


Elaboración de un diseño de mezcla para la estabilización de un suelo con emulsión asfáltica tipo CSS-1h y pavimento asfáltico reciclado (RAP) basado en el procedimiento de Marshall modificado

Elaboration of a mix design for the stabilization of soil with asphalt emulsion type CSS-1h and recycled asphalt pavement (RAP) based on the modified Marshall procedure

Alexandra Maylle Paima 
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Peruana Unión
Lima, Perú
alexandramaylle@upeu.edu.pe

Pedro Enrique Avila Tarma 
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Peruana Unión
Lima, Perú
pedroavila@upeu.edu.pe

Fecha de recepción: 13-12-2023 - **Fecha de aprobación:** 20-03-2023

RESUMEN

La rehabilitación de pavimentos deteriorados requiere de diversos recursos tanto naturales como económicos. Ante tal problemática, esta investigación tuvo como objetivo elaborar un diseño de mezcla para la estabilización de un suelo reciclado con emulsión asfáltica tipo CSS-1h, utilizando el método de diseño Marshall modificado. El estudio analizó la influencia del porcentaje de emulsión asfáltica (3,0 % a 6,0 %) respecto a las propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado según los parámetros que exige el manual peruano de carreteras EG-2013.

Los resultados muestran que, con una dosificación de 4,8 % de emulsión asfáltica y 2,88 % de residuo asfáltico se logra el mejor comportamiento en comparación a los demás porcentajes planteados, obteniendo una máxima estabilidad de 980 kg superando el mínimo valor de 227 kg establecido por la norma. Se concluyó que con dicha dosificación se obtiene una mezcla asfáltica estable con la que se puede estabilizar el pavimento deteriorado para soportar un tránsito vehicular mediano.

Palabras clave: emulsión asfáltica, estabilidad, diseño de mezcla, Marshall modificado.

ABSTRACT

The rehabilitation of deteriorated pavements requires various natural and economic resources. Given this problem, this research aimed to elaborate a mix design to stabilize recycled soil with asphalt emulsion type CSS-1h, using the modified Marshall design method. This study analyzed the influence of the percentage of asphalt emulsion (3,0 % to 6,0 %) regarding the physical and mechanical properties of the stabilized soil according to the parameters required by the Peruvian road manual EG-2013.

The results show that with a dosage of 4,8 % of asphalt emulsion and 2,88 % of asphalt residue, the best performance is achieved compared to the other percentages proposed, obtaining a maximum stability of 980 kg, exceeding the minimum value of 227 kg established by the regulations. It was concluded that with the aforementioned dosage a stable asphalt mixture is obtained with which the deteriorated pavement can be stabilized to withstand medium vehicular traffic.

Keywords: asphalt emulsion, mix design, stability, modified Marshall.

Introducción

Actualmente en Perú gran parte de la infraestructura vial se encuentra en un estado de deterioro según lo publicado por Aldazabal Sánchez (2019). La Cámara de Comercio de Lima indica que el 80 % de las carreteras del Perú están en un mal estado, esto se debe principalmente a que las vías están siendo expuestas a un tránsito vehicular mucho mayor para el cual fueron diseñadas. Es por ello que el pavimento tiende a cumplir su tiempo de vida mucho antes de lo planificado, por ende, presenta fallas superficiales y/o estructurales, asentamientos, hundimientos, deformaciones, agrietamientos, etc., lo cual hace que la estructura envejezca prematuramente (Humpiri Pineda, 2015).

Cuando un pavimento se encuentra en un estado crítico, no solo requiere de un tratamiento superficial para corregir las fallas estructurales profundas sino que, además, requiere de una rehabilitación vial a nivel estructural. Dada la problemática presentada, en esta investigación se elaboró un diseño de mezcla asfáltica basado en el método Marshall modificado para la estabilización de un suelo reciclado con emulsión asfáltica CSS-1h y pavimento asfáltico reciclado (RAP), debido a que la incorporación de emulsión asfáltica propicia mayor flexibilidad a la mezcla, aparte de incrementar la cohesión y permeabilidad del agregado, logrando una alta resistencia mecánica (García Hernández, Delgado Alamilla y Campos Hernández, 2018; Rocchetti y Ferreras, 2016). Por su parte, Leiva Villacorta y Vargas Nordbeck (2018) informan que el reciclaje de agregados RAP reduce los costos asociados a los materiales y el transporte, obteniendo beneficios económicos. Con el diseño de mezcla se determina el porcentaje de emulsión que logra estabilizar un material deteriorado, a fin de obtener una mezcla asfáltica capaz de soportar las aplicaciones de carga (estabilidad) sin adquirir una deformación permanente (fluencia) excesiva o falla por fatiga (Ludeña Rojas, 2017).

La estabilización de un pavimento deteriorado con emulsión asfáltica permite convertir un suelo de baja calidad en una capa estructural con una adecuada capacidad de carga (García Hernández *et al.*, 2018).

Asimismo, permite a la estructura recuperar sus propiedades iniciales y prolongar el periodo para el cual fue diseñada, de esa manera brinda a la estructura existente mayor capacidad de soporte y mitiga el impacto ambiental al reutilizar material que ya cumplió su ciclo de vida (Crispin Paucar y Helguero Calderón, 2016).

Está claro que estabilizar un pavimento deteriorado con emulsión y RAP es viable y permite rehabilitar la estructura utilizando las capas deterioradas (Paccori Mori, 2018), por lo que esta investigación presenta un caso práctico del correcto uso de la emulsión asfáltica CSS-1h y RAP.

Marco teórico

Diseño de mezcla

Un diseño de mezcla se realiza para establecer la proporción de emulsión con el que se logra mejorar en mayor magnitud las propiedades mecánicas de los agregados. Para ello, es esencial preparar mezclas de prueba en el laboratorio (Figura 1) y determinar las propiedades de trabajabilidad, susceptibilidad al daño por humedad, estabilidad y flujo de una mezcla suelo-emulsión (Instituto del Asfalto, 2008).

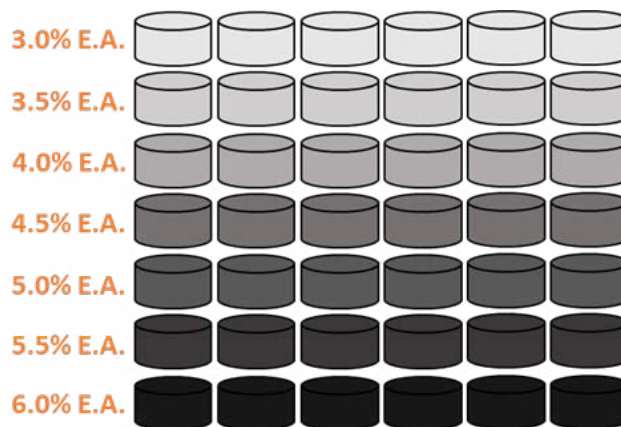


Figura 1. Muestras empleadas para el diseño variando el porcentaje de emulsión asfáltica

Nota: Se elaboró 6 briquetas para cada porcentaje de emulsión y se trabajó con el promedio de las 3 briquetas en condición seca y con el promedio de las 3 briquetas en la condición húmeda.

Estabilización de los agregados de un pavimento deteriorado

La estabilización del material proveniente de la carpeta asfáltica y capa base de un pavimento deteriorado con emulsión, se realiza en frío. Esto es llevado a cabo para la mejora de una o más propiedades físicas mediante procedimientos mecánicos (compactación) y adición de agentes estabilizadores. La razón principal de la estabilización es el aprovechamiento de materiales existentes del lugar de construcción de la obra (Orosa, Pasandín y Pérez, 2021). Por lo general, se aplican en vías deterioradas como es el caso de esta investigación, la cual buscó estabilizar los agregados reciclados con emulsión asfáltica tipo CSS-1h, con el objetivo de incrementar su resistencia, capacidad de carga y que ésta perdure en el tiempo.

Componentes para la estabilización de agregados con emulsión asfáltica

Agregado reciclado

En este estudio se empleó el reciclado a profundidad, los agregados que se utilizaron fueron obtenidos producto de la trituración mecánica de la carpeta asfáltica reciclada (RAP), más la capa base del pavimento deteriorado, para ser estabilizado con emulsión asfáltica, ya sea para la conformación de una capa base al colocar un tratamiento superficial o una nueva carpeta asfáltica de volumen de tránsito medio utilizando un ligante asfáltico, evitando así el uso de materiales de aporte.

El Pavimento Asfáltico Reciclado o RAP, es el material reutilizado que proviene de la carpeta asfáltica que ha perdido en gran medida sus propiedades iniciales y muchas veces concluido con su tiempo de vida (Leiva Villacorta y Vargas Nordcbeck, 2018).

Emulsión asfáltica

Es una mezcla de cemento asfáltico con emulsificantes que, cuando se junta con el agua, forma una emulsión estable, esto permite colocar una capa asfáltica a temperatura ambiente.

Para la elaboración del diseño de mezcla se empleó una emulsión asfáltica catiónica CSS-1h, este tipo de emulsión está conformado por 40 % de agua y 60 % de residuo asfáltico (Instituto del Asfalto, 2008). Se utilizó este tipo de emulsión porque permite a la mezcla asfáltica adquirir mayor grado de estabilidad y flexibilidad según la investigación de Vera Tello (2015) y Paccori Mori (2018), las cuales mencionan que con la emulsión de rotura lenta se obtiene periodos prolongados de trabajabilidad y es apta para su aplicación en mezclas para estabilización de agregados, bases y carpetas asfálticas.

Agua

La calidad del agua utilizada en una estabilización es importante para garantizar el correcto desempeño de la emulsión, previo al diseño se debe verificar su compatibilidad. Para este diseño se utilizó agua potable, el Manual de Carreteras indica que este tipo de agua se puede emplear sin la necesidad de realizar ensayos previos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015).

Método de diseño Marshall modificado

En este estudio se utilizó el método Marshall modificado para la elaboración del diseño de mezcla. Este método emplea agregados de tamaño máximo de 38 mm (1½”), y está pensado para diseño en laboratorio, son aplicables a mezclas que contengan cualquier grado de emulsión asfáltica y gradación densa (granulometría cerrada). El método utiliza especímenes de prueba (briquetas) estándar de 64 mm (2½”) de alto y 102 mm (4”) de diámetro, preparados mediante un procedimiento de combinar y compactar la mezcla agregado-emulsión según las normas AASHTO T 245 (AASHTO, 2022) y ASTM D1559 (ASTM International, 1989). Las briquetas se compactan con un martillo estándar (10 lb y caída libre de 18”), aplicando 50 golpes por lado, para su aplicación en casos de tránsito medio y mantenimiento, según el Manual MS-14, apéndice F (Instituto del Asfalto, 1997). Su finalidad es definir el contenido óptimo de residuo asfáltico para una combinación específica de agregados y así conocer las propiedades de la mezcla, para establecer las densidades y el contenido de vacíos que se deben cumplir durante la construcción del pavimento.

Finalmente, evalúa dos aspectos fundamentales: la prueba de estabilidad-flujo y la relación densidad-vacíos totales de los especímenes compactados (Instituto del Asfalto, 1997).

Ensayo de estabilidad y flujo (ASTM D1559, AASHTO T 245)

Cuando se estabiliza agregados con emulsión asfáltica, se realiza la prueba de estabilidad y flujo para conocer en qué magnitud la mezcla asfáltica mejora sus propiedades mecánicas. Esta prueba mide la resistencia a la deformación del agregado estabilizado y la fluencia mide la deformación bajo carga. La carga de rotura de los especímenes de prueba se designa como estabilidad y la deformación máxima se denomina fluencia (AASHTO, 2022; ASTM International, 1989; Calva Herrera y Muñoz Pérez, 2022).

Zona de estudio

Los agregados fueron obtenidos del pavimento ubicado en la Av. Prolongación Huayabal desde la Av. San Martín hasta la Plaza de Armas del Distrito de Santa Eulalia, Provincia de Huarochirí, Departamento de Lima en Perú (Figura 2). Su función es derivar y soportar el tránsito vehicular mediano del distrito. La longitud de la vía de estudio está conformada por 500 m.



Figura 2. Ubicación de la zona en estudio, tomado de Google Maps

Metodología

La investigación presenta un diagrama de flujo de los procesos que se desarrollaron durante el trabajo de campo, trabajo de laboratorio y finalmente, el trabajo de gabinete, proceso en el cual se realizó la selección del contenido óptimo de residuo asfáltico a fin de determinar si la mezcla asfáltica cumple con los criterios de diseño establecidos por el manual de carreteras EG-2013 (Figura 3).

Trabajo de campo

La primera fase del estudio consistió en realizar una inspección visual con el objetivo de conocer el estado de la vía y poder identificar la zona más crítica a lo largo del tramo evaluado. La evaluación del pavimento se realizó por el método del PCI (Índice de Condición de Pavimento). Con el resultado se determinó que el nivel de serviciabilidad de la vía alcanzó un valor de 22, según su escala califica como un pavimento muy pobre, por lo que es viable realizar una rehabilitación.

Para la extracción de muestra se tuvo en cuenta la norma CE.010 Pavimentos Urbanos, el cual determina el número de puntos de investigación de acuerdo con el tipo de vía (Figura 4). Esta investigación estudió una vía colectora de 500 m de largo y 6 m de ancho. Con base en la norma y en la extensión de la vía, se determinó la excavación de tres calicatas de dimensiones de (100x50x20) cm, estos 20 cm son la profundidad de la excavación, los primeros 5 cm son de la carpeta asfáltica y los 15 cm restantes son de la capa base (Figura 4.b).

Trabajo de laboratorio – Diseño de mezcla

Las características físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica están sujetas al tipo de agregado, contenido de humedad y emulsión. Debido a ello, después de verificar que las propiedades de los materiales cumplen con lo que indica el manual de carreteras EG-2013, ensayos de materiales y emulsiones asfálticas, se procedió a realizar el diseño basado en el método Marshall modificado del manual de mezclas asfálticas en frío MS-14 del Instituto del Asfalto, en conjunto con el manual básico de emulsiones asfálticas MS-19.

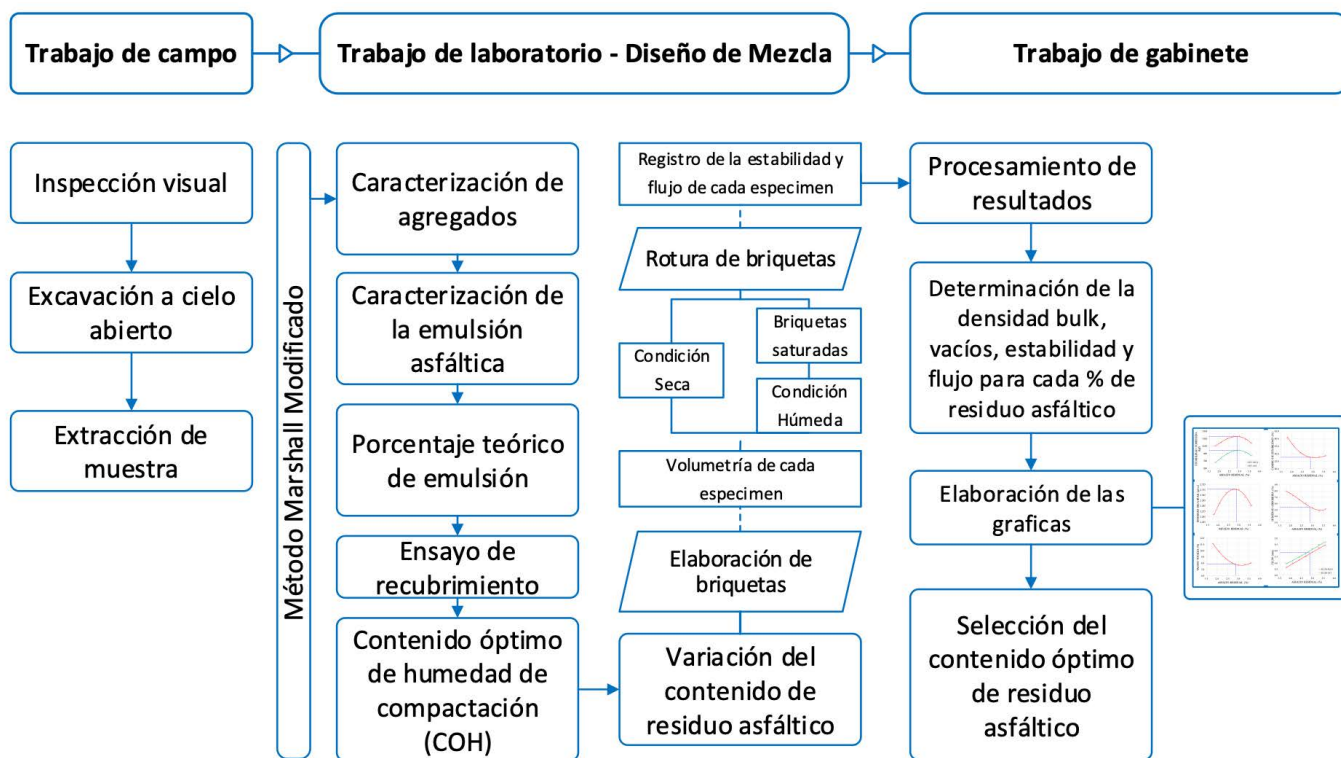


Figura 3. Diagrama de flujo de la investigación



Figura 4. a) Vía deteriorada; b) calicata en la zona de estudio; c) toma de muestras para ensayos; d) diseño de mezcla-elaboración de briquetas

Caracterización de los agregados

La metodología Marshall utiliza un gráfico semilogarítmico para definir el tamaño de partículas permitido, la ordenada dispone el porcentaje del material que pasa la malla, y en la abscisa las aberturas de malla en mm, dadas en logaritmo. La elección de una curva granulométrica para el diseño de mezcla, se desarrolla en función de dos parámetros: el tamaño máximo del agregado y las líneas de control (inferior y superior), siendo este último puntos de referencia obligatorio para la curva granulométrica.

- Material granular

Los agregados deben cumplir ciertos requerimientos mínimos para formar parte de un material estabilizado con emulsión y ser considerados apropiados para el diseño de mezcla (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015). En el Cuadro 1 se muestran las diferentes pruebas que se realizaron al material granular y lo requerido por las especificaciones.

- Análisis granulométrico del RAP

El reto inicial al realizar un diseño para estabilizar agregados reciclados con emulsión es definir una curva granulométrica que cumpla con lo requerido por la metodología del diseño, el RAP en general no cumple con la gradación establecida por la escasez de agregado fino siendo necesario agregar material de aporte, en este caso no sólo se pretendió estabilizar el RAP sino la combinación del material que proviene de la carpeta de rodadura y capa base del pavimento deteriorado (García Hernández *et al.*, 2018).

- Análisis granulométrico combinado

El análisis de gradación de la combinación de agregados se realizó teniendo en cuenta los espesores de las capas del pavimento del cual se extrajo el material, con ello se determinó una dosificación de 25 % de material de la carpeta de rodadura y 75 % de material de la capa base, respecto al peso del material combinado. Para la combinación de los agregados, previamente se realizó la granulometría al material proveniente de la capa base y del RAP, con estos resultados y, de acuerdo con la dosificación determinada mediante los espesores, se definió la curva granulométrica del material granular combinado. En la Figura 5 se muestra que con la dosificación

propuesta se cumple los parámetros de gradación que indica el Manual de Carreteras EG-2013 y el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS-19.

Caracterización de la emulsión asfáltica

Previo al diseño en laboratorio y después de haber determinado la caracterización de los agregados se procedió a comprobar si el tipo de emulsión escogido es apto para la elaboración del diseño de mezcla (Ulloa-Calderón y Múnera-Miranda, 2018). Los resultados del Cuadro 2 evidencian que la emulsión y residuo asfáltico cumplen con los requerimientos máximos y mínimos de calidad según el Manual de Carreteras EG-2013.

Determinación del porcentaje teórico de emulsión

Se calculó el porcentaje tentativo de emulsión asfáltica teniendo en cuenta los datos de la granulometría combinada y la ecuación Illinois. El resultado del contenido tentativo de emulsión fue 4,8 % respecto al peso del agregado combinado, siendo determinado mediante la ecuación del Manual MS-14 del Instituto del Asfalto, apéndice F (ecuación 1).

$$\%E = (0.05 * A + 0.1 * B + 0.5 * C) * 0.7 \quad (1)$$

Donde

% E = Porcentaje tentativo de emulsión.

A = Porcentaje del agregado retenido en el N° 8.

B = Porcentaje del agregado pasante del tamiz N° 8 y retenido en el N° 200.

C = Porcentaje del agregado pasante del tamiz N° 200.

Ensayo de recubrimiento

El ensayo se realiza para verificar la compatibilidad agregado-emulsión, con el fin de garantizar que la emulsión rompa de manera adecuada y logre el recubrimiento del agregado. Este valor fue determinado de forma visual, se añadió a la mezcla del material granular combinado, el porcentaje teórico de emulsión calculado y diferentes porcentajes de agua siguiendo el procedimiento que indica el Manual MS-14 del Instituto del Asfalto, apéndice F, obteniendo como resultado un 85 % de recubrimiento en la mezcla.

Cuadro 1. Características del material granular para estabilizar con emulsión asfáltica según la sección 301.E.02 del Manual de Carreteras EG-2013

Ensayo	Resultados	Criterio de especificación
Material pasante por el tamiz N° 200	9,6 %	10 % máx
Índice de plasticidad	3,3 %	≤9 %
Contenido de humedad	3,53 %	-
Peso específico de grava	2,650 g/cc	-
Porcentaje de absorción de grava	0,458 %	-
Densidad Máxima Seca (Proctor)	2,253 g/cc	-
Contenido óptimo de humedad	6,7 %	-
CBR al 100 % a 0,1"	61,0 %	-
CBR al 95 % a 0,1"	53,3 %	-
CBR al 90 % a 0,1"	46,3 %	-
Materia orgánica	0,45 %	<1% peso
Tamaño máximo	1½"	<e/3
Espesor de la capa	20 cm	15 cm mín
Sales solubles AG	2275 ppm	≤6000 ppm
Sales solubles AF	2470 ppm	≤6000 ppm
Desgaste a la abrasión	25,2 %	≤50 %
Durabilidad al sulfato de magnesio AG	8,22 %	≤18 %
Durabilidad al sulfato de magnesio AF	13,49 %	≤15 %

Nota: CBR: California Bearing Ratio, AG: Agregado Grueso, AF: Agregado Fino, ppm: partes por millón.

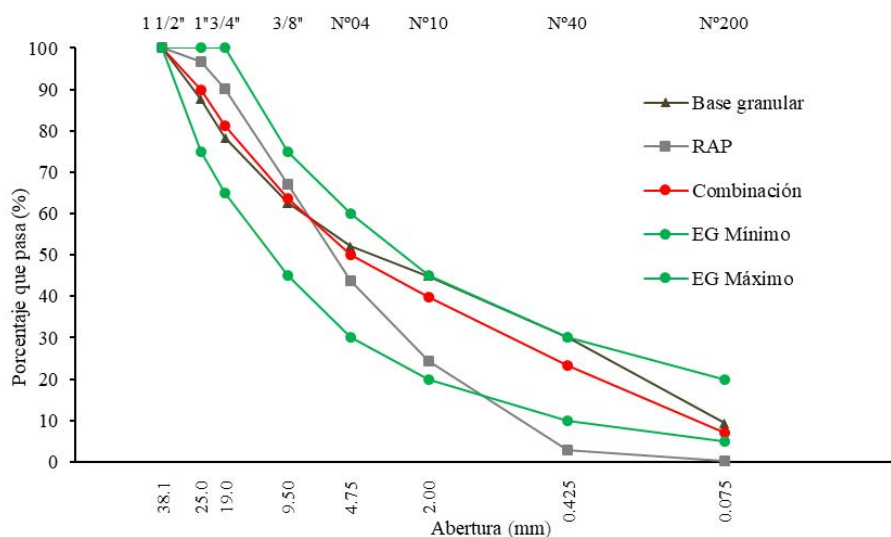


Figura 5. Análisis granulométrico de la base granular, RAP, combinación de los agregados y los límites máximos y mínimos según el Manual de Carreteras EG-2013

Cuadro 2. Resultados de los ensayos de la emulsión asfáltica

Ensayos sobre la emulsión	Método ASTM	Unidades	Criterio de Especificación		Resultado
			Mínimo	Máximo	
Viscosidad Saybolt-Furol, 25 °C	D 7496	ssf	20	100	24
Estabilidad al almacenamiento, 24 h	D 6930	%	---	1	0,4
Destilación	D 6997	---			
Contenido de asfalto residual	D 6997	%	57	---	60,0
Contenido de disolventes	D 6997	%	---	---	0
Prueba del tamiz N° 20	D 6933	%	---	0,1	0
Carga de partícula	D 7402	---	Positivo		Positivo
Ensayos sobre el residuo de la emulsión					
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	D 5	dmm	40	90	65
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min	D 113	cm	40	---	+100
Solubilidad en tricloroetileno	D 2042	%	97,5	---	99,2

Contenido óptimo de humedad de compactación (COH)

Las propiedades de una mezcla asfáltica dependen de la densidad de una muestra compactada. Para el COH se prepararon 10 briquetas (dos para cada porcentaje de agua) en el compactador Marshall aplicando 50 golpes por lado, estas fueron elaboradas con la mezcla del material granular combinado, manteniendo el porcentaje teórico de emulsión 4,8 % y variando el porcentaje de agua en intervalos de 1 %, con el fin de definir la curva estabilidad corregida vs. humedad de compactación. Para el porcentaje total de agua en la mezcla, se tuvo en cuenta la cantidad de agua en la emulsión CSS-1h, la humedad natural del agregado y el porcentaje de agua añadida, siendo el COH el porcentaje de agua añadida con el cual se logra la mayor estabilidad (Ludeña Rojas, 2017). Con los valores obtenidos de la densidad y estabilidad se realizaron gráficos, mediante los que se extrajo el contenido óptimo de humedad de compactación. La Figura 6 muestra que con un COH de 3,3 % respecto al peso del agregado combinado, se alcanza la máxima densidad seca de 2,219 g/cm³ y estabilidad de 1320 kg, obteniendo como porcentaje total de agua en la mezcla un 6,88 %.

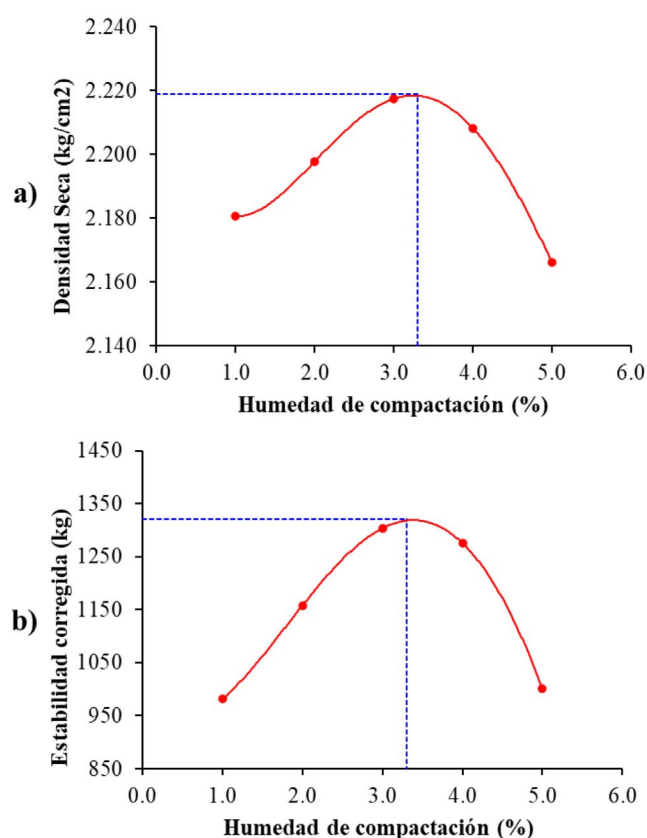


Figura 6. Contenido óptimo de humedad de compactación

Variación del contenido de residuo asfáltico

Esta variación se realizó de la misma forma como se preparó los especímenes para el óptimo de humedad de compactación, pero esta vez manteniendo el COH de 3,3 % y variando el porcentaje de emulsión entre 3 % y 6 % (Figura 1) respecto al peso del agregado combinado en intervalos de 0,5 %, con el fin de definir la curva estabilidad corregida vs. residuo asfáltico.

Para el porcentaje óptimo de residuo asfáltico se elaboraron 42 briquetas (seis para cada porcentaje de emulsión), las cuales fueron moldeadas y ensayadas con el compactador y prensa Marshall. Realizada la compactación de las briquetas para cada porcentaje de emulsión, estas fueron curadas por 24 h en los moldes al aire libre y 24 h adicionales en un horno a una temperatura de 38 °C una vez desmoldadas. Posterior a ello, se separaron las briquetas, 3 para la condición seca y 3 para la condición saturada. Para la determinación de las estabilidades previamente se conoció de cada briketa su volumetría, la estabilidad seca fue determinada inmediatamente después, mientras que, para la estabilidad húmeda, las briquetas fueron saturadas a 100 mm de mercurio (Hg) de presión por una hora antes de realizar la prueba, esto según el manual MS-14. Después de las roturas, fueron secadas al horno. Una vez ensayadas las briquetas en condición seca,

húmeda y determinada la volumetría, se calcularon las características volumétricas (densidad seca bulk, vacíos totales y humedad absorbida) y mecánicas (estabilidad y flujo).

Análisis e interpretación de resultados

Se realizó el diseño de mezcla asfáltica siguiendo el procedimiento de Marshall modificado establecido en el manual MS-14 del Instituto del Asfalto como se indica en el Manual de Carreteras EG-2013. Este procedimiento permitió determinar el contenido óptimo de residuo asfáltico en función a los criterios de diseño para una mezcla agregado-emulsión.

Con los resultados (ver Cuadro 3) de la mezcla asfáltica respecto de la variación de cada porcentaje de emulsión, se realizaron los siguientes gráficos (Figura 7) que relacionan cada una de las propiedades (volumétricas y mecánicas) con el contenido de residuo asfáltico:

- Estabilidad corregida vs. residuo asfáltico
- Vacíos totales vs. residuo asfáltico
- Densidad seca bulk vs. residuo asfáltico
- Cambio de estabilidad vs. residuo asfáltico
- Humedad absorbida vs. residuo asfáltico
- Flujo vs. residuo asfáltico

Cuadro 3. Propiedades volumétricas y mecánicas para cada porcentaje de emulsión asfáltica

Propiedades de la mezcla asfáltica							
Emulsión (%)	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Residuo asfáltico (%)	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6
Estabilidad corregida seca (kg)	1101,5	1192,6	1275,7	1341,2	1356,7	1277,1	1178,7
Estabilidad corregida saturada (kg)	653,5	756,8	902,0	982,0	979,5	917,6	842,3
Vacíos totales (%)	11,1	9,8	9,0	8,1	7,6	7,6	8,0
Densidad seca bulk (g/cc)	2,269	2,292	2,302	2,313	2,315	2,306	2,287
Cambio estabilidad (%)	40,7	36,5	29,3	26,8	27,8	28,1	28,5
Humedad absorbida (%)	6,2	5,2	4,4	3,9	3,3	2,8	2,7
Flujo seco (mm)	2,6	3,0	3,2	3,5	3,9	4,2	4,4
Flujo saturado (mm)	3,0	3,2	3,5	3,7	4,1	4,5	4,7

Nota. Luego de la rotura de las briquetas en condición seca y húmeda se procesaron los resultados para la determinación de las propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla asfáltica.

Mediante los gráficos de la Figura 7 se logró obtener el porcentaje óptimo de residuo asfáltico necesario para completar el diseño de mezcla. Para ello se tuvo en cuenta que, en este tipo de mezclas, la cantidad de residuo asfáltico aplicado normalmente no debe exceder el 3 % sobre el peso del agregado, a su vez el porcentaje de emulsión debe variar entre 4 % y 6 % respecto al mismo peso, según el Manual de Carreteras EG-2013 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015).

Estabilidad corregida vs. porcentaje de residuo asfáltico

Como se observa en la Figura 7.a, a medida que aumenta el porcentaje de residuo asfáltico, aumenta la estabilidad, pero llega a un punto en que el incremento del residuo no supone un aumento significativo de la estabilidad, al contrario, se produce un descenso porque el residuo separa el agregado, disminuyendo la fricción interna y la resistencia

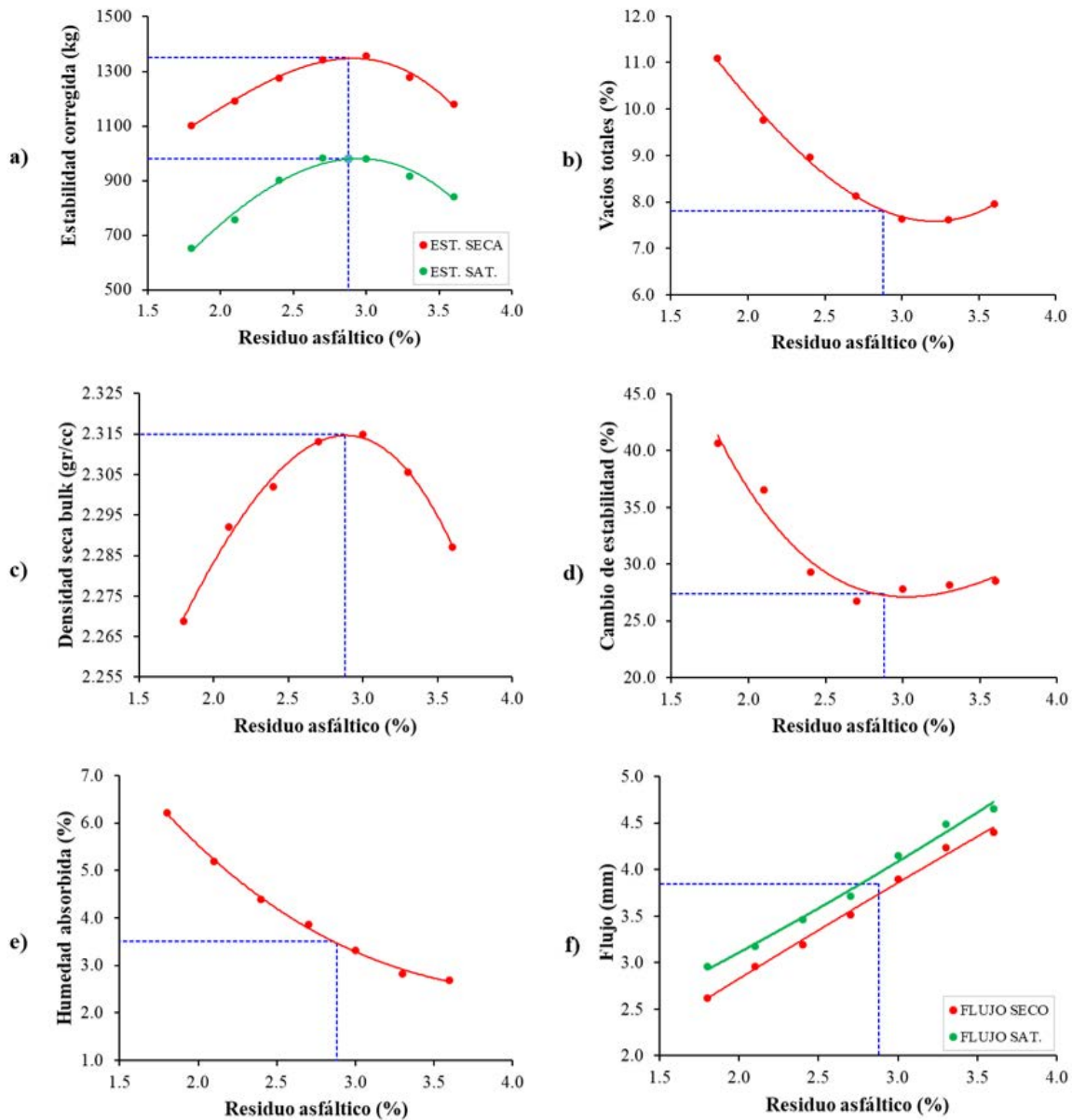


Figura 7. Gráficas del diseño de mezcla asfáltica

global de la mezcla. El porcentaje óptimo de residuo asfáltico derivado del diseño fue aquel porcentaje con el que se logró mayor estabilidad húmeda, la razón de ello fue conocer el comportamiento de la mezcla en un ambiente de severidad.

Además, en la Figura 7.a se muestra que la máxima estabilidad húmeda, se logró con un 2,88 % de residuo asfáltico. Con el fin de determinar si el contenido de residuo fue óptimo para completar el diseño, se ingresó a las gráficas de las demás propiedades y se verificó si con este porcentaje de residuo se cumple con los criterios establecidos por la norma. El valor de estabilidad fue de 980 kg. Desde luego, como criterio de diseño este valor estuvo por encima del mínimo establecido por el manual de carreteras EG-2013 el cual exige una estabilidad de 227 kg (500 lb).

Vacíos totales vs. porcentaje de residuo asfáltico

Los valores de los vacíos totales en la mezcla asfáltica reciclada, se muestran en la Figura 7.b para cada contenido de residuo asfáltico. Como se ve reflejado, a medida que aumenta el porcentaje de residuo asfáltico, disminuyen los vacíos en la mezcla, esto porque se vuelve más manejable y se compacta fácilmente, pero cuando alcanza un porcentaje superior a las necesidades de la mezcla, el total de vacíos comienza a aumentar debido a que el residuo empieza a separar los huecos generados por los agregados. Por lo tanto, la densidad seca bulk disminuye con el aumento de vacíos totales causados por el porcentaje excesivo de residuo asfáltico.

Para la determinación del porcentaje de vacíos totales en la mezcla compactada, y que este se adapte al porcentaje de residuo asfáltico obtenido en el apartado anterior para obtener una estabilidad óptima, se ingresó a la Figura 6.b con 2,88 % de residuos asfálticos y se obtuvo para este caso un 7,8 % de vacíos totales.

Densidad seca bulk vs. porcentaje de residuo asfáltico

La curva de la Figura 7.c indica que la densidad aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de residuo asfáltico. Sin embargo, a partir de cierto punto disminuye, esto ocurre debido a que inicialmente el

residuo asfáltico llena los espacios intergranulares de los agregados hasta un máximo posible, luego desplaza el material granular disminuyendo la densidad de la mezcla. Escoger un porcentaje de residuo asfáltico menor al punto de inflexión genera mayor porcentaje de vacíos por aire y escoger un porcentaje superior genera mayor porcentaje de vacíos por la separación de los agregados.

Para su determinación se entró a la Figura 7.c con el 2,88 % de residuo asfáltico y se obtuvo el valor de densidad que se adecúa al contenido óptimo de residuo asfáltico, para este caso el valor de la densidad seca bulk fue de 2,315 g/cm³.

Cambio de estabilidad vs. porcentaje de residuo asfáltico

Para los especímenes elaborados (42 briquetas) se emplearon dos grupos, ambos curados al aire libre, uno de estos grupos fue ensayado en condición seca y el otro grupo en condición saturada (como se explicó en el apartado variación del contenido de residuo asfáltico).

El cambio de estabilidad viene de la determinación de la estabilidad seca y la estabilidad saturada, estableciendo luego la diferencia de estas estabilidades dividido entre la estabilidad seca. A mayor contenido de residuo asfáltico, el cambio de estabilidad va disminuyendo, eso quiere decir que el material granular que se está estabilizando tiene mayor resistencia al agua, proporcionado por el residuo asfáltico. El cambio de estabilidad para un contenido de residuo asfáltico de 2,88 % fue de 27,4 % como se muestra en la Figura 7.d. Este valor se encuentra por debajo del máximo establecido por la norma (50 % máx).

Humedad absorbida vs. porcentaje de residuo asfáltico

Para evaluar la resistencia al daño causado por la humedad se realizaron ensayos a las briquetas en condición saturada. El cálculo del porcentaje de humedad absorbida es la diferencia del contenido de humedad en condición seca y condición saturada después de la rotura. La humedad absorbida para un contenido de residuo asfáltico de 2,88 % fue de 3,50 % como se muestra en la Figura 7.e, a mayor porcentaje

de residuo asfáltico en la mezcla menor humedad absorbida, lo cual indica mejoras en la resistencia. Sin embargo, no es recomendable estabilizar materiales granulares con un alto porcentaje de residuo asfáltico, porque se requiere una cantidad excesiva de emulsión asfáltica, lo cual da como resultado un costo muy elevado.

Flujo vs. porcentaje de residuo asfáltico

Para evaluar la deformación de las briquetas bajo carga, las probetas se dividieron en dos grupos (tres por cada contenido de residuo asfáltico). Uno de estos grupos fue ensayado en seco, el otro fue sometido a saturación (como se menciona en la sección variación del contenido de residuo asfáltico). Como se observa en la Figura 7.f, los valores de flujo aumentan con el incremento de residuo asfáltico. El valor del flujo para un contenido de residuo asfáltico de 2,88 % fue de 15 1/100" (3,85 mm) el cual está dentro del límite de la especificación.

Análisis estadístico

Se realizó mediante el análisis de componentes principales donde se estandarizó los resultados obtenidos de cada propiedad respecto a la variación de residuo asfáltico para definir el mejor comportamiento.

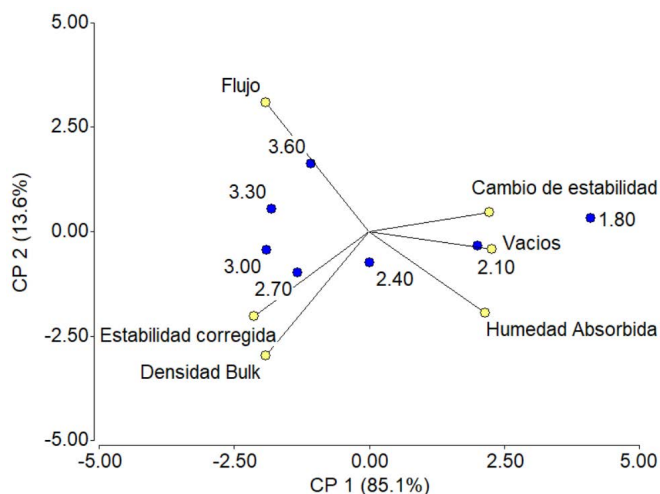


Figura 8. Análisis de componentes principales en función a la variación del porcentaje de residuo asfáltico

La Figura 8 muestra que con 2,7 % y 3,0 % se obtiene mayor estabilidad corregida y densidad seca bulk, menor cambio de estabilidad y vacíos totales y una humedad absorbida como un flujo promedio, a diferencia de 3,6 % que tiene mayor flujo y los porcentajes de 1,8 % y 2,1 % que tienen valores mayores de vacíos totales y cambio de estabilidad. Por lo que el análisis contrasta el valor escogido de 2,88 %, el cual se encuentra entre 2,7 % y 3,0 % de residuo asfáltico.

Trabajo de gabinete - Selección del contenido óptimo de residuo asfáltico

Finalmente, para la selección del contenido óptimo de residuo asfáltico se realizó un análisis a los resultados obtenidos en el diseño de mezcla.

Los resultados del diseño evidenciados en el Cuadro 4, demostraron alcanzar resistencia suficiente para una mezcla asfáltica reciclada en frío. Las propiedades mecánicas de la mezcla agregado-emulsión y los parámetros de diseño se lograron satisfacer ampliamente con un 2,88 % de residuo asfáltico y 4,8 % de emulsión respecto al peso del material granular combinado, lo cual coincide con las investigaciones de Tejeda Piusseaut, Zambrano Mesa y Alonso Aaenlle (2020) y Vera Tello (2015). La incorporación de este porcentaje de emulsión mejoró en mayor grado la resistencia, por ser más estable y cumplir con los parámetros establecidos para una mezcla asfáltica agregado-emulsión. Por su parte, Chilcon Carrera y Ramírez Gálvez (2018), Chávez Caparó y Otazú Escalante (2015) y Paccori Mori (2018) concluyen que el mejor comportamiento de una mezcla asfáltica se logra con porcentajes superiores de emulsión, sin embargo, en esta investigación se consideró que estabilizar el material de un pavimento deteriorado con un alto porcentaje de emulsión incrementa el costo del proyecto. No obstante, la proporción de emulsión dependerá directamente de la granulometría del material a estabilizar.

Cuadro 4. Resultados del diseño y parámetros de control de calidad de la mezcla agregado-emulsión según la sección 424, del Manual de Carreteras EG-2013

Propiedades	Valor	Parámetros	
		Min.	Máx.
Emulsión (%)	4,8	-	-
Residuo asfáltico (%)	2,88	-	-
Estabilidad seca (kg)	1350	-	-
Estabilidad húmeda (kg)	980	227	-
Vacíos totales (%)	7,8	2	8
Densidad seca bulk (g/cm ³)	2,315	-	-
Cambio de estabilidad (%)	27,4	-	50
Humedad absorbida (%)	3,5	-	4
Flujo (1/100")	10	8	16
Recubrimiento (%)	85	50	-

Ensayo de estabilidad – Flujo

Mediante esta prueba se determinó la resistencia (estabilidad) y la deformación (flujo) de la mezcla asfáltica al estar sometida bajo una carga monótonica, estos resultados alcanzaron un valor de 980 kg y 15 1/100" (Bastidas Martínez *et al.*, 2021).

Influencia del residuo asfáltico en la mezcla

Para poder identificar la influencia del porcentaje de residuo asfáltico respecto a la propiedad predominante (estabilidad corregida) de la mezcla asfáltica se realizó un análisis de inferencia estadística mediante la prueba Post hoc de Scheffe.

El Cuadro 5 muestra que la relación de 2,7 % con 1,8 %, 2,1 % y 3,6 % hay diferencias significativas ya que son menores al valor de 0,05 al contrario que con 2,4 %, 3,0 % y 3,3 %, resaltando que la relación de 2,7 % con 3,0 % no presentan diferencias significativas, lo cual indica que presentan mayor semejanza, y de acuerdo con el Cuadro 6 se obtienen las mayores medias de la estabilidad corregida, valores que concuerdan con el análisis de componentes principales.

Cuadro 5. Prueba ANOVA – post hoc – comparaciones múltiples de la estabilidad corregida

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente:		ESTABILIDAD CORREGIDA				
Scheffe						
(I) Residuo Asfáltico		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95 %	
					Límite inferior	Límite superior
1,80	2,10	-103,40000	31,28950	0,167	-232,7372	25,9372
	2,40	-248,46667*	31,28950	0,000	-377,8038	-119,1295
	2,70	-328,53333*	31,28950	0,000	-457,8705	-199,1962
	3,00	-326,00000*	31,28950	0,000	-455,3372	-196,6628
	3,30	-264,16667*	31,28950	0,000	-393,5038	-134,8295
	3,60	-188,83333*	31,28950	0,003	-318,1705	-59,4962
2,10	1,80	103,40000	31,28950	0,167	-25,9372	232,7372
	2,40	-145,06667*	31,28950	0,023	-274,4038	-15,7295
	2,70	-225,13333*	31,28950	0,000	-354,4705	-95,7962
	3,00	-222,60000*	31,28950	0,001	-351,9372	-93,2628
	3,30	-160,76667*	31,28950	0,011	-290,1038	-31,4295
	3,60	-85,43333	31,28950	0,343	-214,7705	43,9038
2,40	1,80	248,46667*	31,28950	0,000	119,1295	377,8038
	2,10	145,06667*	31,28950	0,023	15,7295	274,4038
	2,70	-80,06667	31,28950	0,414	-209,4038	49,2705
	3,00	-77,53333	31,28950	0,450	-206,8705	51,8038
	3,30	-15,70000	31,28950	1,000	-145,0372	113,6372
	3,60	59,63333	31,28950	0,722	-69,7038	188,9705
2,70	1,80	328,53333*	31,28950	0,000	199,1962	457,8705
	2,10	225,13333*	31,28950	0,000	95,7962	354,4705
	2,40	80,06667	31,28950	0,414	-49,2705	209,4038
	3,00	2,53333	31,28950	1,000	-126,8038	131,8705
	3,30	64,36667	31,28950	0,651	-64,9705	193,7038
	3,60	139,70000*	31,28950	0,030	10,3628	269,0372
3,00	1,80	326,00000*	31,28950	0,000	196,6628	455,3372
	2,10	222,60000*	31,28950	0,001	93,2628	351,9372
	2,40	77,53333	31,28950	0,450	-51,8038	206,8705
	2,70	-2,53333	31,28950	1,000	-131,8705	126,8038
	3,30	61,83333	31,28950	0,689	-67,5038	191,1705
	3,60	137,16667*	31,28950	0,034	7,8295	266,5038
3,30	1,80	264,16667*	31,28950	0,000	134,8295	393,5038
	2,10	160,76667*	31,28950	0,011	31,4295	290,1038
	2,40	15,70000	31,28950	1,000	-113,6372	145,0372
	2,70	-64,36667	31,28950	0,651	-193,7038	64,9705
	3,00	-61,83333	31,28950	0,689	-191,1705	67,5038
	3,60	75,33333	31,28950	0,482	-54,0038	204,6705
3,60	1,80	188,83333*	31,28950	0,003	59,4962	318,1705
	2,10	85,43333	31,28950	0,343	-43,9038	214,7705
	2,40	-59,63333	31,28950	0,722	-188,9705	69,7038
	2,70	-139,70000*	31,28950	0,030	-269,0372	-10,3628
	3,00	-137,16667*	31,28950	0,034	-266,5038	-7,8295
	3,30	-75,33333	31,28950	0,482	-204,6705	54,0038

Nota: La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05

Cuadro 6. Prueba post hoc – sub conjuntos homogéneos (estabilidad vs. residuo asfáltico)

Estabilidad					
Scheffe ^a					
Residuo Asfáltico	N	Subconjunto para alfa=0,05			
		1	2	3	4
1,80	3	653,47			
2,10	3	756,87	756,87		
3,60	3		842,30	842,30	
2,40	3			901,93	901,93
3,30	3			917,63	917,63
3,00	3				979,47
2,70	3				982,00
Sig.		0,167	0,343	0,482	0,414

Nota. Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a: Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica=3.

Conclusiones

La estabilización de suelos con emulsión asfáltica para rehabilitar pavimentos deteriorados mediante mezclas asfálticas en frío requiere de la elaboración de un diseño de mezcla, a fin de evaluar su resistencia a la deformación.

Los resultados del diseño y parámetros de control de calidad de la mezcla cumplen con los criterios de diseño y resistencia Marshall que exige las especificaciones del Manual de Carreteras EG-2013 sección 424 para un diseño de mezcla asfáltica en frío de granulometría cerrada, el cual busca la rehabilitación de un pavimento flexible.

El uso de las emulsiones asfálticas dota de mejores estabilidades al suelo tratado. Sin embargo, es importante resaltar que el mejor comportamiento de la mezcla no solo se debe al incremento de la estabilidad, sino al cumplimiento de las demás propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica establecidas en la normativa.

El porcentaje de emulsión asfáltica con el que se logró un comportamiento satisfactorio ante la aplicación de carga fue de 4,8 %, teniendo en la mezcla 2,88 % de residuo asfáltico el cual representa el 60 % respecto a la emulsión. Por otro lado, se afirma que con las proporciones encontradas se obtuvo una mezcla asfáltica estable capaz de soportar o resistir un tránsito vehicular mediano. Al colocar la mezcla asfáltica esta puede desempeñarse como una carpeta de rodadura o una capa base al emplear un tratamiento superficial sobre el material granular estabilizado, optimizando recursos económicos por el tiempo de aplicación relativamente cortos y sin mayores inconvenientes para el tránsito, además de reducir el impacto ambiental negativo.

La aplicación de la técnica del reciclado de pavimentos asfálticos con emulsión asfáltica en el país aún son pocas, por lo cual no se pudo contar con especificaciones técnicas nacionales que permiten seguir con parámetros, por esta razón se consideró que este estudio es un aporte que contribuirá a futuras investigaciones.

Referencias

- Aldazabal Sánchez, A. (2019). CCL: El 80 % de las carreteras del Perú está en mal estado. *Diario Correo*. Recuperado de: <https://diariocorreo.pe/economia/ccl-el-80-de-las-carreteras-del-peru-esta-en-mal-estado-876224/>
- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (2022). *Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus* (AASHTO T 245). AASHTO.
- ASTM International (1989). *Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. Annual Book of ASTM Standards* (ASTM D1559). ASTM International.
- Bastidas Martínez, J. G., Rondón Quintana, H. A., Contreras Zartha, L., Forero Castaño, S., y Rojas Rozo, L. (2021). Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 75–84. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021007>
- Calva Herrera, L. O., y Muñoz Pérez, S. P. (2022). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente incorporando escorias de acero. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1–10. <https://doi.org/10.15517/iv.v24i43.48421>
- Chávez Caparó, E. F., y Otazú Escalante, L. M. (2015). *Estabilización De Suelos Con Emulsión Asfáltica In Situ En La Av. Prolongación Andrés Avelino Cáceres, Análisis Comparativo* (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.
- Chilcon Carrera, J. C., y Ramírez Gálvez, K. R. (2018). *Elaboración de una mezcla asfáltica en frío almacenable para la reparación de pavimentos en el Departamento de Lambayeque, 2017* (Tesis de grado). Universidad Señor de Sipán, Perú.
- Crispin Paucar, E. J., y Helguero Calderón, L. L. (2016). *Estructura de un pavimento asfáltico en material reciclado para mejorar sus beneficios integrales* (Tesis de grado). Universidad Ricardo Palma, Perú.
- García Hernández, F., Delgado Alamilla, H., y Campos Hernández, D. E. (2018). Influencia de variables de diseño en las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado. *Infraestructura Vial*, 20(35), 5–11. <https://doi.org/10.15517/iv.v20i35.34829>
- Humpiri Pineda, K. (2015). *Análisis superficial de pavimentos flexibles para el mantenimiento de vías en la región de Puno* (Tesis de maestría). Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Perú.
- Instituto del Asfalto (1997). *MS-14 Asphalt Cold Mix Manual, Third Edition*. Asphalt Institute, Estados Unidos.
- Instituto del Asfalto (2008). *MS-19 The Basic Asphalt Emulsion Manual, Fourth Edition*. Asphalt Institute and Asphalt Emulsion Manufacturers Association, Estados Unidos.
- Leiva Villacorta, F., y Vargas Nordbeck, A. (2018). Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Infraestructura Vial*, 19(33), 35–44. <https://doi.org/10.15517/iv.v19i33.32921>
- Ludeña Rojas, J. M. (2017). *Aplicación de mezclas asfálticas emulsionadas (Maep), en la conservación vial de la carretera a Antamina Ancash-Perú 2017* (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2015). *Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para la construcción (EG-2013)*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú.
- Orosa, P., Pasandín, A. R., y Pérez, I. (2021). Compaction and volumetric analysis of cold in-place recycled asphalt mixtures prepared using gyratory, static, and impact procedures. *Construction and Building Materials*, 296, 123620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123620>
- Paccori Mori, F. L. (2018). *Propuesta técnica de aplicación del pavimento flexible reciclado para rehabilitación vial - Pachacamac* (Tesis de grado). Universidad Peruana de Los Andes, Perú.

- Rocchetti, M. del H., y Ferrerras, M. E. (2016). Estudios Sobre el Estabilizado de Suelos: Caracterización de Materiales. *Revista Tecnología y Ciencia*, (32), 88–97.
- Tejeda Piusseaut, E., Zambrano Mesa, M. I., y Alonso Aenlle, A. (2020). Materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos. *Infraestructura Vial*, 22(39), 29–42. <https://doi.org/10.15517/iv.v22i39.41574>
- Ulloa-Calderón, A., y Múnera-Miranda, J. C (2018). *Metodología de Diseño para Materiales Granulares Estabilizados con Emulsión Asfáltica*. Informe LM-PI-UMP-054-R3. Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA LanammeUCR, Costa Rica.
- Vera Tello, J. C. (2015). *Mejoramiento con emulsiones asfálticas de bases granulares, para pavimentos en la region Lambayeque* (Tesis de grado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Perú.

Los contenidos de este documento, representan insumos dentro de un proceso de gestión del conocimiento que, por sí mismos, a priori, no constituyen una declaración de una normativa, procedimiento, criterio o herramienta oficial de acatamiento obligatorio en la gestión de proyectos de obra vial pública de Costa Rica, por parte del LanammeUCR. Cualquier posición oficial para Costa Rica sobre aspectos puntuales contemplados en este documento, se realizarán por los medios que corresponden, según los lineamientos de la Universidad de Costa Rica, de la Ley 8114 y su Reglamento al Art 6 (Decreto 37016 – MOPT).