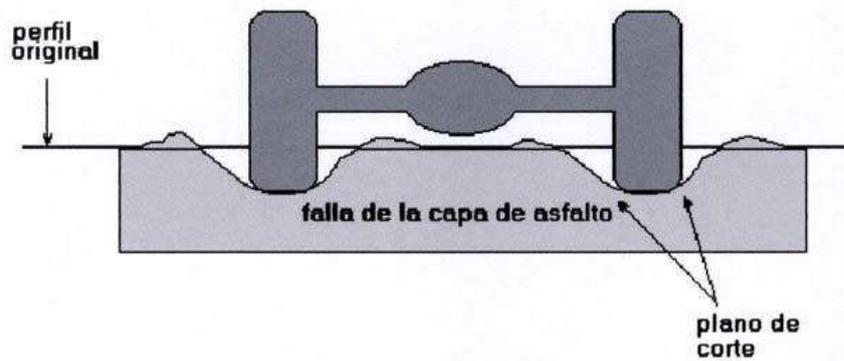


Figura 7. Deformación por fallas en la mezcla asfáltica.

Fuente: Huamán (2011).

2.2.2. Hidrofilia en los pavimentos asfálticos

El daño producido por la humedad es uno de los principales factores que atentan contra la durabilidad de las mezclas asfálticas debido a la pobre adherencia de los agregados con el asfalto. Desfasados ensayos como el de Riedel Weber y pocas innovaciones en asfaltos modificados o mezclas asfálticas mejoradas, nos condenan a tener mezclas asfálticas con poca duración ante el intemperismo.

Este daño se manifiesta por la reducción de serviciabilidad, producto de la pérdida de agregados en la superficie, el desprendimiento de agregados en las capas compactadas y la separación del ligante asfáltico del agregado debido a la presencia del agua.

2.3. Métodos de diseño

El diseño de una mezcla asfáltica consiste en la obtención del porcentaje óptimo de asfalto para una determinada gradación y así garantizar las propiedades para la cual fue formulada.

Según Ramírez, (2006), el método de diseño más utilizado en países como Chile para las mezclas en caliente es el Método Marshall, el cual está basado en el empleo de ensayos mecánicos. Es aplicable a “mezclas en caliente” con cementos asfálticos y que contengan agregados con tamaño máximo igual o inferior a 25 mm. Este procedimiento puede usarse tanto para el diseño en laboratorio como para el control de terreno.

2.3.1. Método Marshall

Este método fue desarrollado por el ingeniero Bruce Marshall (1943) en el estado de Mississippi, Estados Unidos, con el objetivo de determinar el contenido óptimo de asfalto para una determinada granulometría de áridos.

Este contenido óptimo de asfalto se logra obtener mediante la elaboración de probetas que varían entre una y otra en 0.5% de ligante, tratando de estar por encima y por debajo de este.

Las probetas están normalizadas teniendo como diámetro una dimensión de 4" y una altura de 2.5". La compactación de ellas se realiza con el martillo Marshall que posee una base plana y circular de 3 8/7" de diámetro y 10 lb (4.54 kg) de peso.

Mediante el par de mordazas semicirculares se aplica a las probetas de mezcla asfáltica una carga a una velocidad de 51 milímetros por minuto donde su máximo valor representa a la estabilidad. La fluidez es la deformación, en cuartos de milímetros, que ocurre desde el instante en que se aplica la carga hasta lograr la carga máxima.

Con los valores obtenidos, y en base a los criterios definidos en el Manual de Carreteras en función del tipo de tránsito y aplicación de la mezcla, ya sea como carpeta de rodado, carpeta intermedia o capa base, se obtiene el porcentaje óptimo de asfalto y la mezcla de agregados pétreos que garantizan una buena estructura.

2.3.2. Proceso por vía seca

Fajardo y Vergaray (2014), describen que el proceso por vía seca es el método mediante el cual el caucho reciclado es mezclado con los agregados, antes de adicionar el cemento asfáltico Ver figura 8. En este proceso, se usan los granos de caucho triturados como un agregado en la mezcla asfáltica, los cuales pueden sumarse como un árido más o como sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre el 1 y 3 % del peso total de los agregados de la mezcla.

Si bien los granos de caucho son tratados como un árido, no pueden considerarse un material inerte, pues interacciona con el ligante de la mezcla asfáltica. A esto se le suele llamar "digestión" del caucho: este elemento pasa de ser un árido elástico a ser un modificador del ligante en la mezcla asfáltica.

La velocidad del proceso de digestión será inversamente proporcional al tamaño y la cantidad empleada de partículas de caucho y directamente proporcional a la temperatura y tiempo que se mantenga caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra. En laboratorio, se logra mediante el uso de un horno a temperaturas entre 150-170° C y un tiempo de una a dos horas, previa compactación de las probetas.

Debido al corto tiempo de mezclado, el proceso de digestión no logra una reacción similar entre el caucho y el cemento asfáltico, como si se evidencia en el proceso por vía húmeda, por lo tanto, tiene un efecto limitado en el comportamiento de la mezcla. Sin embargo, este corto

tiempo evita que el caucho funcione como un árido elástico de granulometría muy concentrada propensa a la apertura de huecos y pobre nivel de compactación por su componente elástico.

El sistema de alimentación de caucho debe darse cuando los agregados estén calentados y la posterior adición del cemento asfáltico a una temperatura por lo general entre 160° y 190° C, una vez extendido la mezcla asfáltica se debe tener en cuenta la temperatura de compactación que esta entre 150° y 160° C.

Este proceso por vía seca es usado únicamente para mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa, abierta o discontinua y las tres tecnologías más comunes son la tecnología PlusRide, la Genérica o Sistema TAK y la convencional.

La tecnología PlusRide fue desarrollada en Suecia a finales de los años 1960 y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial PlusRide por la firma EnviroTire. Para este método el contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre dos y cuatro por ciento, los granos de caucho deben estar entre los tamices 1/4" y el tamiz N° 10 y el GCR debe ser agregado a la mezcla asfáltica en proporciones que van de 1% a 3% del peso total de los agregados.

La tecnología Genérica o Sistema TAK, desarrollada por el Dr. Takallou a finales de los años 1980 y a principio de los años 1990, utiliza caucho reciclado grueso y fino para mejorar mezclas asfálticas en caliente y de granulometría densa, la parte fina se encarga de interactuar con el cemento asfáltico, mientras que la parte gruesa entra a comportarse como un agregado elástico en la mezcla asfáltica.

El caucho puede llegar a necesitar una pre-reacción o pre-tratamiento con un catalizador para alcanzar una óptima hinchazón de la partícula. En este sistema, el contenido de caucho reciclado no debe exceder el 2 % del peso total de la mezcla para carpetas de rodadura.

La tecnología convencional desarrollada en España emplea caucho reciclado utilizando a diferencia de las anteriores tecnologías menor cantidad de asfalto para granulometrías convencionales, el caucho utilizado es generalmente de granulometría fina (tamaños de granos no mayores a 0.5 mm) y aproximadamente del dos por ciento del peso total de los agregados.



Figura 8. Esquema de fabricación de asfalto caucho por vía seca.

Fuente: Fajardo y Vergaray (2014).

2.3.3. Proceso por vía húmeda

Proceso mediante el cual el asfalto es mezclado previamente a altas temperaturas de entre 180 a 210°C con el caucho durante 1 a 4 horas, haciendo una mezcla modificada asfalto – caucho. Ver figura 9. El caucho reacciona hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos (esta reacción está relacionada directamente con el área superficial del caucho) haciéndose notar en el cambio de viscosidad de la mezcla.

Las dos tecnologías más comunes son la tecnología continua, desarrollada en Florida a finales de los años 1980 empleando entre 8% a 10% de caucho (tamiz N°. 80) y la tecnología terminal, que brinda la capacidad de conservar la mezcla asfalto – caucho.

La aplicación del proceso por vía húmeda puede ser en sellantes, tratamientos superficiales y hasta en mezclas asfálticas en caliente, dando como principal beneficio la reducción de la susceptibilidad térmica evitando o disminuyendo el ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento a bajas temperaturas.



Figura 9. Esquema de fabricación de asfalto caucho por vía húmeda.

Fuente: Fajardo y Vergaray (2014).

2.3.4. Ensayo Lottman test modificado

En la región Piura más del 90 % de las vías pavimentadas son de asfalto y para su diseño estructural se han utilizado métodos empíricos basados en ecuaciones de regresión experimental, obtenidas a partir de una pista de prueba realizada desde 1943 por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, que optó por el método de diseño conceptual Marshall por su practicidad.

Nuestra realidad demuestra una cantidad considerable de pavimentos que evidencian deterioros graves tal como deformaciones, ondulaciones y desprendimientos del material que lo compone, producto de la humedad la cual por lo general no es considerada en el diseño de pavimentos y que es muy importante puesto que a diferencia de las fallas por esfuerzo, ésta actúa disminuyendo la interacción del ligante con los agregados como suele acontecer en nuestra región cada año por el fenómeno pluvial, provocando grietas y fisuras en el mejor de los casos.

Para conocer el deterioro producido por los agentes climáticos sobre las mezclas asfálticas, es necesario conocer sus parámetros que lo caracterizan y definir sus límites de falla, tanto por fatiga, figuración térmica y deformación plástica. Por tanto, es importante saber que ensayo debe utilizarse para caracterizar a la mezcla asfáltica.

Según la experiencia de algunos investigadores como Von Quintus, Scherocman y Hugles (1989, como se cita en Gallego y Saiz, 2017), los valores obtenidos mediante el diseño de una mezcla bituminosa, tales como los resultantes de los ensayos Marshall o el ensayo de Hveem, tienen una pobre correlación con las propiedades comúnmente requeridas para evaluar el fallo

y comportamiento por fluencia, resistencia a la tracción indirecta, fatiga y deformación permanente.

Sería ideal contar con un ensayo capaz de calcular las tensiones totales de las probetas, similares a las que se producen en la carpeta asfáltica real tales como:

- Compresión Triaxial en la superficie.
- Tracción longitudinal y transversal combinado con compresión vertical en la parte inferior de la capa bituminosa debajo de la rueda.
- Tracción longitudinal y transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.
- Tracción longitudinal y transversal en el fondo de la capa bituminosa a una cierta distancia de la carga.

Si bien es cierto, existen ensayos por separado que logran calcular cada estado, no hay uno que reúna todos estos datos. Sin embargo, no sería necesario calcular todos estos estados puesto que la zona más crítica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa bituminosa, bajo la carga.

Existen diversos métodos para estandarizar y evaluar la resistencia de las mezclas bituminosas al daño por humedad, los cuales son en su mayoría empíricos; tal como es el ensayo a tracción indirecta (TSR: Tensile Strength Ratio) utilizado en esta investigación por cumplir con el cálculo de las tensiones solicitadas líneas arriba y así lograr determinar la susceptibilidad al agua y a la vez medir la garantía del polvo de caucho utilizado como parte del agregado y poder tener una nueva práctica para aumentar la vida útil, evitando el proceso de falla del pavimento en nuestra región.

Existen dos tipos de ensayo Lottman:

2.3.4.1. Lottman

Fue desarrollado por Lottman en 1978, como uno de los proyectos del Programa Cooperativo de Investigación de Carreteras Nacional de Estados Unidos, más conocido por sus siglas en inglés (NCHRP) con la finalidad de predecir la susceptibilidad a la humedad, simulando las condiciones reales del campo a través del condicionamiento acelerado en el laboratorio. Para ello Lottman, utilizó la saturación al vacío seguido de acondicionamiento de baño de agua helado y caliente.

2.3.4.2. Lottman Modificado (AASHTO T283):

Fue propuesto por Kandhal, donde incorpora las mejores características del ensayo de **Lottman** y la prueba de Tunnicliff y Root. Este método ha sido aprobado en muchas agencias especializadas y además está incluido en las especificaciones de Superpave.

2.3.5. Ensayo Creep estático

El ensayo uniaxial estático o simplemente Creep es de fácil desempeño y muy difundido. Consiste en la aplicación a lo largo del tiempo de una carga a través de una sonda rotativa. Una exigencia importante es que las caras de las probetas sean perfectamente paralelas y perpendiculares al sentido de aplicación de carga, de modo que ésta sea aplicada uniaxialmente. Esto se logra aplicando tres ciclos de una precarga de onda cuadrada de 556 N (125 Lb.) durante intervalos de un minuto, seguido por un periodo de descanso de un minuto por ciclo. Una vez hecha esta nivelación se hará una sumersión por un periodo superior a dos horas a temperatura de 40 C° y se aplicará una carga de 556 N (125 Lb.) a la probeta durante una hora, pasado este tiempo se retirará la carga y se dejará que la probeta se recupere durante diez minutos.

Durante la hora de carga se calculará el módulo de fluencia para diferentes tiempos y al transcurrir los diez minutos se medirá en porcentaje su recuperación. La tensión de la fluencia para un nivel de estrés dado, se trazará en función del tiempo y se dividirá en tres etapas:

- Primera etapa: parte del gráfico donde la tasa de deformación aumenta rápidamente.
- Segunda etapa: etapa estacionaria donde la tasa de deformación es constante al igual que el ángulo de la pendiente.
- Tercera etapa: etapa de falla en la cual la deformación aumente rápidamente.

Capítulo 3

Desarrollo experimental

En la presente investigación se opta por trabajar con el uso granulométrico MAC- 1, utilizado para carpetas asfálticas de mayores resistencias, obteniéndose mediante ensayos Marshall las propiedades de estabilidad y flujo; así como, los contenidos óptimos de asfalto en mezclas asfálticas convencionales, para mezclas asfálticas mejoradas con 1% de caucho del agregado y para mezclas asfálticas mejoradas con el 2% de caucho del agregado. Ver Tabla 12.

Tabla 12. Curva granulométrica MAC 1

Tamiz	Porcentaje que pasa
25.0 mm	100
19.0 mm	80-100
12.5 mm	67-85
9.50 mm	60-77
4.75 mm	43-54
2.00 mm	29-45
425 μ m	14-25
180 μ m	8-17
75 μ m	4-8

Fuente: Ministerio de transporte y comunicaciones del Perú (2013).

3.1. Materiales

Las arenas gruesas y finas utilizadas en esta investigación provienen de la cantera Cerro Mocho (carretera Sullana – Talara) y de la cantera Sojo (carretera Sullana – Paita) respectivamente. Los áridos gruesos son piedras chancadas de tamaño máximo de media pulgada, procesada en planta obtenida de la cantera Santa Cruz (distrito Querecotillo provincia Sullana carretera Sullana – Lamor).

Estos agregados fueron ensayados para verificar su calidad ante los requerimientos mínimos y máximos solicitados para una mezcla asfáltica. Tales resultados pueden ser apreciados en las tablas 13, 14, 15, 16, 17 y 18.

Tabla 13. Resultado de ensayos para el agregado grueso.

Ensayos	Norma	Requerido	Obtenido
Abrasión los ángeles	MTC E 207	40 % max	12.9%
Cubrimiento con materiales asfálticos.	MTC E 517	>95%	>95%
Determinación de partículas chatas y alargadas	MTC E 223	10% max	0.0%
Caras fracturadas: 1 cara fracturada. 2 caras fracturadas.	MTC E 210	Min 85 % Min 50 %	96.4% 93.4%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Resultado de ensayos para el agregado fino.

Ensayos	Norma	Requerido	Obtenido
Equivalente de arena	MTC E 114	50 % min	68 %
Angularidad	MTC E 222	40 % min	41 %
Índice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP
Índice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 % max	4 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Resultado de Granulometría de los agregados pétreos utilizados en esta investigación.

Tamices		Porcentaje que pasa %			
Abertura mm	Tamiz ASTM	Grava	Arena gruesa	Arena fina	Filler
25.4	1"	100			100
19.1	¾"	99			100
12.7	½"	67			100
9.53	3/8"	38	100	100	100
4.76	N° 4	4	96	95	100
2	N° 10		74	83	100
0.425	N° 40		24	57	100
0.18	N° 80		10	25	100
0.074	N° 200		6	9	100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Diseño de mezcla de los agregados.

Áridos	Denominación	Porcentaje %
Grava Santa Cruz	Agregado grueso	50.00
Arena Cerro Mocho	Arena gruesa	23.00
Arena de Sojo	Arena fina	25.00
Cemento portland	Filler	02.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Resultado: Granulometría de la mezcla utilizada en esta investigación.

Tamices		Porcentaje que pasa %
Abertura mm	Tamiz ASTM	Mezcla
25.4	1"	100
19.1	¾"	99.6
12.7	½"	83.6
9.53	3/8"	69.2
4.76	Nº 4	49.7
2	Nº 10	39.8
0.425	Nº 40	21.6
0.18	Nº 80	10.4
0.074	Nº 200	5.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resultado: Granulometría del caucho utilizado en esta investigación.

Tamices		Porcentaje que pasa %
Abertura mm	Tamiz ASTM	Mezcla
0.6	Nº 30	100
0.425	Nº 40	14.72
0.18	Nº 80	2.6
0.074	Nº 200	1.06

Fuente: Elaboración propia

El asfalto usado es el PEN 60-70 procedente de la planta de Petroperú, el aditivo para mejorar la adherencia del ligante con los áridos fue el Quimibond 3000, y el filler utilizado fue el cemento portland convencional.

Para la realización de las diferentes mezclas asfálticas se contó con el mismo tipo de material pétreo y cemento asfáltico, cuyas características y ensayos se pueden observar en el anexo A; en el caso de las mezclas asfálticas mejoradas, el caucho fue obtenido de una empresa dedicada a la venta de caucho triturado para canchas sintéticas con un huso granulométrico entre los tamices de 0.6 mm y 74 μ m. (Ver tabla 18).

El procedimiento de elaboración de las mezclas asfálticas sin mejorar se realizó a través del método convencional (Marshall) y para el procedimiento para las mejoradas, se empleó el método PlusRide.

Una vez comparadas las propiedades de flujo, estabilidad (Marshall) y de haber obtenido la cantidad de asfalto óptimo, se procedió a realizar el ensayo Creep estático para estudiar las deformaciones permanentes, y el ensayo de tracción indirecta o Lottman Test Modificado que estudió la susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica.

3.2. Descripción de ensayos

3.2.1. Método Marshall

Una vez determinada la proporción de los áridos, se procedió a obtener mediante este ensayo la cantidad óptima de cemento asfáltico, para el cual se prepararon probetas normalizadas de 2 ½" de altura y 4" de diámetro. Cabe resaltar que se utilizaron cinco contenidos de cemento asfáltico, variando entre uno y otro en 0.5 %, tratando de estar por encima y por debajo del óptimo esperado. Para cada contenido de ligante, se fabricaron tres probetas.

Las probetas se prepararon de acuerdo al procedimiento específico de calentamiento, mezclado y compactación. Las temperaturas de las dos últimas dependen del cemento asfáltico que se utilice para fabricar las probetas.

En la presente investigación se optó por el huso granulométrico MAC 1 perteneciente a mezclas densas, donde la metodología Marshall indica que cada probeta debe tener 1200 gr. de peso y debe ser compactada a través del martillo Marshall, que es un dispositivo de acero formado por una base plana y circular de 3 7/8" de diámetro, equipado con un peso de 10 lb (4.54 kg) y construido de para obtener una altura de caída de 18". Las probetas se compactan con 75 golpes por cara o como se especifique según el tránsito de diseño.

Este procedimiento es usado tanto para el diseño en laboratorio como para el control de terreno, y las características principales que se buscan son el contenido de vacíos, estabilidad y flujo.

Los criterios de evaluación de las mezclas asfálticas fueron las especificadas por Perú. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) para pavimentos flexibles (sección 423), en adelante EG 2013, concerniente a pavimento de concreto asfáltico en caliente en relación a mezclas densas. Estos criterios se presentan en las tablas 19 y 20, y el diseño en la 21.

Tabla 19. Requerimiento para mezclas de concreto bituminoso según EG 2013.

Parámetros de diseño	Clase de mezcla		
	A	B	C
Estabilidad (min)	8.15 KN	5.44 KN	4.53 KN
Flujo 0.25 mm	8 – 14	8 – 16	8 - 20
Porcentaje de vacíos con aire	3 – 5	3 – 5	3 - 5
Compactación N° de golpes en cada capa de testigo	75	50	35

Fuente: Perú. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013).

Tabla 20. Requerimiento de vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA) según EG2013.

TAMIZ	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	MARSHALL	SUPERPAVE
2.36 mm (N° 8)	21	-
4.75 mm (N° 4)	18	-
9.50 mm (3/8")	16	15
12.5 mm (1/2")	15	14
19.0 mm (3/4")	14	13
25.0 mm (1")	13	12
37.5 mm (1.5")	12	11
50 mm (2")	11.5	10.5

Fuente: Perú Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013).

Tabla 21. Diseño Marshall convencional.

Grupo	A	B	C	D	E
% de asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
% de agregado	96.00	95.50	95.00	94.50	94.00
% de caucho	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Perú. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013).

3.2.2. Preparación de la mezcla mediante proceso seco

Este proceso se desarrolla para estudiar el efecto del caucho al adicionarse como una parte de los agregados finos en la elaboración de las mezclas asfálticas. La tecnología de aplicación de la vía seca es la PlusRide y su procedimiento se detalla a continuación:

- Preparar la granulometría de los agregados.
- Colocar los agregados pétreos en el horno a una temperatura entre 190 °C y 218 °C por 12 horas.
- Para este estudio se incorporó el caucho en dos proporciones diferentes, de 1% y 2% del peso total del agregado.
- Los agregados pétreos calientes son mezclados con el caucho y colocados en un horno a 190°C o 218°C por aproximadamente 15 segundos.
- Adicionar el asfalto caliente a 135°C a la combinación agregados-caucho y mezclar por un tiempo entre 2 y 3 minutos.
- Colocar la mezcla asfáltica en un periodo de curado de 1 hora a 160°C.
- La mezcla caliente se compacta en moldes Marshall estándar los cuales han sido precalentados a 135°C.
- La mezcla caliente es compactada a una temperatura de 129,5°C con 50 golpes en ambos lados.
- La base del molde es removida inmediatamente después de la compactación, y el molde conteniendo la muestra es colocado en una base de madera de 98 mm de diámetro y 25 mm de espesor. Otra base de madera es colocada en la parte superior de la muestra con un sobrepeso de 2.2 kg y dejándola reposar por 24 horas antes de extraer la muestra del molde.
- La muestra extraída a temperatura ambiente es colocada en una superficie nivelada antes de la prueba.
- La gravedad específica y altura de la muestra es medida inmediatamente después de extraerla del molde.

La cantidad de cemento asfáltico para cada porcentaje de incorporación de caucho, se determinó con el procedimiento Marshall, mediante la elaboración de cinco probetas con diferentes contenidos de ligante, evaluándose el contenido de vacíos con aire como parámetro principal, la estabilidad y el flujo Marshall. A continuación, en las tablas 22 y 23, se entregan los parámetros Marshall obtenidos para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho:

Tabla 22. Diseño Marshall con 1% de caucho.

Grupo	A	B	C	D	E
% de asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
% de agregado	95.04	94.55	94.04	93.56	93.05
% de caucho	0.95	0.945	0.94	0.935	0.93

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Diseño Marshall con 2% de caucho.

Grupo	A	B	C	D	E
% de asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
% de agregado	94.12	93.64	93.14	92.66	92.16
% de caucho	1.88	1.87	1.86	1.85	1.84

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Ensayo Creep estático

Teniendo los instrumentos necesarios se procedió a preparar las muestras bituminosas de compactación de diámetro de 4 pulgadas y altura de 2 pulgadas, se determinaron las densidades relativas, densidades de las mezclas bituminosas, gravedad máxima específica y se corroboró la altura.

Las muestras fueron colocadas en una cámara de temperatura controlada mantenidas a 40 ° C (104 ° F) alrededor de 4 horas. Antes del inicio de la prueba, se montó la muestra en el cabezal de compresión como se detalla en la figura 10 , se aplicó tres ciclos de una precarga de onda cuadrada de 556 N (125 lb.) durante intervalos de un minuto, seguido de un período de descanso de un minuto para cada ciclo para luego dar inicio a una carga de 556 N (125 lb.) a la muestra durante una hora, finalizado ese tiempo, se retiró la carga y permitió que la muestra “rebote” durante 10 minutos procediéndose a su medida. Durante todo el tiempo de carga y descarga, se supervisó y registró la carga y las deformaciones verticales resultantes para cada LVDT.

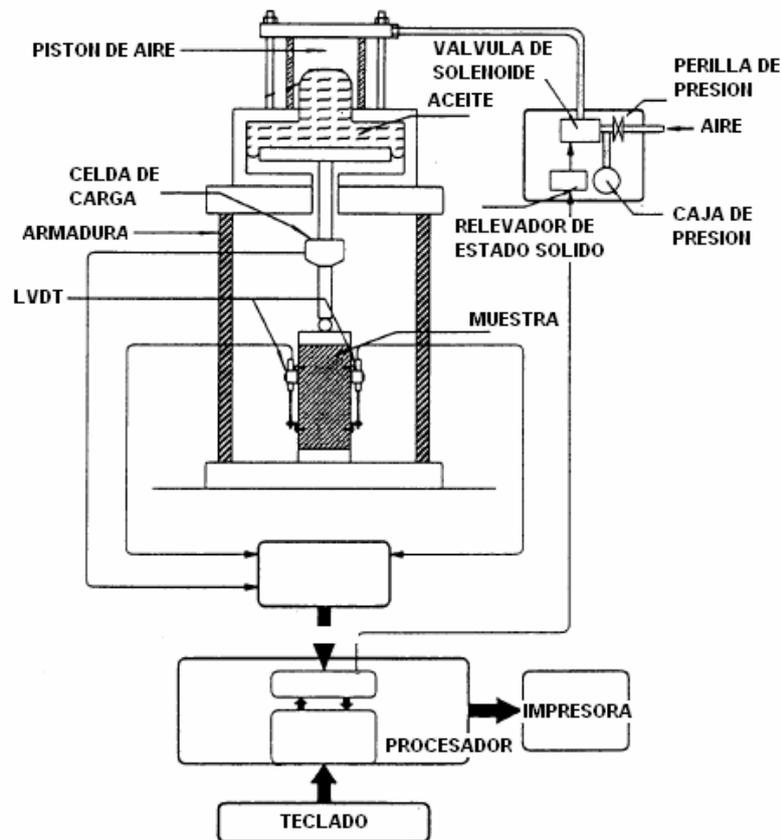


Figura 10. Dispositivo para ensayo de carga estática y repetida.

Fuente: Moreno y Pinto (2014).

A partir de los resultados del ensayo Marshall en los que se obtuvieron los porcentajes de asfaltos óptimos para cada mezcla (convencional, mejoradas con 1 % y con 2 %), se procedió a preparar dos muestras idénticas de cada una de ellas a las cuales se les aplicó el ensayo Creep Estático para calcular las deformaciones unitarias. Este concepto, según ASTM E139, puede expresarse de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{d}$$

(2)

$$\text{Creep rigidez KPa} = \frac{69 \text{ KPa}}{E}$$

Donde:

- ε : Deformación unitaria [mm/mm]
- δ : Deformación [mm]
- d : Espesor del espécimen [mm]
- E : Total de deformación unitaria [mm/mm]

3.2.4. Ensayo tracción indirecta o Lottman Test modificado

Este ensayo evalúa la resistencia de las mezclas asfálticas compactadas al daño causado por la humedad, utilizando el método propuesto por la norma ASSHTO T 283, la cual se ajusta más a las condiciones reales en obra y que, a su vez, permite evaluar la resistencia a la tracción indirecta de las muestras.

El ensayo consiste en aplicar a una muestra cilíndrica una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas. Este tipo de cargas provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, produciendo estado de tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción, esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral. Es un método práctico para caracterizar las propiedades de la mezcla bituminosa producto del fallo provocado por las tensiones de tracción.

Se realiza el procedimiento utilizando el contenido óptimo de cemento asfáltico de las mezclas convencionales y de las mezclas con caucho en un conjunto de mínimo seis probetas por tipo de mezcla, tres de las cuales se ensayarán en seco la resistencia a la tracción indirecta y los otros tres se somete a la saturación al vacío, seguido de un ciclo de inmersión en congelación y agua caliente para luego proceder a ensayar ya en condiciones húmedas la resistencia a la tracción indirecta. Para todos los ensayos se utilizarán la compactación por impacto utilizando el Martillo de Compactación Marshall y las probetas serán de un diámetro de 102 mm y altura de 64 mm. El procedimiento se detalla a continuación:

- Un grupo de probetas debe someterse a baño María (25° C) por dos horas, y posterior a ello deben ser ensayadas a tracción indirecta, a este conjunto de probetas se le denomina grupo en seco.
- El otro grupo se acondicionará primero colocándolo en un recipiente con agua por medio de vacío, luego se expondrá a 18° C durante 16 horas, seguido de un baño en agua a 60° C durante 24 horas, y posteriormente en un baño de agua a 25° C durante 2 horas, para finalmente ser ensayadas a tracción indirecta. A este grupo se le denominará saturado.
- Todas las probetas tanto en seco como en condiciones saturadas se moldearán de tal forma que su porcentaje de vacíos se encuentre cerca al 7%, el cual se logrará bajando el número de golpes por cara cuanto haga falta.
- Los efectos de saturación y acondicionamiento acelerado del agua, en mezclas bituminosas compactadas en laboratorio con su contenido de asfalto óptimo tanto para mezclas convencionales y mezclas mejoradas, se calculan comparando las propiedades

de tracción indirecta de las muestras de laboratorio saturadas, con las propiedades similares de las muestras secas. La reacción de los especímenes a la carga puede ser captada por medio de un registrador de multicanales o un dispositivo de adquisición de datos analógico digital. Se determina la resistencia a la tracción indirecta (ITS), tanto para probetas secas como húmedas, con la siguiente ecuación descrita por Paz (2017):

$$ITS = \left[\frac{2P}{D * H * \pi} \right] \quad (3)$$

Donde:

- P: Carga máxima [kN]
- D: Diámetro de la probeta [mm]
- H: Altura de la probeta [mm]

Luego con la resistencia a la tracción indirecta promedio de cada grupo de probetas, se calcula la razón de resistencia TSR, también descrita en Paz (2017):

$$TSR = \left[\frac{ITS(Humedo)}{ITS(seco)} \right] * 100\% \quad (4)$$

La razón de resistencia TSR es el porcentaje resultante de la variación, producto de las distintas condiciones en las que se sometió la probeta; la cual se puede leer como la susceptibilidad de la mezcla asfáltica en condiciones de humedad debido al grado de saturación y temperaturas.

Capítulo 4

Discusión de resultados

En el presente capítulo se discuten los resultados y se hace un análisis comparativo entre la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica mejorada que haya obtenido mejores resultados o con la que se cumplan los requisitos normativos.

Según plantea el manual español de empleo de caucho de neumáticos fuera de uso en mezclas bituminosas, al introducir el polvo de caucho como parte del agregado, su parte más fina inevitablemente interactúa con el asfalto, logrando absorber sus componentes más ligeros, modificando levemente sus propiedades. Este proceso es similar al de la digestión que sucede en el proceso por vía húmeda. Por otro lado, hace diferencia en la granulometría del caucho puesto que al tener tamaños elevados máximos de hasta 2 mm, la parte más gruesa se comporta como un árido elastómero dentro del esqueleto mineral de la mezcla asfáltica; aunque superficialmente, también reacciona con el ligante creándose una interfase caucho/asfalto que cohesionan ambos materiales y la parte más fina logra hacer el proceso de digestión. Para esta granulometría en España se han utilizado dotación de 2% del polvo de caucho para la mezcla asfáltica y al tener tamaños máximos de hasta 0.5 mm donde existe más interacción con el asfalto, al ser más finas, se han utilizado una dotación de 1% de polvo de caucho.

La guía para fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático, indica que las mezclas con caucho tendrán siempre más vacíos que las convencionales, aunque se reducen por la digestión en el proceso por vía seca dentro de la primera hora, tiempo en que las partículas de caucho pierden parte de las propiedades elásticas que entorpecen la compactación. Esto puede explicar lo que se evidencia en los resultados de la presente investigación, donde se constata que con la adición de caucho el porcentaje de vacío con aire (tabla 24) y de vacíos en el agregado mineral (tabla 25), aumenta con respecto a las mezclas convencionales.

En la tabla 26 del parámetro de flujo 0.01” se aprecia que mayor porcentaje de caucho y ligante (componente deformable) aumenta el flujo. Al respecto Romero (2018) explica que al diluirse la fracción fina del caucho en el asfalto ayuda a mejorar la adherencia y cohesión entre las partículas volviendo a la mezcla más flexible. La parte gruesa del caucho se comporta como un agregado elástico el cual ayuda a que la mezcla sea más flexible y recupere con facilidad su estado normal.

Romero (2018) también hace mención que el reemplazo del agregado fino por caucho hace que la mezcla se vuelva más flexible y deformable; lo que significa que la mezcla será menos rígida, es decir, menos estable según se muestra en la tabla 27. Una de las razones según explican Cabrera y Miranda (2019), puede atribuirse a los altos porcentajes óptimos de asfalto en los diseños con caucho, necesarios para cubrir el incremento de vacíos el cual demanda mayor absorción de ligante.

El peso unitario por su parte, disminuye a medida que la dosificación de caucho se incrementa, fenómeno que Granados (2017) describe argumentando que probablemente se debe a que, a mayor contenido de caucho en la mezcla, el volumen se incrementa, por lo cual se obtiene una menor densidad de la mezcla debido a que los granos de caucho tienen menor densidad que los agregados minerales. Ver tabla 28.

La guía para fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático, menciona que, usando el porcentaje adecuado de caucho según su granulometría, cumplen con las especificaciones MTC E 504, MTC E 505. Para esta investigación, teniendo como referencia la granulometría, lo recomendable es usar el 1% de caucho como parte del agregado y eso se ve reflejado en las tablas 26 y 27 donde se ve que al añadir 2% de caucho altera estos resultados llevando al límite a ambos índices. La guía también recomienda siempre reducir la granulometría del caucho puesto que cuanto menor sea el tamaño máximo menores serán los problemas de compactación y demás originados por el caucho.

Tabla 24. Resultados Marshall de vacíos con aire.

Grupo	% de vacíos con aire en la mezcla total				
	A	B	C	D	E
% de asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
Convencional	8.1	6.9	4.2	3.3	1.8
1 % de caucho	9.5	8.8	6.9	4.7	3.3
2 % de caucho	8.5	7.7	6.7	5.7	3.9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Resultados Marshall vacíos en el agregado mineral.

Grupo	A	B	C	D	E
	% de vacíos en el agregado mineral				
% de asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
Convencional	16.0	16.1	14.8	15.1	14.9
1 % de caucho	17.2	17.6	16.9	16.1	15.9
2 % de caucho	16.1	16.5	16.6	16.8	16.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Resultados Marshall de flujo 0.01”.

Grupo	A	B	C	D	E
	Flujo 0.01”				
% de asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
Convencional	11	12	12	15	15
1 % de caucho	13	14	14	14	13
2 % de caucho	13	14	14	15	14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Resultados Marshall de estabilidad lb.

Grupo	A	B	C	D	E
	Estabilidad (lb)				
	A	B	C	D	E
% de asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
Convencional	2940	3160	3668	3630	3583
1 % de caucho	2554	2524	2932	3006	2900
2 % de caucho	2508	2377	2242	2332	2216

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Resultados Marshall peso unitario.

Grupo	A	B	C	D	E
	Peso unitario (gr/cm ³)				
% de asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
Convencional	2.32	2.33	2.38	2.379	2.396
1 % de caucho	2.24	2.25	2.28	2.31	2.33
2 % de caucho	2.23	2.24	2.25	2.25	2.28

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Cuadro resumen del ensayo Marshall según Norma MTC E 504, MTC E 505 en un 4 % de vacíos de aire.

Ensayo	Vacíos con aire en la mezcla asfáltica	Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad	Flujo	Peso unitario	Vacíos en los agregados minerales
	(%)	(%)	Lb.	(0.01")	(gr/cm ³)	(%)
Norma	MTC E 504					MTC E 505
Especificación	3 – 5	-	Min 1796.7	8-14	-	Min 14
Convencional	4	5.2	3600	13.2	2.37	15.1
1 % de caucho	4	5.7	3000	13.8	2.32	15.7
2 % de caucho	4	6.0	2200	14	2.28	16.3

Fuente: Elaboración propia.

Con relación a la deformación y recuperación de las mezclas asfálticas descritas en las tablas 30 a la 40, los resultados reflejan que las que contienen el 1% de caucho presentan mayor resistencia a la deformación, el cual está por debajo del límite permitido (1% de deformación) considerándose una mezcla satisfactoria para dicho criterio, según Cabrera y Miranda (2019). La adición del 2% de caucho se acerca peligrosamente a lo permitido evidenciándose que, a más caucho, menos satisfactorio será el porcentaje de deformación. Olarte y Soler (2018) en su investigación mencionan que este comportamiento se debe en gran medida al contenido de asfalto, pues para estas mezclas asfálticas mejoradas es necesario diseñar contenidos de asfalto superiores al 6.0%, lo cual hace que la mezcla asfáltica sea más susceptible y mecánicamente no tenga propiedades óptimas; en el presente estudio la mezcla con 2% de caucho está cerca de igualar el 6.0% de ligante por lo que también limita con la medida de satisfacción.

Para el criterio de recuperación, debe considerarse que la mayoría de los materiales de pavimento no son elásticos. En la presente investigación, se puede visualizar en la tabla 40 que

la recuperación aumenta al añadir el 2% de caucho, que representa un exceso dando como resultado una recuperación de 51%; esto sucede debido a que la parte gruesa del caucho se comporta como un agregado elástico el cual ayuda a que la mezcla sea más flexible y recupere con facilidad su estado normal. Similar interpretación se da en Jiménez y Melo (2018).

Tabla 30. Creep estático convencional muestra N° 1.

T (min)	Lecturas de ensayo 0.001"	Deformac. Mm	Espesor del espécimen mm	Valores convertidos		
				Deformac. Unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Creep KPa acumulado
0	0.679	0.000	62.721	0	0	-
5	0.687	-0.203	62.518	0.0033	0.0033	20909
10	0.689	-0.051	62.467	0.0008	0.0041	16829
15	0.691	-0.051	62.416	0.0008	0.0049	14082
20	0.692	-0.025	62.391	0.0004	0.0053	13019
25	0.693	-0.025	62.365	0.0004	0.0057	12105
30	0.695	-0.038	62.327	0.0006	0.0063	10952
35	0.696	-0.038	62.289	0.0006	0.0069	10000
40	0.697	-0.013	62.277	0.0002	0.0071	9718
45	0.697	-0.013	62.264	0.0002	0.0073	9452
50	0.698	-0.030	62.233	0.0005	0.0078	8846
55	0.699	-0.025	62.208	0.0004	0.0082	8415
60	0.700	-0.020	62.188	0.0003	0.0085	8118
10 minutos de recuperación						
70 r	0.695	0.127	62.315			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Creep estático convencional muestra N° 2.

T (min)	Lecturas de ensayo 0.001"	Deformac. Mm	Espesor del espécimen mm	Valores convertidos		
				Deformac. unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Creep KPa acumulado
0	0.328	0.000	62.770	0	0	-
5	0.333	-0.114	62.656	0.0018	0.0018	38333
10	0.338	-0.140	62.516	0.0022	0.004	17250
15	0.343	-0.127	62.389	0.0020	0.006	11500
20	0.347	-0.089	62.300	0.0014	0.0074	9324
25	0.349	-0.051	62.249	0.0008	0.0082	8415
30	0.351	-0.064	62.186	0.0010	0.0092	7500
35	0.353	-0.038	62.148	0.0006	0.0098	7041
40	0.354	-0.038	62.110	0.0006	0.0104	6635
45	0.356	-0.038	62.072	0.0006	0.011	6273
50	0.357	-0.033	62.038	0.0005	0.0115	6000
55	0.358	-0.018	62.021	0.0003	0.0118	5847
60	0.358	-0.018	62.003	0.0003	0.0121	5702
10 minutos de recuperación						
70 r	0.340	0.462	62.465			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Deformación permanente unitaria de la muestra convencional.

T. (min)	Muestra N° 1		Muestra N° 2		Promedio Deformac. Unitaria Acumulada
	Deformac. Unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Deformac. Unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	
0	0	0	0	0	0.0000
5	0.0033	0.0033	0.0018	0.0018	0.0026
10	0.0008	0.0041	0.0022	0.004	0.0041
15	0.0008	0.0049	0.002	0.006	0.0055
20	0.0004	0.0053	0.0014	0.0074	0.0064
25	0.0004	0.0057	0.0008	0.0082	0.0070
30	0.0006	0.0063	0.001	0.0092	0.0078
35	0.0006	0.0069	0.0006	0.0098	0.0084
40	0.0002	0.0071	0.0006	0.0104	0.0088
45	0.0002	0.0073	0.0006	0.011	0.0092
50	0.0005	0.0078	0.0005	0.0115	0.0097
55	0.0004	0.0082	0.0003	0.0118	0.0100
60	0.0003	0.0085	0.0003	0.0121	0.0103

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Creep estático 1 % de caucho muestra N° 1.

Tiempo (min)	Lecturas de ensayo 0.001"	Deformac. mm	Espesor del espécimen mm	Valores convertidos		
				Deformac. unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Creep KPa acumulado
0	0.122	0.000	64.550	0	0	-
5	0.125	-0.076	64.474	0.0012	0.0012	57500
10	0.129	-0.089	64.385	0.0014	0.0026	26538
15	0.131	-0.064	64.321	0.0010	0.0036	19167
20	0.133	-0.051	64.271	0.0008	0.0044	15682
25	0.134	-0.013	64.258	0.0002	0.0046	15000
30	0.135	-0.038	64.220	0.0006	0.0052	13269
35	0.136	-0.013	64.207	0.0002	0.0054	12778
40	0.136	-0.013	64.194	0.0002	0.0056	12321
45	0.137	-0.013	64.182	0.0002	0.0058	11897
50	0.137	-0.013	64.169	0.0002	0.006	11500
55	0.137	0.000	64.169	0	0.006	11500
60	0.137	0.000	64.169	0	0.006	11500
10 minutos de recuperación						
70 r	0.130	0.178	64.347			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Creep estático 1 % de caucho muestra N° 2.

Tiempo (min)	Lecturas de ensayo 0.001"	Deformac. Mm	Espesor del espécimen mm	Valores convertidos		
				Deformac. unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Creep KPa acumulado
0	0.347	0.000	64.750	0	0	-
5	0.350	-0.076	64.674	0.0012	0.0012	57500
10	0.351	-0.013	64.661	0.0002	0.0014	49286
15	0.351	0.000	64.661	0.0000	0.0014	49286
20	0.351	-0.005	64.656	0.0001	0.0015	46000
25	0.351	-0.003	64.653	0	0.0015	46000
30	0.351	0.000	64.653	0	0.0015	46000
35	0.351	-0.005	64.648	0.0001	0.0016	43125
40	0.351	0.000	64.648	0.0000	0.0016	43125
45	0.351	-0.005	64.643	0.0001	0.0017	40588
50	0.351	0.000	64.643	0	0.0017	40588
55	0.351	0.000	64.643	0	0.0017	40588
60	0.351	0.000	64.643	0	0.0017	40588
10 minutos de recuperación						
70 r	0.350	0.030	64.674			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Deformación permanente unitaria de la muestra mejorada con 1% de caucho.

T (min)	Muestra N° 1		Muestra N° 2		Promedio Unitaria Deformac. Acumulada mm/mm
	Deformac. Unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Deformac. Unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	
0	0	0	0	0	0.0000
5	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
10	0.0014	0.0026	0.0002	0.0014	0.0020
15	0.001	0.0036	0	0.0014	0.0025
20	0.0008	0.0044	0.0001	0.0015	0.0030
25	0.0002	0.0046	0	0.0015	0.0031
30	0.0006	0.0052	0	0.0015	0.0034
35	0.0002	0.0054	0.0001	0.0016	0.0035
40	0.0002	0.0056	0	0.0016	0.0036
45	0.0002	0.0058	0.0001	0.0017	0.0038
50	0.0002	0.006	0	0.0017	0.0039
55	0	0.006	0	0.0017	0.0039
60	0	0.006	0	0.0017	0.0039

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Creep estático 2 % de caucho muestra N° 1.

Tiempo (min)	Lecturas de ensayo 0.001"	Deformación mm	Espesor del espécimen mm	Valores convertidos		
				Deformac. unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Creep KPa acumulado
0	0.775	0.000	64.700	0	0	-
5	0.778	-0.076	64.624	0.0012	0.0012	57500
10	0.782	-0.102	64.522	0.0016	0.0028	24643
15	0.787	-0.127	64.395	0.0020	0.0048	14375
20	0.791	-0.089	64.306	0.0014	0.0062	11129
25	0.793	-0.064	64.243	0.0010	0.0072	9583
30	0.795	-0.051	64.192	0.0008	0.008	8625
35	0.797	-0.051	64.141	0.0008	0.0088	7841
40	0.799	-0.038	64.103	0.0006	0.0094	7340
45	0.800	-0.038	64.065	0.0006	0.01	6900
50	0.801	-0.025	64.040	0.0004	0.0104	6635
55	0.802	-0.013	64.027	0.0002	0.0106	6509
60	0.802	-0.013	64.014	0.0002	0.0108	6389
10 minutos de recuperación						
70 r	0.787	0.381	64.395			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37. Creep estático 2 % de caucho muestra N° 2.

Tiempo (min)	Lecturas de ensayo 0.001"	Deformac. mm	Espesor del espécimen mm	Valores convertidos		
				Deformac. unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Creep KPa acumulado
0	0.536	0.000	63.990	0	0	-
5	0.547	-0.267	63.723	0.0042	0.0042	16429
10	0.548	-0.038	63.685	0.0006	0.0048	14375
15	0.550	-0.048	63.637	0.0008	0.0056	12321
20	0.551	-0.015	63.622	0.0002	0.0058	11897
25	0.551	-0.013	63.609	0.0002	0.006	11500
30	0.551	-0.008	63.601	0.0001	0.0061	11311
35	0.556	-0.109	63.492	0.0017	0.0078	8846
40	0.557	-0.036	63.457	0.0006	0.0084	8214
45	0.557	0.000	63.457	0	0.0084	8214
50	0.557	0.000	63.457	0	0.0084	8214
55	0.559	-0.038	63.419	0.0006	0.009	7667
60	0.559	-0.008	63.411	0.0001	0.0091	7582
10 minutos de recuperación						
70 r	0.548	0.274	63.685			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Deformación permanente unitaria de la muestra mejorada con 2% de caucho.

T (min)	Muestra N° 1		Muestra N° 2		Promedio Unitaria Deformac. Acumulada mm/mm
	Deformac. Unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	Deformac. Unitaria mm/mm	Deformac. Unitaria Acumulada mm/mm	
0	0	0	0	0	0.0000
5	0.0012	0.0012	0.0042	0.0042	0.0027
10	0.0016	0.0028	0.0006	0.0048	0.0038
15	0.002	0.0048	0.0008	0.0056	0.0052
20	0.0014	0.0062	0.0002	0.0058	0.0060
25	0.001	0.0072	0.0002	0.006	0.0066
30	0.0008	0.008	0.0001	0.0061	0.0071
35	0.0008	0.0088	0.0017	0.0078	0.0083
40	0.0006	0.0094	0.0006	0.0084	0.0089
45	0.0006	0.01	0	0.0084	0.0092
50	0.0004	0.0104	0	0.0084	0.0094
55	0.0002	0.0106	0.0006	0.009	0.0098
60	0.0002	0.0108	0.0001	0.0091	0.0100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Cuadro resumen de deformación permanente unitaria de las muestras.

Tiempo (min)	Promedio deformación unitaria acumulada mm/mm		
	Convencional	1% de caucho	2% de caucho
0	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0026	0.0012	0.0027
10	0.0041	0.0020	0.0038
15	0.0055	0.0025	0.0052
20	0.0064	0.0030	0.0060
25	0.0070	0.0031	0.0066
30	0.0078	0.0034	0.0071
35	0.0084	0.0035	0.0083
40	0.0088	0.0036	0.0089
45	0.0092	0.0038	0.0092
50	0.0097	0.0039	0.0094
55	0.0100	0.0039	0.0098
60	0.0103	0.0039	0.0100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Recuperación de Creep estático.

		Convencionales		Mejoradas con 1 % de caucho		Mejoradas con 2 % de caucho	
		Muestra N° 1	Muestra N° 2	Muestra N° 1	Muestra N° 2	Muestra N° 1	Muestra N° 2
T	0´	62.721	62.770	64.550	64.750	64.700	63.990
	60´	62.188	62.003	64.169	64.643	64.014	63.411
	70´ R	62.315	62.465	64.347	64.674	64.395	63.685
Deformac.	%	0.86	1.24	0.59	0.17	1.07	0.91
	% Prom.	1.05		0.38		0.99	
	Des. Estándar	0.268		0.296		0.113	
Recup.	%	0.20	0.74	0.28	0.05	0.59	0.43
	% Prom.	0.47		0.16		0.51	
	Des. Estándar	0.381		0.162		0.113	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del ensayo Lottman Modificado tiene relación con lo antes mencionado por Romero (2018), quien indicaba que la cohesión y adherencia entre partículas aumenta gracias a la parte fina de caucho volviendo la mezcla más flexible por lo que en principio debería verse reflejado en una mejoría en la resistencia a la compresión diametral, pero el aumento del porcentaje de caucho hace que haya exceso de asfalto produciendo la separación de áridos disminuyendo el rozamiento interno y por tanto la resistencia global de la mezcla como se observa en la tabla 41 donde se logra verificar que la adición del 2% de caucho baja cerca del 37.6 % la resistencia a la tracción indirecta en estado seco; muy por el contrario con la adición de solo 1% de caucho la resistencia a la tracción indirecta en estado seco solo baja cerca del 3.6%.

Ramírez (2006) tiene resultados similares en cuanto al efecto negativo del agua en la cohesión de la mezcla al disminuir con la incorporación del caucho. También hace mención a la resistencia conservada debido a que además de la parte fina del caucho que mejora la adherencia volviendo la mezcla más flexible, la parte gruesa del caucho se comporta como un agregado elástico el cual ayuda a que la mezcla sea más flexible y recupere con facilidad su estado normal. Esto se ve reflejado en la tabla 42, en la que se puede identificar que la mezcla asfáltica mejorada con la menor cantidad de caucho lleva a una resistencia retenida por efecto de la humedad de un 82%, frente a un 87% que obtiene la mezcla en la que se incorporó el 2% de caucho, cumpliendo ambas con las especificaciones a diferencia de las convencionales.

Tabla 41. Cuadro resumen de cargas tracción indirecta.

Ensayo	Carga tracción indirecta húmeda	Carga tracción indirecta seca
	Kg	Kg
Convencional	357	548
1 % de caucho	425	528
2 % de caucho	301	342

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42. Cuadro resumen de resistencia retenida.

Norma	AASHTO T 283		
Ensayo	Resistencia húmeda	Resistencia seca	Resistencia retenida TSR
	Kg/cm ²	Kg/cm ²	%
Especificación			Min 80
Convencional	3.4	5.4	63
1 % de caucho	4.1	5.0	82
2 % de caucho	2.7	3.1	87

Fuente: Elaboración propia.



Conclusiones

La mezcla asfáltica convencional con 1% de caucho y la mezcla asfáltica con 2% de caucho, cumplen con los parámetros Marshall establecidos en las normas MTC E 504 y 505.

Con respecto a las propiedades mecánicas, la mezcla con 1% de caucho es la óptima para reemplazar la convencional ya que no se excede del porcentaje óptimo de cemento asfáltico con respecto al convencional, no se aproxima al límite superior permisible de flujo como si lo hace la mezcla mejorada con 2% de caucho y posee mayor estabilidad.

La mezcla asfáltica convencional no cumple con el porcentaje mínimo requerido según **AASHTO T 283**, referido a la de resistencia retenida (80%), a fin de evitar los daños prematuros atribuidos a la presencia del agua.

La mezcla asfáltica con 1% de caucho y la mezcla asfáltica con 2% de caucho cumplen con el porcentaje mínimo requerido según **AASHTO T 283**, referido a la resistencia retenida (80%).

Con respecto a la susceptibilidad al agua de los agregados, la mezcla asfáltica con 1% de caucho es la óptima para reemplazar la convencional. Puesto que además de cumplir con el porcentaje mínimo de resistencia retenida (**AASHTO T 283**) también supera en resistencia a la tracción indirecta a las mejoradas con 2% de caucho.

Con respecto a la deformación, la mezcla asfáltica con 1% de caucho es la óptima para reemplazar la convencional puesto que reduce la deformación unitaria.

Normalmente cuando se incrementa la cantidad del ligante se aumenta el componente de cohesión en la resistencia global, pero llega un momento en que incorporar más ligante separa los áridos disminuyendo apreciablemente el rozamiento interno y por tanto la resistencia global de la mezcla. En las mezclas con caucho esta separación de áridos se presenta con mayor rapidez por lo que se obtiene menor estabilidad.



Recomendaciones

A la luz de esta investigación se sugiere incorporar a las mezclas convencionales el 1% de caucho reciclado pues mejora la susceptibilidad al agua en un 23% y en las deformaciones en un 62%.

Las mezclas que contienen el 1% de caucho, presentan mejoras en cuanto a sus propiedades mecánicas, susceptibilidad al agua y deformación permanente que las convencionales y las que contaban con el 2% de caucho; sin embargo, se pudo evidenciar que, a menor porcentaje de caucho, mayor rendimiento de las mezclas asfálticas, por lo cual sería interesante iniciar posteriores investigaciones para determinar el porcentaje exacto para sacar el máximo provecho al caucho.

Se recomienda seguir utilizando el ensayo de tracción indirecta para la evaluación de la adherencia en la mezcla asfáltica, porque además de la obtención del porcentaje de resistencia conservada requisito en la evaluación de las mezclas densas en caliente, el ensayo permite analizar visualmente el comportamiento del agregado cuando es sometido en inmersión como un todo.

En la mayoría de estudios que se han realizado a pavimentos con GCR, se refleja que hay otros factores que afectan los comportamientos mecánicos. Estos factores tienen que ver con la temperatura de reacción del asfalto y el GCR, la granulometría de los agregados, la adición de aditivos y la implementación de otras técnicas de reciclaje de pavimentos.



Referencias bibliográficas

Asphalt Institute. (s.f.). Manual del Asfalto

Cabrera, A., y Miranda, H. (2019). *Mezclas asfálticas mejoradas con caucho de llantas añadido por vía seca*. (Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil). Repositorio UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/13840>.

Castro, G. (2008). *Materiales y compuestos para la industria del neumático*. Universidad de Buenos Aires. Argentina. https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf

Fajardo, L., y Vergaray, D. (2014). *Efecto de la incorporación por vía seca, del polvo de neumático reciclado, como agregado fino en mezclas asfálticas*. (Tesis de pre grado, Universidad San Martín de Porres) Repositorio institucional USMP.

Gallego, J., y Saiz, L. (2017). *Guía para la fabricación y puesta en obras de mezclas bituminosas con polvo de neumático. Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso*. https://www.signus.es/wp-content/uploads/2017/10/Guia_de_mezclas_2017_WEB.pdf

Gobierno de Chile. Ministerio de Obras públicas. Dirección de Vialidad (2014). *Manual de carreteras volumen N° 5 especificaciones técnicas generales de construcción*. (MOP-DGOP-Dirección de vialidad-Chile). https://portal.ondac.com/601/articles-59864_doc_pdf.pdf

Granados, 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) Repositorio Institucional URP. <http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/1572/JLGRANADOSN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Huamán, N. (2011). *La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería) Repositorio institucional UNI. http://www.academia.edu/13989918/UNIVERSIDAD_NACIONAL_DE_INGENIER%3%8DA_FACULTAD_DE_INGENIER%3%8DA_CIVIL_SECCI%3%93N_DE_POSTGRADO_LA_DEFORMACI%3%93N_PERMANENTE_EN_LAS_MEZCLAS_ASF%3%81LTICAS_Y_EL_CONSECUENTE_DETERIORO?auto=download.
- Instituto de Desarrollo Urbano de la Alcaldía Mayor de Bogotá. (2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas*. Universidad de Los Andes. Bogotá - Colombia. https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf.
- Instituto de la Construcción y Gerencia. (2015). *Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos sección: suelos y pavimentos* (4^{ta} ed.) Lima: Fondo Editorial ICG.
- Instituto del Asfalto. (1982). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. EEUU: Lexington.
- Jiménez, M., y Melo, I. (2018). *Comparación de la mezcla asfáltica sin adiciones y mezcla asfáltica con gcr (grano de caucho reciclado) empleando el ensayo de ahuellamiento reemplazando entre el 1% y 4% del agregado fino*. (Tesis de pre grado, Universidad industrial de Santander). Repositorio institucional UIS. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/25348/Flores_PJR.pdf?sequence=1
- Ministerio de Fomento y Obras Públicas del Perú (2007). *Manual de empleo de caucho de neumático fuera de uso en mezclas bituminosas*. http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/27EDCC96-7C3A-42B5-96B7-F6B87D0BD3DF/116371/Manual_NFU.pdf
- Moreno, L., y Pinto, L. (2007). *Estado del arte en el estudio de las deformaciones plásticas en pavimentos*. (Tesis de pre grado, Universidad industrial de Santander). <https://studylib.es/doc/6860611/estado-del-arte-en-el-estudio-de-las-deformaciones-plasti...>
- Olarte, B., y Soler, R. (2018). Efecto del grano de caucho en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo md-12. (Tesis de pregrado, Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia). Repositorio UPT. https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3094/1/TGT_1659.pdf

- Paz, J. (2017). *Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente utilizando ensayo de tracción indirecta*. (Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María). Repositorio digital USM. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/13928/3560900231399UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Perú. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de carreteras especificaciones técnicas generales para construcción*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html. Lima – Perú.
- Perú. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de ensayos de materiales*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html. Lima – Perú.
- Perú. Presidencia del Consejo de Ministros (2018). *Región Piura recibió más de S/ 200 millones para ejecutar obras de reconstrucción con cambios*. <https://www.rcc.gob.pe/2020/region-piura-recibio-mas-de-s-200-millones-para-ejecutar-obras-de-reconstruccion-con-cambios/>
- Ramírez, N. (2006). *Estudio de la utilización de caucho de neumático en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*. (Tesis de pregrado, Universidad de Chile). Repositorio Uchile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104457>
- Romero, L. (2018). *Estudio de la influencia de la adición de neumático reciclado en mezclas asfálticas en caliente, en la ciudad de Juliaca*. (Tesis de pregrado, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez). Repositorio Institucional UANCV. http://repositorio.uancv.edu.pe/bitstream/handle/UANCV/2597/T036_46775214.pdf?sequence=3
- Sobero, C.A (2016). *Asfalto*. <https://www.slideshare.net/CARLOSALBERTOSOBEROA/asfalto-57030981>
- Tirel, K. (2017). *Ingeniería de perfil de modernas plantas para reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU)*. (Tesis de pregrado, Universidad de Chile). Repositorio Uchile. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/144472/Ingenier%C3%ADa-de-perfil-de-modernas-plantas-para-reciclaje-de-neum%C3%A1ticos-fuera-de-uso-%28NFU%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.



Apéndices



Apéndices A. Requerimiento para agregados

A.1. Requerimientos para agregados finos

Ensayos	Norma	Requerimientos	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3.000	> 3.000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N.º 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N.º 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

Fuente: Elaboración propia.



A.2. Requerimientos para agregados gruesos

Ensayos	Norma	Requerimientos	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3.000	> 3.000
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión los ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	+95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción	MTC E 206	1.0% máx.	1.0% máx.

Fuente: Elaboración propia.



Apéndices B. Propiedades físico – mecánicas del agregado grueso.

B.1. Determinación de partículas chatas y alargadas en agregado grueso



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
DETERMINACIÓN DE PARTICULAS CHATAS Y ALARGADAS EN AGREGADO GRUESO
Norma: MITC E 223

Orden de servicio N° : 21467
Informe N° : 182380

Fecha de recepción : 08/05/2018
Fecha de ensayo : 16/05/2018
Fecha de emisión : 10/07/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante : HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA
Tesis : Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino
Ubicación : Piura
Muestreo realizado por : El solicitante
Muestra : Grava triturada
Procedencia : Cantera Santa Cruz

Abertura del tamiz (pulg)	Gradación de la muestra original (%)	Número de partículas	Partículas chatas		Partículas alargadas		Partículas chatas y alargadas	
			% en peso de la fracción	Promedio ponderado	% en peso de la fracción	Promedio ponderado	% en peso de la fracción	Promedio ponderado
2 - 1/2	0.00	---	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 - 1/2 - 1	0.00	---	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 - 3/4	1.17	---	3.10	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4 - 1/2	51.88	---	3.10	1.81	0.00	0.00	0.00	0.00
1/2 - 3/8	46.94	---	5.81	2.73	1.12	0.53	0.00	0.00
Total:			100.00	4	1	1	0	0

Nota:
Razón dimensional empleada: 1:3

Realizó el ensayo : Téc. Wigherto Lazo C.



Christian Wigherto Garcia
Ingeniero Civil
CIP 1000000000
Responsable

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP, está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

B.2. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO, GRUESO Y GLOBAL

Norma: NTP 400.012 2001

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

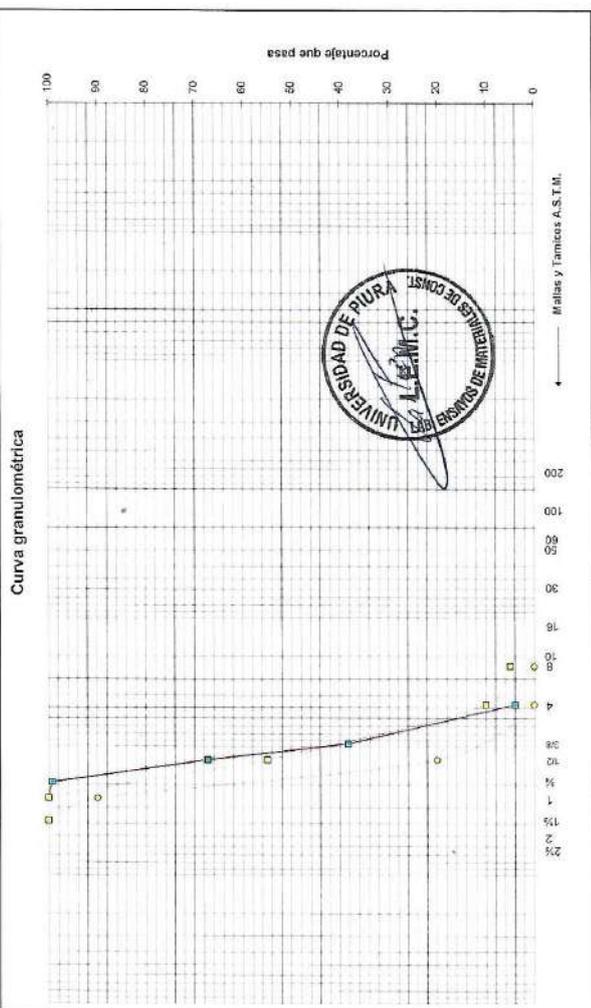
Solicitante : HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA Ubicación : Piura Muestreo realizado por : El solicitante
 Tesis : Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino
 Procedencia : Agregado grueso triturado, procedente de cantera Santa Cruz.

Orden de servicio N° : 21457

Informe N° : 182391

Fecha de ensayo : 21/06/2018

Realizó el ensayo : Téc. Wighenio Lazo C.



Curva granulométrica

Mallas y Tamices A.S.T.M.

Abertura (mm)	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
63.50	2 1/2"				
50.8	2"				
38.1	1 1/2"				
25.4	1"	0.0	0.00	0.00	100
19.1	3/4"	35.4	0.72	0.72	99
12.7	1/2"	1809.6	32.04	32.76	67
9.53	3/8"	1456.3	28.99	61.75	38
4.76	4	1721.5	34.27	96.02	4
2.38	8				
1.19	16				
0.59	30				
0.297	60				
0.149	100				
0.074	200				
	Fondo	194.9			
	Total	5018.7			
	Peso Inicial	5024.0			
	Pérdida	5.3			

Supervisó el ensayo: Christian Varthen Garcia
 Ingeniero Civil
 CIP 106420

Descripción de la muestra: Agregado grueso de tamaño máximo nominal 3/4" (19.1 mm)
 Huso granulométrico trazado: N 67 NTP 400.037 - 2002

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP esta exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

B.3. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS
Norma: MTC E-210 1999

Orden de servicio N° : 21467
Informe N° : 182381
Fecha de emisión : 10/07/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante : HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA
Tesis : Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino.
Ubicación : Piura
Muestreo realizado por : El solicitante
Muestra : Grava triturada
Procedencia : Cantera Santa Cruz

RESULTADOS

a.- Con una cara fracturada

Tamaño de tamiz (pulg.)	A (g)	B (g)	C $\frac{B}{A} \times 100\%$	D %	E $C \times D$
2" - 1 1/2"	0	0	0.00	0.0	0.0
1 1/2" - 1"	0	0	0.00	0.0	0.0
1" - 3/4"	0	0	0.00	1.2	0.0
3/4" - 1/2"	1266	1221	96.45	51.9	5004.0
1/2" - 3/8"	456	450	98.68	46.9	4632.5
Total	1722			100.0	9636.5

Porcentaje con una cara fracturada: = TOTAL E/TOTAL D = **96.4**

Tamaño de tamiz (pulg.)	A (g)	B (g)	C $\frac{B}{A} \times 100\%$	D %	E $C \times D$
2" - 1 1/2"	0	0	0.0	0.0	0.0
1 1/2" - 1"	0	0	0.0	0.0	0.0
1" - 3/4"	0	0	0.0	1.2	0.0
3/4" - 1/2"	1266	1195	94.4	51.9	4897.4
1/2" - 3/8"	456	432	94.7	46.9	4447.2
Total	1722			100.0	9344.6

Porcentaje con dos o más cara fracturada: = TOTAL E/TOTAL D = **93.4**

Observaciones:

A Peso de la muestra
B Peso de material con caras fracturadas
C Porcentaje de caras fracturadas
D Porcentaje retenido graduación original
E Promedio de caras fracturadas

Realizó el ensayo : Téc. Wigberto Lazo C.
Presenció el ensayo : ---

Christian Varón García
Ingeniero Civil
CIP 10642
Responsable



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

B.4. Peso específico y absorción del agregado grueso



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO
Norma: NTP 400.021 2002

Orden de servicio N° : 21467
Informe N° : 182382

Fecha de recepción : 08/05/2018
Fecha de ensayo : 23/05/2018
Fecha de emisión : 10/07/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA
Tesis	: Mejoras mecánicas de las mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como del agregado fino
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Muestra	: Grava triturada
Procedencia	: Cantera Santa Cruz

RESULTADOS:

Muestra	Peso específico de masa (g/cm ³)	Peso específico de masa saturado con superficie seca (g/cm ³)	Peso específico aparente (g/cm ³)	Absorción (%)
M-1	2.71	2.74	2.79	1.0
M-2	2.72	2.75	2.79	0.9

Observaciones: --

Realizó el ensayo : Téc. Wigberto Lazo C.
Presenció el ensayo : --


Christian Vanden Garcia
Ingeniero Civil
CIP 106426
Responsable



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

Apéndices C. Propiedades físico - mecánicas del agregado fino

C.1. Método de ensayo para el análisis granulométrico (Cantera Sojo)



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
Norma: NTP 339.128 1999

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

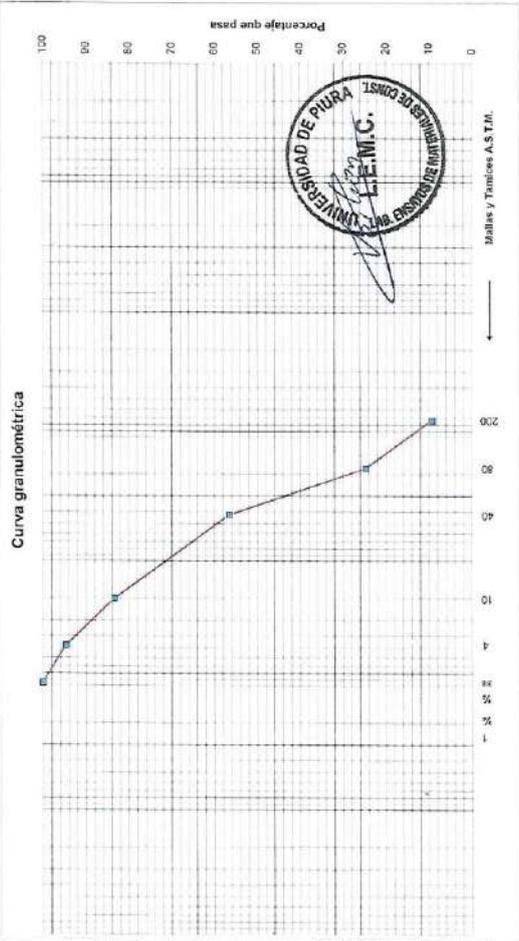
Solicitante : HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA Ubicación : Piura Muestreo realizado por : El solicitante
 Tesis : Mejores mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino
 Procedencia : Cantera Sojo

Orden de servicio N° : 21-497 Informe N° : 182384 Fecha de ensayo : 25/05/2018 Realizó el ensayo : Téc. Wlberto Lazo C.

Abertura	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
25.4	1"				
19.1	3/4"				
12.7	1/2"				
9.5	3/8"	0.00	0.00	0.00	100
4.75	4	43.10	5.34	5.34	95
2	10	91.40	11.32	16.66	83
0.425	40	216.10	26.77	43.43	57
0.18	80	257.30	31.88	75.31	25
0.074	200	124.80	15.46	90.77	9
	Fondo	73.90	9.16		
	Total	806.60			
	Peso Inic.	807.20			
	Pérdida	0.60			

Supervisó el ensayo: Christian Varhen Garcia
Ingeniero Civil
CIP 100420

Descripción de la muestra: Agregado fino zarandeado.



Curva granulométrica

EL LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC- UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. EL LEMC- UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

C.2. Método de ensayo para el análisis granulométrico (Cantera Cerro Mocho)



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
Norma: NTP 339.128 1999

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante : HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA	Ubicación : Piura	Muestreo realizado por : El solicitante
Testis : Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino		
Procedencia : Cantera Cerro Mocho		

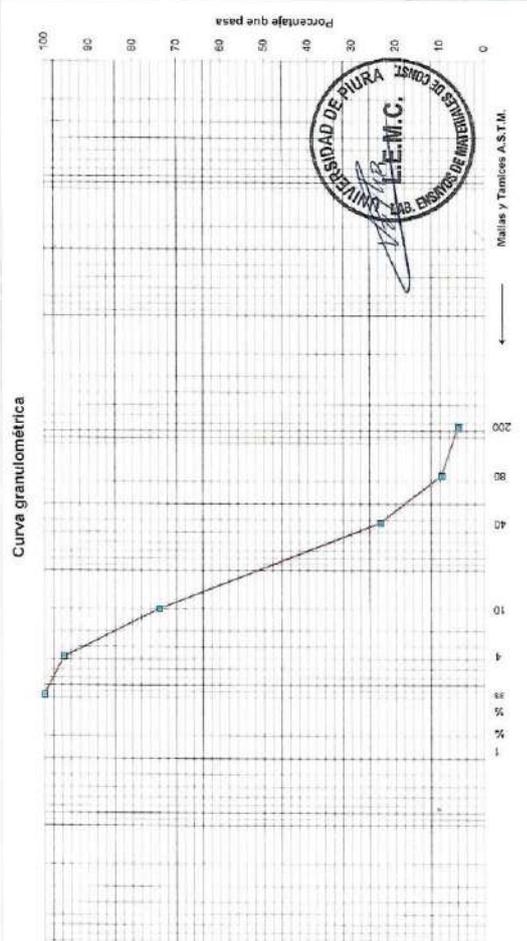
Orden de servicio N° : 21467

Informe N° : 182383

Fecha de ensayo : 25/05/2018

Realizó el ensayo : Téc. Wigberto Lazo C.

Curva granulométrica



Mallas y Tamices A.S.T.M.

Abertura mm	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
25.4	1"				
19.1	3/4"				
12.7	1/2"				
9.5	3/8"	0.00	0.00	0.00	100
4.75	4	36.50	4.39	4.39	96
2	10	180.80	21.75	26.14	74
0.425	40	418.60	50.35	76.49	24
0.18	80	116.10	13.96	90.45	10
0.075	200	31.40	3.78	94.23	6
	Fondo	47.10	5.67		
	Total	830.50			
	Peso Inic.	831.40			
	Pérdida	0.90			

Descripción de la muestra: Agregado fino zonificado.

Supervisó el ensayo: Cristian Verman Garcia
Ingeniero Civil
CIP 108420

EL LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UIJEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UIJEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

C.3. Valor equivalente de arena de suelos y agregado fino

	UNIVERSIDAD DE PIURA LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN		
	VALOR EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADO FINO Norma: NTP 339.146-2000		
Orden de servicio N°	: 21467		
Informe N°	: 182385		
Fecha de recepción	: 08/05/2018		
Fecha de ensayo	: 06/07/2018		
Fecha de emisión	: 10/07/2018		
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:			
Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA		
Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino		
Ubicación	: Piura		
Muestreo realizado por	: El solicitante		
Procedencia	: Mezcla para carpeta asfáltica: 50 % de grava triturada de Santa Cruz, 25 % de arena de Sojo, 23 % de arena Cerro Mocho y 2 % de Filler (Cemento).		
RESULTADOS:			
Ensayo	Nivel de arena (pulg.)	Nivel de arcilla (pulg.)	EA (%)
1	3.60	5.30	68.0
2	3.60	5.40	67.0
3	3.60	5.30	68.0
Promedio*			68.0
Observaciones: *Promedio obtenido según lo establecido en NTP 339-146-2000			
Realizó el ensayo	: Téc. Wigberto Lazo C.		
Presenció el ensayo	: ---		
 LEMC Christian Varón García Ingeniero Civil CIP 10642 Responsable			
El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.			

C.4. Angularidad del agregado fino



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO

Norma: MTC 222-2000

Orden de servicio N° : 21467
Informe N° : 182386
Fecha de recepción : 08/05/2018
Fecha de ensayo : 28/06/2018
Fecha de emisión : 10/07/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA
Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Muestra	: Mezcla para carpeta asfáltica: 50% de grava triturada de Santa Cruz, 25 % de arena de Sojo, 23 % de arena de Cerro Mocho y 2 % de filler (cemento).

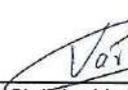
Gravedad Especifica (Gsb) : 2.56

RESULTADOS:

Espécimen	Angularidad
1	41

Observaciones:

Realizó el ensayo : Téc. Wigberto Lazo C.
Presenció el ensayo : —



 Christian Varón García
 Ingeniero Civil
 CIP 106420
 Responsable

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

C.5. Límites líquido- plástico- índice de plasticidad de suelos (fracción que pasa Tamiz N° 40)



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

LÍMITES LÍQUIDO - PLÁSTICO - ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS
Norma: NTP 339.129 1999

Orden de servicio N° : 21467
Informe N° : 182387
Fecha de recepción : 08/05/2018
Fecha de ensayo : 04/07/2018
Fecha de emisión : 11/07/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA
Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Procedencia	: Mezcla: 50 % de grava chancada de Santa Cruz, 25 % de arena de Sojo, 23 % de arena Cerro Mocho y 2 % de Filler (cemento).

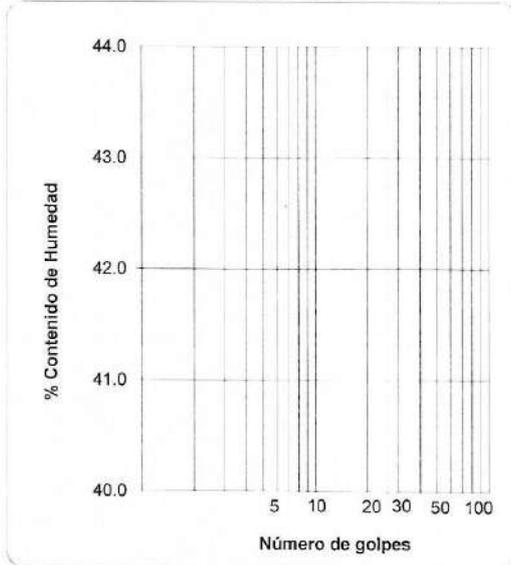
RESULTADOS:

LÍMITE LÍQUIDO

Peso húmedo							
Peso seco							
Peso de agua							
Porcentaje de humedad							
Número de golpes							

LÍMITE PLÁSTICO

Peso húmedo							
Peso seco							
Peso de agua							
Porcentaje de humedad							



DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (Fracción que pasa tamiz N° 40)

Limo
Muestra de color marrón olivo oscuro.
Muestra no plástica.

LÍMITE LÍQUIDO L. L. NP
LÍMITE PLÁSTICO L. P. NP
ÍNDICE PLÁSTICO I. P. NP

Realizó el ensayo: Téc. Wigberto Lazo C.



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

C.7. Límites líquido- plástico- índice de plasticidad de suelos (fracción que pasa Tamiz N° 200)



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

LÍMITES LÍQUIDO - PLÁSTICO - ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS
Norma: NTP 339.129 1999

Orden de servicio N° : 21467
Informe N° : 182388

Fecha de recepción : 08/05/2018
Fecha de ensayo : 04/07/2018
Fecha de emisión : 11/07/2018

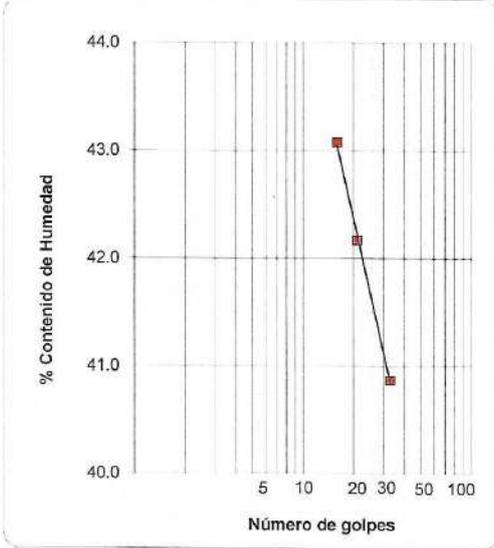
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA
Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Procedencia	: Mezcla: 50 % de grava chancada de Santa Cruz, 25 % de arena de Sojo, 23 % de arena Cerro Mocho y 2 % de Filler (cemento).

RESULTADOS:

LÍMITE LÍQUIDO				
Peso húmedo	18.89	19.52	20.06	
Peso seco	13.41	13.73	14.02	
Peso de agua	5.48	5.79	6.04	
Porcentaje de humedad	40.9	42.2	43.1	
Número de golpes	33	21	16	

LÍMITE PLÁSTICO				
Peso húmedo	11.53	17.83	12.62	
Peso seco	8.37	12.86	9.19	
Peso de agua	3.16	4.77	3.43	
Porcentaje de humedad	37.8	37.1	37.3	



DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
(Fracción que pasa tamiz N° 200)
Limo
Muestra de color marrón olivo oscuro.

Clasificación AASHTO: A-5

LÍMITE LÍQUIDO L. L.	42
LÍMITE PLÁSTICO L. P.	37
ÍNDICE PLÁSTICO I. P.	4

Realizó el ensayo: Téc. Wigberto Lazo C.


UNIVERSIDAD DE PIURA
LEMC.
 Ingeniero Civil
 CIP 10694
 Responsable

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

C.8. Determinación de la inalterabilidad de agregados por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio

	UNIVERSIDAD DE PIURA LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN																																																					
	DETERMINACIÓN DE LA INALTERABILIDAD DE AGREGADOS POR MEDIO DE SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO Norma: NTP 400.016 1999																																																					
Orden de servicio N° : 21467 Informe N° : 182389																																																						
Fecha de recepción : 08/05/2018 Fecha de ensayo : Del 25/06 al 03/07/2018 Fecha de emisión : 11/07/2018																																																						
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:																																																						
<table border="1"> <tr> <td>Solicitante</td> <td>: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA</td> </tr> <tr> <td>Tesis</td> <td>: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino</td> </tr> <tr> <td>Ubicación</td> <td>: Piura</td> </tr> <tr> <td>Muestreo realizado por</td> <td>: El solicitante</td> </tr> <tr> <td>Muestra</td> <td>: Agregado Fino</td> </tr> <tr> <td>Procedencia</td> <td>: Mezcla: 50 % de grava cantera Santa Cruz, 25 % de arena Sojo, 23 % de arena Cerro Mocho y 2% de filler (cemento).</td> </tr> </table>		Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA	Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino	Ubicación	: Piura	Muestreo realizado por	: El solicitante	Muestra	: Agregado Fino	Procedencia	: Mezcla: 50 % de grava cantera Santa Cruz, 25 % de arena Sojo, 23 % de arena Cerro Mocho y 2% de filler (cemento).																																									
Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA																																																					
Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino																																																					
Ubicación	: Piura																																																					
Muestreo realizado por	: El solicitante																																																					
Muestra	: Agregado Fino																																																					
Procedencia	: Mezcla: 50 % de grava cantera Santa Cruz, 25 % de arena Sojo, 23 % de arena Cerro Mocho y 2% de filler (cemento).																																																					
RESULTADOS:																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamaño de tamiz (pulg.)</th> <th>Gradación de la muestra original (%)</th> <th>Peso de las fracciones antes de la prueba (g)</th> <th>Porcentaje que pasa por el tamiz asignado después de la prueba</th> <th>Porcentaje de pérdida (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/8 - #4</td> <td>4.67</td> <td>0.00</td> <td>2.08</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td>#4 - #8</td> <td>11.33</td> <td>100.01</td> <td>2.08</td> <td>0.24</td> </tr> <tr> <td>#8 - #16</td> <td>15.00</td> <td>100.00</td> <td>2.28</td> <td>0.34</td> </tr> <tr> <td>#16 - #30</td> <td>16.00</td> <td>100.01</td> <td>3.42</td> <td>0.55</td> </tr> <tr> <td>#30 - #50</td> <td>20.00</td> <td>100.00</td> <td>4.41</td> <td>0.88</td> </tr> <tr> <td>#50 - #100</td> <td>14.00</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>#100 - Fondo</td> <td>19.00</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>100.00</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: right;">Total</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>					Tamaño de tamiz (pulg.)	Gradación de la muestra original (%)	Peso de las fracciones antes de la prueba (g)	Porcentaje que pasa por el tamiz asignado después de la prueba	Porcentaje de pérdida (%)	3/8 - #4	4.67	0.00	2.08	0.10	#4 - #8	11.33	100.01	2.08	0.24	#8 - #16	15.00	100.00	2.28	0.34	#16 - #30	16.00	100.01	3.42	0.55	#30 - #50	20.00	100.00	4.41	0.88	#50 - #100	14.00				#100 - Fondo	19.00					100.00				Total				2
Tamaño de tamiz (pulg.)	Gradación de la muestra original (%)	Peso de las fracciones antes de la prueba (g)	Porcentaje que pasa por el tamiz asignado después de la prueba	Porcentaje de pérdida (%)																																																		
3/8 - #4	4.67	0.00	2.08	0.10																																																		
#4 - #8	11.33	100.01	2.08	0.24																																																		
#8 - #16	15.00	100.00	2.28	0.34																																																		
#16 - #30	16.00	100.01	3.42	0.55																																																		
#30 - #50	20.00	100.00	4.41	0.88																																																		
#50 - #100	14.00																																																					
#100 - Fondo	19.00																																																					
	100.00																																																					
Total				2																																																		
Observaciones: Se empleó solución de sulfato de magnesio																																																						
Realizó el ensayo : Téc. Wigberto Lazo C. Presenció el ensayo : --																																																						
 Christian Valdivia Garcia Ingeniero Civil CIP 106428 Responsable																																																						
El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.																																																						

C.9. Peso específico y absorción del agregado fino

	UNIVERSIDAD DE PIURA LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN																				
	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO Norma: NTP 400.022 2002																				
Orden de servicio N° Informe N°	: 21467 : 182390																				
Fecha de recepción Fecha de ensayo Fecha de emisión	: 08/05/2018 : 20/06/2018 : 11/07/2018																				
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:																					
Solicitante Tesis Ubicación Muestra Muestreo realizado por Procedencia	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA : Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino : Piura : El solicitante : Agregado fino : Mezcla: 50 % de grava chancada Santa Cruz, 25 % de arena Sojo, 23 % de arena Cerro Mocho y 2 % de filler (cemento).																				
RESULTADOS:																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>Peso específico de masa (g/cm³)</th> <th>Peso específico de masa saturado con superficie seca (g/cm³)</th> <th>Peso específico aparente (g/cm³)</th> <th>Absorción (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M-1</td> <td>2.56</td> <td>2.59</td> <td>2.65</td> <td>1.36</td> </tr> <tr> <td>M-2</td> <td>2.56</td> <td>2.60</td> <td>2.65</td> <td>1.36</td> </tr> <tr> <td>Promedio</td> <td>2.56</td> <td>2.60</td> <td>2.65</td> <td>1.36</td> </tr> </tbody> </table>	Muestra	Peso específico de masa (g/cm ³)	Peso específico de masa saturado con superficie seca (g/cm ³)	Peso específico aparente (g/cm ³)	Absorción (%)	M-1	2.56	2.59	2.65	1.36	M-2	2.56	2.60	2.65	1.36	Promedio	2.56	2.60	2.65	1.36	
Muestra	Peso específico de masa (g/cm ³)	Peso específico de masa saturado con superficie seca (g/cm ³)	Peso específico aparente (g/cm ³)	Absorción (%)																	
M-1	2.56	2.59	2.65	1.36																	
M-2	2.56	2.60	2.65	1.36																	
Promedio	2.56	2.60	2.65	1.36																	
Observaciones: ---																					
Realizó el ensayo Presenció el ensayo	: Téc. Wigberto Lazo C. : ---																				
<div style="text-align: right;">   L.E.M.C. Christian Vargas Garcia Ingeniero CIP 106420 Responsable </div>																					
<p>El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.</p>																					

C.10. Método de ensayo para el análisis granulométrico



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
Norma: NTP 339.128 1999

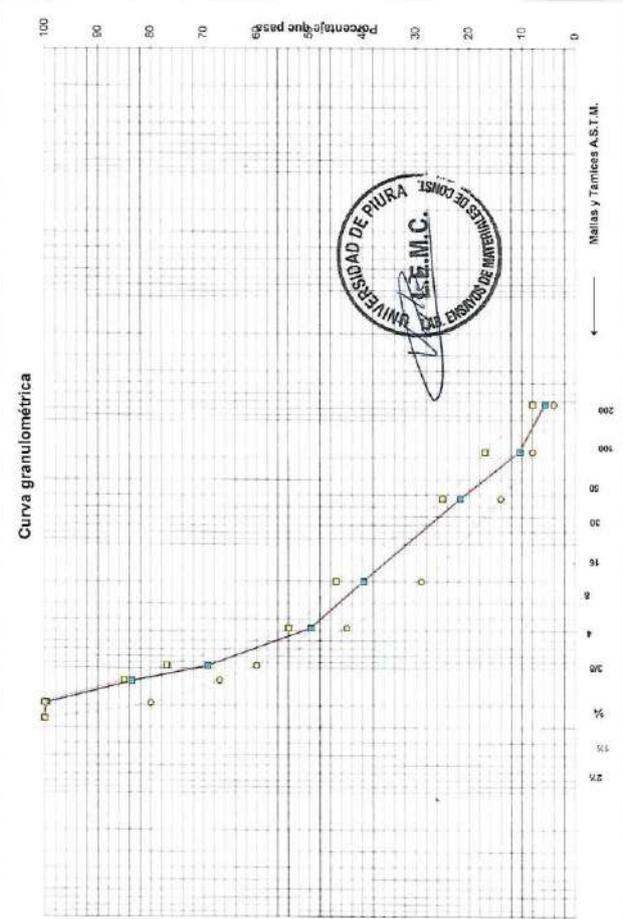
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:
Solicitante : HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ C. Ubicación : Piura Muestreo realizado por : El solicitante
Tesis : Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino.
Procedencia : Mezcla de agregados: 50% grava triturada de cantera Santa Cruz, 25 % de arena de Sojo, 23 % de arena de Cerro Mocho y 2 % de filler (cemento).

Orden servicio N° : 21467
Informe N° : 182397
Fecha de ensayo : 18/09/2018
Realizó el ensayo : Tbc. Wilberio Lazo

Abertura mm.	Tamiz ASTM	Contenido gr.	Retenido		Pasa %
			Parcial %	Total %	
50.8	2"				
38.1	1 1/2"				
25.4	1"	0	0.00	0.00	100.0
19.1	3/4"	49	0.40	0.40	99.6
12.7	1/2"	1871	16.00	16.40	83.6
9.5	3/8"	1774	14.40	30.80	69.2
4.75	4	2402	19.50	50.30	49.7
2	10	1220	9.90	60.20	39.8
0.43	40	2242	18.20	78.40	21.6
0.18	80	1380	11.20	89.60	10.4
0.074	200	591	4.80	94.40	5.6
	Fondo	690			
	Total	12320			
	Peso Inic.	12320			
	Pérdida	0.0			

Supervisó el ensayo: Christian Yarnen García
Ingeniero Civil
CIP 106420

Descripción de la muestra: Diseño de mezcla de agregados para elaborar mezcla asfáltica.
Huso Trazado: MAC 1



Curva granulométrica

EL L.E.M.C. de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la excepción de los datos y resultados de este reporte, no acepta ninguna responsabilidad que derive de la información contenida en este reporte por parte del Cliente o de terceros.
El resultado del ensayo: EL L.E.M.C. de Piura es el responsable de la información contenida en este reporte por parte del Cliente o de terceros.

C.11. Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos

	UNIVERSIDAD DE PIURA LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN																									
	ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A LOS ÁRIDOS FINO (Procedimiento Riedel - Weber) Norma MTC E 517 - 2000																									
Orden de servicio N°	:	21467																								
Informe N°	:	182392																								
Fecha de recepción:	:	08/05/2018																								
Fecha de ensayo	:	26/06/2018																								
Fecha de emisión	:	11/07/2018																								
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:																										
<table border="1"> <tr> <td>Solicitante</td> <td>:</td> <td>HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA</td> </tr> <tr> <td>Tesis</td> <td>:</td> <td>Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino</td> </tr> <tr> <td>Ubicación</td> <td>:</td> <td>Piura</td> </tr> <tr> <td>Muestreo realizado por</td> <td>:</td> <td>El solicitante</td> </tr> <tr> <td>Ligante Asfáltico</td> <td>:</td> <td>Pen 60-70</td> </tr> <tr> <td>Agregado mineral</td> <td>:</td> <td>Arena zarandeada</td> </tr> <tr> <td>Procedencia del agregado</td> <td>:</td> <td>Mezcla: 50 % de grava chancada de Santa Cruz, 25 % de arena Sojo, 23 % de arena de Cerro Mocho y 2 % de filler (cemento).</td> </tr> <tr> <td>Aditivo</td> <td>:</td> <td>Quimibod 3000 (0.5 % del peso del asfáltico).</td> </tr> </table>			Solicitante	:	HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA	Tesis	:	Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino	Ubicación	:	Piura	Muestreo realizado por	:	El solicitante	Ligante Asfáltico	:	Pen 60-70	Agregado mineral	:	Arena zarandeada	Procedencia del agregado	:	Mezcla: 50 % de grava chancada de Santa Cruz, 25 % de arena Sojo, 23 % de arena de Cerro Mocho y 2 % de filler (cemento).	Aditivo	:	Quimibod 3000 (0.5 % del peso del asfáltico).
Solicitante	:	HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA																								
Tesis	:	Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino																								
Ubicación	:	Piura																								
Muestreo realizado por	:	El solicitante																								
Ligante Asfáltico	:	Pen 60-70																								
Agregado mineral	:	Arena zarandeada																								
Procedencia del agregado	:	Mezcla: 50 % de grava chancada de Santa Cruz, 25 % de arena Sojo, 23 % de arena de Cerro Mocho y 2 % de filler (cemento).																								
Aditivo	:	Quimibod 3000 (0.5 % del peso del asfáltico).																								
RESULTADOS:	Índice de adhesividad (Riedel-Weber):	9																								
Observaciones:	Asfalto proporcionado por el solicitante.																									
Realizó el ensayo	:	Téc. Wigberto Lazo C.																								
		 Christian Varhas Gerda Ingeniero Civil CIP 106420 Responsable																								
																										
<p>El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.</p>																										

C.12. Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos (incluye emulsiones) en la presencia del agua (STRIPPING) mezclas abiertas y/o T.S.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

**CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFÁLTICOS (INCLUYE EMULSIONES)
EN PRESENCIA DEL AGUA (STRIPPING) MEZCLAS ABIERTAS Y/O T.S.
Norma MTC E 517 - 2000**

Orden de servicio N° : 21467
Informe N° : 182379

Fecha de recepción: : 08/05/2018
Fecha de ensayo : 15/05/2018
Fecha de emisión : 10/07/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA
Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino.
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Asfalto	: PEN 60 - 70
Agregado mineral	: Grava triturada
Procedencia del agregado	: Cantera Santa Cruz
Aditivo	: 'Quimibond 3000
Dosificación del agregado	: '0.5 % del peso del cemento.

RESULTADOS: Recubrimiento mayor al 95 %.

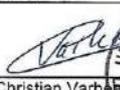
Observaciones: ---

Realizó el ensayo : Téc. Wigberto Lazo C.
Presenció el ensayo : ---

Christian Valdez García
Ingeniero Civil
CIP 106426
Responsable

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

Apéndice D. Diseño Marshall convencional

	UNIVERSIDAD DE PIURA LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MÉTODO MARSHALL																							
	Orden de Servicio N° Informe N°	: 21713 : 184026																						
Fecha de ensayo Fecha de emisión	: 21/08/2018 : 22/08/2018																							
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:																								
<table border="1"> <tr> <td>Solicitante</td> <td colspan="4">: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA</td> </tr> <tr> <td>Tesis</td> <td colspan="4">: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino</td> </tr> <tr> <td>Ubicación</td> <td colspan="4">: Piura</td> </tr> <tr> <td>Muestreo realizado por</td> <td colspan="4">: El solicitante</td> </tr> </table>					Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA				Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino				Ubicación	: Piura				Muestreo realizado por	: El solicitante			
Solicitante	: HILDEBRANDO MANUEL SANCHEZ CORDOVA																							
Tesis	: Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino																							
Ubicación	: Piura																							
Muestreo realizado por	: El solicitante																							
I. MATERIALES																								
Asfalto:	: Pen 60 - 70	Arena fina, zarandeada: cantera Sojo																						
Grava triturada (1/2"):	: Cantera Santa Cruz	Filler: Cemento Portland																						
Arena gruesa, zarandeada	: Cantera Cerro Mocho	Aditivo: Quimobond 3000																						
II. PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS AGREGADOS MINERALES																								
	Grava	Arena Cerro Mocho	Arena Sojo	Filler																				
Tamaño máximo nominal en mm. (pulg)	12.7 (1/2")	---	---	---																				
Gravedad específica	2.76	2.61	2.61	3.15																				
III. DOSIFICACIÓN / m³ DE MEZCLA COMPACTADA																								
	Porcentaje en el peso total de la mezcla	Cantidades en peso seco (kg)																						
Asfalto	5.20	123.2 (32.6 galones)																						
Grava Sojo	47.40	1123.4																						
Arena Cerro Mocho	21.80	516.7																						
Arena Sojo	23.70	561.7																						
Filler (cemento Portland)	1.90	45.0																						
Aditivo	0.5 % del peso del cemento asfáltico	---																						
III.-PROPIEDADES DE LA MEZCLA COMPACTADA																								
	Obtenidas	Especificadas																						
Porcentaje de vacíos	4.0	3 - 5																						
Porcentaje V.M.A en la mezcla compactada	15.2	14																						
Estabilidad Marshall corregida (Kg.)	1630	Min. 815																						
Flujo (0.01")	13	8 - 14																						
Densidad de la mezcla compactada (Kg/m ³)	2370	---																						
Observaciones:																								
Especímenes de prueba compactados con 75 golpes por lado. Temperatura de ensayo: 60° C.																								
Realizó el ensayo	: Téc. Wigberto Lazo C.																							
	 Christian Varón García Ingeniero Civil CIP 108420 Responsable																							
El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.																								

Apéndice E. Archivo fotográfico

E.1. Probetas de ensayo Marshall convencional



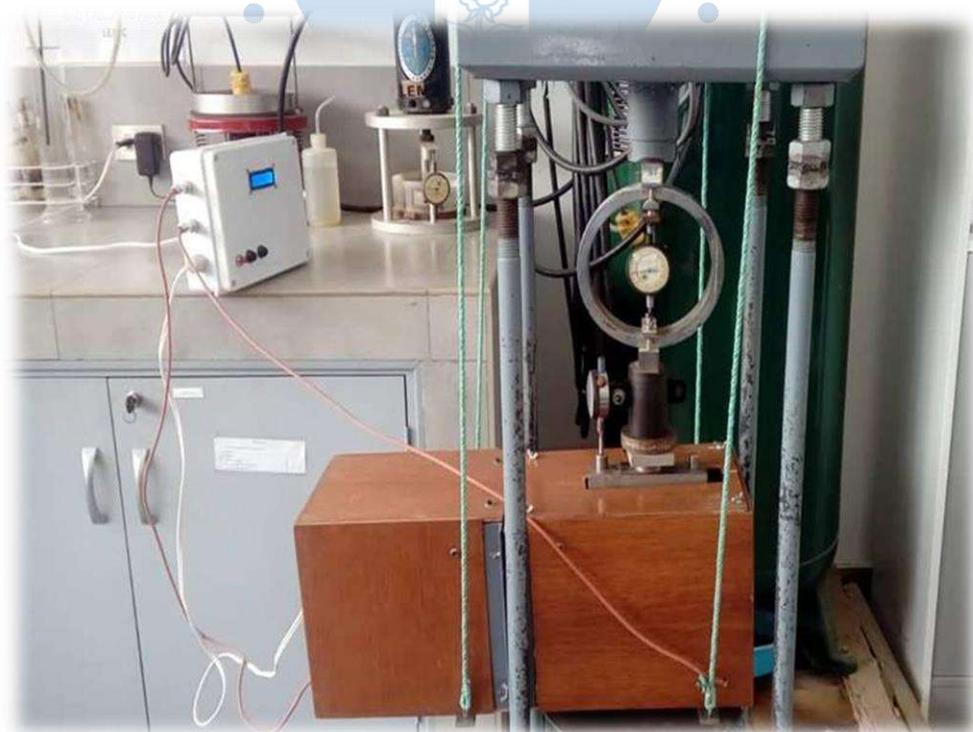
E.2. Probetas para ensayo Marshall con 1% de caucho



E.3. Probetas para ensayo Marshall con 2% de caucho



E.4. Equipo Creep



E.5. Manómetro calibrado a 500 lb

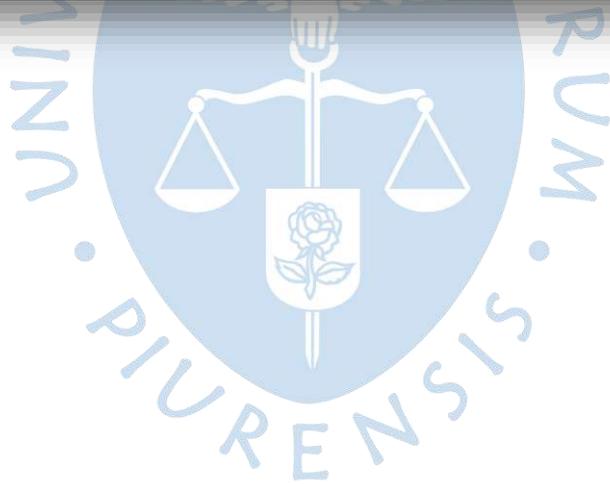


E. 6. Prensa de carga



E.7. Equipo para ensayo de tracción indirecta modificado**E. 8. Probetas para tracción indirecta modificado**

E.9. Probetas convencionales en baño maría



Apéndices F. Ensayo Lottman modificado ASTM D-4867, AASHTO T-283-3

F.1. Efecto de la humedad sobre mezclas asfálticas convencionales (grupo saturado)

OBSERVACIONES			MEZCLA CONVENCIONAL (5.2 PORCENTAJE OPTIMO DE CEMENTO ASFALTICO)		
ENSAYO		Und.	A	B	C
GRUPO SATURADO					
% de cemento asfáltico en peso de la mezcla		%	5.2	5.2	5.2
% del agregado grueso en peso de la mezcla		%	47.4	47.4	47.4
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena fina)		%	21.8	21.8	21.8
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena gruesa)		%	23.7	23.7	23.7
% de filer en peso de la mezcla		%	1.89	1.89	1.89
Diámetro	D	cm	10.3	10.3	10.3
Espesor	T	cm	6.61	6.40	6.56
Peso de la muestra seca al aire	A	Gr.	1212.2	1197.2	1217.1
SSD de la muestra	B	Gr.	1213.2	1198.2	1218.7
Peso de la muestra en agua	C	Gr.	691.1	682.2	693.6
Volumen (B-C)	E	c.c.	522.1	516.0	525.1
P.e. Bulk de la muestra (A/E)	F	Gr/c. c.	2.322	2.320	2.318
% de vacíos	H	%	6.0	6.1	6.2
Volumen de vacíos (H*E /100)	I	c. c.	31.3	31.3	32.3
Peso después de saturar al vacío	Bsat	Gr.	1238.2	1222.5	1242.6
Volumen de agua absorbido	J	c.c.	26	25.3	25.5
Volumen del espécimen	V	c.c.	551	533	547
Volumen de vacíos de aire	Vv	c.c.	33	32	34
Saturación		%	79	78	76
Carga de tracción indirecta	P	Kg	372.3	359.6	339.7
Promedio de Carga Tracción indirecta		Kg	357		
Resistencia húmeda 2P/tD ₁	St _m	Kg/c m ²	3.5	3.5	3.2
Promedio de resistencias		Kg/c m²	3.4		

Fuente: Elaboración propia.

F.2. Efecto de la humedad sobre mezclas asfálticas convencionales (grupo seco)

ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO ASTM D-4867, AASHTO T-283~3					
OBSERVACIONES			MEZCLA CONVENCIONAL (5.2 PORCENTAJE OPTIMO DE CEMENTO ASFALTICO)		
ENSAYO		Unidad	D	E	F
GRUPO SECO					
% de cemento asfáltico en peso de la mezcla		%	5.2	5.2	5.2
% del agregado grueso en peso de la mezcla		%	47.4	47.4	47.4
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena fina)		%	21.8	21.8	21.8
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena gruesa)		%	23.7	23.7	23.7
% de filer en peso de la mezcla		%	1.89	1.89	1.89
Diámetro	D	cm	10.16	10.16	10.16
Espesor	T	cm	6.40	6.40	6.40
Peso de la muestra seca al aire	A	Gr.	1209.4	1211.7	1208.0
SSD de la muestra	B	Gr.	1210.7	1212.7	1209.2
Peso de la muestra en agua	C	Gr.	689.6	691.0	689.0
Volumen (B·C)	E	c.c.	521.1	521.7	520.2
P.e. Bulk de la muestra (A/E)	F	Gr/c.c.	2.321	2.323	2.322
% de vacíos	H	%	6.0	6.0	6.0
Volumen de vacíos (H*E /100)	I	c. c.	31.5	31.1	31.1
Carga de tracción indirecta	P	Kg	509.5	567.5	567.5
Promedio de Carga Tracción indirecta		Kg	548		
Resistencia seca 2P/tD _{II}	St. _m	Kg/cm ²	5.0	5.6	5.6
Promedio de resistencias		Kg/cm²	5.4		

Fuente: Elaboración propia.

F.3. Efecto de la humedad sobre mezclas asfálticas mejorada con 1% de caucho (grupo saturado)

OBSERVACIONES			MEZCLA MEJORADA CON 1% DE CAUCHO (5.7 PORCENTAJE OPTIMO DE CEMENTO ASFALTICO)		
			A1	B1	C1
ENSAYO	Und.	GRUPO SATURADO			
% de cemento asfáltico en peso de la mezcla	%	5.7	5.7	5.7	
% del agregado grueso en peso de la mezcla	%	46.67	46.67	46.67	
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena fina)	%	21.47	21.47	21.47	
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena gruesa)	%	23.33	23.33	23.33	
% de filer en peso de la mezcla	%	1.867	1.867	1.867	
% de caucho en peso de la mezcla	%	0.933	0.933	0.933	
Diámetro	D	Cm	10.2	10.26	10.2
Espesor	T	Cm	6.5	6.64	6.4
Peso de la muestra seca al aire	A	Gr.	1211.2	1213.6	1201.6
SSD de la muestra	B	Gr.	1212.3	1214.8	1215.0
Peso de la muestra en agua	C	Gr.	676.2	679.4	683.5
Volumen (B·C)	E	c.c.	536.1	535.4	531.5
P.e. Bulk de la muestra (A/E)	F	Gr/c.c.	2.259	2.267	2.261
% de vacíos	H	%	6.4	6.1	6.4
Volumen de vacíos (H·E /100)	I	c. c.	34.6	32.9	33.9
Peso después de saturar al vacío	Bsat	Gr.	1230.2	1231.9	1219
Volumen de agua absorbido	J	c.c.	19.0	18.3	17.4
Volumen del espécimen	V	c.c.	527	549	519
Volumen de vacíos de aire	Vv	c.c.	34	34	33
Saturación		%	56	54	53
Carga de tracción indirecta	P	Kg	412.8	430.8	432.6
Promedio de Carga Tracción indirecta		Kg	425		
Resistencia húmeda 2P/tD ₁	St. _m	Kg/cm ²	4	4	4.2
Promedio de resistencias		Kg/cm²	4.1		

Fuente: Elaboración propia.

F.4. Efecto de la humedad sobre mezclas asfálticas mejorada con 1% de caucho (grupo seco)

ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO ASTM D-4867, AASHTO T-283~3					
OBSERVACIONES			MEZCLA MEJORADA CON 1% DE CAUCHO (5.7 PORCENTAJE OPTIMO DE CEMENTO ASFALTICO)		
ENSAYO		Unidad	D1	E1	F1
GRUPO SECO					
% de cemento asfáltico en peso de la mezcla		%	5.7	5.7	5.7
% del agregado grueso en peso de la mezcla		%	46.67	46.67	46.67
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena fina)		%	21.47	21.47	21.47
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena gruesa)		%	23.33	23.33	23.33
% de filer en peso de la mezcla		%	1.867	1.867	1.867
Diámetro	D	Cm	10.2	10.2	10.2
Espesor	T	cm	6.6	6.6	6.6
Peso de la muestra seca al aire	A	Gr.	1213.7	1199.0	1208.9
SSD de la muestra	B	Gr.	1216.1	1201.5	1212.5
Peso de la muestra en agua	C	Gr.	680.3	670.6	680.0
Volumen (B·C)	E	c.c.	535.8	530.9	532.5
P.e. Bulk de la muestra (A/E)	F	Gr/c.c.	2.265	2.258	2.270
% de vacíos	H	%	6.2	6.5	6.0
Volumen de vacíos (H·E /100)	I	c. c.	33.2	34.4	31.9
Carga de tracción indirecta	P	Kg	598.9	477.0	507.1
Promedio de Carga Tracción indirecta		Kg	528		
Resistencia seca 2P/tD _{II}	St. _m	Kg/cm ²	5.7	4.5	4.8
Promedio de resistencias		Kg/cm²	5		

Fuente: Elaboración propia.

F.5. Efecto de la humedad sobre mezclas asfálticas mejorada con 2% de caucho (grupo saturado)

OBSERVACIONES			MEZCLA MEJORADA CON 2% DE CAUCHO (6 PORCENTAJE OPTIMO DE CEMENTO ASFALTICO)		
			A2	B2	C2
ENSAYO	Und.	GRUPO SATURADO			
% de cemento asfáltico en peso de la mezcla	%	6	6	6	
% del agregado grueso en peso de la mezcla	%	46.08	46.08	46.08	
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena fina)	%	21.2	21.2	21.2	
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena gruesa)	%	23.04	23.04	23.04	
% de filer en peso de la mezcla	%	1.84	1.84	1.84	
% de caucho en peso de la mezcla	%	1.84	1.84	1.84	
Diámetro	D	Cm	10.26	10.26	10.2
Espesor	T	Cm	6.97	6.84	6.7
Peso de la muestra seca al aire	A	Gr.	1207.0	1206.6	1206.0
SSD de la muestra	B	Gr.	1209.3	1211.9	1211.1
Peso de la muestra en agua	C	Gr.	666.3	670.2	667.8
Volumen (B·C)	E	c.c.	543.0	541.7	543.3
P.e. Bulk de la muestra (A/E)	F	Gr/c.c.	2.2	2.2	2.2
% de vacíos	H	%	6.2	6.0	6.3
Volumen de vacíos (H·E /100)	I	c. c.	33.7	32.6	34.4
Peso después de saturar al vacío	Bsat	Gr.	1231.1	1229.7	1228.7
Volumen de agua absorbido	J	c.c.	24.1	23.1	22.7
Volumen del espécimen	V	c.c.	576	566	543
Volumen de vacíos de aire	Vv	c.c.	36	34	34
Saturación		%	67	68	66
Carga de tracción indirecta	P	Kg	295.2	309.7	299.5
Promedio de Carga Tracción indirecta		Kg	301		
Resistencia húmeda 2P/tD ₁	St.m	Kg/cm ²	2.6	2.8	2.8
Promedio de resistencias		Kg/cm²	2.7		

Fuente: Elaboración propia.

F.6. Efecto de la humedad sobre mezclas asfálticas mejorada con 2% de caucho (grupo seco)

ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO ASTM D-4867, AASHTO T-283-3					
OBSERVACIONES			MEZCLA MEJORADA CON 2% DE CAUCHO (6 PORCENTAJE OPTIMO DE CEMENTO ASFALTICO)		
ENSAYO		Unidad	D2	E2	F2
GRUPO SECO					
% de cemento asfáltico en peso de la mezcla		%	6	6	6
% del agregado grueso en peso de la mezcla		%	46.08	46.08	46.08
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena fina)		%	21.2	21.2	21.2
% de agregado fino en peso de la mezcla (arena gruesa)		%	23.04	23.04	23.04
% de filer en peso de la mezcla		%	1.84	1.84	1.84
Diámetro	D	cm	10.2	10.2	10.2
Espesor	T	cm	6.7	6.9	6.9
Peso de la muestra seca al aire	A	Gr.	1209.3	1208.4	1210.5
SSD de la muestra	B	Gr.	1212.5	1211.5	1214.3
Peso de la muestra en agua	C	Gr.	660.0	659.8	659.0
Volumen (B·C)	E	c.c.	552.5	551.7	555.3
P.e. Bulk de la muestra (A/E)	F	Gr/c.c.	2.2	2.2	2.2
% de vacíos	H	%	7.6	7.6	8.0
Volumen de vacíos (H*E /100)	I	c. c.	42.2	41.8	44.5
Carga de tracción indirecta	P	Kg	334.3	344.3	346.3
Promedio de Carga Tracción indirecta		Kg	342		
Resistencia seca 2P/tD _{II}	St. m	Kg/cm ²	3.1	3.1	3.1
Promedio de resistencias		Kg/cm²	3.1		

Fuente: Elaboración propia.

Anexos



Anexo A. Preparación de las muestras Lottman

1. La mezcla asfáltica preparada en el laboratorio se colocará en una bandeja de aluminio o de acero y se refrigerará a temperatura ambiente 2 ± 0.5 horas. A continuación, la mezcla se colocará en un horno a $140^\circ \text{F} \pm 1.8^\circ$ ($60^\circ \text{C} \pm 1^\circ$) durante 20 ± 4 horas, seguido de 2.5 ± 0.5 horas a la temperatura de compactación del aglutinante. Este procedimiento de envejecimiento a corto plazo se utiliza únicamente para muestras mezcladas en laboratorio. El material producido en campo no se envejece a corto plazo antes del procedimiento de compactación.
2. Las muestras se colocarán en un horno a la temperatura de compactación durante el tiempo especificado en el proceso Marshall convencional o procedimiento Plusride. Las probetas obtenidas en laboratorio y en campo se compactarán a 7 ± 1.0 por ciento de vacíos de aire (este nivel de vacíos se logra disminuyendo considerablemente el número de golpes por cara que se realizan en la compactación)
3. Los especímenes de Lottman se agruparán según parentesco de vacíos de aire en mínimo dos subconjuntos de tres muestras para ponerse a prueba en seco y el otro en condiciones húmedas con un ciclo de congelación y deshielo.
4. Determinar en promedio la resistencia a la tracción indirecta de ejemplares secos y acondicionados a 25°C .

Fuente: Elaboración propia.