

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



PLAN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA: DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO UTILIZANDO  
RAP (PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO) OBTENIDO DEL  
AEROPUERTO DE QUITO, ADICIONANDO 2%, 3% y 4% DE POLVO DE  
LLANTA DE AVIÓN

AUTORES:

DAVID GUSTAVO ESPINOZA NARANJO

MARÍA CAROLINA GUAYAQUIL IZA

QUITO DM, NOVIEMBRE 2023

## Contenido

1. Introducción.....	10
1.1. Justificación.....	10
1.2. Planteamiento del Problema.....	11
1.3. Objetivos .....	11
1.3.1. Objetivo General.....	11
1.3.2. Objetivos Específicos.....	11
1.4. Hipótesis.....	12
2. Marco Teórico .....	13
2.1 Material RAP.....	13
2.1.1 Definición .....	13
2.1.2 Propiedades y características .....	13
2.1.3 Procedencia del material.....	14
2.2 Emulsión Asfáltica .....	15
2.2.1 Definición .....	15
2.2.2 Propiedades y Características .....	16
2.2.3 Procedencia de la Emulsión.....	18
2.3 Diseño de una mezcla asfáltica en frío.....	18
2.3.1 Definición .....	18
2.4 Relleno mineral o filler. ....	20
2.4.1. Definición: .....	20
2.4.1.1. Arena: .....	20

2.4.1.2. Polvo de llanta: .....	20
2.4.2. Propiedades y características.....	21
2.4.2.1. Arena .....	21
2.4.2.2. Polvo de llanta de avión.....	21
2.4.3. Procedencia de los agregados.....	22
2.4.4. Método de incorporación del filler en la mezcla asfáltica .....	24
2.4.4.1. Método por vía seca:.....	24
2.4.4.2. Método por vía húmeda:.....	24
2.5 Caracterización del desempeño de la mezcla asfáltica en frio .....	24
2.5.1. Ensayos de estabilidad y flujo .....	24
3. Ensayos y resultados de los materiales .....	26
3.1. Ensayos del material asfáltico recuperado (RAP).....	26
3.1.1. Muestreo en campo (INEN 695) .....	26
3.1.2. Análisis granulométrico (INEN 696/ ASTM C 136).....	27
3.1.4 Extracción de asfalto residual (ASTM D 2172) .....	29
3.2. Ensayos realizados al filler (Caucho / arena).....	31
3.2.1. Análisis granulométrico del filler (ASTM D 546) .....	31
3. Ensayos realizados a la emulsión asfáltica (Css-1h).....	34
3.1. Viscosidad- Saybolt Furol, 25 °C (NTE INEN 1981, ASTM D 244).....	35
3.1.2 Carga de partícula (ASTM D7402, INEN 908).....	35
3.1.3 Asentamiento 5 días (ASTM D6930, INEN 910) .....	36

3.1.4 Estabilidad de almacenamiento 24 horas (ASTM D6930, INEN 909) .....	36
3.1.5 Residuo por evaporación (ASTM D6934, INEN 905) .....	37
3.1.6 Prueba del tamiz N°20 (ASTM D6933, INEN 906).....	37
3.1.7 Penetración (ASTM D5, INEN 918) .....	37
3.1.8 Ductilidad (ASTM 133, INEN 916) .....	38
4. Diseño de la mezcla asfáltica:.....	39
4.1. Diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall.....	39
4.2. Estabilidad y flujo .....	40
4.3. Cálculo de la mezcla asfáltica .....	41
4.3.1. Dosificación de la mezcla del agregado .....	41
4.3.2. Elaboración de briquetas .....	44
4.3.2.1. Grupo 1 .....	45
4.3.2.2. Grupo 2 .....	48
4.3.2.3. Grupo 3 .....	51
5. Análisis de resultados.....	54
5.1. Determinación del porcentaje teórico de emulsión .....	54
5.2. Proceso y Resultados de Estabilidad y Flujo.....	55
5.3.1 Determinación de la mezcla más resistente.....	58
5.3.1.1 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado) y 2%, 3% y 4% de caucho proveniente de llantas de avión. ....	58

5.3.1.2.- 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado) y 2%, 3% y 4% de caucho proveniente de llantas de avión y arena fina.	60
5.3.1.3.- 4% de Emulsión asfáltica, % de agua variable, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado) .....	62
6. Conclusiones y recomendaciones .....	65
Referencias.....	68

## Índice de tablas:

Tabla 1: Muestra mínima para el muestreo.....	27
Tabla 2: franjas granulométricas.....	28
<i>Tabla 3: Promedio de la granulometría del agregado RAP.....</i>	<i>29</i>
Tabla 4: muestra mínima para el ensayo de extracción de asfalto.....	30
Tabla 5: Resultados del ensayo de asfalto residual.....	31
Tabla 6: Granulometría del polvo de llanta .....	32
Tabla 7: granulometría de la arena.....	33
Tabla 8: Representación de resultados de los ensayos de con la emulsión .....	38
Tabla 9: límites de estabilidad y flujo .....	40
Tabla 10: factores de correlación .....	41
Tabla 11: Diseño de mezcla grupo 1.....	42
Tabla 12: Diseño de mezcla del grupo 2.....	43
Tabla 13: Resumen de los parámetros para la elaboración de la mezcla asfáltica .....	54
Tabla 14: tabla resumen de estabilidad y flujo .....	58
Tabla 15: Promedio del porcentaje de caucho .....	58
Tabla 16: Tabla resumen de estabilidad y flujo de las probetas con porcentaje de caucho y arena .....	60
Tabla 17: Promedio del porcentaje de caucho y arena .....	60
Tabla 18: tabla resumen .....	62
Tabla 19: tabla resumen .....	62
Tabla 20: Parámetros de verificación según la norma vigente, briquetas grupo 1(4%E, 4%A, 2% caucho, 900g RAP).....	64
Tabla 21: Parámetros de verificación según la norma vigente, briquetas grupo 2 (4%E, 4%A, 2% caucho, 1% arena fina, 900g RAP).....	64

Tabla 22: Parámetros de verificación según la norma vigente, briquetas grupo 3 (4%E, %A variable) .....64

## Índice de Ilustraciones:

Ilustración 1: Ubicación de la corporación Quiport en el aeropuerto de Quito .....	14
Ilustración 2: Almacenamiento del agregado RAP .....	15
Ilustración 3: representación de la molécula de emulsión aniónica.....	15
Ilustración 4: representación de la molécula de emulsión catiónica.....	16
Ilustración 5: Ejemplo de nomenclatura. ....	17
Ilustración 6: Ubicación de la planta industrial de Imptek .....	18
Ilustración 7: Emulsión asfáltica.....	18
Ilustración 8: Ubicación de la planta de asfalto .....	22
Ilustración 9: Almacenamiento de arena.....	23
Ilustración 10: Ubicación de la planta de procesamiento de la empresa Quiport.....	23
Ilustración 11: Polvo de llanta .....	23
Ilustración 12: Límites para estabilidad y flujo .....	25
<i>Ilustración 13: Listado de ensayos a realizar para comprobar la calidad de la emulsión asfáltica.....</i>	<i>35</i>
Ilustración 14: molde para el ensayo Marshall .....	47
Ilustración 15: briquetas en baño maría .....	48
Ilustración 16: Elaboración de briquetas.....	50
Ilustración 17: elaboración de briquetas .....	53
Ilustración 18: briquetas ensayadas .....	56
Ilustración 19: ensayo Marshall .....	56
Ilustración 20: Resultados de estabilidad y flujo .....	57
Ilustración 21: Resultados del ensayo de estabilidad y flujo .....	58

**índice de Gráficas:**

Gráfica 1: Curva granulométrica del agregado RAP .....	29
Gráfica 3: Curva granulométrica del polvo de llanta .....	32
Gráfica 4: Curva granulométrica Arena .....	33
Gráfica 5: Diseño de la mezcla del grupo 1 .....	43
Gráfica 6: Diseño de la mezcla del grupo 1 .....	44

# **CAPÍTULO 1**

## **1. Introducción**

### **1.1. Justificación**

Actualmente, la corporación Quiport es la encargada del mantenimiento integral del aeropuerto de Quito. Según datos de 2021, se conoce que a diario se recibe un promedio de 70 vuelos nacionales e internacionales y 35514 movimientos de aeronaves (Quiport,2021) razón por la cual, la pista de aterrizaje se encuentra en constante uso y generación de residuos. Debido al aterrizaje de los aviones, sus llantas pueden alcanzar una temperatura de 300 °C, por ende, el caucho de las llantas se desprende. Esta acumulación de caucho o goma debe ser eliminada periódicamente para evitar que se conviertan en un peligro para la operación de la pista de vuelo, reduciendo la macro textura de este, lo que permitirá la formación de una película de agua en la superficie de la pista aumentando el riesgo de aparición del temido hidroplaneo o acuaplaning, el cual agranda la distancia de frenado y disminuye la capacidad de control de la aeronave por parte del piloto. El programa de mantenimiento vial considerado por la corporación se basa en actividades de fresado constante, obteniendo 4.5 a 5 toneladas anuales de polvo de llanta y RAP “Pavimento de Asfalto Reciclado” son 7000 m<sup>3</sup> anual (Dato actualizado hasta el año 2023), material que se encuentra acumulado al aire libre, generando así, un problema de espacio y contaminación.

En consecuencia, a lo antes mencionado, nos hemos planteado realizar una mezcla asfáltica en frío utilizando RAP, polvo de llanta, arena y emulsión asfáltica con el objetivo de que la empresa concesionada pueda aplicar esta idea e implementar en vías secundarias aledañas al aeropuerto reusando materiales reciclados, abaratando costos y alcanzando el ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles.

## **1.2. Planteamiento del Problema**

El constante mantenimiento del aeropuerto de Quito genera toneladas anuales de residuos asfálticos, estos son el polvo de llanta de avión y el pavimento asfáltico reciclado conocido como RAP, lo cual genera problemas en el almacenamiento y en la gestión de tratamiento de residuos. Quiport, la empresa encargada del proceso de mantenimiento de la pista de aterrizaje necesita encontrar la manera de optimizar estos recursos.

Por lo cual, en el presente trabajo de titulación busca desarrollar una mezcla asfáltica en frío, la cual use como agregado grueso al contenido RAP extraído del fresado de la pista de aterrizaje y a su vez añadir polvo de llanta de avión, este material actuará a manera de filler el cual completará la curva granulométrica. Adicional a estos materiales se añade un porcentaje de emulsión óptimo, arena y agua. La finalidad es encontrar una mezcla asfáltica en frío, la cual use materiales totalmente reciclados, reduciendo así la huella de carbono en el proceso de mantenimiento.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Realizar y proponer una mezcla asfáltica en frío usando RAP, añadiendo 2%, 3% y 4% de polvo de llanta de avión con el propósito de encontrar el mejor resultado en estabilidad y flujo mediante el ensayo Marshall.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar el porcentaje óptimo de polvo de llanta que se debe agregar a la mezcla asfáltica en frío para obtener una combinación efectiva y de alta calidad
- Evaluar el desempeño que produce el polvo de llanta de avión como aditivo en una mezcla asfáltica en frío.

- Obtener resultados de estabilidad y flujo para determinar su resistencia con los determinados porcentajes de polvo de llanta.

#### **1.4. Hipótesis**

Mediante la aplicación de criterios técnicos, económicos y ambientales se buscará un porcentaje de emulsión asfáltica, RAP, material fino, y polvo de llanta; que cumpla con las solicitudes para caminos de tráfico liviano.

## CAPÍTULO 2

### 2. Marco Teórico

#### 2.1 Material RAP

##### 2.1.1 Definición

RAP significa "Recycled Asphalt Pavement" o "Pavimento de Asfalto Reciclado" en español. El término RAP se refiere al material de asfalto reciclado que se obtiene al retirar y triturar el asfalto deteriorado o antiguo de una carretera existente para su posterior reutilización en la construcción o rehabilitación de carreteras. La utilización de este tipo de material reciclado ayuda a que la industria logre ahorrar recursos económicos y conserve de manera eficiente el medio ambiente, evitando la contaminación por acumulación de residuos. (Miranda-Arguello, 2019)

##### 2.1.2 Propiedades y características

El RAP Tiene una serie de propiedades y características que lo hacen valioso en la construcción de vías:

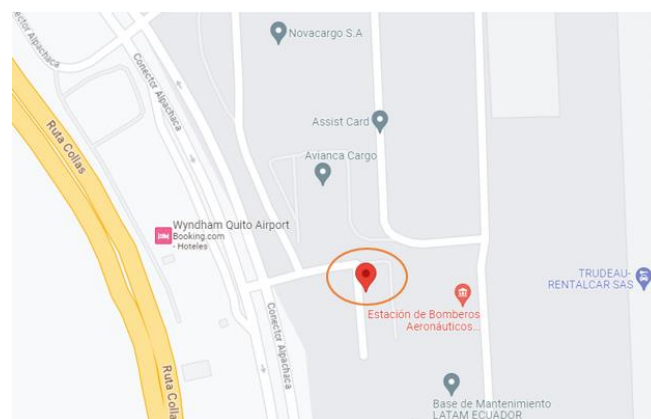
- **Sostenibilidad:** El RAP es una opción sostenible, ya que reduce la necesidad de extraer y procesar asfalto virgen, lo que ahorra recursos naturales y reduce la energía requerida para la producción de asfalto nuevo.
- **Costo:** El uso de RAP suele ser más económico en comparación con el asfalto nuevo, lo que puede reducir los costos de construcción y mantenimiento de carreteras.
- **Rendimiento:** Cuando se maneja adecuadamente, el RAP puede tener un rendimiento igual o incluso superior al asfalto nuevo en términos de durabilidad y resistencia a la fatiga.
- **Granulometría:** La granulometría del RAP (tamaño de las partículas) es un factor importante para considerar, ya que puede afectar la calidad de la mezcla de asfalto

reciclado. El control de la granulometría es esencial para lograr una mezcla homogénea y de alto rendimiento.

- **Contenido de asfalto:** El contenido de asfalto en el RAP puede variar según la fuente y el proceso de reciclaje. Es importante conocer y ajustar el contenido de asfalto para cumplir con las especificaciones del proyecto.
- **Evaluación de calidad:** Antes de utilizar RAP en un proyecto de construcción de carreteras, es fundamental realizar pruebas de laboratorio para evaluar su calidad y determinar la proporción óptima que debe mezclarse con asfalto nuevo. (Miranda-Arguello, 2019)

### 2.1.3 Procedencia del material

El material proviene de La Corporación Quiport S.A. empresa encargada de administrar y manejar el sistema aeroportuario en la ciudad de Quito, Ecuador.



*Ilustración 1: Ubicación de la corporación Quiport en el aeropuerto de Quito*

*Fuente: Google maps*



*Ilustración 2: Almacenamiento del agregado RAP*

*Fuente: Google Maps*

## **2.2 Emulsión Asfáltica**

### **2.2.1 Definición**

Una emulsión asfáltica es una mezcla estable de asfalto y agua, combinada con un agente emulsificante. El asfalto, que es un producto derivado del petróleo, generalmente es sólido a temperatura ambiente, pero puede mezclarse con agua mediante el uso de un agente emulsificante para formar una suspensión líquida estable. (MTO, 2002)

Las emulsiones se clasifican de acuerdo con el tipo de agente emulsificante, por lo cual existen dos tipos, estas son: aniónicas y catiónicas.

- Emulsión aniónica: el agente emulsificante transmite carga negativa a cada una de las capas que estén en contacto directo con la mezcla asfáltica. Tienen mayor afinidad con los agregados calizos que tienen carga positiva. (Ruiz, 2019)



*Ilustración 3: representación de la molécula de emulsión aniónica*

*Fuente: Google*

- Emulsión catiónica: el agente emulsificante en este tipo de emulsiones transmite una polaridad positiva. Este tipo de emulsión tiene afinidad con los agregados silíceos con carga negativa. (Ruiz, 2019)



*Ilustración 4: representación de la molécula de emulsión catiónica*

*Fuente: Google*

### **2.2.2 Propiedades y Características**

La emulsión utilizada para esta investigación es la Emulsión Asfáltica CCS-1h de quiebre lento. Se encuentra en estado líquido. No contaminante, de excelente durabilidad y adherencia a diferentes tipos de áridos. Se los usa para: riegos de liga o slurrys (lechadas asfálticas).

- Rotura:

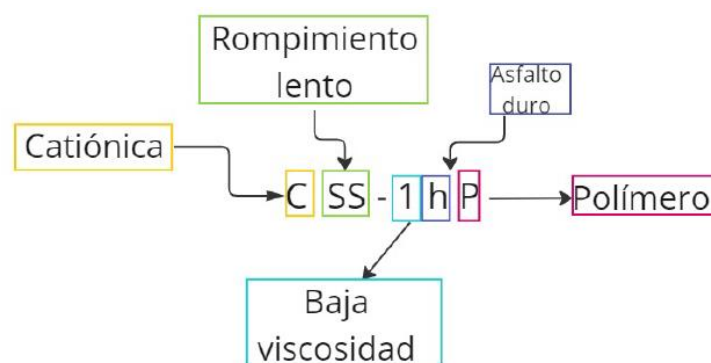
Se refiere a la división del agua y el asfalto debido al contacto con los agregados, o a su vez, con el contacto de la superficie a ser colocado. Todas las emulsiones se clasifican en base al tiempo de rompimiento, para las emulsiones de rotura rápida (RS) y media (MS) se considera un tiempo de manejabilidad de mezcla de entre 1 y 5 minutos respectivamente. Además, para emulsiones RS se recomienda usar agregados limpios y de baja superficie específica, es decir agregados gruesos, mientras que para las emulsiones MS se recomiendan agregados de baja superficie específica, pero de granulometrías abiertas. Por otro lado, las emulsiones de rotura lenta (SS) son las más usadas por su trabajabilidad y compatibilidad para cobertura de agregado fino. (Talavera , Castaño, & Martínez , 2012)

- Curado:

Esta propiedad adhiere cada uno de los agregados y forma las capas del pavimento, la importancia del curado en las emulsiones es la velocidad de endurecimiento que esta transfiere a la mezcla para que se convierta en un pavimento sólido. Mientras se desarrolla el proceso de curado, la emulsión alcanza la capacidad de cohesividad. (Talavera , Castaño, & Martínez , 2012)

Por otro lado, se muestra un ejemplo de nomenclatura de emulsiones:

- Primer cuadro: Cuando una emulsión es catiónica se pone como sufijo a la letra C, si no tiene nada, se sobreentiende que es aniónica.
- Segundo cuadro: representa el rompimiento de la emulsión, se usan las abreviaciones explicadas en la sección superior (rotura)
- Tercer cuadro: representa el tipo de viscosidad de la emulsión. “1” indica baja viscosidad y “2” de alta viscosidad.
- Cuarto cuadro: representa la consistencia del asfalto. “h” indica que es de consistencia dura (hard), mientras que “S” indica que es de consistencia blanda (soft).
- Quinto cuadro: Representa la presencia de polímeros. En el caso de este estudio, la emulsión usada no contiene polímeros, por lo cual no tiene esta sección. (Múnera, 2017)

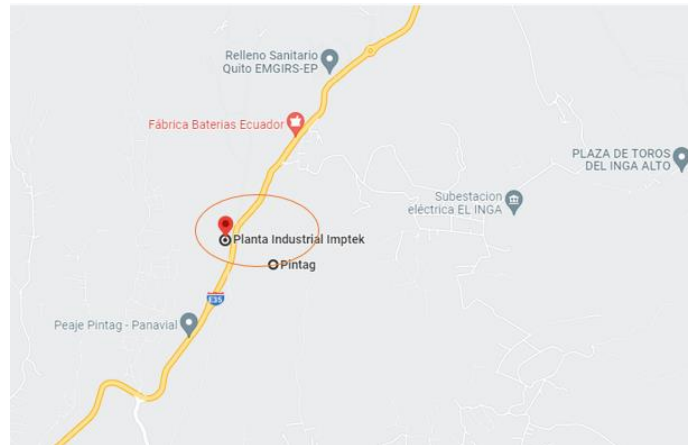


*Ilustración 5: Ejemplo de nomenclatura.*

*Fuente: propia*

### 2.2.3 Procedencia de la Emulsión

La emulsión asfáltica proviene de Imptek empresa ecuatoriana antes conocida como Chova quienes garantizan la confiabilidad y la calidad del producto, respaldada por su experiencia y reputación en la industria de la construcción.



*Ilustración 6: Ubicación de la planta industrial de Imptek*

*Fuente: Google maps*



*Ilustración 7: Emulsión asfáltica*

*Fuente: propia*

## 2.3 Diseño de una mezcla asfáltica en frío

### 2.3.1 Definición

El diseño de una mezcla asfáltica en frío se refiere al proceso de planificación y formulación de una combinación de materiales, con el objetivo de crear una mezcla que sea adecuada para

su aplicación en superficies de carreteras, reparaciones de baches u otras aplicaciones similares a temperatura ambiente. El diseño busca determinar las proporciones precisas de estos componentes para lograr un equilibrio óptimo entre la durabilidad, resistencia al desgaste y adherencia de la mezcla, asegurando así un rendimiento efectivo en condiciones de frío sin la necesidad de calentamiento previo del asfalto. Este proceso de diseño considera factores como las condiciones climáticas, las características del tráfico y las especificaciones del proyecto para garantizar la mezcla adecuada para cada situación particular.

- Mezcla abierta

Una mezcla abierta en frío es una combinación, por una parte, de áridos gruesos, emulsión y por lo general, aditivos. El objetivo de esta mezcla es que se pueda extender y compactar a temperatura ambiente, es decir que su propiedad física de viscosidad no sea muy densa, para que pueda cumplir con la capacidad de almacenamiento. Por añadidura, el porcentaje de vacíos en una mezcla asfáltica abierta en frío no puede superar el 12%, este parámetro numérico garantiza que no se produzcan deformaciones plásticas debido al paso de cargas y a las diferentes variaciones térmicas. (PROAS, s/f)

- Mezcla cerrada

Se puede definir a una mezcla cerrada en frío a aquella que contiene una granulometría muy completa. Es decir, la curva granulométrica esta formada por partículas que pasan los tamaños de abertura de los tamices máximos, como los de 1 pulgada hasta el tamiz #200. Por consiguiente, la formulación de este tipo de mezcla se refiere a la combinación de porcentajes de emulsión catiónica de rotura lenta y agregado fino. (Quirola & Reinoso , 2017). El porcentaje de vacíos no puede superar el 6%. (Padilla, 2004)

## **2.4 Relleno mineral o filler.**

### **2.4.1. Definición:**

En términos generales, se puede definir al relleno mineral o filler como un tipo de material que es considerado para mejorar las propiedades, características y rendimientos de nuevos procesos físicos en los productos finales a los cuales va a ser agregado.

El uso de rellenos minerales o filler es común para reducir costos de producción y fabricación, además, se conoce que el implemento de estos tiene la capacidad de aumentar la durabilidad y resistencia al desplazamiento en el diseño de la mezcla asfáltica. La principal ventaja para el empleo de este tipo de materiales es la adhesividad producida entre el relleno mineral y el asfalto, generando la reducción de porosidad e impidiendo la infiltración de agua o aire en la mezcla. (Tagle, 2015)

El filler usado para este trabajo de titulación son los siguientes:

- Arena
- Polvo de llanta

#### **2.4.1.1. Arena:**

En el caso de la arena, es importante que cumpla con los requisitos básicos establecidos en la norma MOP-001-F 2002. Por lo general, el tamaño máximo nominal de la arena es de 5 mm, es decir, el porcentaje retenido del tamiz N° 200 debido a que es un agregado fino. (MTOPI, 2002)

#### **2.4.1.2. Polvo de llanta:**

El uso de este polímero en el diseño de una mezcla asfáltica brinda muchas ventajas, algunas de ellas son:

- Aumento de la durabilidad del asfalto: previene el agrietamiento de la carpeta asfáltica reduciendo así el índice de accidentes de tránsito debido a que se mejora en gran medida la adherencia en superficies mojadas.
- Al ser un material flexible y maleable reduce el ruido
- Reduce la huella ecológica que produce un avión al momento de aterrizar en la pista generando así un beneficio ambiental.

Por lo tanto, este trabajo de investigación busca adicionar varios porcentajes de polvo de llanta y un porcentaje determinado de arena en el desarrollo de una mezcla asfáltica en frío, todo esto con el objetivo de plantear una nueva alternativa de reciclaje en el país. (Castro , Fuentes , & Martinez , 2016)

## **2.4.2. Propiedades y características**

### **2.4.2.1. Arena**

Su uso en una mezcla asfáltica tiene gran importancia, debido a sus propiedades de resistencia, durabilidad, elásticas y volumétricas. Se emplea este tipo de agregado en el desarrollo de las mezclas asfálticas debido al tamaño máximo nominal, y a su capacidad de llenar espacios vacíos entre las partículas de agregado más grandes.

La capacidad antes mencionada garantiza que la curva granulométrica sea eficiente y se obtengan buenos resultados de resistencia, trabajabilidad y homogeneidad en las mezclas propuestas. (Das, 2012)

### **2.4.2.2. Polvo de llanta de avión**

El polvo de llanta de avión es un polímero no tan convencional en comparación del polvo de llanta de neumático de vehículo, debido a que este se obtiene de la trituración de neumáticos fuera de circulación. Sin embargo, el polvo de llanta de avión posee propiedades útiles y de gran importancia para el empleo en una mezcla asfáltica. Estas son:

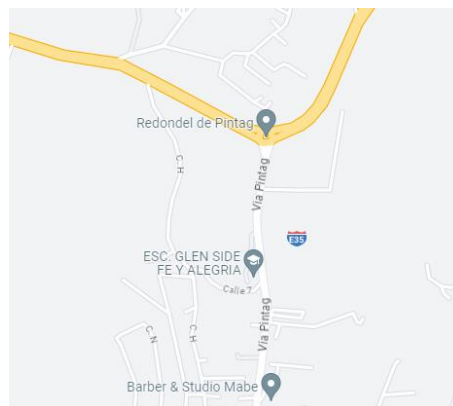
- Resistencia al desgaste y abrasión: debido a los impactos que deben soportar las llantas de un avión su composición física debe ser resistente.
- Durabilidad
- Peso ligero

Este material debe cumplir con las especificaciones establecidas en la norma NTE INEN 2680:2013, en donde se establece:

- El caucho reciclado debe tener menos del 0.75% de humedad en peso y flujo
- La gravedad específica debe ser de 1.15 con una tolerancia de 0.05
- No debe contener partículas visibles de metales
- Se recomienda que las partículas de polvo de llanta estén trituradas de manera que puedan pasar el tamiz N°8 (Campaña, Galeas, & Guerrero, 2015)

### **2.4.3. Procedencia de los agregados**

La arena usada para el diseño de la mezcla asfáltica propuesta proviene de la mina para explotación de materiales pétreos de “Naranjo Lopez constructores”.



*Ilustración 8: Ubicación de la planta de asfalto*

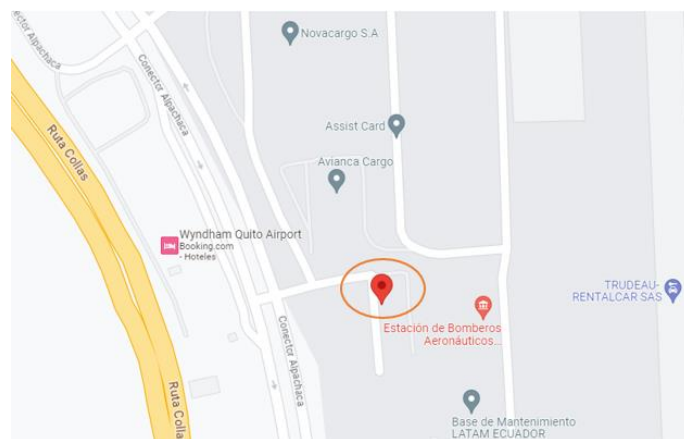
*Fuente: Google maps*



*Ilustración 9: Almacenamiento de arena*

*Fuente: Propia*

El polvo de llanta fue obtenido por la corporación “Quiport”, empresa encargada de realizar el mantenimiento de la pista de aterrizaje. La limpieza de la pista se realiza con cierta frecuencia. Con el uso de una maquina fresadora se va retirando el exceso de polvo de llanta para posterior almacenamiento.



*Ilustración 10: Ubicación de la planta de procesamiento de la empresa Quiport*

*Fuente: Google maps*



*Ilustración 11: Polvo de llanta*

*Fuente: Propia*

#### **2.4.4. Método de incorporación del filler en la mezcla asfáltica**

Los métodos usados para incorporar cualquier tipo de filler en una mezcla asfáltica son 2, por vía húmeda y por vía seca.

##### **2.4.4.1. Método por vía seca:**

Este método consiste en tratar al filler (arena y polvo de llanta) como agregado fino. Se considera que el conjunto de materiales forma parte de los agregados granulares de la mezcla, por tal motivo es necesario realizar una curva granulométrica en conjunto. Por lo tanto, se mezcla el filler a las cantidades establecidas de agregados granulares antes de incorporar la emulsión asfáltica. Este proceso es el más convencional en obra, debido a la facilidad de ejecución. (MTOP, 2002)

##### **2.4.4.2. Método por vía húmeda:**

Este método consiste en agregar filler al ligante que se esté considerando, es decir a la emulsión asfáltica en caliente, se aprovecha este estado debido a que su viscosidad es baja y brinda facilidad en la mezcla. Por otro lado, para este método es necesario usar un mecanismo de agitación de alto cizallamiento para garantizar la digestión total del polvo de llanta evitando la turbulencia y la posible separación de las fases del asfalto modificado. (MTOP, 2002)

#### **2.5 Caracterización del desempeño de la mezcla asfáltica en frío**

##### **2.5.1. Ensayos de estabilidad y flujo**

Se realiza con la ayuda del aparato Marshall. El objetivo del ensayo es determinar la resistencia a la fluencia en mezclas asfálticas para lo cual se usan briquetas cilíndricas, las cuales son ensayadas con cargas perpendiculares su eje cilíndrico. Es importante mencionar que este tipo de metodología únicamente es aplicada para mezclas asfálticas con agregados que cumplen con el tamaño máximo nominal de hasta 1 plg. (MTOP, 2002)

El flujo tiene como objetivo medir la deformación que se va a producir en una mezcla cuando es sometida a una determinada carga antes de que se produzca una fractura. Con estos resultados se conoce como se ha reducido el diámetro entre la carga inicial y la máxima, se expresa en unidades de 0.25mm

La estabilidad en cambio indica la resistencia al desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas, muestra el valor de la carga que se necesita para que la briqueta falle.

Según la norma actual de pavimentos MOP-001-F 2002 establece rangos de aceptabilidad para el ensayo de estabilidad y flujo:

**TABLA 405.5.4**

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos en mezcla								
- Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
% Vacíos agregados	VER TABLA 405-5.5							
Relación filler/betún	0.8	1.2	0.8	1.2				
% Estabilidad retenida luego 7 días en agua temperatura ambiente								
- Capa de Rodadura	70	----	70	----				
- Intermedia o base	60	----	60	----				

*Ilustración 12: Límites para estabilidad y flujo*

*Fuente: MTOP, 2002*

## Capítulo 3

### 3. Ensayos y resultados de los materiales

#### 3.1. Ensayos del material asfáltico recuperado (RAP)

Con respecto al agregado fresado (RAP) es necesario realizar los ensayos estipulados en la sección 406-2 de las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP-001-F-2002) con el objetivo de medir y garantizar la calidad de los agregados. Los ensayos propuestos por la norma son los siguientes:

##### 3.1.1. Muestreo en campo (INEN 695)

Este ensayo engloba el procedimiento y posterior análisis de la obtención de muestras de agregado RAP, con el objetivo de la determinación de una fuente de abastecimiento de calidad para futuros usos en mezclas asfálticas.

El ensayo consiste en tratar de tomar la muestra más representativa del árido grueso y fino, con el objetivo de demostrar las características reales del terreno. Para una correcta toma de muestras, es importante que el personal de extracción realice un buen uso de los materiales, equipos y herramientas

Tamaño del arido	Masa mínima de la muestra in situ	Volumen mínimo de la muestra in situ
mm	Kg	L
<b>Áridos finos</b>		
2.36	10	8
4.75	10	8
<b>Áridos gruesos</b>		
9.5	10	8
12.5	15	12
19	25	20
25	50	40
37.5	75	60
50	100	80
63	125	100
75	150	120
90	175	140

*Tabla 1: Muestra mínima para el muestreo*

*Fuente: INEN, 2010*

### **3.1.2. Análisis granulométrico (INEN 696/ ASTM C 136)**

El análisis granulométrico de una muestra de suelo permite conocer el tamaño de las partículas que están presentes, ayuda a determinar la importancia que generan en la fracción de suelo a analizar y su permeabilidad. Por lo tanto, el análisis granulométrico de agregados separa en cantidades proporcionales los tamaños de abertura de los tamices y la muestra de árido, en este caso de contenido RAP. (Lara, 2018)

Es fundamental generar una curva granulométrica, la cual es una representación gráfica de la estructura del suelo visualizada desde los parámetros básicos de clasificación como son el diámetro efectivo, coeficiente de uniformidad y curvatura. El procedimiento se realiza por tamices, se coloca una cantidad de agregado seco dentro de una serie de tamices con aberturas variables, ordenados de mayor a menor. Después de realizar el proceso de tamizado se determina el peso de cada uno de los tamices usados para delimitar el porcentaje acumulado en cada uno de los tamices.

En la presente investigación, el análisis granulométrico es importante, ayuda a determinar la cantidad de agregado necesario para elaborar las briquetas. La norma vigente en el país MOP-001-F-2002 en su sección 405 sugiere una granulometría para pavimentos recuperados (RAP). La tabla mostrada a continuación se encuentra en la sección 405.5

Tamiz		Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada							
Número	Abertura	3/4"		1/2"		3/8"		N°4	
	mm								
1"	50.8		100	-		-		-	
3/4"	19	90	100		100	-		-	
1/2"	12.7	-		90	100		100	-	
3/8"	9.5	56	80			90	100		100
N° 4	4.75	35	65	44	74	55	85	80	100
N°8	2.36	23	49	28	58	32	67	65	100
N° 16	1.18	-		-		-		40	80
N°30	0.6	-		-		-		25	65
N°50	0.3	5	19	5	21	7	23	7	40
N°100	0.15	-		-		-		3	20
N°200	0.075	2	8	2	10	2	10	2	10

Tabla 2: franjas granulométricas

Fuente: MOP,2002

Las ecuaciones utilizadas para determinar la curva granulométrica son las siguientes:

- Porcentaje retenido

$$\%retenido = \frac{\text{Peso retenido parcial}}{W_t} \cdot 100 \quad (1)$$

En donde:

$W_t$  Representa el sumatorio total del peso de la muestra, g

- Porcentaje retenido acumulado

Este porcentaje se obtiene después de la acumulación de cada uno de los porcentajes retenidos por cada uno de los tamices

$$\%retenido\ acumulado = \sum \%retenidos \quad (2)$$

- Porcentaje pasante

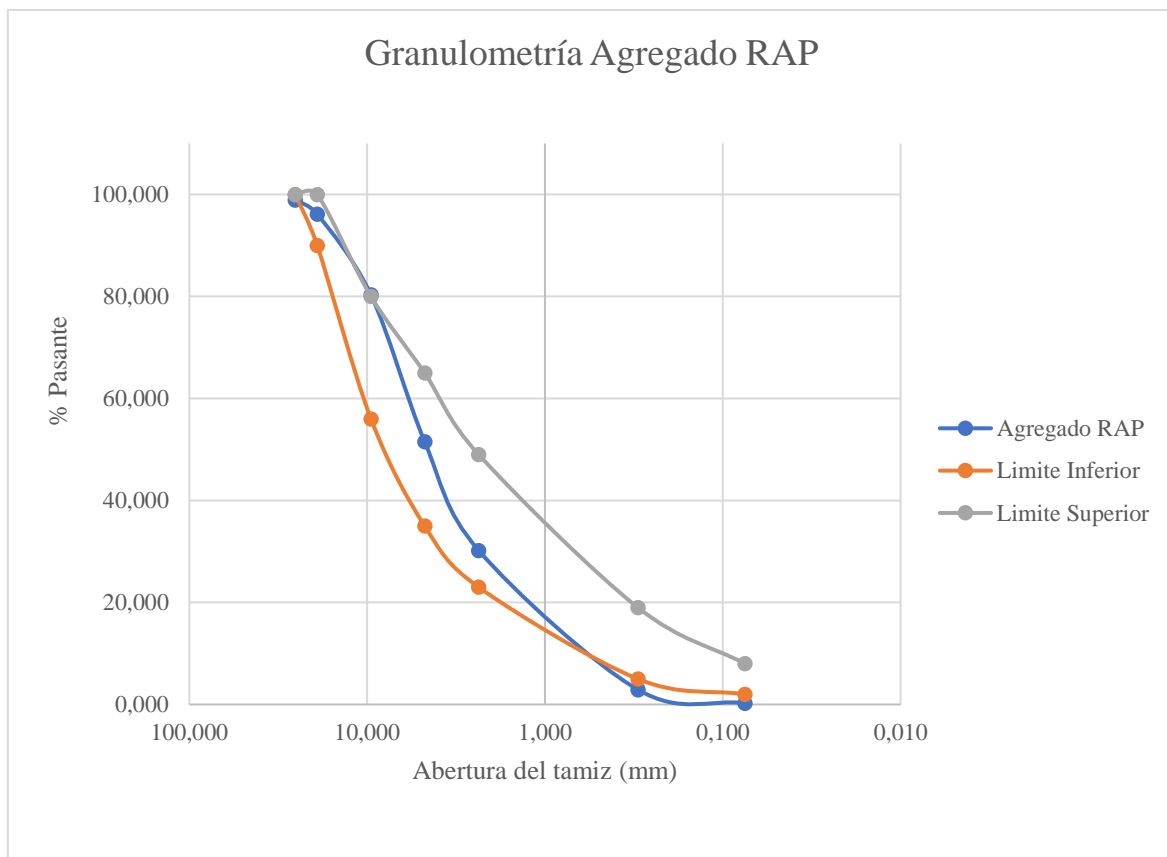
$$\%pasante = 100 - \%retenido\ acumulado \quad (3)$$

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en base a las ecuaciones y a las especificaciones de la norma: La franja granulométrica aceptada es la que considera la abertura del tamiz ¾ debido a que la curva granulométrica obtenida está dentro de los límites admisibles estipulados en la norma. Por consiguiente, se muestran los resultados de la granulometría del RAP.

Tamiz	Abertura	Peso Retenido	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Promedio del porcentaje que pasa	límites según la norma	
	mm	g	%	%	%	minimo	maximo
1	25.4	34.45	0.995	0.995	98.894	100	100
3/4	19.1	106.11	3.064	4.058	96.136	90	100
3/8	9.52	524.72	15.150	19.208	80.307	56	80
No. 4	4.75	1117.22	32.257	51.465	51.531	35	65
No.8	2.36	672.03	19.403	70.869	30.208	23	49
No. 50	0.3	901.03	26.015	96.884	2.905	5	19
200	0.075	99.63	2.877	99.760	0.254	2	8
Bandeja	0	8.3	0.240	100.000	0.000	0	0

Tabla 3: Promedio de la granulometría del agregado RAP

Fuente: Propia



Gráfica 1: Curva granulométrica del agregado RAP

Fuente: propia

### 3.1.4 Extracción de asfalto residual (ASTM D 2172)

Se emplea el ensayo de extracción de asfalto residual para determinar la cantidad específica que existe de asfalto en una muestra de material fresado (RAP), esta información es útil para

realizar el diseño de una mezcla asfáltica, debido a que es necesario conocer el porcentaje de asfalto inicial para poder realizar la corrección en el diseño. Los resultados que se obtienen dependen mucho del tiempo y almacenamiento del contenido RAP, si este lleva varios meses almacenado es probable que el contenido de asfalto sea menor.

La cantidad de muestra que se usa para realizar el ensayo se obtiene de la siguiente tabla:

Tamiz		Muestra mínima
Número	Abertura	Kg
	mm	
N° 4	4.75	0.5
3/8"	9.5	1
1/2"	12.7	1.5
3/4"	19	2
1"	50.8	3
1/2"	37.5	4

*Tabla 4: muestra mínima para el ensayo de extracción de asfalto*

*Fuente: ASTM D 2172*

La masa mínima depende del tamaño máximo nominal del agregado. Si la masa de prueba supera la capacidad de almacenamiento de la máquina centrífuga se puede dividir en porciones iguales. Posterior a la extracción de asfalto es recomendable realizar una mezcla de prueba para la determinación de la humedad.

El cálculo del porcentaje de asfalto residual se obtiene en base a la siguiente ecuación:

$$\%C.A. = \frac{(A - B) - (D - C)}{A} * 100$$

En donde:

*%C.A.* Representa el porcentaje de asfalto residual presente en la muestra de agregado RAP

*A* Representa el peso de la muestra seca antes de la extracción

*B* Representa el peso de la muestra seca después de la extracción

*C* Representa el peso del filtro seco antes de la extracción

D Representa el peso del filtro seco después de la extracción

Extracción cuantitativa de Asfalto Residual- Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)					
Muestra	Pesos				
	Muestra seca antes de la extracción	Muestra seca después de la extracción	Filtro seco antes de la extracción	Filtro seco después de la extracción	%C.A.
	A	B	C	D	
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
1	551.35	512.45	22.95	23.98	6.87
2	551.67	512.87	22.87	23.87	6.85
3	550.93	511.98	22.51	23.8	6.84
4	550.03	511.45	22.87	23.91	6.83
5	550.89	511.62	22.56	23.89	6.89
				<b>PROMEDIO % C.A.</b>	6.9

*Tabla 5: Resultados del ensayo de asfalto residual*

*Fuente: Propia*

### 3.2. Ensayos realizados al filler (Caucho / arena)

#### 3.2.1. Análisis granulométrico del filler (ASTM D 546)

En los fillers (arena / caucho) se realiza un análisis granulométrico mediante el proceso de tamizado para encontrar la textura y composición del relleno mineral, así como obtener la distribución de tamaños de partículas presentes en el material.

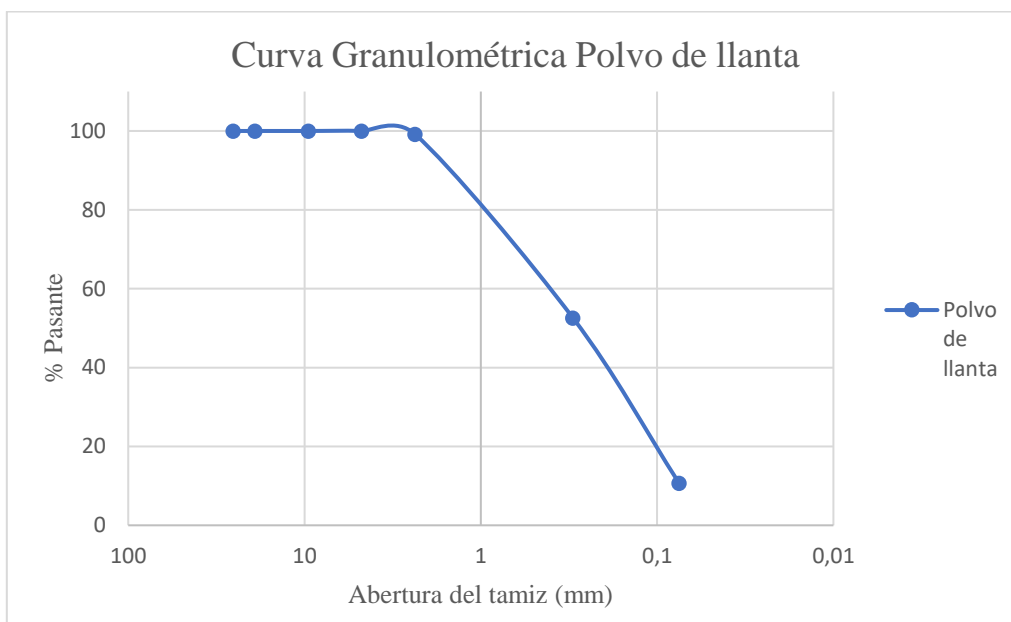
Para hacer el análisis se seleccionan 500 gramos de la muestra y hacerla pasar por los tamices como lo menciona la sección 405-5.1 de la (MOP-001-F-2002). A continuación, se presenta los resultados de la granulometría del polvo de llanta y arena

#### 1. Polvo de llanta

Tamiz	Abertura	Peso retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado	Promedio del porcentaje que pasa
	mm	g	%	%	%
1	25.4	0	0	0	100
3/4	19.1	0	0	0	100
3/8	9.52	0	0	0	100
No. 4	4.75	0	0	0	100
No.8	2.36	3.41	0.84	0.84	99.16
No. 50	0.3	204.17	46.59	47.42	52.58
200	0.075	180.65	41.92	89.34	10.66
bandej	0	46.59	10.66	100.00	0.00

Tabla 6: Granulometría del polvo de llanta

Fuente: Propia



Gráfica 2: Curva granulométrica del polvo de llanta

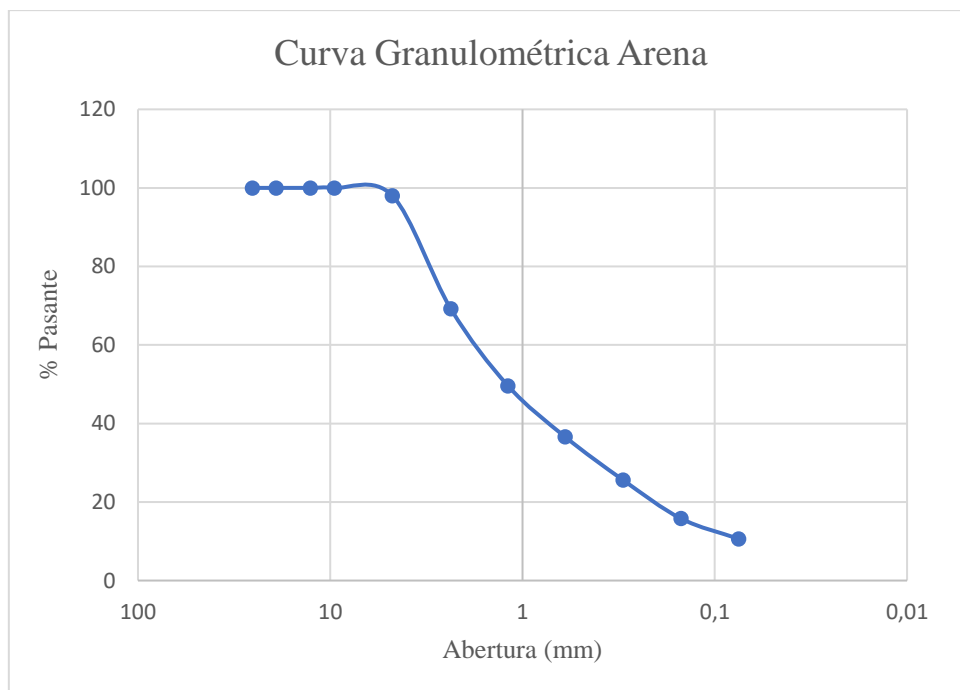
Fuete: propia

2. Arena:

Tamiz	Abertura	Peso retenido acumulado	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
	mm	g	%	%
1 1/2	38.100			
1	25.400	0	0	100
3/4	19.100	0	0	100
1/2	12.700	0	0	100
3/8	9.520	0	0	100
No. 4	4.750	10	2	98
No.8	2.360	154	30.8	69.2
No. 16	1.190	252	50.4	49.6
No. 30	0.600	317	63.4	36.6
No. 50	0.300	372	74.4	25.6
No. 100	0.150	421	84.2	15.8
No.200	0.075	447	89.4	10.6
bandeja	0.000	53	10.6	89.4

Tabla 7: granulometría de la arena

Fuente: Naranjo-López Constructores Cía. Ltda.



Gráfica 3: Curva granulométrica Arena

Fuente: Naranjo- López Constructores Cía. Ltda.

### **3. Ensayos realizados a la emulsión asfáltica (Css-1h)**

Para el desarrollo de una propuesta de mezcla asfáltica en frío del presente trabajo de investigación se empleó la emulsión asfáltica CSS- 1h. Sus siglas indican que es una emulsión catiónica de curado lento, de baja viscosidad y proviene de un asfalto duro.

Sus principales características son:

- Actúa de ligante asfáltico para agregados que por lo general se usan en mezclas asfálticas en frío
- Se emplea en el reciclaje y recuperación de pavimentos fatigados
- Para estabilizar suelos y bases
- Actúa como sello asfáltico, es decir como sand seal fog seal y slurry seal tipo 1,2 y3.
- Cumple con un papel importante en la imprimación de superficies y en riegos de adherencia. (IMPTEK, 2021)

En consecuencia, debido a la importancia de empleabilidad que se da a la emulsión usada en la mezcla asfáltica propuesta, es necesario realizar una serie de ensayos previstos por la normativa vigente para así garantizar la calidad del producto final y confirmar la vida útil del producto propuesto. A continuación, se muestra la tabla en donde se detallan la serie de ensayos a realizar. Es obtenida de la normativa vigente MOP-001-F-2002, se ubica en la sección 810 de asfaltos y productos asfálticos.

REQUISITOS DE EMULSIONES ASFALTICAS CATIONICAS.

PROPIEDAD	ROTURA RAPIDA		ROTURA MEDIA				ROTURA LENTA					
	CRS-1		CRS-2		CMS-2		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
VISCOSIDAD:												
FUROL,a 25 gC, s.	-	-	-	-	-	-	-	-	20	100	20	100
FUROL,a 50 gC, s.	20	100	100	400	50	450	50	450	-	-	-	-
ESTABILIDAD AL ALMACENAJE 24 h, %	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
DEMULSIFICACION: 35 ml .8% sds, %	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CUBRIMIENTO												
agregado seco	-	-	-	-	bueno		bueno		-	-	-	-
luego rociado	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
agregado humedo	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
luego rociado	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
CARGA DE PARTICULA	+		+		+		+		+		+	
MEZCLA CON CEMENTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	-	2,0
ENS. DEL TAMIZ	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
DESTILACION: ACEITE DESTILADO %	-	3	-	3	-	12	-	12	-	-	-	-
RESIDUO, %	60	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
ENSAYOS EN EL RESIDUO:												
PENETRACION, a 25 grados,100 gr, 5 s.	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
DUCTILIDAD, a 25 grados, 5 cm/m, cm.	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO %	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-
TEMPERATURA DE EMPLEO:												
ALMACENAMIENTO	50	85	50	85	50	85	50	85	10	60	10	60
MEZCLA EN PLANTA	-	-	-	-	10	70	10	70	10	70	10	70
MEZCLA EN SITIO	-	-	-	-	20	70	20	70	20	70	20	70
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	50	85	50	85	-	-	-	-	-	-	-	-

Ilustración 13: Listado de ensayos a realizar para comprobar la calidad de la emulsión asfáltica

Fuente: MOP, 2002

**3.1. Viscosidad- Saybolt Furol, 25 °C (NTE INEN 1981, ASTM D 244)**

Este ensayo nos permite determinar la viscosidad de la emulsión, esto es importante ya que influye en la capacidad que tiene la emulsión para mantenerse en su lugar y unirse con los agregados. Lo que se busca en este ensayo es determinar el tiempo en segundos que tarda en pasar 60 cm<sup>3</sup> de emulsión por un tubo hacia un recipiente. Asegurándonos que se encuentre la muestra a 25 °C.

**3.1.2 Carga de partícula (ASTM D7402, INEN 908)**

Este ensayo es útil para identificar si la emulsión usada es aniónica o catiónica, es decir identificar la emulsión de acuerdo con la carga eléctrica que presenten las partículas de betún,

considerando que, si se forma una película gruesa de espécimen en el cátodo, esta será catiónica.

Los equipos usados para este ensayo serán dos electrodos, un cátodo y un ánodo que se encuentran conectados a un flujo eléctrico continuo que circula a una corriente entre 8 mA y 10 mA.

Para poder hacer el ensayo es necesario realizarlo en una muestra de emulsión, para luego zambullir en ella los electrodos, hasta verificar que la corriente eléctrica disminuya hasta máximo 2mA.

### **3.1.3 Asentamiento 5 días (ASTM D6930, INEN 910)**

Este ensayo permite calcular cuánta estabilidad pueden llegar a tener las emulsiones asfálticas mientras son almacenadas y encontrar la tendencia de las partículas de asfalto a sedimentarse. Como su nombre lo dice este ensayo tiene una duración de 5 días. Como instrumentos de laboratorio se necesitan dos probetas de vidrio que tengan una capacidad de 500 ml.

En las dos probetas se vierte un poco de emulsión y se deja reposar por 5 días, verificando que durante este tiempo no se agiten ni se muevan las probetas. Al transcurrir los 5 días se toma una muestra de la parte superior e inferior y la diferencia entre ambas muestras será el resultado.

### **3.1.4 Estabilidad de almacenamiento 24 horas (ASTM D6930, INEN 909)**

De la misma forma que el ensayo mencionado en la sección anterior, este permite hallar la tendencia de las partículas de asfalto a sedimentarse, pero en 24 horas. Se vierte emulsión en un cilindro de vidrio. Al transcurrir este tiempo se toma una muestra de la parte superior e inferior y la diferencia entre ambas muestras será el resultado.

### **3.1.5 Residuo por evaporación (ASTM D6934, INEN 905)**

Este ensayo permite determinar cuánto porcentaje de asfalto o betún posee la emulsión, haciendo que este alcance altas temperaturas en un horno para poder evaporar todo lo que no sea asfalto, como los componentes jabonosos y el agua. De esta manera se puede pesar el residuo restante.

Se coloca 3 vasos con  $50 \pm 0,1$  g de emulsión y se los introduce en un horno a una temperatura constante de  $163 \pm 3$  °C durante 2 horas.

Para poder realizar los cálculos se obtiene los pesos finales e iniciales para poder calcular el porcentaje de asfalto.

### **3.1.6 Prueba del tamiz N°20 (ASTM D6933, INEN 906)**

Este ensayo permite determinar la calidad de la emulsión, haciendo pasar una muestra por el tamiz N°20, calculando así el porcentaje retenido en la malla. Con los valores obtenidos se analiza la uniformidad de la emulsión.

### **3.1.7 Penetración (ASTM D5, INEN 918)**

Este ensayo permite determinar la consistencia de la emulsión mediante la distancia que una aguja penetra una muestra de 100 gr en 5 segundos a una temperatura de 25°C. El valor de la penetración se expresa en céntimos de centímetro. Para el ensayo se realizan 3 penetraciones, el resultado expresado es el promedio de estas.

$$Tolerancia = \frac{PROMEDIO DE PENETRACIÓN}{100} + 1$$

### 3.1.8 Ductilidad (ASTM 133, INEN 916)

Este ensayo permite determinar la distancia que la muestra de emulsión puede alcanzar antes de que esta se quiebre, y se lo realiza en una briqueta separándola desde sus dos extremos en un instrumento que mide la ductilidad, a una temperatura de  $25 \pm 0.5$  °C y una velocidad de  $5 \pm 0.25$  cm por minuto.

A continuación, se tabulan los resultados que se obtuvieron de los ensayos propuestos y explicados con anterioridad.

<b>Tabla de Resultados Emulsión Asfáltica CSS-1H</b>				
<b>Ensayo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>	<b>Especificación</b>	<b>Cumple</b>
Viscosidad- Saybolt Furol a 25 °C	SFF	30	20-100	SI
Carga de partícula	-	Positiva	Positiva - Negativa	SI
Asentamiento 5 días	%	2	0-5	SI
Estabilidad de almacenamiento 24 horas	%	0.6	0-1	SI
Residuo por evaporación	%	72	Min. 57	SI
Prueba del tamiz N°20	%	0.02	0 - 0.1	SI
Penetración	dmm	55.5	40 - 90	SI
Ductilidad	cm	58	Min.40	SI

*Tabla 8: Representación de resultados de los ensayos de con la emulsión*

*Fuente: Propia*

## Capítulo 4

### 4. Diseño de la mezcla asfáltica:

#### 4.1. Diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall

En la actualidad, la norma vigente que estipula los lineamientos de diseño y de aceptación de una mezcla asfáltica es la MOP-001-F-2002 Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes, recomienda que para realizar una mezcla asfáltica en frío con material reciclado de pavimentos antiguos (RAP) y emulsión asfáltica, se diseñe con los criterios detallados en el manual MS-19 del Instituto del asfalto. Adicional a esto, el trabajo de investigación tiene como objetivo comparar resultados de estabilidad y flujo entre tres mezclas asfálticas: la primera con RAP y con varios porcentajes de caucho, la segunda con RAP junto con varios porcentajes de caucho y arena y la última únicamente con RAP. Cada una de estas mezclas acompañadas de un porcentaje de emulsión y agua. Este análisis se realiza en base a los criterios del manual Ms- 14 del Instituto del Asfalto conocido como “Mezclas Asfálticas en frío”.

El diseño se regirá en base a la metodología Marshall la cual fue propuesta por el ingeniero Bruce Marshall. Usando agregados de un tamaño máximo nominal de 1 pulgada (25 mm) o tamaños inferiores. Por lo general este método es aplicado en controles de calidad dentro de obra.

Para realizar el muestreo y elaboración de briquetas para su posterior ensayo, se usan especímenes estándar de 64 mm de altura y 102 mm de diámetro. La elaboración del ensayo se guía en base a la norma ASTM D1559 y su principal método de diseño es la densidad- análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de cada uno de los especímenes realizados bajo esta metodología. Para el caso de este trabajo de investigación, únicamente se realizará la

evaluación de estabilidad y flujo para determinar el contenido óptimo de polvo de llanta de avión.

#### 4.2. Estabilidad y flujo

Los parámetros de estabilidad y flujo son indicadores de clasificación y medición para mezclas asfálticas en frío y caliente. La caracterización de la mezcla se rige en base a la tabla 405.5.4 proporcionada por la norma vigente de puentes y caminos MOP- 001F- 2002, se muestra a continuación los límites aceptables.

TIPO DE TRÁFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
CRITERIOS MARSHALL	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	---	1800	---	1200	---	-1000	2400
Flujo (pulgada/ 100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos en mezcla								
Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9

*Tabla 9: límites de estabilidad y flujo*

*Fuente: (MTO, 2002)*

- Estabilidad Marshall: este parámetro representa la fuerza que produjo el fallo en la briqueta de análisis después de aplicar una carga de deformación constante. Además, la estabilidad mide la resistencia de la briqueta y expresa su resultado en lb. Se conoce que por esta metodología las briquetas no cumplen con las dimensiones estándar establecidas, razón por la cual, es necesario realizar una corrección con un factor de correlación, el cual se encuentra en la tabla 7.1 del MS-22 del Asphalt Institute. (Asphalt Institute, 2001)

Volumen del espécimen (cm <sup>3</sup> )	Espesor aproximado (mm)	Espesor aproximado (pulgadas)	Relación de corrección	Volumen del espécimen (cm <sup>3</sup> )	Espesor aproximado (mm)	Espesor aproximado (pulgadas)	Relación de corrección
200 a 213	25.4	1	5.56	406 a 420	50.8	2	1.47
214 a 225	27.0	1 1/16	5.00	421 a 431	52.4	2 1/16	1.39
226 a 237	28.6	1 1/8	4.55	432 a 443	54.0	2 1/8	1.32
238 a 250	30.2	1 3/16	4.17	444 a 456	55.6	2 3/16	1.25
251 a 264	31.8	1 1/4	3.85	457 a 470	57.2	2 1/4	1.19
265 a 276	33.3	1 5/16	3.57	471 a 482	58.7	2 5/16	1.14
277 a 289	34.9	1 3/8	3.33	483 a 495	60.3	2 3/8	1.09
290 a 301	36.5	1 7/16	3.03	496 a 508	61.9	2 7/16	1.04
302 a 316	38.1	1 1/2	2.78	509 a 522	63.5	2 1/2	1.00
317 a 328	39.7	1 9/16	2.50	523 a 535	65.1	2 9/16	0.96
329 a 340	41.3	1 5/8	2.27	536 a 546	66.7	2 5/8	0.93
341 a 353	42.9	1 11/16	2.08	547 a 559	68.3	2 11/16	0.89
354 a 367	44.4	1 1/4	1.92	560 a 573	69.8	2 3/4	0.86
368 a 379	46.0	1 13/16	1.79	574 a 585	71.4	2 13/16	0.83
380 a 392	47.6	1 7/8	1.67	586 a 598	73.0	2 7/8	0.81
393 a 405	49.2	1 15/16	1.56	599 a 610	74.6	2 15/16	0.78

*Tabla 10: factores de correlación*

*Fuente: (MOP,2002)*

- Flujo Marshall: representa la capacidad que adquiere la mezcla para resistir el asentamiento que se produce al aplicar cargas, además de controlar la deformación sin agrietarse. Por otro lado, este análisis muestra la deformación vertical que se puede producir en la briqueta al llegar al fallo por la carga aplicada. La unidad de análisis es expresada en 1/1000 plg. (Asphalt Institute, 2001)

### **4.3. Cálculo de la mezcla asfáltica**

#### **4.3.1. Dosificación de la mezcla del agregado**

Los elementos que conforma los agregados que serán parte de la mezcla asfáltica son 3: agregado RAP, polvo de llanta y arena, estos dos últimos elementos actúan a manera de filler los cuales serán adicionados por vía seca.

Para la dosificación de la mezcla, es importante conocer sus propiedades físicas, es decir, conocer la distribución de tamaños del agregado mediante resultados del ensayo

granulométrico. Se considero como criterio de evaluación a los límites establecidos en la norma vigente del país, los cuales se presentan en la tabla mostrada abajo.

Como consecuencia, junto a los resultados granulométricos obtenidos, se estiman porcentajes para cada uno de los componentes de la mezcla asfáltica. Se realizaron evaluaciones para observar y definir una curva granulométrica que este dentro de los límites establecidos por la norma vigente.

El desarrollo de las briquetas se realizó por 3 etapas. Considerando que para la etapa 3 no se agrega ningún tipo de filler ya sea caucho o arena, el diseño de mezcla se realizó para la etapa 1 y 2 ya que poseen un agregado fino.

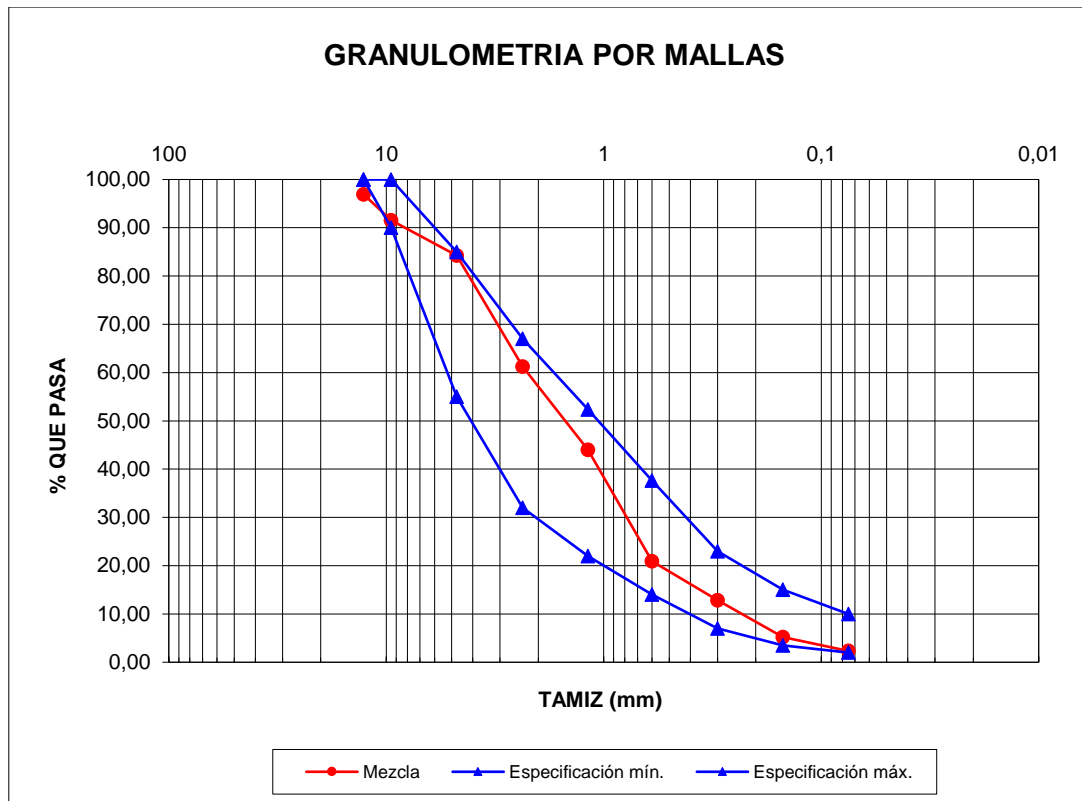
- **Grupo 1: 900 g de agregado RAP, 4% Emulsión, 4% Agua, 2%, 3% y 4% de polvo de llanta**

Por lo tanto, se determinó el diseño de mezcla de la siguiente forma, con los siguientes porcentajes establecidos en base a los análisis.

% DE MEZCLA			Identificación
<b>A</b>	0.80	80	Agregado RAP
<b>B</b>	0.00	0	
<b>C</b>	0.00	0	
<b>D</b>	0.2	20	Polvo de llanta

*Tabla 11: Diseño de mezcla grupo 1*

*Fuente: Propia*



Gráfica 4: Diseño de la mezcla del grupo 1

Fuente: Propia

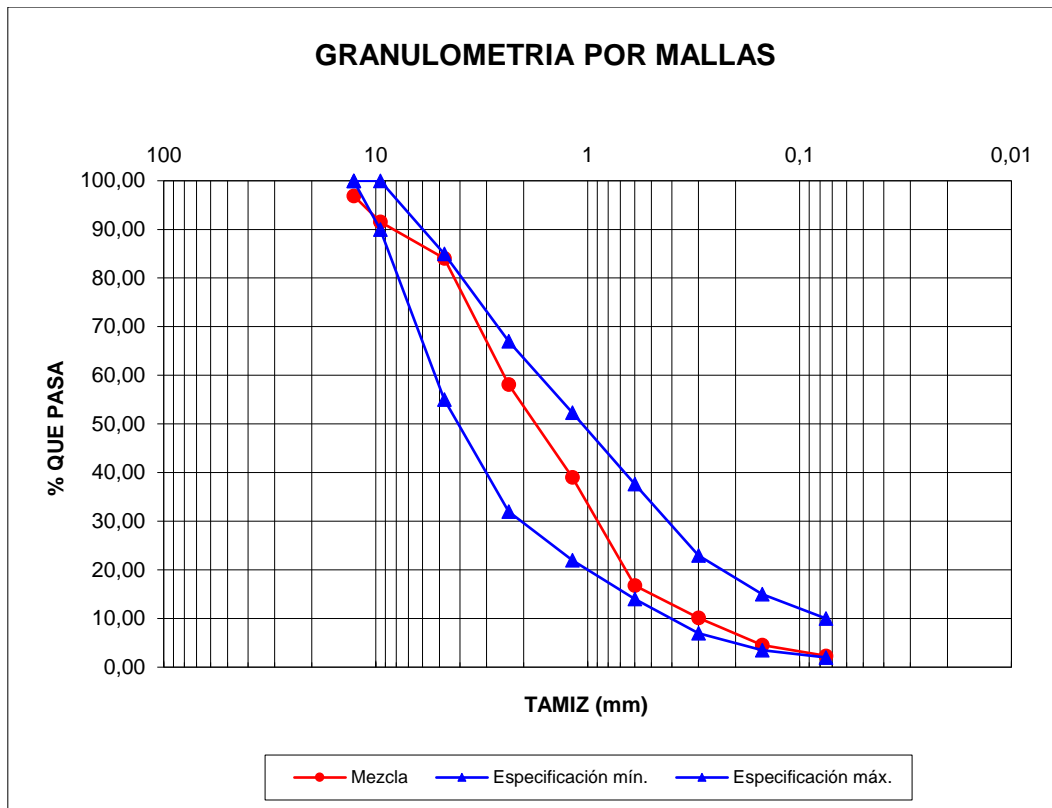
- **Grupo 2: 900gr de Agregado RAP, 4% Emulsión, 4% Agua, 2%, 3% y 4% de polvo de llanta, 1%, 1,5% y 2% de arena**

Por lo tanto, se determinó el diseño de mezcla de la siguiente forma, con los siguientes porcentajes establecidos en base a los análisis.

% DE MEZCLA			Identificación
<b>A</b>	0.80	80	Agregado RAP
<b>B</b>	0.00	0	
<b>C</b>	0.10	10	Arena
<b>D</b>	0.1	10	Polvo de llanta

Tabla 12: Diseño de mezcla del grupo 2

Fuente: Propia



Gráfica 5: Diseño de la mezcla del grupo 1

Fuente: Propia

#### 4.3.2. Elaboración de briquetas

El procedimiento para obtener los valores de estabilidad y flujo en el ensayo Marshall es el siguiente:

Se elaboraron en total 33 briquetas divididas en 3 grupos. Las primeras nueve contienen 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado) y un porcentaje variable de caucho proveniente de llantas de avión. Las otras nueve contienen 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado), un porcentaje variable de caucho proveniente de llantas de avión, y arena fina obtenida de la planta asfáltica de Naranjo López Constructores. Y las últimas 15 contienen 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, y 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado)

Para el primer, segundo y tercer grupo el proceso para elaborar las briquetas no varía:

#### 4.3.2.1. Grupo 1

Para poder elaborar las briquetas, se debe determinar la cantidad de material necesario que entrara en la mezcla. Para el grupo 1 se harán 3 briquetas por cada porcentaje de caucho y los porcentajes de caucho que fueron seleccionados son del 2%, 3% y 4% de caucho con respecto a los 900 gr de RAP.

Pasos para la elaboración de las briquetas:

- Paso 1:

Determinar los porcentajes de cada material que entrará en la mezcla. Para esto se calcula cada porcentaje con respecto a los 900 gr de RAP.

Composición de briquetas con el 2% de Caucho:

4% Emulsión Asfáltica	→	36gr
4% Agua	→	36gr
2% Caucho	→	18gr

Composición de briquetas con el 3% de Caucho:

4% Emulsión Asfáltica	→	36gr
4% Agua	→	36gr
3% Caucho	→	27gr

Composición de briquetas con el 4% de Caucho:

4% Emulsión Asfáltica → 36gr

4% Agua → 36gr

4% Caucho → 36gr

- Paso 2.1

#### Briquetas Grupo 1 - 2% de caucho

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica, después poner 36 gr de agua y finalmente añadir 18gr de caucho.

#### Briquetas Grupo 1 - 3% de caucho

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica, después poner 36 gr de agua y finalmente añadir 27gr de caucho.

#### Briquetas Grupo 1 - 4% de caucho

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica, después poner 36 gr de agua y finalmente añadir 36gr de caucho.

Una vez seleccionado los materiales, se procede a mezclar manualmente hasta visualizar que la mezcla tenga un tono o color uniforme.

Se prepara un molde para poder introducir la mezcla, poniendo papel filtro en la base para que la mezcla no se pegue en el molde.

Con una cuchara de albañil se coloca la mezcla obtenida en el molde y se procede con una varilla a dar 15 golpes alrededor y 10 golpes en el centro del molde. Culinado este, se coloca un papel filtro sobre la mezcla vertida.

Se lleva el molde hacia el martillo de compactación eléctrico y se programa los golpes que recibirá por cara. Para una mezcla en frío la MOP-001-F-2002 en el capítulo 4.11 indica que el espécimen debe recibir 50 golpes por lado. Se selecciona 50 golpes en el contador automático, luego se introduce la mezcla y se coloca el martillo encima de esta. En el contador automático se presiona en el botón de iniciar y se espera a que el aparato de 50 golpes. A continuación, se da vuelta al molde y se repite el proceso.



*Ilustración 14: molde para el ensayo Marshall*

*Fuente: laboratorio de pavimentos PUCE*

Culinado el proceso previo, se deja reposar el molde por 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo mencionado se desmolada la muestra mediante un gato hidráulico y se introduce el molde al horno a 60°C por 72 horas de acuerdo con la ASTM D 1559.



*Ilustración 15: briquetas en baño maría*

*Fuente: laboratorio de pavimentos PUCE*

#### **4.3.2.2. Grupo 2**

Para empezar a hacer las briquetas, se debe determinar la cantidad de material necesario que entrara en la mezcla. En el grupo 2 se harán 3 briquetas por cada porcentaje de caucho y por cada porcentaje de caucho ira la mitad de arena, los porcentajes de caucho que fueron seleccionados son del 2%, 3% y 4% de caucho con respecto a los 900 gr de RAP.

Pasos para la elaboración de las briquetas:

- Paso 1

Composición de briquetas con el 2% de Caucho:

4% Emulsión Asfáltica	→	36gr
4% Agua	→	36gr
2% Caucho	→	18gr
1% Arena	→	9gr

Composición de briquetas con el 3% de Caucho:

4% Emulsión Asfáltica	→	36gr
-----------------------	---	------

4% Agua	→	36gr
3% Caucho	→	27gr
1,5% Arena	→	13,5gr

Composición de briquetas con el 4% de Caucho:

4% Emulsión Asfáltica	→	36gr
4% Agua	→	36gr
4% Caucho	→	36gr
2% Arena	→	18gr

- Paso 2.1

Briquetas Grupo 2 - 2% de caucho

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica, después poner 36 gr de agua, añadir 18gr de caucho y finalmente agregar 9gr de arena.

Briquetas Grupo 2 - 3% de caucho

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica, después poner 36 gr de agua, añadir 27gr de caucho y finalmente agregar 13,5 gr de arena.

Briquetas Grupo 2 - 4% de caucho

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica, después poner 36 gr de agua, añadir 36gr de caucho y finalmente agregar 18gr de arena.

Una vez seleccionado los materiales, se procede a mezclar manualmente hasta visualizar que la mezcla tenga un tono o color uniforme.



*Ilustración 16: Elaboración de briquetas*

*Fuente: laboratorio de pavimentos PUCE*

Se prepara un molde para poder introducir la mezcla, poniendo papel filtro en la base para que la mezcla no se pegue en el molde.

Con una cuchara de albañil se coloca la mezcla obtenida en el molde y se procede con una varilla a dar 15 golpes alrededor y 10 golpes en el centro del molde. Culminado este, se coloca un papel filtro sobre la mezcla vertida.

Se lleva el molde hacia el martillo de compactación eléctrico y se programa los golpes que recibirá por cara. Para una mezcla en frío la MOP-001-F-2002 en el capítulo 4.11 indica que el espécimen debe recibir 50 golpes por lado. Se selecciona 50 golpes en el contador automático, luego se introduce la mezcla y se coloca el martillo encima de esta. En el contador automático

se presiona en el botón de iniciar y se espera a que el aparato de 50 golpes. A continuación, se da vuelta al molde y se repite el proceso.

Culminado el proceso previo, se deja reposar el molde por 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo mencionado se desmolada la muestra mediante un gato hidráulico y se introduce el molde al horno a 60°C por 72 horas de acuerdo con la ASTM D 1559.

#### **4.3.2.3. Grupo 3**

Para empezar a hacer las briquetas, se debe determinar la cantidad de material necesario que entrara en la mezcla. En el grupo 3 se harán 5 briquetas por cada porcentaje de agua de con respecto a los 900 gr de RAP.

Pasos para la elaboración de las briquetas:

- Paso 1

Composición de briquetas con el 1% de Agua:

4% Emulsión Asfáltica → 36gr

1% Agua → 9gr

Composición de briquetas con el 2% de Agua:

4% Emulsión Asfáltica → 36gr

2% Agua → 18gr

Composición de briquetas con el 3% de Agua:

4% Emulsión Asfáltica → 36gr

3% Agua → 27gr

Composición de briquetas con el 4% de Agua:

4% Emulsión Asfáltica → 36gr

4% Agua → 36gr

Composición de briquetas con el 5% de Agua:

4% Emulsión Asfáltica → 36gr

5% Agua → 45gr

- Paso 2.1

Briquetas Grupo 3 - 1% de agua

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica y colocar 9gr de agua.

Briquetas Grupo 3 - 2% de agua

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica y colocar 18gr de agua.

Briquetas Grupo 3 - 3% de agua

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica y colocar 27gr de agua.

Briquetas Grupo 3 - 4% de agua

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica y colocar 36gr de agua.

Briquetas Grupo 3 - 5% de agua

Colocar una bandeja sobre una balanza sensible al gramo, encerar la balanza y colocar 900 gr de RAP, posterior a eso, colocar 36gr de emulsión asfáltica y colocar 45gr de agua.

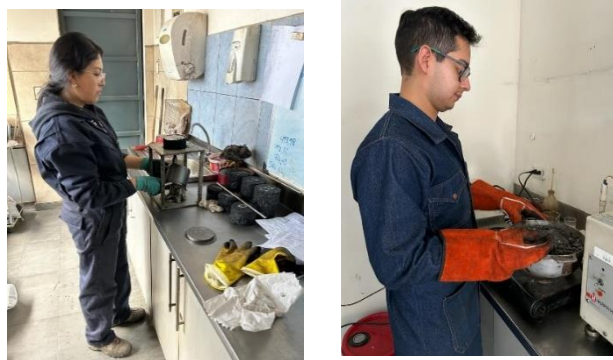
Una vez seleccionado los materiales, se procede a mezclar manualmente hasta visualizar que la mezcla tenga un tono o color uniforme.

Se prepara un molde para poder introducir la mezcla, poniendo papel filtro en la base para que la mezcla no se pegue en el molde.

Con una cuchara de albañil se coloca la mezcla obtenida en el molde y se procede con una varilla a dar 15 golpes alrededor y 10 golpes en el centro del molde. Culinado este, se coloca un papel filtro sobre la mezcla vertida.

Se lleva el molde hacia el martillo de compactación eléctrico y se programa los golpes que recibirá por cara. Para una mezcla en frío la MOP-001-F-2002 en el capítulo 4.11 indica que el espécimen debe recibir 50 golpes por lado. Se selecciona 50 golpes en el contador automático, luego se introduce la mezcla y se coloca el martillo encima de esta. En el contador automático se presiona en el botón de iniciar y se espera a que el aparato de 50 golpes. A continuación, se da vuelta al molde y se repite el proceso.

Culinado el proceso previo, se deja reposar el molde por 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo mencionado se desmolada la muestra mediante un gato hidráulico y se introduce el molde al horno a 60°C por 72 horas de acuerdo con la ASTM D 1559.



*Ilustración 17: elaboración de briquetas*

*Fuente: propia*

## Capítulo 5

### 5. Análisis de resultados

#### 5.1. Determinación del porcentaje teórico de emulsión

La determinación del porcentaje óptimo de emulsión fue realizada de la siguiente forma:

1. Se determina el porcentaje de asfalto emulsificado con la siguiente ecuación obtenida por el instituto del asfalto:

$$P = 0.035a + 0.045b + kc + F$$

En donde:

$P$  representa el porcentaje de asfalto emulsificado

$a$  es el porcentaje de agregado retenido en el tamiz #8

$b$  es el porcentaje de agregado pasante de tamiz #8 y retenido en el tamiz #200

$c$  es el porcentaje de agregado que pasa por el tamiz #200

$k$

- 0.15 cuando pasa del 11 al 15% el tamiz #200
- 0.18 cuando pasa del 6% al 10% el tamiz # 200
- 0.20 cuando pasa el 5% o menos el tamiz #200

$F$  depende de la absorción del agregado liviano o pesado, puede ser de 0 a 2%

<b>G =</b>	19.69	0.19690
<b>g =</b>	28.78	0.28780
<b>A =</b>	48.63	0.48630
<b>a =</b>	2.65	0.02650
<b>f =</b>	0.25	0.00250

Tabla 13: Resumen de los parámetros para la elaboración de la mezcla asfáltica

Fuente: propia

Por lo tanto,

$$P = 4.55$$

La planta asfáltica IMPTEK realiza la producción diaria con el 62% de asfalto, por lo tanto, el porcentaje óptimo de emulsión es el siguiente:

$$\%Emulsión = \frac{\% \text{Asfalto óptimo}}{\% \text{residuo emulsión}}$$

$$\%Emulsión = \frac{4.55}{0.62} = 7.33\%$$

En base a estudios previos, se conoce que el porcentaje de asfalto residual que contiene el agregado RAP es del 6.9% de asfalto. Por lo tanto, el porcentaje de asfalto teórico es la resta entre los porcentajes de asfalto obtenidos:

$$\%asfalto \text{ teórico} = \% \text{asfalto calculado} - \%asfalto \text{ teórico}$$

$$\%asfalto \text{ teórico} = 6.9\% - 4.55$$

$$\%asfalto \text{ teórico} = 2.33\%$$

Como último paso, se determina el porcentaje de emulsión teórico considerando el valor de producción de la emulsión, por lo tanto:

$$\%emulsión = \frac{\% \text{asfalto residual teórico}}{\%asfalto \text{ producción}}$$

$$\%emulsión = \frac{2.33\%}{62\%} = 4\% \text{ emulsión}$$

## **5.2. Proceso y Resultados de Estabilidad y Flujo**

Este es un proceso que nos permite obtener el flujo plástico o la resistencia a la fluencia en las mezclas realizadas con sus distintos porcentajes de material. Elaborándolas en moldes de 102mm y aplicando una fuerza perpendicular al eje del molde, mediante la máquina Marshall.

Para empezar con el proceso, se deben preparar los equipos e introducir las briquetas realizadas en el baño María (Baño de agua con control de temperatura) por un tiempo de 45 minutos a 1 hora, a una temperatura constante de 25 ° C.



*Ilustración 18: briquetas ensayadas*

*Fuente: propia*

Al culminar, en orden se sacan cada uno de los especímenes para ubicarlos dentro de la mordaza para briquetas, en el centro de la prensa, secando con delicadeza la superficie con una franela. Considerando que desde que se saca la briketa hasta que se la introduce en la mordaza no debe demorar más de 30 segundos.

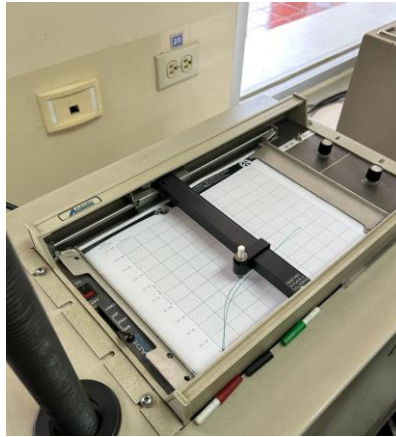


*Ilustración 19: ensayo Marshall*

*Fuente: Propia*

Luego se emplea la carga en la briketa hasta que se produzca una rotura, a una velocidad uniforme de 50.8mm por minuto (2" / minuto) de acuerdo con la ASTM D 6927. Haciendo este

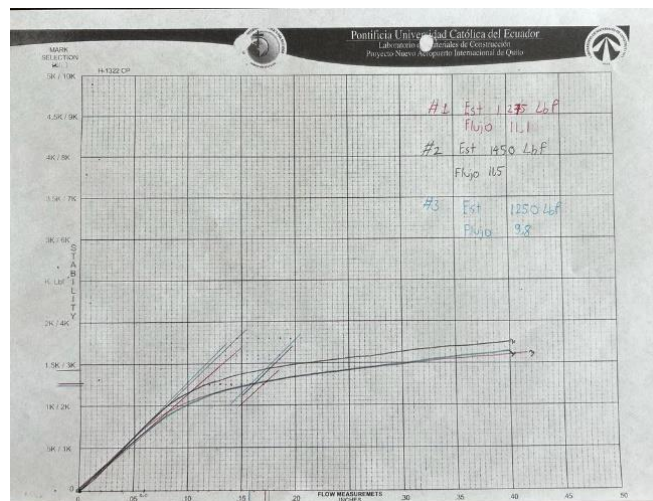
proceso podremos obtener el valor de estabilidad otorgado en libras fuerza y el flujo el cual su unidad de medida es la centésima de pulgada.



*Ilustración 20: Resultados de estabilidad y flujo*

*Fuente: propia*

Para determinar estabilidad y flujo cuando la característica de falla no se la puede apreciar de una forma clara, es decir, cuando no se tiene una curva totalmente definida. De acuerdo con la normativa ASTM 6927, es necesario trazar una tangente a la curva, luego contar 6 unidades de flujo hacia la derecha y trazar una paralela a la tangente, uniéndola con el nuevo punto cero, haciendo que interseque con la curva para luego poder proyectar ese punto hacia abajo y hacia la izquierda. Proyectando el valor hacia la izquierda se obtiene la estabilidad y haciendo lo mismo hacia abajo se obtiene el flujo.



*Ilustración 21: Resultados del ensayo de estabilidad y flujo*

*Fuente: Laboratorio de pavimentos PUCE*

### 5.3.1 Determinación de la mezcla más resistente

Al culminar el ensayo Marshall con los datos obtenidos se analiza que mezcla es la más resistente tabulando los datos y presentando gráficas que nos permiten tener una mejor percepción de lo que se ha realizado. Para lo cual se presentarán los resultados dependiendo de la composición de cada mezcla:

#### 5.3.1.1 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado) y 2%, 3% y 4% de caucho proveniente de llantas de avión.

Briqueta	Flujo (centésima de pulgada)	Estabilidad (Lbf)	% Caucho	Promedio Estabilidad	Promedio Flujo
1	11.1	1275	2	1325.0	10.8
2	11.5	1450	2		
3	9.8	1250	2		
4	11.5	1100	3	1108.3	11.2
5	10.6	1075	3		
6	11.5	1150	3		
7	12	900	4	950.0	11.8
8	12	950	4		
9	11.5	1000	4		

*Tabla 14: tabla resumen de estabilidad y flujo*

*Fuente: propia*

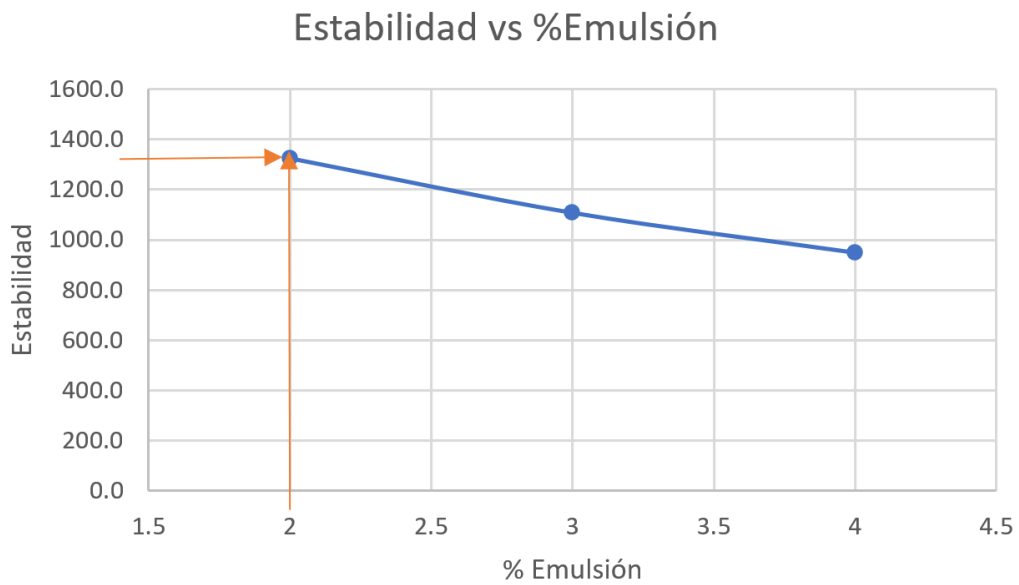
Con los datos obtenidos se pudo hacer un promedio para cada porcentaje de caucho y tener un solo valor de flujo y estabilidad.

Briqueta	Flujo (centésima de pulgada)	Estabilidad (Lbf)	% Caucho
1,2,3	10.8	1325.0	2
4,5,6	11.2	1108.3	3
7,8,9	11.8	950.0	4

*Tabla 15: Promedio del porcentaje de caucho*

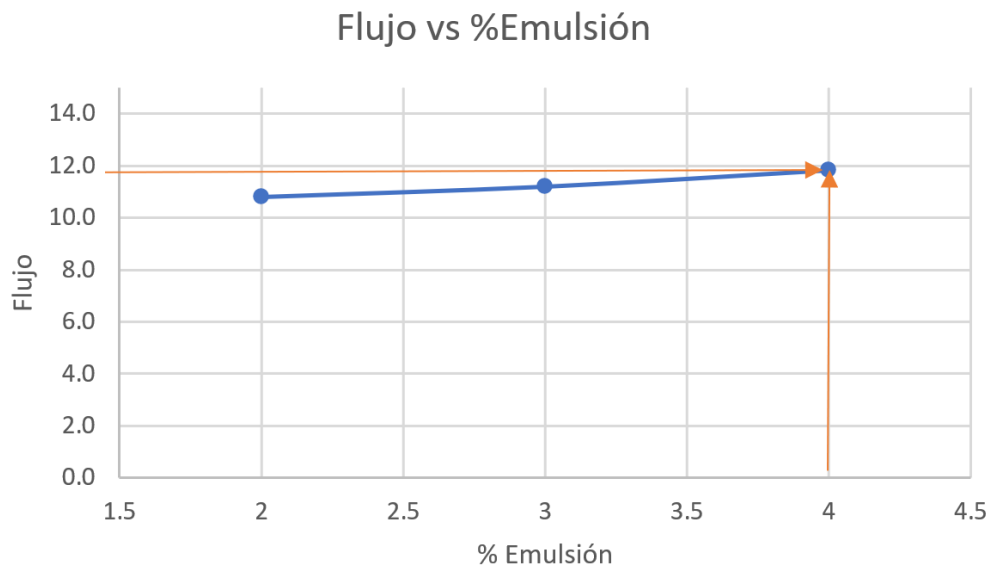
*Fuente: propia*

Al tener un solo valor para cada porcentaje de caucho se puede analizar la estabilidad y flujo



*Imagen 1: Promedio de Estabilidad vs. Emulsión*

*Fuente: Propia*



*Imagen 2: Promedio de flujo vs. Emulsión*

*Fuente Propia*

Usando una mezcla con: 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado) y 2% de caucho proveniente de llantas de avión se obtiene un valor de estabilidad máxima de 1325 lbf con un flujo de 11.8 centésima de pulgada.

**5.3.1.2.- 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado) y 2%, 3% y 4% de caucho proveniente de llantas de avión y arena fina.**

Briqueta	Flujo (centésima de pulgada)	Estabilidad (Lbf)	% Caucho	Promedio Estabilidad	Promedio Flujo	% Arena
10	9.4	1350	2	1146.7	9.6	1
11	10.4	1100				
12	9.1	990				
13	11.1	950	3	943.3	11.3	1.5
14	11.8	940				
15	11	940				
16	13.6	950	4	966.7	13.4	2
17	13	1000				
18	13.6	950				

*Tabla 16: Tabla resumen de estabilidad y flujo de las probetas con porcentaje de caucho y arena*

*Fuente: propia*

Con los datos obtenidos se puede hacer un promedio para cada porcentaje de caucho y arena para obtener un solo valor de flujo y estabilidad.

Briqueta	Flujo (centésima de pulgada)	Estabilidad (Lbf)	% Caucho	% Arena
10,11,12	9.6	1146.7	2	1
13,14,15	11.3	943.3	3	1.5
16,17,18	13.4	966.7	4	2

*Tabla 17: Promedio del porcentaje de caucho y arena*

*Fuente: propia*

Al tener un solo valor para cada porcentaje de caucho y arena se puede analizar la estabilidad y flujo.

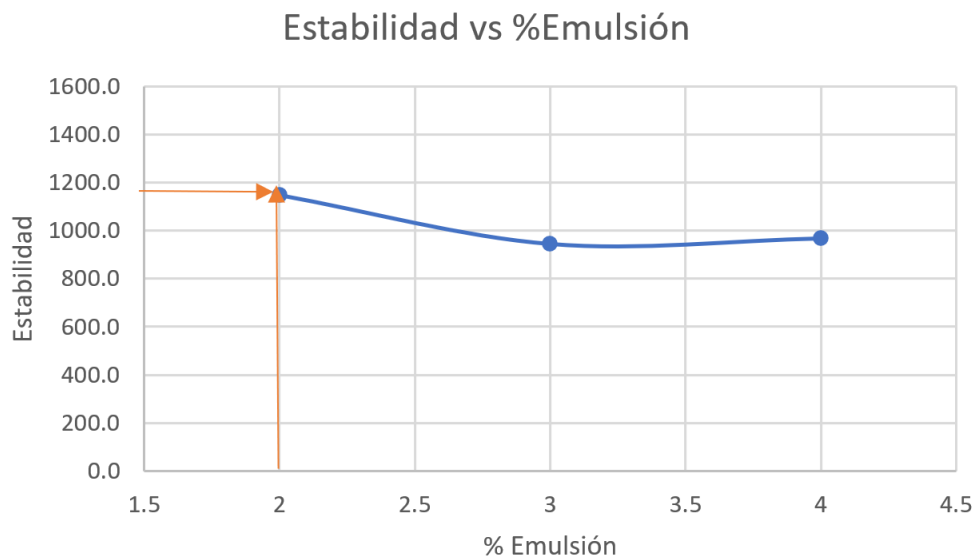


Imagen 3: Estabilidad vs emulsión de las briquetas con porcentajes de caucho y arena

Fuente: propia

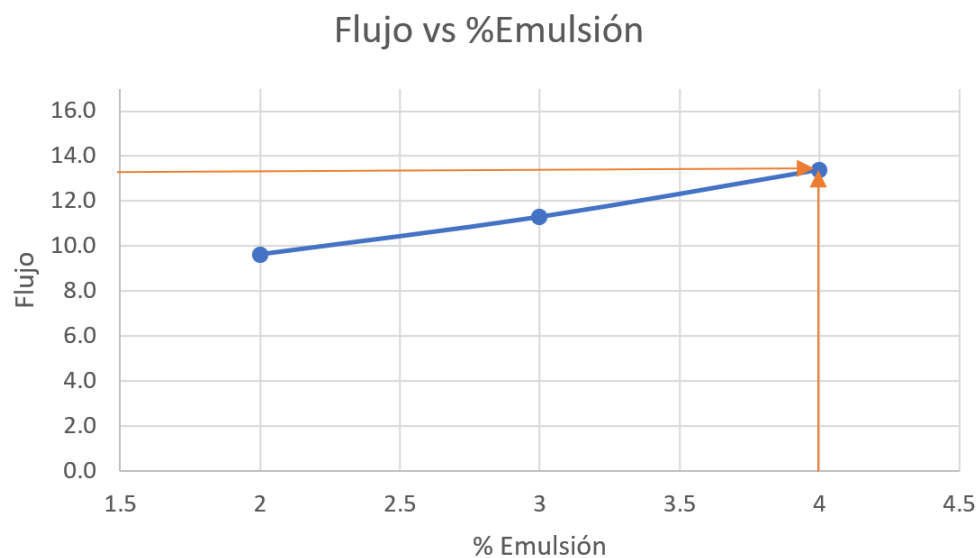


Imagen 4: Flujo vs emulsión de las briquetas con porcentajes de caucho y arena

Fuente: propia

Usando una mezcla con: 4% de Emulsión asfáltica, 4% de agua, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado) y 2% caucho proveniente de llantas de avión y 1% de arena

finalmente se obtiene un resultado óptimo de estabilidad máxima de 1146.7 lbf con un flujo de 13.4 centésima de pulgada.

### 5.3.1.3.- 4% de Emulsión asfáltica, % de agua variable, 900 gramos de RAP (Pavimento de Asfalto Reciclado)

Esta mezcla a comparación de las anteriores no posee un porcentaje de caucho y los valores de estabilidad y flujo fueron graficados con respecto al porcentaje de agua.

Briqueta	Flujo (centésima de pulgada)	Estabilidad (Lbf)	% Agua	Promedio Estabilidad	Promedio Flujo
19	12.5	1597	1	1555	11.5
20	11.2	1520	1		
21	10.9	1547	1		
22	8.8	1486	2	1434	9.3
23	9.2	1376	2		
24	9.8	1440	2		
25	10.2	1359	3	1375	11.1
26	11.3	1312	3		
27	11.9	1454	3		
28	12	1165	4	1153	12.1
29	11.8	1162	4		
30	12.4	1132	4		
31	12.2	1168	5	1120	12.6
32	12.7	1133	5		
33	13	1058	5		

Tabla 18: tabla resumen

Fuente propia

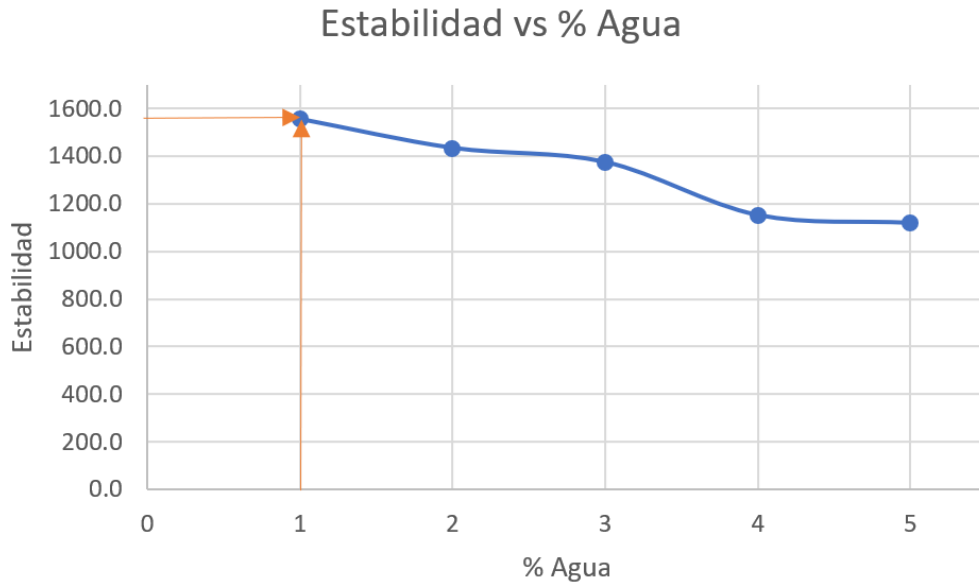
Con los datos obtenidos se puede hacer un promedio para cada porcentaje de agua para obtener un solo valor de flujo y estabilidad.

Briqueta	Flujo (centésima de pulgada)	Estabilidad (Lbf)	% Agua
19,20,21	11.5	1555.0	1
22,23,24	9.3	1434.0	2
25,26,27	11.1	1375.0	3
28,29,30	12.1	1153.0	4
31,32,33	12.6	1120.0	5

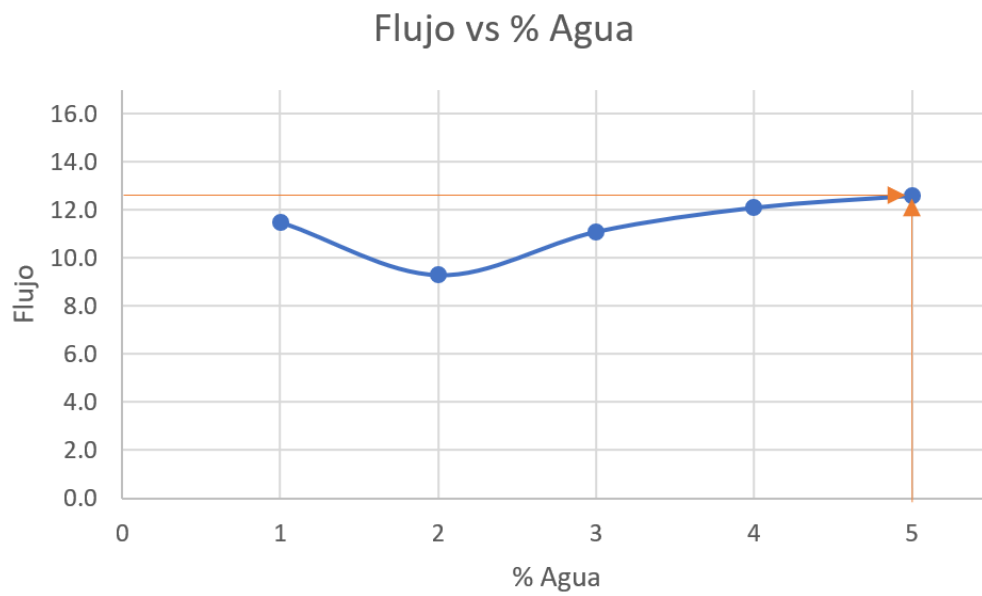
Tabla 19: tabla resumen

Fuente propia

Al tener un solo valor para cada porcentaje de agua se puede analizar la estabilidad y flujo.



*Imagen 5: Estabilidad vs Agua en las briquetas iniciales*  
Fuente propia



*Imagen 6: Estabilidad vs Agua en las briquetas iniciales*  
Fuente propia

Usando una mezcla con: 4% de Emulsión asfáltica, % de agua variable, 900 gramos de RAP  
(Pavimento de Asfalto Reciclado)

La estabilidad máxima es de 1555 lbf con un flujo de 12.6 centésima de pulgada.

Propiedades Mezcla 1	Unidad	Especificación MOP			Verificación
		Tráfico Liviano			
		Valor	MIN.	MAX	Cumple
Estabilidad	Lb	1325	1000	2400	SI
Flujo	pulg/100	11.8	8	16	SI

Tabla 20: Parámetros de verificación según la norma vigente, briquetas grupo 1 (4%E, 4%A, 2% caucho, 900g RAP)

Fuente propia

Propiedades Mezcla 2	Unidad	Especificación MOP			Verificación
		Tráfico Liviano			
		Valor	MIN.	MAX	Cumple
Estabilidad	Lb	1146.7	1000	2400	SI
Flujo	pulg/100	13.4	8	16	SI

Tabla 21: Parámetros de verificación según la norma vigente, briquetas grupo 2 (4%E, 4%A, 2% caucho, 1% arena fina, 900g RAP)

Fuente propia

Propiedades Mezcla 3	Unidad	Especificación MOP			Verificación
		Tráfico Liviano			
		Valor	MIN.	MAX	Cumple
Estabilidad	Lb	1555	1000	2400	SI
Flujo	pulg/100	12.6	8	16	SI

Tabla 22: Parámetros de verificación según la norma vigente, briquetas grupo 3 (4%E, %A variable)

Fuente propia

## Capítulo 6

### 6. Conclusiones y recomendaciones

#### 6.1. Conclusiones:

- La estabilidad obtenida en los tres grupos de briquetas fue usada con el objetivo de estimar el desplazamiento y deformación que va a sufrir la briqueta cilíndrica. Además de encontrar la carga máxima que puede soportar la briqueta de análisis. Por lo tanto, se determinó que dentro de los tres grupos de estudio planteados la mezcla con mejores resultados de estabilidad fue la del primer grupo dejando un valor máximo de 1555 *lbf*. Este valor de estabilidad es aceptable por estar dentro de los límites establecidos en las especificaciones técnicas, lo cual garantiza que la mezcla propuesta, junto a la granulometría usada es apta para el uso en pavimentaciones para tráfico liviano.
- El porcentaje óptimo de polvo de llanta de avión fue del 2%, la mezcla en frío propuesta que funciona con este porcentaje fue la del grupo 1 (4% emulsión, 4% agua, 900 gr RAP, 2% caucho). Los valores de estabilidad y flujo obtenidos fueron de 1325 *lbf* y 10.8 */plg*, respectivamente. Adicional a esto, las probetas del grupo 2 (4% emulsión, 4% agua, 900 gr RAP, 2% caucho y 1% arena) generaron valores de estabilidad de 1146.7 *lbf* y 9.6 */plg* de flujo, al comparar con los valores límites establecidos en las especificaciones técnicas vigentes en el país, se puede concluir que esta última combinación está dentro de los rangos establecidos, es decir, el uso de arena y caucho como filler ha generado buenos resultados y los valores respaldan la hipótesis planteada al inicio de este trabajo de integración curricular.
- Los resultados de estabilidad y flujo obtenidos en las probetas de los grupos 1 y 2 son aceptados por los límites establecidos y están dentro de las especificaciones técnicas, la variación porcentual de estabilidad entre estos dos grupos es de 15.55%, este valor

muestra un incremento en los parámetros de estabilidad lo cual mejora el comportamiento y características de la mezcla.

## **6.2.Recomendaciones:**

- Debido a los resultados de estabilidad obtenidos se determino que la mezcla ideal en base a las especificaciones técnicas es la del tercer grupo. No obstante, para cumplir con el objetivo del ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles se recomienda usar la mezcla asfáltica en frío generada en el segundo grupo, considerando el uso del 2% de polvo de llanta de avión junto al 4% de emulsión CSS- 1H, agregado RAP y el 4% de agua. Debido a que se obtuvieron valores de estabilidad de 1325 *Lbf* y flujo de 10.8 centésimas de pulgada, estos valores están dentro de los límites establecidos en las especificaciones técnicas.
- Con los criterios de evaluación establecidos en las especificaciones técnicas, se recomienda usar la mezcla propuesta en el grupo 3, debido a que considera porcentajes de caucho y arena fina. Si bien es cierto, que los resultados de estabilidad y flujo son inferiores a los obtenidos en la mezcla del grupo 1, se podría usar la mezcla del grupo 3 para dar solución a problemas de espacio generado por la acumulación de toneladas de caucho en las instalaciones del aeropuerto de Quito.
- Se recomienda hacer los ensayos correspondientes al RAP y al caucho, si estos son extraídos de algún lugar diferente, ya que estos valores pueden variar de acuerdo con su procedencia y su almacenamiento.
- A pesar de que en este trabajo no hubo problemas con los porcentajes de caucho seleccionados, para próximas investigaciones se recomienda no sobrepasar el 5 % de caucho en mezclas en frío con RAP, ya que al subir el porcentaje de caucho la estabilidad, empieza a disminuir.

- Se recomienda utilizar emulsiones que cumplan con todos los requisitos especificados en la normativa, ya que esto puede principalmente afectar en términos de adherencia.
- Se debe tener en cuenta que, para utilizar el polvo obtenido de las llantas de caucho, este debe pasar por un proceso de trituración, ya sea trituración mecánica, criogénica, cuchillas de disco o en húmedo.
- Se debe considerar que el RAP al transcurrir el tiempo y al ser almacenado al medio ambiente, puede traer con ello efectos negativos en el rendimiento y la calidad del material, por eso se recomienda, utilizar el material lo antes posible y almacenarlo en bodegas.

## Referencias

ASTM International. (2017). *Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts*.

Obtenido de D244 - 09.

ASTM Institucional. (2010). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens).

Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2015). *Obtención del asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores*. Quito: EPN.

Castro, A., Fuentes, L., & Martínez, G. (2016). *Efecto de la adición del polvo de llanta desechadas en mezclas asfálticas en frío con el 100% de agregados reciclados*. Barranquilla: LATAM-RILEM.

Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. California: Pearson.

IMPTEK, C. (2021). *Productos viales- Ficha técnica*. Quito: IMPTEK- CHOVA del Ecuador S.A.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Obtenido de NTE INEN 696.

Lara, L. (2018). *Guía de prácticas de laboratorio de hormigones*. Quito: PUCE.

Manual Básico de emulsiones asfálticas. (1976). *Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA)*. The Asphalt Institute. Manual MS. 19

Miranda-Arguello, F. (2019). *Mezclas asfálticas con RAP: Pavimentos Asfálticos Reciclados*. Costa Rica: PITRA- LanammeUCR. Obtenido de

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1421/Boletin%201%2020Mezclas%20asf%C3%A1lticas%20con%20RAP.pdf?sequence=1>

MTOP. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Quito: MTOP.

Múnera, J. C. (2017). *Emulsiones asfálticas: concepto, aplicación, clasificación, rompimiento y curado*. San José: Universidad de Costa Rica. Obtenido de

<https://bloglanammeucr.wordpress.com/2022/10/05/emulsiones-asfalticas-concepto-aplicacion-clasificacion-rompimiento-y-curado/>

Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Cataluña: Universidad Politécnica de catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14&isAllowed=y>

PROAS. (s/f). *Mezclas abiertas en frío (basado en el pliego elaborado por ATEB)*. Madrid: CEPASA. Obtenido de [https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/PROAS/Ficheros\\_proas/Mezclas-abiertas-en-frio.pdf](https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/PROAS/Ficheros_proas/Mezclas-abiertas-en-frio.pdf)

Quirola, D., & Reinoso, F. (2017). *Mejoramiento de las características de mezclas asfálticas en frío, mediante la adición de porcentajes de Asfier 211 y 240 en el agua de pre- envuelta*. Quito: PUCE.

Ruiz, D. (2019). *Emulsiones asfálticas, asfaltos modificados, aplicación de métodos de diseño de mezclas asfálticas*. Lima : Universidad de Lima .

The Asphalt Institute. (2020). *Glosario de términos*. Obtenido de <http://www.asphaltinstitute.org/engineering/glossary-of-terms/>

Tagle, A. (2015). *pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos convencionales reciclados en caliente*. Buenos Aires: Comisión permanente del asfalto. Obtenido de <https://cpasfalto.com.ar/wp-content/uploads/2019/11/3-Recomendaciones-CPA-para-Reciclados-en-caliente.pdf>

Talavera, R., Castaño, V., & Martínez, M. (2012). *Emulsiones asfálticas*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte. Obtenido de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/documentotecnico/dt23.pdf>

YANEZ Gustavo, Manual visual, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.