

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



PLAN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**TEMA: OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN
FRÍO UTILIZANDO RAP Y POLVO DE LLANTA DE AVIÓN, KOAMIN12, DEL
AEROPUERTO DE QUITO.**

AUTORES:

JORGE ANTONIO JÁCOME IZA

GUSTAVO ADOLFO TITUAÑA VÁSQUEZ

QUITO 08, MARZO DE 2024

Índice de Tablas

TABLA 1 TABLA 406-9.01.....	29
TABLA 2 LÍMITES-FACTOR K.....	33
TABLA 3 FACTOR F.....	34
TABLA 4 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL FILLER	34
TABLA 5 REQUISITOS DE EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIÓNICAS.....	36
TABLA 6 RESULTADOS DE EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1H.....	41
TABLA 7 CRITERIOS DE DISEÑO DE LA MEZCLA DE ASFALTO Y AGREGADOS EMULSIONADOS.....	43
TABLA 8 PORCENTAJE DE MATERIAL RESPECTO AL RAP 1%.....	46
TABLA 9 PORCENTAJE DE MATERIAL RESPECTO AL RAP 1,5%.....	46
TABLA 10 PORCENTAJE DE MATERIAL RESPECTO AL RAP 2%.....	46
TABLA 11 PORCENTAJE DE MATERIAL RESPECTO AL RAP 2,5%.....	46
TABLA 12 PORCENTAJE DE MATERIAL RESPECTO AL RAP Y EMULSIÓN ASFÁLTICA	47
TABLA 13 PORCENTAJE DE MATERIAL RESPECTO AL RAP, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y POLVO DE LLANTA	47
TABLA 14 PORCENTAJE DE MATERIAL RESPECTO AL RAP, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y ADITIVO KAOMIN 12.....	48
TABLA 15 GRANULOMETRÍA.....	49
TABLA 16 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO.....	51
TABLA 17 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO FINO	51
TABLA 18 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS AGREGADOS	51
TABLA 19 EXTRACCIÓN DE BITUMEN POR EL MÉTODO DE IGNICIÓN.....	52
TABLA 20 PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN PARA EL RAP.....	52
TABLA 21 MUESTRA EN ESTADO SECO GRUPO 1.....	54
TABLA 22 ESTADO SECO 1%.....	57
TABLA 23 ESTADO HÚMEDO 1%	57
TABLA 24 ESTADO SECO 1.5%.....	57
TABLA 25 ESTADO HÚMEDO 1.5 %.....	58
TABLA 26 ESTADO SECO 2%	58
TABLA 27 ESTADO HÚMEDO 2%	58
TABLA 28 ESTADO SECO 2.5%.....	59
TABLA 29 ESTADO HÚMEDO AL 2.5 %.....	59
TABLA 30 MUESTRAS EN ESTADO SECO GRUPO 2	61
TABLA 31 MUESTRAS EN ESTADO HÚMEDO	61
TABLA 32 ESTADO SECO CON EMULSIÓN AL 4.00%.....	63
TABLA 33 ESTADO SECO CON EMULSIÓN AL 4.00%.....	63
TABLA 34 MUESTRA EN ESTADO SECO GRUPO 3.....	64
TABLA 35 MUESTRA EN ESTADO HÚMEDO GRUPO 3	65
TABLA 36 RAP, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y POLVO DE LLANTA (ÓPTIMO 1%) EN ESTADO SECO RESUMEN	66
TABLA 37 RAP, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y ADITIVO KAOMIN 12 EN ESTADO SECO GRUPO 4.....	67
TABLA 38 RAP, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y ADITIVO KAOMIN 12 EN ESTADO HÚMEDO GRUPO 4	67
TABLA 39 RAP, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y ADITIVO KAOMIN 12 EN ESTADO SECO	69
TABLA 40 RAP, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y ADITIVO KAOMIN 12 EN ESTADO HÚMEDO	69
TABLA 41 VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD CON LA NORMATIVA MS-14.....	70

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Curva Granulométrica.....	35
Ilustración 2 Curva Granulométrica RAP.....	50
Ilustración 3 Estabilidad vs % de polvo de llanta.....	60
Ilustración 4 Promedio estabilidad vs mezcla asfáltica.....	70

Contenido

PLAN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR.....	1
--	---

CAPÍTULO I.....	6
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	6
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.3. OBJETIVOS	7
1.3.1. OBJETIVO GENERAL:	8
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	8
1.4. HIPÓTESIS.....	8
CAPÍTULO II.....	8
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	8
2.1. RAP (Recycled Asphalt Pavements).....	9
2.1.1. Definición	9
2.1.2. Propiedades	9
2.1.3. Utilidad	10
2.1.4. Granulometría del RAP	11
2.1.5. Evaluación del contenido de asfalto en el RAP	12
2.1.6. Gravedad específica (SH) Secado al horno, en condición saturada y superficialmente seca SSS y gravedad específica aparente	12
2.2. Mezcla asfáltica en frío.....	13
2.2.1. Definición	13
2.2.2. Propiedades	13
2.3. Demanda teórica de asfalto residual	15
2.4. Contenido óptimo de agua	15
2.5. Emulsión Asfáltica	16
2.5.1. Definición	16
2.5.2. Historia de las emulsiones asfálticas:	16
2.5.3. Ingredientes	17
2.5.4. Tipos	17
2.5.5. Rotura de la emulsión	18
2.6. Aditivo de Adherencia	19
2.6.1. Definición	19
2.7. Residuos sólidos en mezclas asfálticas	20
2.7.1. Polvo de llanta de avión	20
2.8. Método de incorporación de polvo de llanta de avión en mezcla asfáltico:.....	21
2.6.1. Incorporación en seco	21
2.6.2. Incorporación con el asfalto	22
2.6.3. Incorporación mediante un equipo específico	22
2.6.4. Incorporación en múltiples etapas	22

2.9.	Desempeño de la mezcla asfáltica en frío	22
2.9.1.	Resistencia a la compresión	22
2.10.	Ensayo Marshall	22
2.11.	Caracterización volumétrica.....	23
2.11.1.	Gravedad específica máxima teórica a 25°C (Gmm)	23
2.11.2.	Gravedad específica bulk (Gmb)	24
2.11.3.	Gravedad específica aparente (Gsa)	24
2.11.4.	Contenido de vacíos llenos de aire (VFA)	25
CAPÍTULO III		25
3.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y ENSAYOS	25
3.1.	Caracterización agregados	25
3.1.1.	Muestreo en campo (ASTM D75 – INEN 695)	26
3.1.2.	Análisis granulométrico (ASTM C136 - MOP 2002)	26
3.1.3	Gravedad específica de los agregados (ASTM C 127- ASTM C 128)	29
3.1.4.	Gravedad Especifica Neta de los Agregados (Gsa, Gse, Gsb)	32
3.1.5.	Extracción cuantitativa de aglutinante de asfalto por el método de ignición (Aashto T308-08)	32
3.2.	Determinación de porcentaje de emulsión teórico	33
3.3.	Ensayos realizados al polvo de llanta (filler)	34
3.2.1	Análisis granulométrico del filler (ASTM D 546)	34
3.4.	Ensayos realizados a la emulsión asfáltica (Css-1h)	35
CAPÍTULO IV		42
4.	DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA:.....	42
4.1.	Diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall	42
4.2.	Estabilidad y fujó	42
4.3.	Elaboración de briquetas	43
4.3.1.	Rap – Polvo de llanta (1%, 1,5%, 2% y 2,5%) – Emulsión – aditivo.....	45
4.3.2.	Rap – Emulsión	47
4.3.3.	Rap – Polvo de llanta (porcentaje optimo) – Emulsión	47
4.3.4	Rap – Emulsión – aditivo.....	47
4.4.	Gravedad especifica Bulk	48
4.5.	Procedimiento ensayo Marshall	48
CAPITULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS		49
5.	Resultados.....	49
5.1.	Granulometría	49
5.2.	Gravedad específica de los agregados	50
5.3.	Extracción de bitumen	52
5.4.	Porcentaje óptimo de emulsión para el RAP.....	52

6. Conclusiones.....	71
7. Recomendaciones.....	72
Bibliografía.....	73
ANEXOS	Error! Bookmark not defined.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

TEMA

Optimización del Diseño de Mezclas Asfálticas en Frío Utilizando RAP y Polvo de Llanta de Avión, Koamin12, del Aeropuerto de Quito.

1.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El actual programa de mantenimiento vial implementado por Quiport produce una cantidad considerable de polvo de llanta y RAP, lo que ocasiona problemas de espacio y contaminación en las instalaciones. En el caso particular del Aeropuerto de Quito, la generación anual de una gran cantidad de RAP sin un destino definido puede tener consecuencias negativas a largo plazo, como la contaminación de suelos y aguas subterráneas.

Con el propósito de abordar esta problemática de manera efectiva, se plantea la utilización de una mezcla asfáltica en frío que incorpora RAP, polvo de llanta, aditivo de adherencia y emulsión asfáltica en las vías secundarias cercanas al aeropuerto. Esta iniciativa busca no solo reutilizar materiales reciclados, reducir costos y promover la sostenibilidad, sino también cumplir con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 11, referente a ciudades y comunidades sostenibles. En Ecuador, la gestión inadecuada de grandes volúmenes de RAP plantea desafíos ambientales debido a la falta de un plan estructurado para su reutilización.

Quiport (2021), menciona que esta iniciativa no solo representa una solución innovadora para el mantenimiento de las vías, sino que también refleja el compromiso de la corporación con el desarrollo sostenible y la preservación del medio ambiente. De esta manera, se busca integrar prácticas sostenibles en las operaciones del aeropuerto, contribuyendo a la construcción de una ciudad más sostenible y segura para sus habitantes y

visitantes.

Además, se destaca que la producción convencional de mezclas asfálticas en caliente conlleva un elevado consumo energético, mientras que la incorporación de RAP en mezclas en frío puede resultar en una reducción significativa de costos y del impacto ambiental.

"El uso de RAP y polvo de llanta de avión en la pavimentación puede tener un impacto significativo en la reducción de residuos y en la mejora de la calidad ambiental. Estudiar y medir el desempeño de estos materiales en el proyecto puede generar información valiosa para futuras iniciativas sostenibles en el sector de la construcción" Daza (2021).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las preocupaciones por la conservación del medio ambiente a nivel mundial hacen que las mezclas en frío representen una alternativa viable pues la producción de estas mezclas implica un ahorro en el consumo de energía, así como una reducción en la generación de vapores tóxicos y polvo.

El pavimento asfáltico reciclado tiene como ventaja la versatilidad ya que permite usar una gran variedad de agregados empujados y se puede usar en diferentes condiciones ambientales.

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 a su vez añadir polvo de llanta de avión; adicionalmente, a estos materiales se añade un aditivo.

El fin es encontrar el porcentaje adecuado de polvo de llanta de avión para una mezcla asfáltica en frío a través del ensayo de Marshall, la cual use materiales totalmente reciclados, aumentando el aditivo de adherencia KAOMIN 12, para lograr resultados óptimos de estabilidad.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL:

Desarrollar una mezcla asfáltica en frío utilizando RAP, añadiendo polvo de llanta de avión en diferentes porcentajes (1%, 1.5%, 2%, y 2.5%) y un aditivo de adherencia KAOAMIN 12, a través del ensayo Marshall con el fin de evidenciar resultados en estabilidad.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar el porcentaje óptimo de polvo de llanta de avión de entre todos los porcentajes propuestos que maximice la estabilidad de la mezcla asfáltica en frío, mediante el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo Marshall.
- Evaluar el impacto del aditivo de adherencia KAOAMIN 12 en la estabilidad de la mezcla asfáltica en frío, con los diferentes porcentajes del polvo de llanta de avión.
- Analizar la combinación óptima de porcentaje de RAP, polvo de llanta de avión y aditivo de adherencia para establecer el tipo de vía según los resultados obtenidos.

1.4. HIPÓTESIS

Al incorporar RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado), polvo de llanta de avión y el aditivo de adherencia Koamin12 en el diseño de mezclas asfálticas en frío, se espera lograr una combinación que mejore la durabilidad, resistencia y sostenibilidad de las vías pavimentadas cerca del Aeropuerto de Quito.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

ANTECEDENTES O MARCO REFERENCIAL

El empleo de polvo de llanta en las mezclas asfálticas, especialmente en las variedades en frío, ha ido desarrollándose de manera gradual a lo largo del tiempo en respuesta a preocupaciones ambientales y de sostenibilidad. Su inicio no puede ser atribuido a una única entidad, sino que ha surgido como resultado de diversos esfuerzos y avances en la industria de la construcción de

carreteras y la gestión de residuos. Sin embargo, el interés por utilizar polvo de llanta en mezclas asfálticas ha ganado importancia durante las últimas décadas del siglo XX. Esto se debe, en parte, al creciente volumen de neumáticos desechados, lo que ha generado la necesidad de encontrar métodos más sostenibles para manejar estos residuos y minimizar su impacto ambiental. A continuación, se mencionan los principales estudios que serán referenciados en este proyecto de integración curricular:

- Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores.
- Efecto de la adición del polvo de llantas desechadas en mezclas asfálticas en frío con el 100% de agregados reciclados.
- Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas

2.1. RAP (Recycled Asphalt Pavements)

2.1.1. Definición

El término RAP hace referencia al material de pavimento reprocessado que sirve para la construcción de carreteras que contienen asfalto y agregados. Estos materiales se generan cuando se retiran pavimentos asfálticos para operaciones de reconstrucción, repavimentación y rehabilitación o para obtener acceso a servicios públicos enterrados (Rout, Biswas, Shubham, & Sinha, 2023).

El RAP como material reciclado se obtiene después del fresado o remoción del pavimento asfáltico existente para diversos procesos de reparación y reconstrucción. En ocasiones, la producción masiva de estos residuos termina en los vertederos. Este material es utilizado en varias formas fraccionarias, como fracciones gruesas, fracciones finas y fracciones mixtas para la producción de mezcla de concreto (Rout, Biswas, Shubham, & Sinha, 2023).

2.1.2. Propiedades

Según Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, el RAP consiste en un material que ha experimentado un proceso de envejecimiento y endurecimiento progresivo durante la vida

de servicio producto de diversos mecanismos que definen las características del ligante (1996). Estos procesos corresponden a:

- Oxidación por reacción de difusión entre la carpeta y el oxígeno en el aire.
- Volatilización por evaporación de los componentes más ligeros, especialmente durante la construcción.
- Polimerización por reacción química de componentes moleculares.
- Tixotropía debido a la formación de una estructura dentro de la carpeta de asfalto durante un largo período de tiempo.
- Sinéresis debido a la exudación de finos componentes aceitosos.
- Separación a través de la eliminación de componentes grasos, resinas y asfaltenos por agregados absorbentes.

Además, “la combinación de ligante virgen con ligante envejecido puede conducir a la formación de conglomerados entre el agregado y el material de relleno (filler) lo cual afecta los procesos de mezclado debido a la dificultad de penetración del asfalto virgen al ser incorporado” (Oliver, 2001).

Así mismo, se ha comprobado “existe un efecto del precalentamiento del RAP previo al mezclado, lo cual incide sobre el tiempo de mezclado entre asfaltos vírgenes y envejecidos y el grado de desempeño del ligante combinado” (Stephens, Mahoney, & Dippold, 2001).

2.1.3. Utilidad

El RAP se puede utilizar según sus diferentes fracciones en “pavimentos de hormigón compactado con rodillo, pavimentos de hormigón de cemento Portland, pavimentos de hormigón permeable, adoquines prefabricados de hormigón, bloques, mortero de cemento y hormigón autocompactante” (Rout, Biswas, Shubham, & Sinha, 2023).

En 2018, Singh, Ransinchung, Debbarma, & Kumar afirman que el uso de RAP reduce la necesidad de agregados tradicionales; por lo tanto, el costo de transporte disminuye, lo que

resulta en una disminución del costo del proyecto para producir el concreto en los sitios de construcción.

La mayoría de las investigaciones sugieren que del RAP grueso es adecuado para pavimentos de hormigón. Se ha informado que “las ventajas de la inclusión en el pavimento de concreto mejoran la trabajabilidad, las propiedades de tenacidad y la congelación-congelación-descongelación” (Singh, Ransinchung, Debbarma, & Kumar, 2018).

Así mismo, el uso de RAP almacenado mejora la estética de las carreteras debido a una disminución en las cantidades de RAP que se mantienen al borde de estas (Miranda & Aguiar, 2019).

Varios estudios se han centrado en determinar los materiales alternativos que se pueden utilizar en reemplazo del cemento y la eliminación de los desechos de la industria, cuyos beneficios potenciales se pueden obtener a través de los procesos de rechazo, reciclaje y reducción (Rout, Biswas, Shubham, & Sinha, 2023).

2.1.4. Granulometría del RAP

Según el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INV, 2013) "El ensayo de granulometría de los agregados se realiza para determinar la distribución de tamaños de las partículas que componen el RAP, lo que permite evaluar su idoneidad para su uso en mezclas asfálticas recicladas" (INV E 213-13, p. 1). Además, se debe considerar que el procedimiento trata de separar las partículas del RAP en tamaños diferentes a través de un proceso de tamizado y busca determinar la cantidad en peso que pasa por cada tamiz (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

"La granulometría del RAP es crucial para garantizar una adecuada trabajabilidad, compactación y resistencia de la mezcla asfáltica reciclada. Una distribución deficiente de tamaños puede afectar negativamente las propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla" (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 2009, pág. 448).

2.1.5. Evaluación del contenido de asfalto en el RAP

El contenido de asfalto en el RAP es un parámetro clave para el diseño de mezclas asfálticas recicladas. Así, "el ensayo de contenido de asfalto en el RAP se realiza para determinar la cantidad de ligante asfáltico presente en el material reciclado, lo que permite dosificar adecuadamente la mezcla" (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

Además, se debe considerar que "el procedimiento consiste en extraer el ligante asfáltico del RAP mediante disolventes y calcular su contenido en porcentaje respecto al peso total de la muestra" (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

Por otra parte, "el contenido de asfalto en el RAP puede variar significativamente dependiendo de su fuente y proceso de producción. Un exceso o deficiencia de ligante en la mezcla reciclada puede comprometer su desempeño y durabilidad" (Mallick & El-Korchi, 2018, pág. 126).

2.1.6. Gravedad específica (SH) Secado al horno, en condición saturada y superficialmente seca SSS y gravedad específica aparente

Estos parámetros son importantes para la caracterización de los agregados y el diseño de mezclas asfálticas. Según Garnica et al. (2005), "La gravedad específica (SH) se define como la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado a temperatura indicada y la masa en el aire de igual volumen de agua destilada a la misma temperatura" (p. 105).

"La gravedad específica saturada y superficialmente seca (SSS) se refiere a la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado saturado y superficialmente seco a una temperatura indicada y la masa en el aire de igual volumen de agua destilada a la misma temperatura" (Garnica, Gómez, & Sesma, 2005, pág. 106).

"La gravedad específica aparente es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado a una temperatura indicada y la masa en el aire de igual volumen de agua

destilada a la misma temperatura, excluyendo los poros permeables al agua" (Garnica, Gómez, & Sesma, 2005, pág. 107).

2.2. Mezcla asfáltica en frío

2.2.1. Definición

Es un tipo de mezcla bituminosa (es un material compuesto, que consiste en agregados pétreos como: grava, arena y piedra triturada) utilizada en la construcción y mantenimiento de carreteras que se produce y aplica a temperatura ambiente o ligeramente caliente, sin necesidad de calentar el asfalto como en las mezclas asfálticas en caliente. Estas mezclas generalmente contienen emulsiones asfálticas o agentes adhesivos para ayudar a mantener unidos los agregados (Asphalt Institute, 1994).

Este proceso no requiere ningún calentamiento agregado, lo que hace que la mezcla asfáltica en frío sea económico y relativamente libre de contaminación (Al-Busaltan, 2012).

En la actualidad, la mezcla asfáltica en frío se utiliza en gran medida para obras menores de construcción y reparación. La temperatura de fabricación de la mezcla asfáltica en frío está en el rango de 0 a 40 °C. Debido a la baja temperatura de producción, no requiere calentamiento, lo que resulta en una cantidad significativa de ahorro de energía; además, no necesitan gran inversión en equipos y se puede usar en áreas remotas tanto en construcción inicial como en pavimentos reciclados (Jain & Singh, 2021).

2.2.2. Propiedades

2.2.2.1. Mezcla con emulsión en planta

"Las mezclas asfálticas en frío se elaboran con emulsiones asfálticas en plantas especializadas. Este proceso evita el calentamiento de los agregados y el ligante, lo que reduce el consumo de energía y las emisiones contaminantes" (Gallego, 2010, pág. 231)

"La producción de mezclas en frío con emulsión asfáltica se realiza a temperaturas ambientes, lo que facilita su transporte y colocación. Sin embargo, requieren un período de

curado para que la emulsión rompa y se desarrollen las propiedades mecánicas adecuadas" (Gallego, 2010, pág. 232).

"Las plantas de mezclas en frío con emulsión asfáltica permiten un mejor control de la composición y calidad de la mezcla en comparación con los métodos de reciclaje in situ. Sin embargo, su uso está limitado por la necesidad de un período de curado prolongado" (Instituto Mexicano del Transporte, 2003, pág. 235).

2.2.2.2. Componente de mezcla asfáltica en frío

Como cualquier otra mezcla asfáltica, los componentes principales de la mezcla asfáltica en frío son los agregados y el material aglutinante. El componente adicional que lo hace diferente de otras mezclas asfálticas es el agua y el solvente (Kamil, y otros, 2021).

2.2.2.3. Diseño de mezcla en frío

El diseño de mezcla en frío se procesa a temperatura ambiente, mientras que el diseño de mezcla en caliente generalmente se realiza para una temperatura de mezcla y compactación de 140 °C. En el caso del diseño de mezcla en frío, la temperatura de diseño suele oscilar entre 0 y 40 °C. Los métodos de diseño de mezclas asfálticas varían, a nivel mundial como en EE.UU., el método Superpave está ampliamente implementado, en Europa y países asiáticos, se utiliza el método Marshal (Kamil, y otros, 2021).

2.2.2.4. Rendimiento de la mezcla asfáltica en frío

Hay muchos beneficios ambientales y económicos de la mezcla asfáltica en frío sobre la mezcla asfáltica caliente. La mezcla asfáltica en frío se utiliza generalmente en forma de asfalto reciclado en frío para el mantenimiento y otros trabajos de construcción menores debido a los problemas asociados con su menor estabilidad y mayores vacíos de aire. Los parámetros que afectan el rendimiento de la mezcla en frío son; el grado y la función del aglutinante base, el material vacío combinado, el tiempo de curado y las características del agregado (Kamil, Ruddock, & Atherton, 2016).

2.2.2.5. Curado de mezcla asfáltica en frío

La mezcla asfáltica convencional alcanza su máxima resistencia dentro de las 24 horas posteriores a la construcción, mientras que la de mezcla asfáltica en frío requiere tiempo adicional para alcanzar su máxima resistencia. El tiempo requerido por la mezcla asfáltica en frío para alcanzar su máxima resistencia se denomina tiempo de curado de mezcla asfáltica en frío. Durante el proceso de curado, el agua presente en la mezcla fría se evapora. A medida que el agua se evapora, el aglutinante presente en la emulsión alcanza sus propiedades físicas originales y su resistencia al agua (Kamil, y otros, 2021).

2.3. Demanda teórica de asfalto residual

Hace referencia a la cantidad de ligante asfáltico que se requiere para cubrir completamente la superficie de los agregados en una mezcla asfáltica.

"La demanda teórica de asfalto residual se calcula a partir de la superficie específica de los agregados, la cual depende de su granulometría y propiedades superficiales.

Esta demanda teórica representa la cantidad mínima de ligante necesaria para recubrir completamente los agregados" (National Asphalt Pavement Association, 2016).

"La demanda teórica de asfalto residual es un parámetro de referencia utilizado en el diseño de mezclas asfálticas, pero no determina el contenido óptimo de ligante, el cual debe ajustarse en función de los requisitos de desempeño y las propiedades volumétricas deseadas" (National Asphalt Pavement Association, 2016).

2.4. Contenido óptimo de agua

Este tema trata sobre la cantidad de agua necesaria para alcanzar la máxima densidad y trabajabilidad en una mezcla asfáltica en frío elaborada con emulsión.

Según Rodrigues et al. (2013), "el contenido óptimo de agua en una mezcla asfáltica en frío con emulsión es crucial, ya que influye directamente en la trabajabilidad, compactación y curado de la mezcla" (p. 105).

"Un exceso de agua en la mezcla puede provocar segregación y dificultar la compactación, mientras que un contenido deficiente puede resultar en una mezcla seca y poco trabajable" (Rodrigues, Gomes, & Lobo, 2013, pág. 319).

"El contenido óptimo de agua se determina mediante pruebas de compactación y densidad en muestras de mezcla asfáltica en frío con diferentes contenidos de agua, seleccionando el valor que permita alcanzar la máxima densidad seca" (Instituto Mexicano del Transporte, 2003, pág. 78).

2.5. Emulsión Asfáltica

2.5.1. Definición

Es una combinación de asfalto y agua estabilizada mediante un agente emulsionante. Se encuentra en estado líquido y se caracteriza por su no contaminación, así como por su excelente durabilidad y adherencia a diferentes tipos de áridos. Esta emulsión se emplea comúnmente en aplicaciones como riegos de liga o slurrys (lechadas asfálticas). La designación "CCS-1h" hace referencia a su propiedad de quiebre lento.

2.5.2. Historia de las emulsiones asfálticas:

Para complementar la definición es importante considerar algo de la historia de las emulsiones asfálticas. Así tenemos algunos teóricos que han estudiado este tema a través de los años:

Según Mallik y Delmar (1997) "Las emulsiones asfálticas se han utilizado desde principios del siglo XX. Una de las primeras aplicaciones registradas fue en 1903, cuando se utilizaron para sellar caminos en California" (p. 3).

"En 1922, la empresa Huasteca Petroleum Company en México desarrolló un proceso para producir emulsiones asfálticas, lo que permitió su uso generalizado en la construcción de carreteras" (Mallik & Davidon, 1997, p. 4).

"A finales de la década de 1960, se introdujeron nuevas técnicas para la producción de emulsiones asfálticas, lo que mejoró su calidad y estabilidad. Esto permitió el desarrollo de nuevas aplicaciones en la construcción de carreteras y el mantenimiento de pavimentos" (Instituto Mexicano del Transporte, 2003, pág. 12).

2.5.3. Ingredientes

- “Asfalto: el cemento asfáltico es el ingrediente básico de una emulsión, y en la mayoría de los casos, constituye el 55 al 70 por ciento de la misma” (Albornoz, 2014).
- “Agua: ella humedece y disuelve; se adhiere a las demás sustancias, y modera las reacciones químicas” (Albornoz, 2014).
- “Agentes emulsificantes: las propiedades de una emulsión asfáltica dependen principalmente de la química usada como emulsificante, esa química es llamada Surfactante, lo que determina que la emulsión sea clasificada como Aniónica, Catiónica ó No iónica” (Albornoz, 2014).

2.5.4. Tipos

Según Rodríguez, Castaño, & Martínez (2001), las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de emulgente usado. En este caso se puede mencionar dos tipos, aniónicas y catiónicas:

- Emulsiones Aniónicas: En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga negativa (Rodríguez, Castaño, & Martínez, 2001).
- Emulsiones Catiónicas: En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga positiva (Rodrigues, Gomes, & Lobo, 2013).

Respecto a la estabilidad de las emulsiones asfálticas, éstas se pueden clasificar en los siguientes tipos (Rodríguez, Castaño, & Martínez, 2001):

- De Rompimiento Rápido: Estas se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos (con excepción de la emulsión conocida como ECR-60), la cual no se debe utilizar en la elaboración de estas últimas (Rodríguez, Castaño, & Martínez, 2001).
- De Rompimiento Medio: Estas normalmente se emplean para carpetas de mezcla en

frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos es menor o igual al 2%, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobre carpetas (Rodríguez, Castaño, & Martínez, 2001).

- De Rompimiento Lento: Estas se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas (Rodrigues, Gomes, & Lobo, 2013).
- Para Impregnación: Estas se utilizan para impregnaciones de sub-bases y/o bases hidráulicas (Rodrigues, Gomes, & Lobo, 2013).
- Super Estables: Estas se emplean en la estabilización de materiales y en la recuperación de pavimentos (Rodríguez, Castaño, & Martínez, 2001).

2.5.5. Rotura de la emulsión

La rotura de la emulsión asfáltica es un proceso crucial en la aplicación de mezclas asfálticas en frío, ya que determina la adherencia del ligante a los agregados y el desarrollo de las propiedades mecánicas deseadas. Según Gallego (2010) "La rotura de la emulsión asfáltica es el proceso mediante el cual las partículas de asfalto, inicialmente dispersas en una fase acuosa, se unen formando una película continua sobre la superficie de los agregados" (p. 214).

Como menciona el Manual de Emulsiones Asfálticas del Instituto Mexicano del Transporte (2003) "La rotura de la emulsión asfáltica puede ocurrir por diversos mecanismos, como la evaporación del agua, la absorción por los agregados, la aplicación de un agente químico o cambios en el pH del medio" (p. 45).

Los factores que influyen en la rotura de la emulsión son varios, por ejemplo "la naturaleza y tamaño de los agregados, la composición de la emulsión, las condiciones ambientales y la energía de compactación son factores clave que determinan la velocidad y eficacia de la rotura" (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 2009, pág. 580).

Por su parte, Rodrigues et al. (2013) indican que "una rotura adecuada de la emulsión es esencial para garantizar una buena adhesividad entre el ligante y los agregados, lo que a su

vez afecta las propiedades mecánicas y la durabilidad de la mezcla asfáltica en frío" (p. 92).

2.6. Aditivo de Adherencia

2.6.1. Definición

Kaomin 12 es una mezcla de aminas que se utiliza en la formulación o de forma directa como aditivo para mezcla en frío y/o caliente en donde se requiere mejorar la adhesividad de los agregados con el asfalto. Este se puede agregar en forma directa o formulando (KAOMIN, 2019).

Si bien, no es posible obtener información extensa sobre el aditivo Kaomin 12, se entrega al lector información sobre los aditivos de adherencia de manera general, es importante conocer que "los aditivos de adherencia son compuestos químicos que se agregan a las emulsiones asfálticas para mejorar la adherencia entre el ligante y los agregados, lo que aumenta la resistencia al desprendimiento y la durabilidad de la mezcla" (Instituto Mexicano del Transporte, 2003, pág. 61).

"Los aditivos de adherencia más comunes son las aminas, los compuestos orgánicos de diamino compuestos y los agentes tensioactivos. Estos aditivos actúan reduciendo la tensión superficial del ligante y mejorando su mojabilidad sobre los agregados" (Gallego, 2010, pág. 219).

En cuanto a las ventajas del uso de los aditivos de adherencia se conoce que mejora de manera significativa "la resistencia al desprendimiento de las mezclas asfálticas, especialmente en condiciones de humedad y altas temperaturas" (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 2009, pág. 584).

Por otro lado, algunas investigaciones han determinado que "el uso excesivo de aditivos de adherencia puede afectar negativamente las propiedades reológicas del ligante y provocar un envejecimiento prematuro de la mezcla asfáltica" (Instituto del Asfalto, 1989, pág. 198).

2.7. Residuos sólidos en mezclas asfálticas

"El uso de residuos sólidos como parte de los agregados en las mezclas asfálticas se ha investigado ampliamente en los últimos años, buscando desarrollar tecnologías más sostenibles y aprovechar materiales que normalmente se desechan" (Montejo, 2002, pág. 289).

"La incorporación de residuos sólidos en mezclas asfálticas puede reducir los costos de construcción y contribuir a la conservación de los recursos naturales. Sin embargo, es necesario evaluar cuidadosamente las propiedades de los materiales y realizar ensayos de desempeño para garantizar la calidad del pavimento" (Rodrigues, Gomes, & Lobo, 2013, pág. 67).

Además; es importante considerar que "algunos de los residuos sólidos que se han utilizado en mezclas asfálticas incluyen: neumáticos triturados, vidrio molido, cenizas volantes, escorias de altos hornos, entre otros. Su uso adecuado puede mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del pavimento" (Montejo, 2002, pág. 290). Para efectos de esta investigación se utilizará el polvo de llanta de avión

2.7.1. Polvo de llanta de avión

2.7.1.1. Definición

Una llanta de avión es una rueda diseñada específicamente para aeronaves, que proporciona soporte y permite el desplazamiento del avión en la pista de aterrizaje y durante el despegue. Estas llantas están construidas con materiales y tecnologías especiales para soportar las condiciones extremas de carga, velocidad y temperatura a las que están expuestas durante el ciclo de vuelo de la aeronave (Crane & Dale, 2010).

Federal Aviation Administration (FAA), en 2008 se menciona que: "Los componentes principales de una llanta de avión incluyen la carcasa, el cinturón de acero, el talón, el aro de montaje, el relleno de aire, la banda de rodadura y la cubierta protectora.

Estos elementos trabajan en conjunto para proporcionar la resistencia, durabilidad y capacidad de soporte necesarias para operar de manera segura y eficiente en el entorno aeroportuario”.

2.7.1.2. Condiciones

El polvo de caucho empleado para mejorar las propiedades del cemento asfáltico debe cumplir ciertas especificaciones que se encuentran establecidas en la norma NTE INEN 2680:2013 (NTE INEN 2680, 2013).

La norma establece los siguientes puntos:

- El caucho reciclado debe contener menos del 0.75 % de humedad en peso y libre de flujo. La gravedad específica de este caucho debe ser de 1.15 ± 0.05 .

- El caucho reciclado no debe contener partículas visibles de metales no ferrosos y no más de 0.01 % en peso de partículas de metales ferrosos.

- Se recomienda que todas las partículas de caucho tengan un tamaño capaz de pasar por el tamiz de 2.36 mm (No. 8) Además, es necesario evaluar la degradación del polvo de caucho a la temperatura de ensayo (175 °C) (NTE INEN 2680, 2013).

2.8. Método de incorporación de polvo de llanta de avión en mezcla asfáltico:

La incorporación del filler o polvo de llanta de avión en una mezcla asfáltica es un paso importante en el proceso de producción. El filler se utiliza para mejorar ciertas propiedades de la mezcla, como la resistencia, la durabilidad y la trabajabilidad. Existen varios métodos para incorporar el filler en la mezcla asfáltica.

2.6.1. Incorporación en seco

Antes de la incorporación del asfalto, el filler se agrega directamente a los agregados pétreos. Esto permite que el polvo de llanta de avión se distribuya uniformemente en la mezcla seca. Las plantas de mezcla discontinua usan esta técnica con frecuencia (Val & Kraemer, 2004).

2.6.2. Incorporación con el asfalto

El polvo de llanta de avión se puede agregar directamente al asfalto caliente antes de incorporarlo a los áridos. Esto permite una buena dispersión del filler en el ligante asfáltico (MS, 2001).

2.6.3. Incorporación mediante un equipo específico

Algunos laboratorios cuentan con equipos especiales, tales como tolvas de alimentación de filler o también conocidos como sistemas de inyección, que permiten incorporar el polvo de llanta de avión de manera controlada y precisa en la mezcla asfáltica (Garnica & Sesma, Mezclas asfálticas y firmes. , 2005).

2.6.4. Incorporación en múltiples etapas

En algunos casos, se puede dividir la adición del polvo de llanta de avión en etapas del proceso de mezclado para lograr una mejor dispersión y distribución en la mezcla (Montejo, Ingeniería de pavimentos para carreteras. , 2002).

2.9. Desempeño de la mezcla asfáltica en frío

2.9.1. Resistencia a la compresión

“La resistencia a la compresión de las mezclas asfálticas en frío aumenta con el tiempo de curado debido al desarrollo de la rigidez y la ganancia de resistencia del sistema emulsión-cemento. Además, se encontró que el uso de aditivos mejoraba significativamente la resistencia a la compresión en comparación con las mezclas sin aditivos” (Malekmohammadi, Ameri, & Vamegh, 2016).

2.10. Ensayo Marshall

"El método Marshall es un procedimiento empírico que se ha utilizado durante más de 60 años en el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Este método cubre el rango completo de tamaños de agregados utilizados en la construcción de pavimentos, desde mezclas densas hasta abiertas" (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 2009, pág. 109)

"El método Marshall consiste en calentar la mezcla asfáltica y compactarla con un martillo de peso y altura de caída específicos en un molde cilíndrico. Posteriormente, se realizan ensayos sobre las muestras compactadas para determinar la estabilidad, flujo, densidad y vacíos" (García, 2018, p. 247).

Es regulado por las normas ASTM D486, ASTM D4123 y MOP-001F-2002 405, es una prueba de laboratorio ampliamente utilizada para evaluar las propiedades de las mezclas asfálticas, particularmente su resistencia y estabilidad ante cargas repetidas y variaciones de temperatura. Fue desarrollado por Francis H. Ray Marshall en la década de 1930 y es esencial en la industria de la construcción de carreteras y pavimentos.

2.11. Caracterización volumétrica

2.11.1. Gravedad específica máxima teórica a 25°C (Gmm)

Esta gravedad representa la gravedad específica de una mezcla asfáltica sin vacíos de aire, "la Gmm se calcula a partir de las gravedades específicas y las proporciones de los componentes de la mezcla asfáltica (agregados, asfalto y aditivos), suponiendo una masa unitaria sin vacíos de aire" (National Asphalt Pavement Association, 2016).

Gmm se entiende como un parámetro crucial para identificar las propiedades volumétricas de la mezcla; así también, los vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y el contenido de asfalto efectivo (National Asphalt Pavement Association, 2016).

"La determinación de la gravedad específica máxima teórica (Gmm) es un ensayo fundamental para el diseño de mezclas asfálticas, ya que permite calcular las propiedades volumétricas y el contenido de vacíos de aire" (Instituto Mexicano del Transporte, 2016, pág. 135).

"El procedimiento consiste en remover el aire atrapado en una muestra de mezcla suelta mediante la aplicación de vacío parcial, midiendo posteriormente la masa de la muestra

y calculando su densidad máxima teórica" (Instituto Mexicano del Transporte, 2016, pág. 136).

2.11.2. Gravedad específica bulk (Gmb)

Es la gravedad específica de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire atrapados. Según Roberts et al. (2009) "La Gmb se determina midiendo la masa y el volumen de una muestra compactada de mezcla asfáltica. Esta propiedad se utiliza para calcular el contenido de vacíos de aire y otras propiedades volumétricas" (p. 268).

"La gravedad específica bulk (Gmb) se determina mediante el ensayo de densidad y masa unitaria en muestras compactadas de mezcla asfáltica, utilizando procedimientos como la medición geométrica o el desplazamiento de agua" (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 2009, pág. 271).

"La Gmb es un parámetro clave para evaluar el grado de compactación alcanzado en la mezcla asfáltica y su resistencia potencial a la deformación permanente" (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 2009, pág. 272).

2.11.3. Gravedad específica aparente (Gsa)

"La gravedad específica aparente (Gsa) de los agregados se determina mediante el ensayo de gravedad específica y absorción de agregados gruesos y finos, excluyendo los poros permeables al agua" (National Asphalt Pavement Association, 2016).

Se debe considerar que "el conocimiento de la Gsa es fundamental para calcular correctamente las proporciones de los componentes de la mezcla asfáltica y garantizar un adecuado diseño volumétrico" (National Asphalt Pavement Association, 2016). Además, Garnica et al (2005) agrega que la "La Gsa se utiliza para calcular el volumen de los agregados en una mezcla asfáltica, lo que permite determinar el contenido de asfalto efectivo y otras propiedades volumétricas" (p. 109).

2.11.4. Contenido de vacíos llenos de aire (VFA)

Representa el porcentaje de vacíos en el agregado mineral que están llenos de asfalto, "un adecuado VFA es esencial para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Valores de VFA demasiado altos pueden resultar en una mezcla inestable, mientras que valores bajos pueden conducir a una mezcla demasiado rígida y susceptible al agrietamiento" (National Asphalt Pavement Association, 2016).

"El contenido de Vacíos llenos de aire (VFA) representa el espacio disponible en la mezcla asfáltica compactada que está ocupado por el ligante asfáltico" (Gallego, 2010, pág. 198)(p. 198).

Además, "un adecuado rango de VFA es esencial para garantizar la durabilidad y resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica. Valores excesivos o deficientes de VFA pueden afectar negativamente el desempeño de la mezcla" (Gallego, 2010, pág. 199).

CAPÍTULO III

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y ENSAYOS

Los materiales empleados en la elaboración del siguiente plan de integración curricular comprenden pavimento asfáltico reciclado, emulsión asfáltica, polvo de llanta de avión y el aditivo de adherencia KAOMIN 12, suministrado por el ingeniero Carlos Mercado en representación de la empresa QuimiKao. El agregado reciclado y el polvo de llanta fueron provistos por el aeropuerto internacional Mariscal Sucre. Se realizó una caracterización del agregado reciclado para determinar su distribución granulométrica, mientras que la emulsión asfáltica fue evaluada en términos de estabilidad. Respecto al polvo de llanta, se analizó su granulometría, y el aditivo de adherencia se respaldó con su ficha de laboratorio, que detalla su composición.

3.1. Caracterización agregados

El material reciclado empleado en esta investigación proviene del aeropuerto internacional Mariscal Sucre en la urbe de Quito. Este material, conocido como RAP, está conformado por partículas que muestran tres estados diferentes: algunas consisten únicamente en asfalto envejecido y finos, otras son agregados parcialmente cubiertos por asfalto envejecido, y algunas están casi completamente descubiertas. El material se sometió a un proceso de secado al aire libre, tamizado y separado en fracciones para facilitar su manipulación durante la preparación de las mezclas. Estos ensayos son propuestos en MOP - 001-F 2002 ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES

3.1.1. Muestreo en campo (ASTM D75 – INEN 695)

Las muestras de agregado van a ser tomadas desde un almacenamiento, la Norma ASTM - D75 recomienda tomar tres porciones: parte superior, punto medio e inferior de la pila del material.

Con un correcto muestreo se busca reflejar la naturaleza y condición real de los materiales, el éxito del ensayo dependerá del personal que realice la extracción al hacer un buen uso de equipos y materiales.

3.1.2. Análisis granulométrico (ASTM C136 - MOP 2002)

El ensayo de análisis granulométrico tiene como propósito el de obtener información acerca de la proporción que participan las partículas del suelo en aberturas específicas, los resultados obtenidos serán en peso, el cual tendrá su porcentaje respectivo respecto a peso total de la muestra

La curva granulométrica tiene como propósito evaluar si la muestra recogida cumple con especificaciones requeridas para el diseño de la mezcla en frío, límites establecidos en la MOP 2002

3.1.2.1. Procedimiento

Para el ensayo granulométrico las muestras se secaron por un día entero en el horno a una temperatura de 110°, esto para evitar no tener un peso constante.

El rap (agregado) se homogenizo mediante el método de cuarteo manual, colocando la muestra en la superficie del laboratorio, se debe recalcar que la superficie debe ser constante y limpia, con la ayuda de una pala se comienza el proceso del volteado del material, este debe ir recogiendo el material desde la superficie, se realiza tres veces el proceso.

El cumulo hecho se debe aplanar presionando la punta de la pala, esto se realiza para obtener una circunferencia con espesor, diámetro uniforme.

Al tener la circunferencia se divide el material en cuatro partes iguales, y se procede a recoger la muestra para el ensayo.

Se seleccionan los tamices necesarios para satisfacer las especificaciones requeridas según lo estipulado en la MOP 2002, en el cual constan los tamices: 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4, 3/8, No. 4, No.10, No. 40 y No. 200.

El proceso de tamizado se puede proceder a mano o por medio de una tamizadora mecánica, el proceso en este caso se llevó mediante la tamizadora mecánica la cual no debe pasar los 10 000 rpm sin carga, los tamices se los debe poner en orden descendente por tamaño de abertura, el tamizado mecánico se lo realizo hasta el tamiz 3/8 con un tiempo de ejecución de la máquina de 10 min, el otro proceso de tamizado se lo realizo de forma manual, es importante limitar la cantidad de material tamizado, el peso retenido en los tamices no debe superar los 7 kg/cm² de superficie tamizada, el tiempo que se realiza el tamizado manual terminará cuando no pase más del 1% de la cantidad de peso retenida en el tamiz.

Tomar los tamices y asegurar que la mayor cantidad de muestras no se queden, esto se realiza con golpes en la parte superior de un lado del tamiz mientras le damos la vuelta, por un minuto.

Calcular el material retenido en cada tamiz en función de su peso por medio de la balanza, el proceso se lo realiza con extrema precaución al anotar correctamente los resultados, al finalizar se comprueba el peso de la muestra inicial y la final, la diferencia no deberá superar el 0.3% si supera el porcentaje se toma como resultados no aceptados.

3.1.2.2 Cálculos

Ecuaciones usadas:

- 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

Acumulación de cada uno de los porcentajes retenidos en cada uno de los tamices

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

- Porcentaje pasante

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

- Curva granulométrica

Para la realización de la curva granulométrica los límites van a basarse en lo

estipulado en la MOP 2002, Tabla 406-6.01

Escogemos la sección B al tener un tamaño máximo nominal de agregado de 1 ½''

Tabla 1 Tabla 406-9.01

TAMIZ	Abertura	A	B	C
	mm			
2"	50,8	100	-	-
1 1/2"	38,1	70-100	100	-
1	25,4	55-85	70-100	100
3/4	19,1	50-80	60-90	70-100
3/8	9,52	40-70	45-75	50-80
Nº 4.	4,75	30-60	30-60	35-65
Nº 8.	2,36	20-50	20-50	25-50
Nº 50.	0,3	10-30	10-30	10-30
200	0,075	5-20	5-20	5-20

Elaborado por: (MOP, 2002)

3.1.3 Gravedad específica de los agregados (ASTM C 127- ASTM C 128)

3.1.3.1 Definición

La gravedad específica se define como la relación entre la densidad del material y la densidad del agua, lo cual proporciona una medida de la relación entre el peso y el volumen de los agregados. Esta información permitirá comprender cómo se distribuyen el peso y el volumen de los agregados dentro de la mezcla, dándonos las bases para calcular la proporción de la emulsión en el diseño. lo que a su vez influye en las propiedades y el comportamiento de esta durante su aplicación.

3.1.3.2 Agregado grueso

- Procedimiento

Para obtener la muestra se cuartea el material, se homogeniza a continuación se obtienen la cantidad de material mínimo para realizar el ensayo que se basan en su tamaño máximo nominal.

Se seca la muestra en un horno a una temperatura de 100 – 110° el material va a estar hasta tener un peso constate, se deja enfriar el agregado a temperatura ambiente por dos horas, pesamos el agregado obteniendo así el dato A.

Se sumerge la muestra con agua entre 20 y 28 horas, después de este tiempo se seca

superficialmente la muestra rodando sobre un paño hasta que visualmente el agregado no tenga agua superficial, para obtener resultados óptimos, realizarlo de manera individual cada agregado es más efectivo, pesamos el agregado obteniendo el dato B.

La muestra se coloca en un recipiente, sumergiéndolo en agua, el agua deberá estar entre 21 y 25°, los agregados deberán estar completamente bajo el agua, el hilo de suspensión que sostiene la balanza debe ser lo más delgado posible. Pesamos el agregado obtenido el dato C.

- Cálculos

Las ecuaciones dadas son estipuladas en la ASTM C 127

$$\text{Gravedad específica de masa (seca)} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica de masa (SSD)} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica de aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{B-A}{A} * 100\%$$

Donde:

A= Peso de la muestra secada al horno (gramos)

B= Peso de la muestra saturada con superficie seca SSD (gramos)

C= Peso de la muestra sumergida en agua (gramos)

3.1.3.3 Agregado fino

- Procedimiento

El material para usar se debe homogenizar y cuartear, se procede a coger la muestra, la cual no debe superar los 4.75 mm (Tamiz N°4), cogemos 1 kg aproximadamente, al tener la muestra la ponemos en el horno a 105°C por 24 horas, luego dejarla a temperatura ambiente de 1 a 3 horas, al finalizar las horas tomar el peso seco, obtenemos el dato A, consecuente se debe cubrirla con agua a inmersión y mantenerla de 20 a 28 horas. Pasado las horas

establecidas se debe decantar el agua cuidadosamente, después de este proceso se extiende la muestra sobre una bandeja y se expone la muestra a una corriente de aire tibio, se debe revolver al mismo tiempo que la muestra este expuesta al aire para así obtener un secado homogéneo, cuando visualmente se acerque a la condición de SSS, sujetamos un molde cónico y en el ponemos la muestra, se apisona con 25 golpes de varilla, se levanta cuidadosamente el cono de forma vertical, si la superficie todavía presenta humedad libre, el árido fino retendrá su forma moldeada. El árido fino comenzará a desmoronarse ligeramente cuando haya alcanzado la condición de superficie seca, pesamos la muestra y obtenemos el dato B.

Al picnómetro lo llenamos de agua hasta un determinado punto, proseguimos a llenarlo con 500g de agregado fino, llenamos con agua hasta un 90% de la capacidad. Con ayuda de una bomba de vacío sacamos los vacíos de la muestra que está dentro del picnómetro, siguiente a esto aseguramos la temperatura del agua y la muestra estén entre 21 y 25° C, pesamos la muestra, picnómetro y el agua, obteniendo el dato C.

- **Cálculos**

Las ecuaciones dadas son estipuladas en la ASTM C 128

$$\text{Gravedad específica de masa (seca)} = \frac{A}{B + 500 - C}$$

$$\text{Gravedad específica de masa (SSD)} = \frac{500}{B + 500 - C}$$

$$\text{Gravedad específica de aparente} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100\%$$

Donde:

A= Peso de la muestra secada al horno (gramos)

B= Peso del frasco (picnómetro) con agua (gramos)

C= Peso del frasco + la muestra + el agua, hasta la marca de calibración (gramos)

500 = Peso de agregado fino saturado usado en gramos

3.1.4. Gravedad Específica Neta de los Agregados (G_{sa} , G_{se} , G_{sb})

Cuando el agregado total está compuesto por distintas fracciones de agregado grueso, agregado fino y filler, cada una con diferentes gravedades específicas, se calcula la gravedad específica neta mediante:

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{P_g}{G_g} + \frac{P_i}{G_i} + \frac{P_f}{G_f}}$$

Donde:

P_g , P_i , P_f : Porcentaje en peso de los agregados grueso, intermedio y fino

G_g , G_i , G_f : Gravedad específica de los agregados grueso, intermedio y fino

3.1.5. Extracción cuantitativa de aglutinante de asfalto por el método de ignición (Aashto T308-08)

El ensayo consiste determinar el contenido de asfalto por medio de ignición para alcanzar temperaturas que lleguen al punto de inflamación del ligante asfáltico dentro de un horno estipulado en la norma Aashto T308-08.

La determinación del porcentaje de a asfalto presente en el RAP es de suma importancia debido a que nos permitirá estimar el porcentaje de emulsión que se incluirá en el diseño de la mezcla asfáltica en frío. Dando un estimado para que el pavimento trabaje de manera óptima sus propiedades mecánicas y aumente su durabilidad.

3.1.5.1 Procedimiento

El horno debe estar precalentado entre 535 y 545°C, determinamos la masa mínima de material a ensayarse de acuerdo con el tamaño máximo nominal del agregado de la tabla 2 de ASHTO T308-8. El material debe estar debidamente seco hasta obtener una masa constante a una temperatura entre 100 y 110°C. Se debe pesar la canasta y siguiente a esto se distribuye uniformemente la muestra de ensayo en las mismas y pesamos en una balanza calibrada para

calcular la masa inicial de la muestra. Luego se ingresa la masa inicial de la muestra en gramos en el controlador del horno de ignición, se coloca la bandeja con la muestra dentro del horno y se verifica la masa registrada por el horno este dentro de ± 5 g, se inicia el proceso de combustión y cuando el cambio en la masa no exceda de 0,01 % en 3 min continuos el proceso de combustión se detiene. Sacamos la muestra dejamos enfriar al ambiente y pesamos.

3.1.5.2 Cálculo

Las ecuaciones dadas son estipuladas en el AASHTO T308-8.

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

En donde:

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

A Representa el peso de la muestra inicial

B Representa el peso de la muestra final

3.2. Determinación de porcentaje de emulsión teórico

Con los datos obtenidos a partir de los ensayos previamente realizados podemos calcular el porcentaje teórico óptimo de emulsión para un diseño en frío

Se lo determino mediante la siguiente ecuación proporcionada por el instituto del asfalto

$$P = 0.0035a + 0.045b + kc + F$$

Donde:

P : Proporción de cemento asfáltico en relación con el peso total de la mezcla

a : Cantidad de agregado que se retiene en el tamiz N° 8 expresada en porcentaje

b : Cantidad de agregado que atraviesa el tamiz N° 8 pero queda retenido en el tamiz N° 200, expresada en porcentaje

c : Cantidad de agregado que atraviesa el tamiz N° 200 expresado en porcentaje

k : factor relacionado con la cantidad de agregado que atraviesa el tamiz N° 200

Tabla 2 Límites-Factor K

Factor K	Limites		K
	Inferior	Superior	
Si %pasa T.No. 200	11	15	0,15
Si %pasa T.No. 200	6	10	0,1
Si %pasa T.No. 200	6	-	0,2

Fuente: (Intendencia de Montevideo)

F: factor relacionado con la absorción del material granular

Tabla 3 Factor F

Relacionado con la absorción del material granular		
Factor F		
F=	2	Alta Absorción
F=	0,7-1	Absorción Media

Fuente: (Intendencia de Montevideo)

3.3. Ensayos realizados al polvo de llanta (filler)

3.2.1 Análisis granulométrico del filler (ASTM D 546)

El ensayo propuesto es para determinar la distribución del tamaño de las partículas del polvo de llanta, esto nos ayudara para verificar el impacto de la granulometría del polvo de llanta en las mezclas asfálticas en frio.

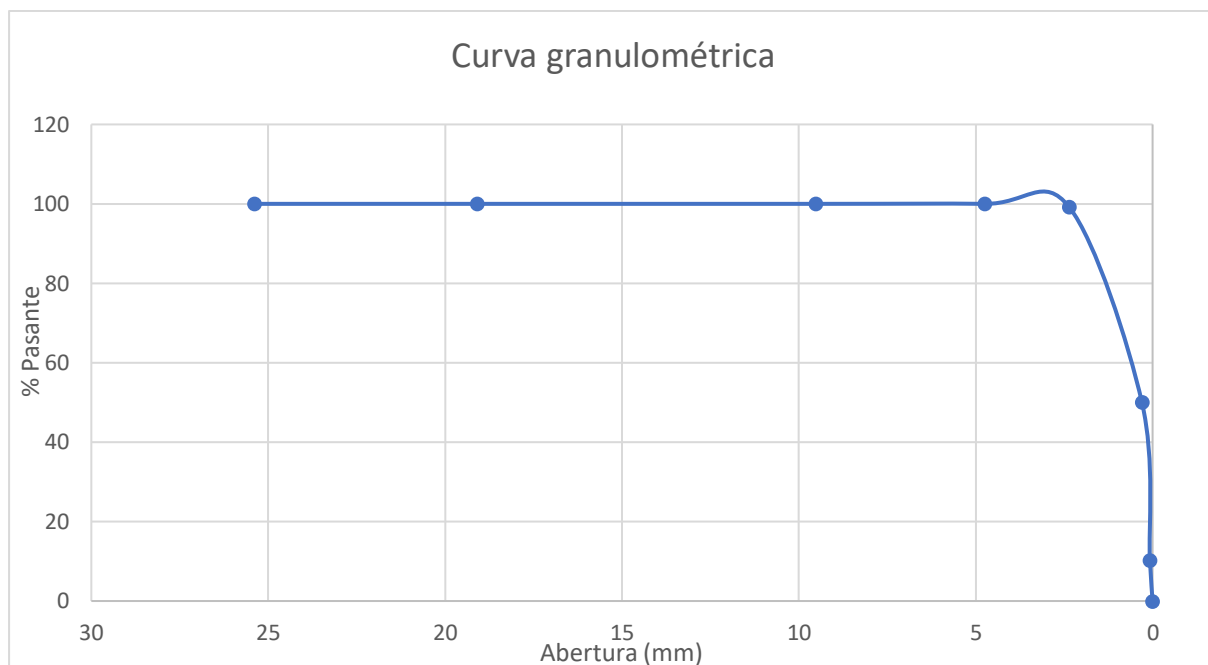
Tabla 4 Análisis granulométrico del filler

TAMIZ	Abertura mm	Peso retenido g	Porcentaje retenido %	Porcentaje acumulado %	Promedio del porcentaje que pasa %
1	25,4	0	0	0	100
3/4	19,1	0	0	0	100
3/8	9,52	0	0	0	100
N° 4.	4,75	0	0	0	100
N° 8.	2,36	3,41	0,77	0,77	99,23
N° 50.	0,3	217,6	49,24	50,01	49,99

200	0,075	175,63	39,74	89,75	10,25
Bandeja	0	45,3	10,25	100,00	0

Elaborado por: Fuente propia

Ilustración 1 Curva Granulométrica polvo de llanta



Elaborado por: Fuente propia. La mayor concentración de partículas se encuentra en los tamices N°50 y 200.

3.4. Ensayos realizados a la emulsión asfáltica (Css-1h)

Para elaborar la propuesta de mezcla asfáltica en frío de esta investigación, se utilizó la emulsión asfáltica CSS-1h. Esta emulsión se distingue por ser catiónica de curado lento, con baja viscosidad y proveniente de un asfalto duro.

Las características principales de esta emulsión son las siguientes:

- Sirve como ligante asfáltico para agregados, comúnmente utilizados en mezclas asfálticas en frío.
- Es utilizada en la rehabilitación y reciclaje de pavimentos fatigados.
- Se emplea en la estabilización de suelos y bases.
- Actúa como sellador asfáltico, incluyendo aplicaciones como sand seal, fog seal y slurry seal tipo 1, 2 y 3.

- Desempeña un papel crucial en la imprimación de superficies y en riegos de adherencia (IMPTEK, 2021).

Debido a la relevancia del uso de esta emulsión en la mezcla asfáltica propuesta, es imprescindible realizar una serie de ensayos según la normativa vigente para garantizar la calidad del producto final y confirmar su durabilidad. A continuación, se presenta una tabla que detalla los ensayos a realizar, extraída de la normativa MOP-001-F-2002, ubicada en la sección 810 de asfaltos y productos asfálticos.

Tabla 5 Requisitos de emulsiones asfálticas catiónicas

PROPIEDAD	ROTURA RAPIDA		ROTURA MEDIA				ROTURA LENTA					
	CRS-1		CRS-2		CMS-2		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	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	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaborado por: (MOP, 2002)

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

Este ensayo es fundamental para evaluar la viscosidad de la emulsión, ya que esta propiedad influye directamente en su capacidad para adherirse de manera efectiva a los agregados y mantenerse en su posición durante la aplicación. El procedimiento consiste en medir el tiempo, en segundos, que 60 cm³ de emulsión tardan en fluir a través de un tubo hacia un recipiente específico, asegurando que la muestra se mantenga a una temperatura constante de 25 °C. Esta medición permite determinar si la emulsión tiene la viscosidad adecuada para su uso en aplicaciones asfálticas.

- Carga de partícula (ASTM D7402, INEN 908)

Este ensayo es fundamental para determinar la naturaleza de la emulsión asfáltica utilizada, es decir, si es aniónica o catiónica, lo que se refiere a la carga eléctrica de las partículas de betún. La carga eléctrica de las partículas es crucial ya que influye en cómo la emulsión interactúa con los agregados y otros materiales en la mezcla asfáltica. Si durante el ensayo se observa la formación de una película gruesa en el cátodo, se concluye que la emulsión es catiónica, lo que implica que las partículas de betún tienen una carga positiva.

El equipo utilizado para este ensayo incluye dos electrodos: un cátodo y un ánodo. Estos electrodos están conectados a una fuente de corriente eléctrica continua, con una intensidad de corriente que oscila entre 8 mA y 10 mA. La elección de esta corriente es importante para asegurar que las partículas de betún migren adecuadamente durante el ensayo, permitiendo una evaluación precisa de la emulsión.

Para llevar a cabo el ensayo, se requiere una muestra de la emulsión asfáltica. Los electrodos se sumergen en esta muestra, y se monitorea la corriente eléctrica que fluye a través del sistema. Es esencial observar cómo cambia la corriente durante el ensayo. El ensayo se considera completo cuando la corriente disminuye hasta un máximo de 2 mA. Esta reducción en la corriente eléctrica es un indicador de que las partículas de betún han migrado hacia el cátodo o el ánodo, confirmando la naturaleza catiónica o aniónica de la emulsión.

Este proceso es crucial para garantizar que la emulsión tenga las propiedades eléctricas adecuadas para su uso en aplicaciones específicas, como mezclas asfálticas en frío, sellos asfálticos y reciclaje de pavimentos. Conocer la carga eléctrica de las partículas de betún ayuda a prever cómo se comportará la emulsión en condiciones reales, asegurando así la calidad y durabilidad del producto final.

- Asentamiento 5 días (ASTM D6930, INEN 910)

Este ensayo es fundamental para evaluar la estabilidad de las emulsiones asfálticas

durante el almacenamiento y determinar la tendencia de las partículas de asfalto a sedimentarse. El procedimiento, que se extiende a lo largo de cinco días, requiere el uso de dos probetas de vidrio con una capacidad de 500 ml cada una para asegurar precisión en la medición.

Para llevar a cabo el ensayo, se llena cada probeta con una cantidad específica de emulsión asfáltica. Estas probetas se dejan reposar en un ambiente controlado, sin agitar ni mover durante los cinco días completos. Mantener condiciones constantes de temperatura y humedad es crucial para evitar cualquier influencia externa que pueda afectar la sedimentación.

Al final del período de cinco días, se extraen muestras tanto de la parte superior como de la parte inferior de cada probeta. La diferencia en la composición, densidad y concentración de partículas de asfalto entre estas muestras se mide y analiza. Este análisis proporciona información valiosa sobre la estabilidad de la emulsión y su capacidad para mantener las partículas de asfalto suspendidas de manera uniforme, lo cual es esencial para su rendimiento en aplicaciones prácticas.

Evaluar la sedimentación y estabilidad de las emulsiones asfálticas es crítico para garantizar que el producto mantenga sus propiedades durante el almacenamiento y que su aplicación en proyectos de pavimentación sea efectiva y duradera. Este ensayo ayuda a asegurar la calidad y confiabilidad de las emulsiones asfálticas, contribuyendo a la longevidad y desempeño de las superficies pavimentadas.

- Estabilidad de almacenamiento 24 horas (ASTM D6930, INEN 909)

Al igual que el ensayo descrito en la sección anterior, este procedimiento permite determinar la tendencia de las partículas de asfalto a sedimentarse, pero en un período de 24 horas. Para realizar este ensayo, se vierte emulsión asfáltica en un cilindro de vidrio graduado. Al finalizar el tiempo de reposo, se toman muestras de la parte superior y de la parte inferior del cilindro. La diferencia en la concentración y distribución de las partículas entre ambas muestras proporciona los resultados del ensayo, indicando el grado de sedimentación de las

partículas de asfalto en la emulsión asfáltica.

- Residuo por evaporación (ASTM D6934, INEN 905)

Este ensayo permite determinar el porcentaje de asfalto o betún presente en la emulsión, sometiéndola a altas temperaturas en un horno para evaporar todos los componentes no asfálticos, como los componentes jabonosos y el agua. Este método es crucial para evaluar la calidad y consistencia de la emulsión asfáltica utilizada en pavimentación.

El procedimiento consiste en colocar tres vasos, cada uno con emulsión que puede variar entre 49 y 51 g, en un horno que se mantiene a una temperatura constante entre 160 y 163 °C durante un período de 2 horas. Este control de temperatura asegura una evaporación completa de los componentes volátiles sin degradar el asfalto.

Para calcular el porcentaje de asfalto, se obtienen y comparan los pesos iniciales y finales de las muestras. El peso inicial se registra antes de colocar las muestras en el horno, y el peso final se mide después de la evaporación de los componentes no asfálticos. La diferencia entre estos pesos permite calcular el contenido de asfalto en la emulsión.

- Prueba del tamiz N°20 (ASTM D6933, INEN 906)

Este ensayo es crucial para evaluar la calidad de la emulsión asfáltica, determinando su uniformidad y consistencia. El procedimiento implica hacer pasar una muestra de emulsión a través de un tamiz N°20, lo cual permite calcular el porcentaje de material que queda retenido en la malla.

El análisis comienza con la preparación de la muestra de emulsión, asegurando que esté bien mezclada para obtener resultados representativos. La emulsión se vierte cuidadosamente sobre el tamiz, y mediante movimientos controlados, se permite que las partículas más finas pasen a través de la malla mientras que las más gruesas quedan retenidas.

El porcentaje de material retenido en el tamiz se calcula pesando el residuo en la malla después del tamizado y comparándolo con el peso total de la muestra inicial. Este valor

proporciona una medida directa de la uniformidad de la emulsión, indicando si las partículas de asfalto están distribuidas de manera homogénea o si hay presencia de aglomerados que puedan afectar el rendimiento de la emulsión en aplicaciones prácticas.

Este ensayo es fundamental para garantizar que la emulsión asfáltica cumpla con las especificaciones técnicas y normativas requeridas para su uso en proyectos de pavimentación.

Un alto porcentaje de material retenido podría indicar problemas en la fabricación de la emulsión, como una dispersión inadecuada de las partículas de asfalto o la presencia de impurezas, lo cual podría afectar la adhesión y durabilidad del pavimento final.

- Penetración (ASTM D5, INEN 918)

Este ensayo es fundamental para determinar la consistencia y dureza de la emulsión asfáltica, evaluando la distancia que una aguja penetra en una muestra de 100 gramos en un período de 5 segundos a una temperatura controlada de 25°C. La medida de la penetración se expresa en décimas de milímetro, o céntimos de centímetro.

Para llevar a cabo este ensayo, se prepara la muestra de emulsión asegurando que esté homogénea y sin burbujas de aire. La muestra se coloca en un recipiente adecuado, y se ajusta el equipo de penetración para que la aguja esté en contacto con la superficie de la emulsión.

El ensayo se realiza efectuando tres penetraciones en diferentes puntos de la muestra para asegurar la representatividad de los resultados. La aguja, con un peso y dimensiones estándares, se deja caer libremente bajo su propio peso durante exactamente 5 segundos. La profundidad de penetración de la aguja se mide con precisión utilizando un dispositivo de lectura calibrado.

El valor de penetración obtenido de cada ensayo individual se registra, y el resultado final se expresa como el promedio de las tres mediciones. Este valor proporciona una indicación clara de la consistencia de la emulsión asfáltica, reflejando su grado de dureza o suavidad a la temperatura especificada.

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

- Ductilidad (ASTM 133, INEN 916)

Este ensayo es fundamental para determinar la ductilidad de la emulsión asfáltica, es decir, la capacidad de la emulsión para deformarse bajo tensión sin quebrarse. El ensayo se realiza utilizando una briqueta de emulsión, la cual es sometida a tensión en un dispositivo diseñado específicamente para medir la ductilidad.

El procedimiento implica separar los extremos de la briqueta a una velocidad constante de 5 ± 0.25 cm por minuto, manteniendo una temperatura controlada de $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$. La distancia que la briqueta puede estirarse antes de romperse se mide con precisión, proporcionando una indicación clara de la ductilidad de la emulsión.

Para llevar a cabo el ensayo, se prepara la muestra de emulsión en la forma de una briqueta, asegurando que esté homogénea y libre de imperfecciones. La briqueta se coloca en el dispositivo de ductilidad, que aplica una fuerza de tracción uniforme y constante a través de sus extremos.

- Resultados ensayos

Los resultados de los ensayos propuestos se presentan en la siguiente tabla resumen.

Tabla 6 Resultados de emulsión asfáltica CSS-1H

Tabla de Resultados Emulsión Asfáltica CSS-1H				
Ensayo	Unidades	Valor	Especificación	Cumple
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	Mín. 57	SI
Prueba del tamiz N°20	%	0.02	0 - 0.1	SI
Penetración	dmm	55.5	40 - 90	SI
Ductilidad	cm	58	Mín.40	SI

Elaborado por: (Espinoza & Guayaquil, 2023)

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA:

4.1. Diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall

En Ecuador no se cuenta con una norma vigente para el diseño de mezclas asfálticas en frío con material reciclado por lo que la MOP 2002 recomienda basarse en el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas que es una publicación del Instituto del Asfalto donde nos indica los ensayos a seguir. En este caso según MS-19 se deberá seguir con el ensayo Marshall.

El ensayo Marshall nos va a permitir conocer datos de estabilidad y fluencia de especímenes cilíndricos, siguiendo procedimientos del ASTM D 1559, los parámetros a medir nos van a asegurar si el diseño de pavimento va a tener la resistencia necesaria para soportar el tráfico vehicular y la flexibilidad suficiente para adaptarse a variaciones climáticas.

Para comparar resultados y tener información sobre la incidencia tanto del polvo de llanta como del aditivo presentado KOAMIN 12 se decidió verificar la estabilidad de 4 casos.

- Rap – Polvo de llanta (1%, 1,5%, 2% y 2,5%) – Emulsión – aditivo
- Rap – Emulsión
- Rap – Polvo de llanta (porcentaje óptimo) – Emulsión
- Rap – Emulsión – aditivo

El ensayo Marshall nos da criterios iniciales, uso de agregados de tamaño máximo nominal de una pulgada, los especímenes cilíndricos deben tener un estándar de 64 mm de espesor y 102 mm de diámetro. Para cada caso tener un mínimo de 3 especímenes.

La carga que se va a aplicar a los especímenes debe ser perpendicular al eje cilíndrico con el uso del equipo Marshall.

4.2. Estabilidad y fluencia

- **Estabilidad**

La estabilidad es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir deformaciones bajo cargas aplicadas en este caso se evalúa el rendimiento que va a tener el pavimento ante las cargas que podría tener ya sean estas muertas o vivas.

El espécimen va a resistir una carga producida por la máquina de carga a compresión hasta producir el fallo, esa carga será nuestro parámetro de estabilidad.

Tabla 7 Criterios de diseño de la mezcla de asfalto y agregados emulsionados

PROPIEDAD DE PRUEBA	min	max
Estabilidad N(lb) a 22°C (72°F) - mezcla de pavimentación	2224(500)	-
Perdida de estabilidad porcentual, después de la saturación al vacío y la inmersión	-	50
Recubrimiento del agregado	50	-

Elaborado por: (Asphalt Institute, 1994)

4.3. Elaboración de briquetas

Para la elaboración de briquetas debemos tener el peso del agregado (RAP) adecuado, según la MOP 2002 este puede variar entre los 900 y 1 100 g por lo que procedimos hacer briquetas con tres diferentes pesos: 900, 1000 y 1 100 g al ser solo una comprobación solo se realizó una briqueta por cada peso. Los pesos de 1000 y 1 100 al realizar los 50 golpes de cada lado según lo estipulado nos dieron medidas que se sobre pasaban a las medidas estándares de espesor y diámetro, dando resultado como peso optimo los 900 g de RAP.

Para la determinación del agua de pre envuelta se realizó una prueba visual al exponer el RAP a diferentes porcentajes de agua con respecto a su peso. El estado del RAP para que la

humedad se considere optima debe estar en un estado de superficie saturada seca, estas características visuales son el RAP con un ligero tono más intenso. Se realizo el ensayo visual con porcentajes de 1, 2 y 3%. El porcentaje 1% no era suficiente para cubrir todos los agregados del RAP. El porcentaje 3% cubría todos los agregados del RAP, pero en su superficie dejaba una película brillante esto quiere decir que tenía una superficie saturada contrario a lo buscado. El 2% cubría todos los agregados y no dejaba una película brillante, opacaba al material debido al agua encontrando así lo buscado.

Para los casos donde se tiene aditivo se realizó el proceso de fusión entre la emulsión el aditivo esto se siguió con recomendaciones del fabricante donde estipulaba poner entre el 1 y 2 % de aditivo (KOAMIN 12) con respecto al peso de la emulsión, en preferencia especificaba el 1% para mejores resultados. Se realizo entonces la fusión entre la emulsión y el aditivo al 1%, para la unión se lo realizo en un recipiente de precipitación donde agregábamos la emulsión, luego se coloca el aditivo dentro de una jeringa comercial, esto nos ayudara a ir introduciendo el aditivo a la emulsión de forma paulatina esto debido a que si no se lo hace de esta forma la emulsión presenta una consistencia presente de conglomerados. Se vertió el aditivo de forma pausada y se mezcló con ayuda de un taladro modificado para la ayuda de la fusión entre los dos componentes. Como recomendación del fabricante el resultado de la fusión entre el aditivo y la emulsión solo puede pasar un día sin ser utilizado, esto debido a que el aditivo pierde sus propiedades vinculantes y empieza a sedimentarse.

- Paso 1

Los 900 g de RAP se ponen en un recipiente metálico, donde como primer paso se añadía los 2% de agua estipulada (18 g), se mezcla con ayuda de guantes de caucho por lo mínimo de 4 minutos haciendo movimientos de adentro hacia afuera.

- Paso 2

Poner el óptimo porcentaje de emulsión (4%) para la unión correcta del agregado

húmedo y la emulsión, se debe mezclar con movimientos de adentro hacia afuera con un mínimo de 4 min

- Paso 3

El polvo de llanta se debe agregar después de haber agregado la emulsión donde se procede a mover la mezcla con dos manos y movimientos de adentro hacia afuera con un mínimo de tiempo de 3 min.

- Paso 4

La preparación para llevar nuestra mezcla a los moldes comienza con la preparación del molde esto se realiza poniendo papel filtro en la base del molde y con una brocha colocar aceite sobre el papel, con el objetivo que la mezcla no se pegue al molde, se procede a colocar la mezcla con un cucharón hasta llegar al límite del molde, con una varilla se efectúan los golpes que son 15 en los límites del molde y 10 en el centro. Al finalizar se coloca papel filtro de igual manera poniendo con una brocha una pequeña cantidad de aceite.

- Paso 5

El matillo de compactación donde se realiza los golpes debe revisarse viendo que todo esté en orden, verificando engranajes aceitados y bola de martillo en buen estado. Se lleva la mezcla se inserta en la máquina eléctrica de forma correcta, se programan los golpes que va a recibir por cada cara. Para una mezcla en frío el MS – 19 estipula 50 golpes por lado, una vez programado los golpes se inicia con la ejecución de la máquina, al finalizar los primeros 50 golpes se repite el mismo procedimiento virando la cara de la muestra.

- Paso 6

La muestra debe dejarse reposar por 24 horas para luego ser desmoldada con cuidado por medio de un gato hidráulico.

4.3.1. Rap – Polvo de llanta (1%, 1,5%, 2% y 2,5%) – Emulsión – aditivo

Para este primer grupo de especímenes obtuvimos un total 24 briquetas a ensayar, esto

debido a que cada porcentaje se ensaya en estado seco y húmedo, se menciona anteriormente que por cada caso son 3 especímenes como mínimo, para este grupo se siguen todos los pasos estipulados con anterioridad.

Grupo 1

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica, 1% de caucho y aditivo

Tabla 8 Porcentaje de material respecto al RAP 1%

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
1% Polvo de llanta	9 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOMIN 12	0.36 gr

Elaboración propia

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica 1.5% de caucho y aditivo

Tabla 9 Porcentaje de material respecto al RAP 1,5%

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
1.5% Polvo de llanta	12 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOMIN 12	0.36 gr

Elaboración propia

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica, 2% de caucho y aditivo

Tabla 10 Porcentaje de material respecto al RAP 2%

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
2% Polvo de llanta	18 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOMIN 12	0.36 gr

Elaboración propia

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica, 2.5% de caucho y aditivo

Tabla 11 Porcentaje de material respecto al RAP 2,5%

Porcentaje de material respecto al RAP	
---	--

Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
2.5% Polvo de llanta	22.5 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOMIN 12	0.36 gr

Elaboración propia

4.3.2. Rap – Emulsión

Para este segundo grupo de especímenes se obtuvo un total de 6 briquetas, para este grupo se deben seguir todos los pasos exceptuando el paso 3 debido a que no se incluye polvo de llanta y además no se debe agregar aditivo a la emulsión.

Grupo 2

- Para briqueta con RAP y emulsión

Tabla 12 Porcentaje de material respecto al RAP y emulsión asfáltica

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
4% Emulsión Asfáltica	36 gr

Elaboración propia

4.3.3. Rap – Polvo de llanta (porcentaje optimo) – Emulsión

Para este tercer grupo de especímenes se obtuvo un total de 6 briquetas, para este grupo se deben seguir todos los pasos expuestos anteriormente teniendo en cuenta que a la emulsión no se le agrega el aditivo estipulado.

Grupo 3

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta (optimo 1%)

Tabla 13 Porcentaje de material respecto al RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
1% Polvo de llanta	9 gr
4% Emulsión Asfáltica	36 gr

Elaboración propia

4.3.4 Rap – Emulsión – aditivo

Para este cuarto grupo de especímenes se obtuvo un total de 6 briquetas, para este

grupo se deben seguir todos los pasos exceptuando el paso 3 debido a que no se incluye polvo de llanta.

Grupo 4

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12

Tabla 14 Porcentaje de material respecto al RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOMIN 12	0.36 gr

Elaboración propia

4.4. Gravedad específica Bulk

Se realiza la medición de espesores y anchos de cada briqueta, cuatro por cada espécimen para luego sacar un promedio. Se toma el peso en aire, peso sumergido, peso superficie saturada seca para lo cual se debe sumergir el espécimen en un recipiente con agua de 3 a 5 minutos, se saca el espécimen y se seca superficialmente, se pesa.

4.5. Procedimiento ensayo Marshall

- Estado húmedo

El espécimen es sometido a saturación aplicando un vacío de 100ml de mercurio durante una hora, para este procedimiento se lo realizo en el picnómetro que se utiliza en el ensayo RICE.

Una vez realizado el procedimiento estipulado anteriormente, se sacan los especímenes y se toman su peso, este sería el peso saturado.

Los especímenes se llevan a la prensa Marshall donde será aplicada una carga constante de 50mm/ minuto este ensayo nos dará datos de estabilidad.

Una vez ensayados los especímenes van al horno durante 24 horas a una temperatura entre 105 y 115°C para obtener el peso seco.

- Estado seco

Después de realizar la gravedad específica Bulk, el espécimen es puesto en el horno por 24 horas a una temperatura entre 40 y 50°C hasta obtener masa constante.

Luego los especímenes son envueltos en bolsas plásticas y sumergidas en baño maría a por una hora a una temperatura de 25°C.

Los especímenes se llevan a la prensa Marshall donde será aplicada una carga constante de 50mm/ minuto este ensayo nos dará datos de estabilidad.

CAPITULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5. Resultados

Para alcanzar los objetivos propuestos en el plan de trabajo de integración curricular, se realizaron los ensayos de granulometría del material de pavimento asfáltico reciclado (RAP) y el polvo de llanta, así como la extracción de bitumen del RAP y ensayo Marshall con los ensayos requeridos para este.

5.1. Granulometría

La granulometría del pavimento asfáltico reciclado se hizo con la finalidad de obtener la gradación del material, por lo que se escogió los límites basándonos en la mopa-2002, lo cual nos cumplió en el rango del literal B como podemos observar la tabla “”. Si bien tenemos el tamaño de partículas desde 1” por condiciones de laboratorio para hacer las briquetas usamos desde el tamaño de partícula de 3/4” ya que las áreas de los moldes son pequeños para usar el material de 1”.

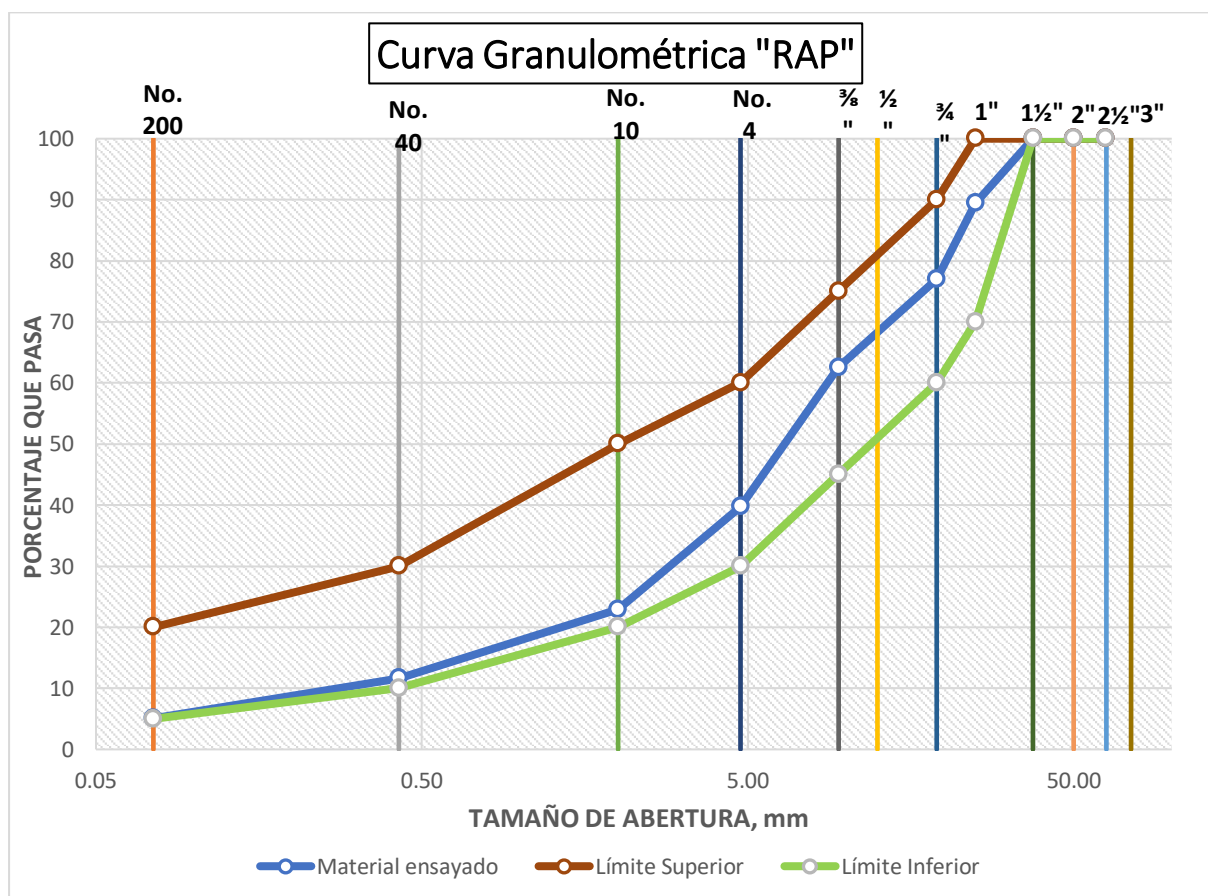
Tabla 15 Granulometría

GRANULOMETRIA							
Masa seca		5496,97					
Tamiz		Masa (gr)		Porcentajes		Límites	
ASTM	Abertura	Retenido	Retenida	Retenida	Pasante	min	max
Número	mm		acumulada	acumulada			
2 1/2"	62,5	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100

1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1"	25	580,00	580,00	10,55	89,45	70	100
3/4"	19	684,00	1264,00	22,99	77,01	60	90
3/8"	9,5	795,20	2059,20	37,46	62,54	45	75
No. 4	4,75	1253,00	3312,20	60,26	39,74	30	60
No.10	2,00	354,90	4236,97	77,08	22,92	20	50
No. 40	0,43	621,00	4857,97	88,38	11,62	10	30
No. 200	0,075	359,00	5216,97	94,91	5,09	5	20
Pasante del 200		280,00	5496,97	100,00			

Elaboración propia

Ilustración 2 Curva Granulométrica RAP



Elaboración propia

En la presente curva granulométrica se puede identificar que el material se encuentra dentro de los límites representados en la gráfica de color rojo para el límite superior de color rojo y para el límite inferior de color verde. Así mismo se puede observar en la parte superior el número de tamices y en la parte izquierda el porcentaje que pasa.

5.2. Gravedad específica de los agregados

Para la gravedad específica determinamos dividiendo el material en dos partes, en el

porcentaje de material grueso retenido hasta el tamiz N°4 o de 4.75 mm y el porcentaje de material fino pasante del tamiz N°4 y de esta manera obtener la gravedad específica bulk, gravedad específica aparente y el porcentaje de absorción.

Los ensayos se realizaron siguiendo las normas ASTM C 127 y ASTM C 128

Tabla 16 Gravedad específica del agregado grueso

Material Grueso - RAP (Retenido Tamiz No. 4)	
Descripción	Datos
Peso SSS=	2989,0 gr
Peso Aparente -Sumergido=	1602,0 gr
Peso SH - Bulk=	2959,0 gr
Resultados	
Estado	Gs
SH - Bulk=	2,133
SSS=	2,155
Aparente=	2,181
% Absorción=	1,01 %

Elaboración propia

Tabla 17 Gravedad específica del agregado fino

Material Fino - RAP (Pasante del Tamiz No. 4)	
Descripción	Datos
Peso SH- Bulk=	495,30
Peso Pic. + Agua=	649,40
Peso Pic. + agua + Muestra=	935,24
Peso SSS=	500,00
Resultados	
Estado	Gs
SH - Bulk=	2,313
SSS=	2,335
Aparente=	2,365
% Absorción=	0,95 %

Elaboración propia

Tabla 18 Gravedad específica de los agregados

%Peso de agregado Grueso=	60,3%		
%Peso de agregado Fino=	39,7%		
Estado:	SH - Bulk	Aparente	Absorción
Gs Ag. Grueso=	2,13	2,18	1,01
Gs Ag. Fino=	2,31	2,36	0,95

Resultados	
Gsb-bulk=	2,20
Gsa-aparente=	2,25
% Absorción=	0,99

Elaboración propia

Una vez realizados los ensayos de laboratorio, para determinar la gravedad específica para cada agregado grueso y fino y luego de conocer la granulometría se obtuvo los porcentajes del agregado grueso y fino, por lo cual se utilizó las fórmulas específicas para determinar la gravedad específica del agregado en conjunto, gravedad específica aparente y el porcentaje de absorción.

5.3.Extracción de bitumen

Tabla 19 Extracción de bitumen por el método de ignición

Extracción de bitumen por el método de ignición	
Muestra 1:	5,23 %
Promedio=	5,23 %
% Asfalto final=	3,14 %

Elaboración propia

En la tabla 20 de extracción de bitumen por el método de ignición, se realizó el ensayo solamente para una muestra por lo que en el promedio se puso el mismo porcentaje de la muestra y así poder determinar el porcentaje de asfalto con la fórmula estipulada.

5.4.Porcentaje óptimo de emulsión para el RAP

Tabla 20 Porcentaje óptimo de emulsión para el RAP

Porcentaje óptimo de emulsión para el RAP	
% Residuo asfáltico de la emulsión:	62,00%
% Pasa Tamiz No. 4	39,74%
% Retenido Tamiz No. 4	60,26%
% Emulsión Efectivo	
% retenido tamiz No. 8	70,62%
% pasa tamiz No. 8	29,38%
% pasa tamiz No. 200	5,09%
K - factor relacionado con el pasante Tamiz No. 200	0,2
F - factor relacionado con la absorción del material granular	0,8
% Emulsión Tentativo	9,05%
% Emulsión efectiva	3,98%

Elaboración propia

En la tabla 21 del porcentaje óptimo de emulsión para el RAP, luego de obtener los resultados de los laboratorios granulométrico, extracción de bitumen y sabiendo el porcentaje de residuo asfáltico de la emulsión proporcionada por IMTECK de 62%, el porcentaje pasante del tamiz N°4 de 39.74% , porcentaje retenido del tamiz N°4 de 60.26%, así como el porcentaje retenido y pasante del tamiz N°8 de 70.62% y 29.38% respectivamente, porcentaje pasante del tamiz 200 de 5.09% y los factores de: K - factor relacionado con el pasante Tamiz No. 200 de 0.2 y F - factor relacionado con la absorción del material granular de 0.8 se determinó el porcentaje de emulsión efectiva.

Ensayo MARSHAL

Análisis de briquetas

Una vez terminado el ensayo Marshall para los cuatro grupos de especímenes podemos analizarlos de forma individual y global, tanto en estado húmedo y en estado seco y sea de esta manera más fácil entender como están variando los especímenes según los siguientes resultados obtenidos.

Grupo 1

Tabla 21 Muestra en estado seco Grupo 1

Muestras en estado seco														
Briquets	Emulsión	Asfalto Residual	N°	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Especifica Bulk)	A - (Residuo de Asfalto)	K1,K2, K3 - (Conte. Agua testigo)	Gd (Grav. Especifica Bulk Seca)	VMA - (Vacíos en el Agregado Mineral)	V - (Total de Vacíos)	(Estabilidad Corregida)	Promedio estabilidad
1%	4,00 %	2,48 %	1	918,96 gr	948,53 gr	462,87 gr	1,892	2,48 %	0,52 %	1,883	18,36 %	13,87 %	1750 lb	1750,00 lb
			2	928,18 gr	941,25 gr	445,01 gr	1,870	2,48 %	0,49 %	1,862	19,28 %	14,84 %	1700 lb	
			3	919,21 gr	946,24 gr	495,55 gr	2,040	2,48 %	0,55 %	2,029	12,03 %	7,19 %	1800 lb	
1,50 %	4,00 %	2,48 %	4	920,45 gr	947,63 gr	460,81 gr	1,891	2,48 %	0,51 %	1,881	18,42 %	13,93 %	1600 lb	1616,67 lb
			5	924,66 gr	954,26 gr	485,52 gr	1,973	2,48 %	0,54 %	1,962	14,90 %	10,22 %	1660 lb	
			6	923,90 gr	944,94 gr	441,73 gr	1,836	2,48 %	0,49 %	1,827	20,76 %	16,40 %	1590 lb	

2%	4,00 %	2,48 %	7	928,21 gr	957,17 gr	493,39 gr	2,00 1	2,48 %	0,54 %	1,99 1	13,67 %	8,92 %	1350 lb	1283,33 lb
			8	929,54 gr	954,29 gr	472,56 gr	1,93 0	2,48 %	0,52 %	1,92 0	16,75 %	12,17 %	1300 lb	
			9	927,53 gr	953,82 gr	473,90 gr	1,93 3	2,48 %	0,52 %	1,92 3	16,61 %	12,03 %	1200 lb	
2,50 %	4,00 %	2,48 %	10	945,66 gr	975,24 gr	505,12 gr	2,01 2	2,48 %	0,55 %	2,00 1	13,23 %	8,46 %	1350 lb	1350,00 lb
			11	937,76 gr	964,01 gr	474,01 gr	1,91 4	2,48 %	0,52 %	1,90 4	17,42 %	12,88 %	1350 lb	
			12	935,10 gr	963,04 gr	493,06 gr	1,99 0	2,48 %	0,54 %	1,97 9	14,17 %	9,45 %	1350 lb	

Muestras en estado húmedo

Briquetas	Emulsión	Asfalto Residual	N°	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Specific Bulk)	A - (Residu. Asfalto)	K4, K5, K6 - (Concreto)	Gd (Grav. Specific Bulk Seco)	VM A - (vacíos en el Agregado Mineral)	V - (Total de vacíos)	(Estabilidad Correída)	Promedio Estabilidad	Porcentaje de pérdida de estabilidad	Humedad Absorbida	SSS aplicado 100 mm de hgpo r 1 hora	Seco después de 24h	Humedad Absorbida	
1%	4,00 %	2,48 %	1	908,46 gr	931,95 gr	467,05 gr	1,95 4	2,48 %	2,65 %	1,90 5	17,4 0 %	12,8 5 %	1550 lb	1583,333	9,52 %	2,97 %	941,01 gr	906,23 gr	3,69 6 %	3,809 %
			2	919,85 gr	949,00 gr	478,83 gr	1,95 6	2,48 %	3,25 %	1,89 6	17,7 6 %	13,2 4 %	1600 lb				955,82 gr	918,49 gr	3,90 6 %	

			3	922, 08 gr	949,1 5 gr	483, 22 gr	1,97 9	2,48 %	3,01 %	1,92 3	16,6 3 %	12,0 4 %	1600 lb				957, 50 gr	920,87 gr	3,82 6 %	
1,50 %	4,00 %	2,48 %	4	922, 84 gr	950,5 3 gr	493, 82 gr	2,02 1	2,48 %	3,07 %	1,96 2	14,9 3 %	10,2 5 %	1950 lb	1866, 667	- 15,46	3,09 %	953, 80 gr	921,74 gr	3,36 1 %	4,512 %
			5	928, 52 gr	956,6 9 gr	486, 14 gr	1,97 3	2,48 %	3,11 %	1,91 5	16,9 5 %	12,3 8 %	1750 lb				982, 99 gr	927,44 gr	5,65 1 %	
			6	925, 68 gr	953,6 1 gr	489, 98 gr	1,99 7	2,48 %	3,09 %	1,93 8	15,9 5 %	11,3 3 %	1900 lb				968, 40 gr	924,59 gr	4,52 4 %	
2%	4,00 %	2,48 %	7	929, 04 gr	955,1 5 gr	476, 20 gr	1,94 0	2,48 %	2,88 %	1,88 7	18,1 8 %	13,6 8 %	1700 lb	1683, 333	- 31,17	2,86 %	968, 11 gr	927,10 gr	4,23 6 %	4,183 %
			8	933, 43 gr	960,8 3 gr	476, 40 gr	1,92 7	2,48 %	3,01 %	1,87 2	18,8 2 %	14,3 6 %	1650 lb				970, 38 gr	931,71 gr	3,98 5 %	
			9	929, 30 gr	953,7 7 gr	464, 01 gr	1,89 7	2,48 %	2,70 %	1,84 9	19,8 3 %	15,4 2 %	1700 lb				969, 92 gr	927,94 gr	4,32 8 %	
2,50 %	4,00 %	2,48 %	10	933, 90 gr	957,2 3 gr	454, 61 gr	1,85 8	2,48 %	2,56 %	1,81 3	21,3 9 %	17,0 7 %	1400 lb	1525, 000	- 12,96	2,77 %	974, 65 gr	931,02 gr	4,47 6 %	4,282 %
			11	930, 08 gr	953,3 4 gr	472, 10 gr	1,93 3	2,48 %	2,56 %	1,88 6	18,2 3 %	13,7 4 %	1650 lb				972, 22 gr	928,53 gr	4,49 4 %	
			12	1024 ,32 gr	1056, 24 gr	544, 95 gr	2,00 3	2,48 %	3,19 %	1,94 3	15,7 5 %	11,11 %	1525 lb				1063 ,36 gr	1022,1 4 gr	3,87 6 %	

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica, 1% de caucho y aditivo resumen.

Tabla 22 Estado Seco 1%

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
1%	1750 lb 1700 lb 1800 lb	1750,00 lb

Elaboración propia

Este cuadro es el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica, 1% de caucho y aditivo en estado seco para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

Tabla 23 Estado húmedo 1%

ESTADO HUMEDO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
1%	1550 lb 1600 lb 1600 lb	1583,33 lb

Elaboración propia

Este cuadro es el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica, 1% de caucho y aditivo en estado húmedo para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica 1.5% de caucho y aditivo resumen.

Tabla 24 Estado seco 1.5%

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
1,5%	1600 lb 1660 lb	1616,67 lb

 1590 lb

Elaboración propia

Este cuadro es el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica, 1.5% de caucho y aditivo en estado seco para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

Tabla 25 Estado húmedo 1.5 %

ESTADO HUMEDO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
1,5%	1950 lb 1750 lb 1900 lb	1866,67 lb

Elaboración propia

Este cuadro es el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica, 1.5% de caucho y aditivo en estado húmedo para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

- Para briketa con RAP, emulsión asfáltica, 2% de caucho y aditivo resumen.

Tabla 26 Estado seco 2%

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
2%	1350 lb 1300 lb 1200 lb	1283,33 lb

Elaboración propia

Este cuadro es el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica, 2% de caucho y aditivo en estado seco para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

Tabla 27 Estado húmedo 2%

ESTADO HUMEDO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
2%	1700 lb 1650 lb 1700 lb	1683,33 lb

Elaboración propia

Este cuadro es el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica, 2% de caucho y aditivo en estado húmedo para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica, 2.5% de caucho y aditivo resumen.

Tabla 28 Estado seco 2.5%

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
2,5%	1350 lb 1350 lb 1350 lb	1350,00 lb

Elaboración propia

Este cuadro es el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica, 2.5% de caucho y aditivo en estado seco para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

Tabla 29 Estado húmedo al 2.5 %

ESTADO HUMEDO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
2,5%	1400 lb 1650 lb 1525 lb	1525,00 lb

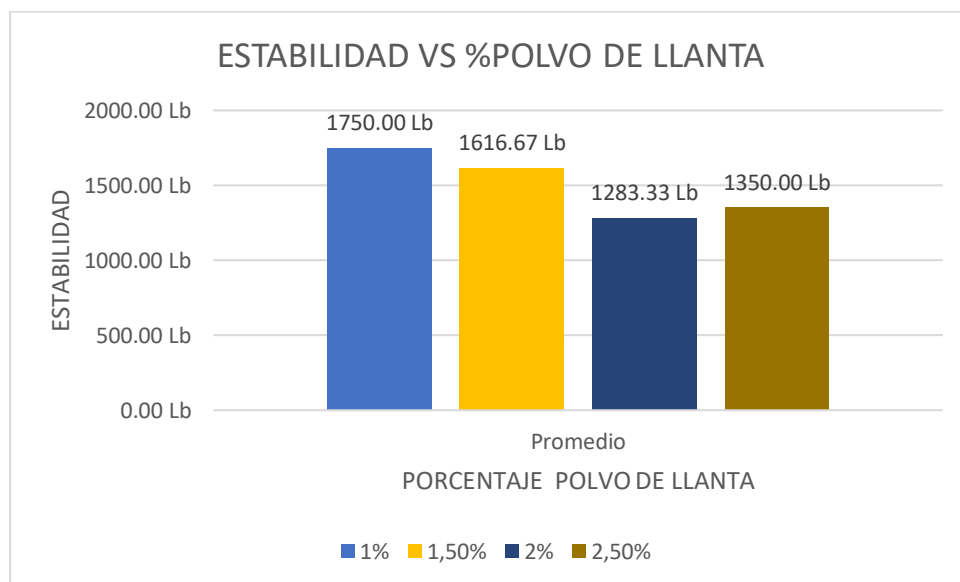
Elaboración propia

Este cuadro es el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica, 2.5% de

caucho y aditivo en estado húmedo para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

Gráfico de estabilidad vs porcentaje de polvo de llanta

Ilustración 3 Estabilidad vs % de polvo de llanta



Elaboración propia

La gráfica presentada muestra la relación entre la estabilidad y el porcentaje de polvo de llanta incorporado en las mezclas asfálticas. En el eje vertical se mide la estabilidad en libras (lb), mientras que en el eje horizontal se presentan los diferentes porcentajes de polvo de llanta utilizados: 1%, 1.5%, 2% y 2.5%.

- 1% de polvo de llanta: Se observa una estabilidad promedio de 1750.00 Lb, la más alta entre los cuatro porcentajes evaluados.
- 1.5% de polvo de llanta: Presenta una estabilidad promedio de 1616.67 Lb.
- 2% de polvo de llanta: Muestra una estabilidad promedio de 1283.33 Lb, siendo la más baja entre las muestras analizadas.
- 2.5% de polvo de llanta: Tiene una estabilidad promedio de 1350.00 Lb.

Grupo 2

Tabla 30 Muestras en estado seco Grupo 2

Muestras en estado seco													
Emulsión	Asfalto Residual	N°	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Specific a Bulk)	A - (Residuo de Asfalto)	K1,K2,K3 - (Conte. Agua testigo)	Gd (Grav. Specific a Bulk Seca)	VMA - (vacíos en el Agregado Mineral)	V - (Total de vacíos)	(Estabilizada Corregida)	Promedio Estabilizado
4,00 %	2,48 %	4	914,21 gr	935,08 gr	449,27 gr	1,882	2,48 %	0,50 %	1,873	18,79 %	14,33 %	1490 lb	1463,33 lb
		5	902,05 gr	920,03 gr	435,40 gr	1,861	2,48 %	0,49 %	1,852	19,67 %	15,25 %	1400 lb	
		6	912,86 gr	924,35 gr	413,28 gr	1,786	2,48 %	0,46 %	1,778	22,89 %	18,65 %	1500 lb	

Elaboración propia

Tabla 31 Muestras en estado húmedo

Muestras en estado húmedo																			
Emulsión	Asfalto Residual	N°	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Specific a Bulk)	A - (Residuo de Asfalto)	K4,K5,K6 - (Conte. Agua testigo)	Gd (Grav. Specific a Bulk Seca)	VMA - (vacíos en el Agregado Mineral)	V - (Total de vacíos)	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad	Porcentaje de pérdida de estabilidad	Humedad Absorbida	SSS aplicado 100 mm de hgp por 1 hora	Seco después de 24h	Humedad Absorbida	
4,00 %	2,48 %	1	909,10 gr	937,97 gr	485,42 gr	2,009	2,48 %	3,25 %	1,947	15,57 %	10,92 %	1870 lb	1920,00 lb	-31,21 %	2,61 %	953,32 gr	907,99 gr	4,755 %	4,812 %

2	914, 55 gr	939, 46 gr	462, 74 gr	1,91 8	2,48 %	2,79 %	1,86 8	19,01 %	14,5 6 %	1900 lb	960, 18 gr	913, 49 gr	4,86 3 %
3	908, 68 gr	924, 53 gr	442, 30 gr	1,88 4	2,48 %	1,79 %	1,85 2	19,69 %	15,2 7 %	1990 lb	954, 12 gr	908, 16 gr	4,81 7 %

- Para briqueta con RAP y emulsión resumen.

Tabla 32 Estado seco con emulsión al 4.00%

ESTADO SECO		
Solo con Emulsión	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
4,00 %	1490 lb 1400 lb 1500 lb	1463,33 lb

Elaboración propia

Este cuadro representa el resumen para las briquetas con RAP y emulsión asfáltica, en estado seco para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

Tabla 33 Estado seco con emulsión al 4.00%

ESTADO HUMEDO		
Solo con Emulsión	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
4,00 %	1870 lb 1900 lb 1990 lb	1920,00 lb

Elaboración propia

Este cuadro representa el resumen para las briquetas con RAP y emulsión asfáltica, en estado húmedo para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

Grupo 3

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta (optimo 1%)

Tabla 34 Muestra en estado seco Grupo 3

Muestras en estado seco														
Briquetas Polvo llanta óptimo	Emulsión	Asfalto Residual	N °	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Specific a Bulk)	A - (Residu o de Asfalto)	K1,K2,K 3 - (Conte. Agua testigo)	Gd (Grav. Specific a Bulk Seca)	VMA - (vacíos en el Agregad o Mineral)	V - (Total de vacíos)	(Estabilid ad Corregida)	Promedio Estabilida d
1%	4,00 %	2,48 %	4	881,14 gr	903,42 gr	378,34 gr	1,678	2,48 %	0,44 %	1,671	27,54 %	23,56 %	1480 lb	1443,33 lb
			5	907,67 gr	927,65 gr	426,45 gr	1,811	2,48 %	0,48 %	1,803	21,83 %	17,53 %	1400 lb	
			6	923,90 gr	943,84 gr	459,85 gr	1,909	2,48 %	0,51 %	1,899	17,63 %	13,10 %	1450 lb	

Tabla 35 Muestra en estado húmedo Grupo 3

Muestras en estado húmedo																				
Briquetas	Emulsión	Asfalto Residual	N°	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Gra v. Specific Bulk)	A - (Residuo de Asfalto)	K4,K5,K6 (Concrete)	Gd (Specific Bulk Seca)	VMA - (vacíos en Agregado)	V - (Total de vacíos)	(Estabilidad Corre gida)	Promedio Estabilidad	Porcentaje de pérdida de estabilidad	Humedad Absorbida	SSS aplicado 100mm de hrgpo r 1 hora	Seco después de 24h	Humedad Absorbida	
1%	4,00 %	2,48 %	1	918,87 gr	933,70 gr	398,20 gr	1,716	2,48 %	1,65 %	1,689	26,77 %	22,74 %	1000 lb	1333,333 lb	7,62 %	1,93 %	938,99 gr	916,82 gr	2,36 %	4,90 %
			2	918,91 gr	935,68 gr	415,57 gr	1,767	2,48 %	1,87 %	1,735	24,76 %	20,62 %	1300 lb				978,07 gr	917,83 gr	6,15 %	9 %
			3	917,97 gr	938,24 gr	433,60 gr	1,819	2,48 %	2,26 %	1,780	22,82 %	18,58 %	1700 lb				975,65 gr	915,13 gr	6,20 %	3 %

Elaboración propia

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta (optimo 1%) en estado Seco resumen.

Tabla 44 RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta (optimo 1%) en estado Seco resumen

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo de llanta optimo	(Estabilidad Corregida)	Promedio
1%	1480 lb	1443,33 lb
	1400 lb	
	1450 lb	

Elaboración propia

Este cuadro representa el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta optimo 1% en estado seco para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta (optimo 1%) en estado húmedo resumen.

Tabla 36 RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta (optimo 1%) en estado Seco resumen

ESTADO HUMEDO		
Briquetas Polvo de llanta optimo	(Estabilidad Corregida)	Promedio
1%	1000 lb	1333,33 lb
	1300 lb	
	1700 lb	

Elaboración propia

Este cuadro representa el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta optimo 1% en estado húmedo para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

						Bul k)	alto)	a testi go)	Bul k Sec a)	egad o Min eral)				estab ilida d		de hgp or 1 hora			
4,00 %	2,48 %	7	902, 30 gr	922, 15 gr	436, 32 gr	1,85 7	2,48 %	2,25 %	1,81 7	21,1 9 %	16, 86 %	1790 lb	1873, 333 lb	- 49,87 %	1,73 %	971, 08 gr	901, 81 gr	7,1 33 %	6,4 62 %
		8	908, 85 gr	919, 67 gr	420, 82 gr	1,82 2	2,48 %	1,22 %	1,80 0	21,9 2 %	17, 63 %	1850 lb				980, 13 gr	908, 35 gr	7,3 24 %	
		9	897, 60 gr	912, 67 gr	437, 52 gr	1,88 9	2,48 %	1,72 %	1,85 8	19,4 3 %	15, 00 %	1980 lb				943, 80 gr	897, 28 gr	4,9 29 %	

Elaboración propia

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12 en estado seco resumen.

Tabla 39 RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12 en estado seco

ESTADO SECO		
Emulsión 35.64 gr con aditivo 0.36 gr	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
4,00 %	1200 lb 1200 lb 1350 lb	1250,00 lb

Elaboración propia

Este cuadro representa el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica y el aditivo KAOMIN12 en estado seco para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12 en estado húmedo resumen.

Tabla 40 RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12 en estado húmedo

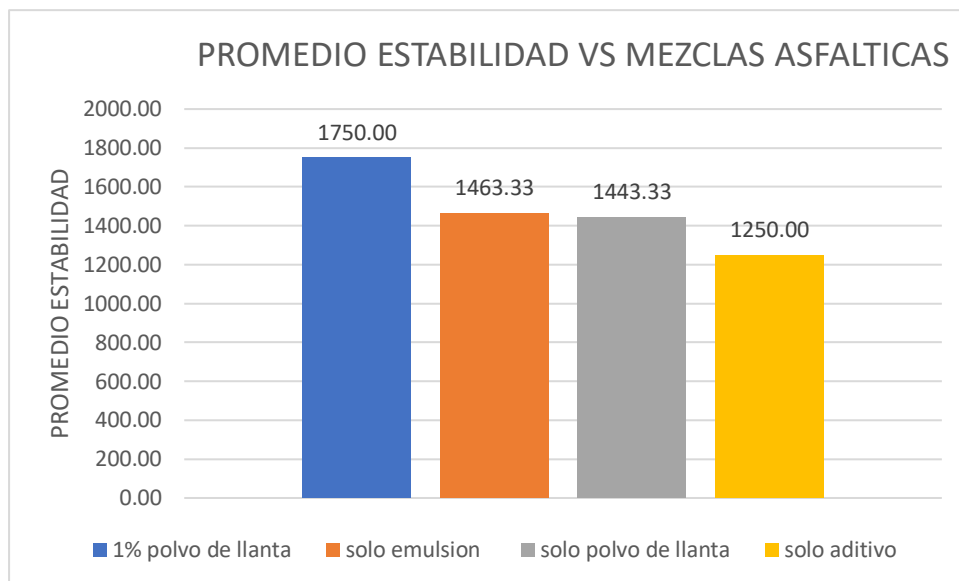
ESTADO HUMEDO		
Emulsión 35.64 gr con aditivo 0.36 gr	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
4,00 %	1790 lb 1850 lb 1980 lb	1873,33 lb

Elaboración propia

Este cuadro representa el resumen para las briquetas con RAP, emulsión asfáltica más el aditivo KAOMIN12 en estado húmedo para lo cual de los especímenes sacamos un promedio y determinamos la estabilidad para este caso.

Gráfica de promedio de estabilidad vs mezclas asfálticas

Ilustración 4 Promedio estabilidad vs mezcla asfáltica



Elaboración propia

Esta grafica se realizó una vez que se obtuvo todos los cálculos de la estabilidad promedio en seco para el primer resultado es del grupo 1 y utilizamos el promedio de la briqueta con el 1% de polvo de llanta ya que es el mayor de este grupo, para el segundo resultado solo emulsión es el diseño de la briqueta que está conformada por RAP, agua de pre-envuelta y emulsión, en el tercer resultado solo polvo de llanta o grupo 3 se utilizó el porcentaje de polvo de llanta optimo que fue el 1% con RAP, agua de pre-envuelta y emulsión y el ultimo valor solo aditivo es la emulsión más el aditivo KAOMIN12 con RAP y agua de pre-envuelta.

Análisis de resultados de estabilidad con la normativa MS-14.

Tabla 41 Verificación de estabilidad con la normativa MS-14

Verificación de la estabilidad con la normativa MS-14			
	Estabilidad Promedio	Especificación MS-14 (Tráfico liviano)	
Grupo 1			
Porcentaje de llanta	(lb)	Min (lb)	Cumple
1% Polvo de llanta y aditivo	1750	500	SI
1,5% Polvo de llanta y aditivo	1616,67		SI
2% Polvo de llanta y aditivo	1283,33		SI
2,5% Polvo de llanta y aditivo	1350		SI

	Grupo 2		
Solo RAP y Emulsión	1463,33	500	SI
	Grupo 3		
Solo %polvo llanta optimo	1443,33	500	SI
	Grupo 4		
Solo aditivo KAOMIN 12	1250,00	500	SI

Elaboración propia

6. Conclusiones

- Al desarrollar el diseño en frío y realizar el ensayo Marshall del pavimento asfáltico reciclado con la emulsión C_{ss}-1h, añadiendo el polvo de llanta de avión en los porcentajes de (1%, 1.5%, 2% y 2.5%) y un aditivo de adherencia KAOMIN 12, se determinó que para el diseño en frío óptimo fueron las briquetas del grupo 1, siendo los especímenes con 1% de polvo de llanta de avión la mejor combinación de estabilidad en estado seco con un promedio de 1700 lb.
- El aditivo de adherencia KAOMIN 12, no fue un elemento favorable en el aumento de estabilidad, el grupo 4 fue el menor de los cuatro grupos en términos de estabilidad. La composición fue: RAP, agua de pre-Envuelta, emulsión C_{ss}-1h y aditivo de adherencia, obteniendo un promedio de estabilidad de 1250 lb, pero cabe recalcar su importancia en la cohesión entre los componentes del espécimen, se pudo observar que en el proceso de desmolde de las briquetas que no poseían el aditivo eran vulnerables, teniendo que manipular con cuidado.
- El análisis de la combinación óptima de RAP, emulsión C_{ss}-1h, polvo de llanta de avión y aditivo de adherencia KAOMIN 12 para verificar la estabilidad ha sido satisfactorio. Los resultados obtenidos mediante el ensayo Marshall indican que todas las mezclas cumplen con los límites mínimos establecidos por el MS-14 del Instituto del Asfalto, ya que todos los especímenes superaron las 500 lb de estabilidad. Es importante destacar que, según la norma MS-14, este tipo de mezcla es adecuada para vías con tráfico liviano.

- Al aplicar la fórmula del porcentaje de pérdida de estabilidad, se esperaba obtener resultados positivos. Sin embargo, los datos experimentales revelaron que las briquetas en húmedo presentaron valores mayores que las briquetas en seco, resultando en porcentajes de estabilidad negativos. Este comportamiento se debe a que las briquetas estaban llenas de vacíos, permitiendo que el agua se introdujera en estos espacios y aumentara la estabilidad. Como resultado, el agua mejoró la capacidad de las briquetas para recibir las cargas aplicadas en el ensayo Marshall obteniendo el porcentaje de pérdidas de estabilidad máxima la combinación del grupo 2 constituida por PAP y emulsión C_{ss}-1h en estado seco de 1463.33 lb y en estado húmedo de 1920 lb dándonos un porcentaje de pérdidas de estabilidad -31.21%.

7. Recomendaciones

- Al incorporar polvo de llanta reciclada y RAP, se reduce la necesidad de nuevos materiales vírgenes, disminuyendo la explotación de recursos naturales y reduciendo las emisiones significativas de CO₂ generadas en la producción y transporte de materiales vírgenes. Se debe considerar el diseño del grupo 1 con la combinación de RAP, emulsión C_{ss}-1h, 2.5% de polvo de llanta de avión y aditivo de adherencia KAOMIN 12, ya que es el porcentaje más alto de polvo de llanta de avión y cumple con las normativas de estabilidad. Fomentar el uso de estos materiales reciclados promueve un modelo de economía circular en la industria de la construcción, contribuyendo a un enfoque sostenible y minimizando el desperdicio.
- A medida que se incrementa el porcentaje de polvo de llanta en la mezcla asfáltica, se observa una tendencia a la disminución de la estabilidad, según los ensayos realizados con porcentajes de 1%, 1.5%, 2% y 2.5%. Aunque estos porcentajes cumplen con las normativas de estabilidad, es importante no asumir que mayores cantidades de polvo de llanta mantendrán este cumplimiento. Se recomienda mantener el porcentaje de polvo de llanta dentro de los rangos estudiados y validados

para asegurar la estabilidad y el rendimiento óptimo de la mezcla asfáltica o hacer más ensayos aumentando el polvo de llanta.

- Antes de realizar la mezcla de las briquetas verificar que todos los equipos de los diferentes ensayos estén en su correcto funcionamiento.

Bibliografía

- Albornoz, Y. (2014). EMULSIONES ASFÁLTICAS. *Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad de Los Andes*.
- Al-Busaltan, S. (2012). *Mechanical properties of an upgrading cold-mix asphalt using waste material*. Asphalt Institute. (1994). *MS-14 Asphalt Cold Mix Manual*. Lexington: KY: Asphalt Institute.
- Crane, D., & Dale, C. (2010). *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*. John Wiley & Sons.
- Espinoza, G., & Guayaquil, M. (2023). 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.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2008). *Aircraft Tire Maintenance and Operational Practices*. FAA Advisory Circular.
- Gallego, J. (2010). *Materiales y Productos Bituminosos en la Construcción*. Editorial Reverté.
- García, A. (2018). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. México: Colegio de Ingenieros Civiles de México.
- Garnica, P., & Sesma, J. G. (2005). *Mezclas asfálticas y firmes*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Garnica, P., Gómez, J., & Sesma, J. (2005). *Mecánica de Suelos*. Editorial Pearson.
- HOLCIM. (2024). *HOLCIM*. Obtenido de <https://www.holcim.com.ec/agregados-arena-no-lavada>
- Instituto del Asfalto. (1989). *Manual de Pavimentos Asfálticos*. Instituto del Asfalto.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2003). *Manual de Emulsiones Asfálticas*. Publicación Técnica No. 235.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*.
- Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
- Intendencia de Montevideo. (s.f.). *DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Obtenido de <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/4-extractoprincipiosdeconstrucciondemezclasasfalticasencaliente.pdf>
- Islam, M., Zaman, M., & Tarefder, R. (2018). Curing evaluation of cold asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 428-437.
- Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>
- Kalman, B., & Svedinger, H. (2013). Field performance evaluation of cold recycled asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 871-889.
- Kamil, H., Dulaimi, A., Al-Mansoori, T., Al-Busaltan, S., Herez, M., Sadique, M., & Abdel-Wahed, T. (2021). The future of eco-friendly cold mix asphalt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111318>
- Kamil, H., Ruddock, F., & Atherton, W. (2016). Rutting Prediction of a Reinforced Cold Bituminous Emulsion Mixture Using Finite Element Modelling. *Procedia Engineering*.
- KAOMIN. (2019). KAOMIN 12 Aditivo promotor de adherencia para mezclas. *KAO*.
- Malekmohammadi, M., Ameri, M., & Vamegh, H. (2016). Compressive Strength of Cold Bituminous Mixtures. *Construction and Building Materials*, 246-254.
- Mallick, R., & El-Korchi, T. (2018). *Pavement Recycling and Reuse of Material*. CRC Press.
- Mallik, J., & Davidon, D. (1997). Asphalt Emulsions. En A. J. Hoiberg (Ed.) *Bituminous Materials: Asphalts, Tars, and Pitches* (pp. 1-40). Krieger Publishing Company.
- Miranda, F., & Aguiar, J. (2019). MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PAV: PAVIMENTOS

ASFÁLTICOS RECICLADOS. PITRA-LanammeUCR.

- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. . Universidad Católica de Colombia.
- Montejo, A. (2002). *Pavimentos de Concreto y Mezclas Asfálticas*. Universidad Católica de Colombia.
- MOP. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES ESPECIFICACIONES GENERALES*.
- MS, A. I. (2001). *Principios de construcción de mezclas asfálticas en caliente*. Manual Serie N° 22.
- National Asphalt Pavement Association. (2016). *Manual de Especificaciones de Construcción*. NAPA.
- NTE INEN 2680. (2013). Productos derivados del petróleo. Asfalto modificado con caucho reciclado. Requisitos e inspección.
- Oliver, J. (2001). The Influence of the Binder in RAP on Recycled Asphalt Properties. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 2(3), 311-325.
- Rashidi, H., Mahdi, S., & Shamseddin, S. (2018). Tensile strength evaluation of cold asphalt mixture with cementing emulsion. *Construction and Building Materials*, 403-410.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D., & Kennedy, T. (1996). . Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design,. *Napa Education Foundation*.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D., & Kennedy, T. (2009). Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. *National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation*.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D., & Kennedy, T. (2009). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction (3rd ed.)*. National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Rodrigues, J., Gomes, M., & Lobo, H. (2013). *Materiales Alternativos en Pavimentos Asfálticos*. Editorial Reverté.
- Rodríguez, R., Castaño, V., & Martínez, M. (2001). EMULSIONES ASFALTICAS. *SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES*.
- Rout, D., Biswas, S., Shubham, K., & Sinha, A. (2023). A systematic review on performance of reclaimed asphalt pavement (RAP) as sustainable material in rigid pavement construction: Current status to future perspective. *Journal of Building Engineering*, 76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107253>
- Singh, S., Ransinchung, G., Debbarma, S., & Kumar, P. (2018). Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes. *Journal of Cleaner Production*, 174, 42-52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.179>
- Stephens, J., Mahoney, J., & Dippold, C. (2001). Determination of the PG Binder Grade to Use in a RAP Mix.
- Val, M. d., & Kraemer, C. (2004). *Ingeniería de carreteras*. España: McGraw-Hill Interamericana .