

DOSIFICACIONES PARCIALES DE CENIZA DE CAESALPINIA SPINOSA Y FIBROCEMENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

PARTIAL DOSAGES OF CAESALPINIA SPINOSA ASH AND CEMENT FIBER IN ASPHALT MIXTURES FOR FLEXIBLE PAVEMENTS

Víctor Raúl, Amao Eslachin¹; Leopoldo, Choque Flores²

Recibido 23/11/2024; Aprobado: 11/06/2025

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica262.3>

RESUMEN

Este estudio experimental evalúa la influencia de la adición parcial de ceniza de *Caesalpinia Spinosa* (CS) o Ceniza de tara, y Fibrocemento (FC) en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles. Se analizaron porcentajes de reemplazo del relleno mineral de 1,0%, 1,5% y 2,5%, mediante los ensayos Marshall y Lottman, con el objetivo de determinar su efecto sobre la estabilidad, fluencia y resistencia a la humedad. Esta mezcla mejora sus propiedades, por consiguiente, tienden a ser aplicables en carreteras. Se fabricaron un total de 51 briquetas de mezcla asfáltica seleccionada. La distribución de especímenes se organizó en dos grupos: el primero compuesto por 27 especímenes para la prueba Marshall y el segundo por 24 para la prueba Lottman. Del conjunto de patrón (0% de modificación), se prepararon 18 briquetas para ensayo Marshall, y 6 fueron destinadas a los ensayos y Lottman. En el caso de las mezclas modificadas con aditivos en concentraciones de 1,0%, 1,5% y 2,5%, se elaboraron 3 y 6 especímenes para cada ensayo, respectivamente. Los resultados del ensayo Marshall indican que la estabilidad disminuye respecto a la muestra patrón (1289,9 kg), obteniendo valores de 1271,9 kg, 1198 kg y 1256 kg para 1,0%, 1,5% y 2,5% de CS+FC, respectivamente. En cuanto a la fluencia, los valores varían de 2,91 mm en la muestra patrón a 3,5 mm, 3,26 mm, 3,08 mm y 2,93 mm según el porcentaje de adición. Finalmente, el ensayo de tracción indirecta (TSR) mostró valores de 82,7%, 79,6%, 81,2% y 76,7%.

Palabras clave: *Ceniza de *Caesalpinia Spinosa*; fibrocemento; mezclas asfálticas modificadas*

ABSTRACT

This experimental study evaluates the influence of the partial addition of *Caesalpinia Spinosa* ash (CS) or Tara ash, and Fiber Cement (FC) in asphalt mixtures for flexible pavements. Mineral filler replacement percentages of 1,0%, 1,5% and 2,5% were analyzed using the Marshall and Lottman tests, with the aim of determining their effect on stability, creep and resistance to moisture. This mixture improves its properties, therefore, tend to be applicable to roads. A total of 51 briquettes of selected asphalt mixture were manufactured. The distribution of specimens was organized into two groups: the first composed of 27 specimens for the Marshall test and the second by 24 for the Lottman test. From the pattern set (0% modification), 18 briquettes were prepared for the Marshall test, and 6 were intended for the and Lottman tests. In the case of the mixtures modified with additives at concentrations of 1,0%, 1,5% and 2,5%, 3 and 6 specimens were prepared for each test, respectively. The results of the Marshall test indicate a decrease in stability compared to the standard sample (1289,9 kg), with values of 1271,9 kg, 1198 kg, and 1256 kg for 1.0%, 1,5%, and 2,5% CS+FC, respectively. Creep values ranged from 2,91 mm for the standard sample to 3.5 mm, 3.26 mm, 3.08 mm, and 2,93 mm, depending on the addition percentage. Finally, the indirect tensile strength test (TSR) showed values of 82,7%, 79,6%, 81,2%, and 76,7%.

Keywords: *Caesalpinia Spinosa ash; cement fibers; modified asphalt mixtures*

¹Víctor Raúl, Amao Eslachin. Ingeniero Civil. Universidad César Vallejo. Especialista en estudios y proyectos en la Municipalidad Distrital de Pangoa. Perú. Correo: vamaoe@ucvvirtual.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0764-5939>

²Leopoldo, Choque Flores. Doctor en ingeniería civil. Docente investigador en la Universidad Cesar Vallejo. Correo: lchoquef@ucv.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0914-7159>

1. INTRODUCCIÓN

Se han estado desarrollando y planteando nuevas técnicas de cómo mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, en diversas partes del mundo. Nuevos diseños de mezclas bituminosas son estudiados con el fin de sobreponer los daños que ocasionan el tráfico y el cambio climático drástico, los cuales se han convertido en la prioridad de ingenieros de carreteras, todo con respecto a ampliar la vida de servicio y durabilidad del asfalto.

Por tanto, el objetivo general planteado en este artículo fue la de evaluar la influencia de las dosificaciones parciales de ceniza de *Caesalpinia Spinosa* y Fibrocemento en el desempeño mecánico y durabilidad de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles. Específicamente, se analizó su efecto en la estabilidad, fluencia y densidad mediante el ensayo Marshall, y su resistencia a la humedad y daño por agua a través del ensayo de Lottman, considerando normativas y criterios de desempeño para mejorar la calidad y vida útil de las estructuras viales.

2. ANTECEDENTES

En general, se menciona que la mezcla bituminosa se aplica especialmente en carreteras y pista de aeropuertos esto debido a que la capa asfáltica se somete a cargas. Debe poseer el porcentaje correcto de betún para estar seguro de una buena resistencia a la deformación por corte cuando se expone a una temperatura muy alta, los vacíos en la mezcla requieren estar suficientemente compactada para hacer posible una mayor compactación por el tráfico y así también mejorar la resistencia a la deformación plástica [1]. Sin embargo, otro causante del deterioro es la humedad, especialmente en áreas tropicales con altas precipitaciones. Es fundamental evaluar la sensibilidad del asfalto a dicha humedad, ya que si es insuficiente puede provocar fallas prematuras y pérdida de adherencia al agregado, afectando así la durabilidad del pavimento [2].

Las fuertes cargas de tráfico durante toda su vida útil del pavimento, se une a la humedad

siendo la causa del debilitamiento del asfalto lo que estimula una pérdida de cohesión conllevando a la separación del asfalto y agregados y también el desprendimiento de la carpeta asfáltica [3]. En Nigeria los ingenieros y especialistas en carreteras realizaron investigaciones con un motivo relevante que es amplificar la vida útil y la durabilidad del asfalto, lo cual se admite que aplicar una técnica conocida que es combinar agregados con aglutinante asfáltico y aplicar presión y calor sobre la mezcla, ya no hace efecto en la durabilidad del pavimento, de esta forma el relleno mineral cumple un papel importante en la elaboración de la mezcla caliente asfáltica ampliando el servicio de uso de la carpeta de rodadura [4].

En Indonesia, el incremento en los números de vehículos públicos y privados ha incentivado a la ampliación de construir carreteras para disipar el tránsito, debido a que se acumula en las horas de máxima movilidad, y esto afectando directamente proporcional a la escasez de materia prima y los daños en vías principales [5]. Así mismo en China la superficie vial tiene distintas ventajas, como la conducción cómoda, beneficios económicos y la adaptabilidad ambiental. Sin embargo, el volumen de tráfico, la carga de ejes de los vehículos ha aumentado considerablemente junto a las patologías de carreteras [6].

Las mezclas asfálticas tienen la función de soportar de manera directa las acciones de las llantas de vehículos y transferir las cargas a los niveles inferiores del pavimento, para así proporcionar una excelente rodadura. El material estructural se caracteriza por la propiedad de cohesión y su resistencia una vez endurecida a la estabilidad permanente durante su uso o a las deformaciones plásticas y la fatiga. La temperatura y la carga en que será expuesta son entes vitales para que la mezcla asfáltica prolongue su duración, por ello su caracterización y propiedades tienen que estar conectadas a estos factores, lo que implica también la necesidad de conocer la geología del material [7].

Diversas investigaciones se han planteado en relación con el tema de investigación, en cuanto a la evaluación de las propiedades

físicas y mecánicas de bloques de concreto, con la adición y/o sustitución de materiales considerados desechables. Por ejemplo, se realizó un estudio de la influencia de las partículas de caucho en la resistencia a la compresión de bloques de concreto, con el objetivo de disminuir el impacto ambiental negativo generado por los neumáticos. Consistió en la sustitución de agregado fino por partículas de caucho en porcentajes del 10 %, 15 % y 20 %. Los resultados obtenidos al realizar el ensayo de resistencia a la compresión mostraron que la sustitución del agregado fino por partículas de caucho en un 20 % corresponde a una resistencia mínima neta de 3,69 MPa; por lo tanto, fue considerada viable. Además, un bloque de concreto con sustitución parcial de agregado fino por partículas de caucho resulta más económico que un bloque convencional [5].

3. METODOLOGÍA

Este estudio se realizó en el marco de un diseño experimental aplicado, con el objetivo de generar conocimiento con orientación práctica. El método utilizado fue cuantitativo, para permitir el análisis estadístico. Para asegurar la validez de los resultados, se utilizó como referencia una muestra estándar o patrón (P) de mezcla asfáltica para evaluar el impacto de los cambios en los porcentajes de ceniza y fibra en la mezcla de Ceasclpina Spinosa y Fibrocemento (FC).

Establece relaciones de causa y efecto entre los cambios en la composición de la mezcla asfáltica y las propiedades resultantes, estos

efectos se analizan en detalle a través de diferentes representaciones gráficas, lo que permite una visualización y comprensión precisas del impacto de los materiales añadidos en las características mecánicas y de rendimiento de la mezcla. Además, se recopiló información de múltiples fuentes, incluida literatura científica, regulaciones, publicaciones y trabajos académicos, y se compararon los resultados de los ensayos realizados para este estudio.

La muestra se tomó de una forma aleatoria con un muestreo no probabilístico escogido de manera conveniente, se utilizaron las normas Marshall [8], cuyo objetivo es determinar la combinación óptima de agregados y ligante asfáltico para obtener una mezcla con propiedades de resistencia y durabilidad adecuadas. Adicionalmente, se aplicó las normas Lottman [9] o ensayo Lottman modificado (AASHTO T283), para evaluar la resistencia al daño por humedad de mezclas asfálticas. Por tanto, las propiedades a estudiar son: flujo, estabilidad, resistencia al daño por humedad inducido para una muestra total de 51 briquetas detalladas en la Tabla 1. A continuación, reflejado en la Figura 1 se muestran los procedimientos desarrollados como parte de la metodología de trabajo, los cuales fueron diseñados para demostrar experimentalmente el impacto de las variables estudiadas. Para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados, se establecieron controles adecuados en cada etapa del desarrollo experimental.

Tabla 1. Muestra de diseño de mezcla asfáltica por diseñar. Fuente: adaptado por los autores de [8 y 9]

Método Ensayos	Fibrocemento y ceniza de tara (%)			
	Patrón (P)		Modificado	
	0%	1,0 %	1,5 %	2,5%
MARSHALL	18	3	3	3
LOTTMAN	6	6	6	6
Parcial	24	9	9	9
Total	51 unidades			

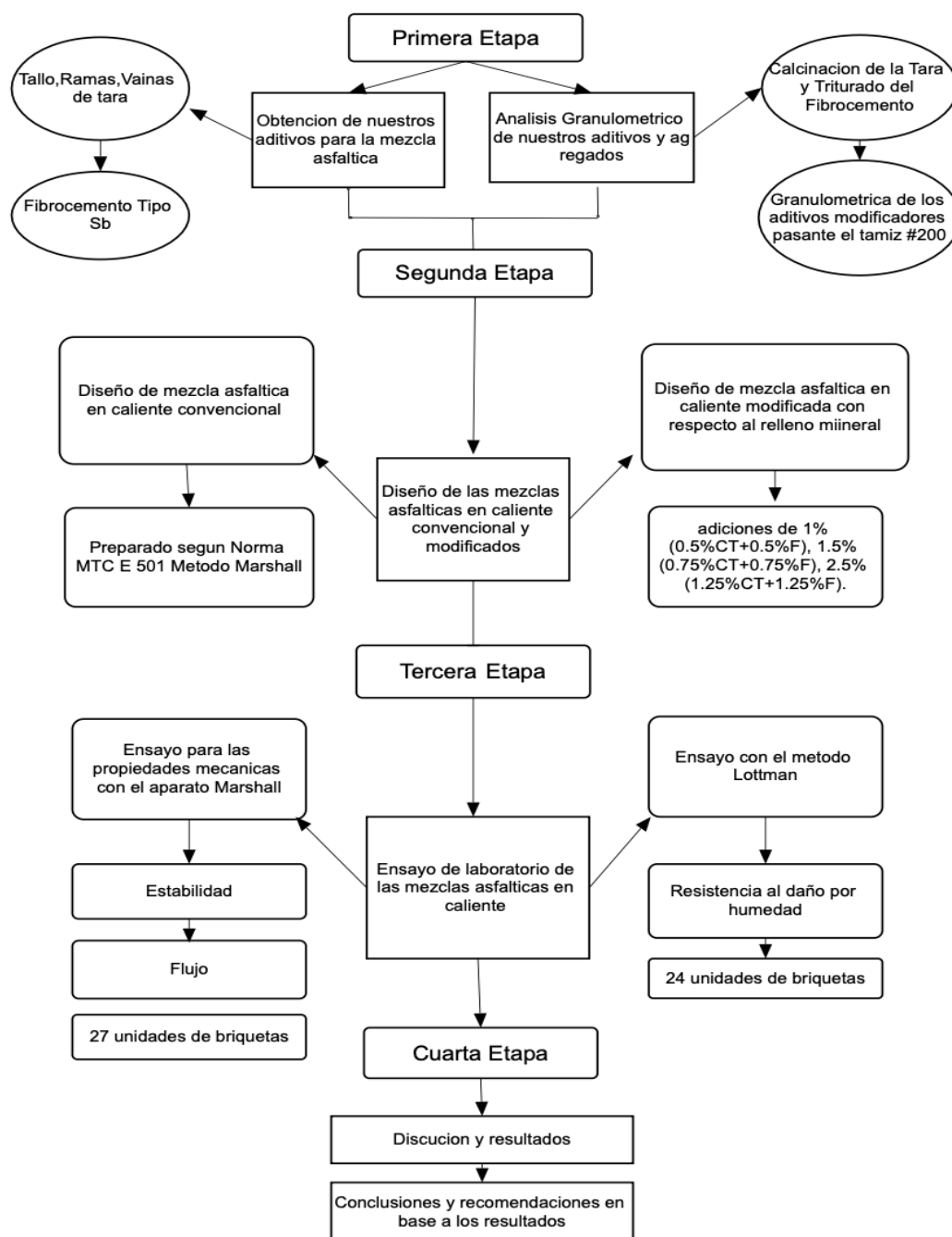


Figura 1. Diagrama del método de trabajo experimental. Fuente: los autores

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Desarrollo de Ensayos Previos

Se efectuaron ensayos previos para el diseño de mezcla asfáltica, la relevancia de conocer las características físicas y mecánicas de los agregados, serán componentes primordiales para la calidad y satisfacción de los resultados,

sin estos ensayos no habría calidad para demostrar que los valores brindados son significativos, de la cual se aplican Normas técnicas para su desarrollo: AASHTO T-168 [10], ASTM D 2172 [11], AASHTO T-30 [12], ASTM-D6926 [13], ASTM-D6927 [14].

La Tabla 2 muestra el análisis granulométrico

o ensayos en las partículas de agregado grueso para determinar los tamaños nominales máximos y mínimos. Esta evaluación es crucial para el diseño de mezclas homogéneas,

especialmente en el caso de mezclas asfálticas en caliente, donde el tamaño de las partículas afecta directamente las propiedades mecánicas y estructurales del pavimento.

Tabla 2. *Análisis granulométrico del agregado grueso. Fuente: los autores*

Tamiz (#)	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial (gr)	%Retenido Acumulado (gr)	% que pasa
3/4	19,05	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2	12,70	895,0	17,7	17,7	82,3
3/8	9,525	1,955,0	38,7	56,4	43,6
1/4	6,30	--	--	--	--
# 4	4,760	2,020,0	40,0	96,4	3,6
# 8	2,360	170,0	3,4	99,8	0,2
# 10	2,00	8,0	0,2	100,0	0,0
Fondo		2,0	0,0	100,0	0,0
Total		Peso de la muestra 5050,0 gramos			

En la Tabla 3 se identifica que, para la muestra ensayada, se siguieron los pasos que mencionan las Normas, estas indicaciones dadas manifiestan que previo al experimento las características de la muestra deben ser tal y como se encuentran in situ, para así determinar y hallar su peso inicial y peso después de un lavado y secado.

Tabla 3. *Resultado de prueba de gravedad específica, absorción y módulo de fineza. Fuente: los autores*

Peso inicial	5065,0 gr
Peso lavado seco	5050,0 gr
% que pasa N° 4	3,6 gr

En la granulometría de agregado grueso se consideró como muestra una cantidad de 5050,0 gr donde se determinó los tamaños de acuerdo con los tamices; se observa que el tamaño mínimo de agregado está en el tamiz

#4 con un 4,9% de acumulado que pasa y en la malla 3/4 del 100%.

En la Figura 2 se observa la granulometría de agregado grueso considerada como muestra una cantidad de 5050,0 gramos donde se determinó los tamaños de acuerdo con los tamices; se observa que el tamaño mínimo de agregado está en el tamiz #4 con un 4,9% de acumulado que pasa y en la malla 3/4 del 100%.

Y en la Tabla 4 se aprecia la granulometría de agregado fino, se consideró como muestra una cantidad de 799,2 gramos donde se determinó los tamaños de acuerdo con los tamices; se observa que el tamaño mínimo de agregado está en el tamiz #200 con un 8,5% de acumulado que pasa.

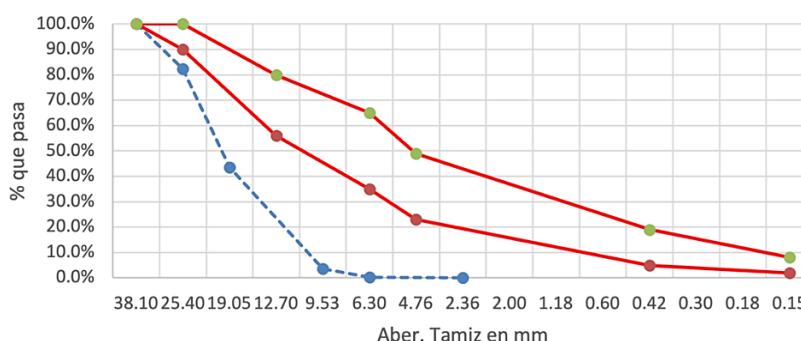


Figura 2. *Curva granulométrica del agregado grueso. Fuente: los autores*

Tabla 4. Análisis granulométrico del agregado fino. Fuente: los autores

Tamiz (#)	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial (gr)	%Retenido Acumulado (gr)	% que pasa
3/8	9,525	0	0	0	100
# 4	4,760	34,3	4,3	4,3	95,7
# 8	2,360	224,7	28,1	32,4	67,6
# 10	2,00				
# 16	1,180	177,3	22,2	54,6	45,4
# 30	0,600	118,1	14,8	69,4	30,6
# 40	0,420				
# 50	0,300	88,2	11,0	80,4	19,6
# 80	0,180				
# 100	0,150	60,3	7,5	88,0	12,0
# 200	0,075	28,1	3,5	91,5	8,5
<# 200	fondo	68,2	8,5	100,0	0,0
fin			764,9		
Total			799,2 gramos		

De acuerdo con la Tabla 5 se puede describir que, la prueba de gravedad específica se lleva a cabo utilizando una muestra no alterada y extraída con precaución para evitar alterar su humedad y prevenir la exudación.

Tabla 5. Análisis granulométrico del agregado fino. Fuente los autores

Peso inicial	799,2 gr
Peso lavado seco	731,0 gr
% que pasa N° 200	8,5%
Peso retenido N° 4	34,3
Módulo de Fineza	5,20

En la Figura 3, correspondiente a la medición granulométrica del agregado fino, se puede observar que la distribución de tamaños de partículas cumple con los límites especificados en la normativa vigente, caracterizándolo como un material no plástico. Asimismo, el porcentaje acumulado resaltado a través de la malla N°200 es de 9,3%, lo que indica la presencia de una fracción de limo en el material.

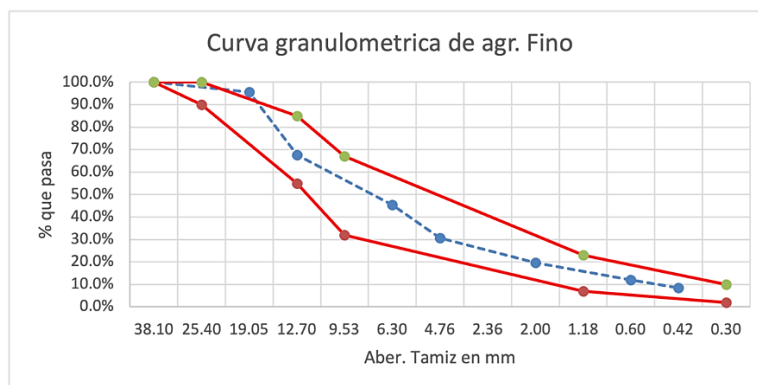


Figura 3. Diagrama Curva granulométrica del agregado fino. Fuente: los autores

4.2. Análisis de la Caesalpinia Spinosa

Para determinar la composición química de la ceniza de Caesalpinia Spinosa denominada vulgarmente Tara, el ensayo se realizó en el laboratorio Slab, (Sistema de servicios y análisis químicos S.A.C), se utilizaron 50 gramos de ceniza enfriada a temperatura ambiente. El ensayo se realizó en Talavera,

Perú, donde la temperatura alcanza los 6 °C y la humedad relativa es del 58%. Se evidencia en la Tabla 6 el orden en como el laboratorio presenta los óxidos, este ensayo se realiza con la metodología fluorescencia de rayos x, el barrido se realiza con Na a U y con un límite de detección de 0,001%.

Tabla 6. Composición química de *Ceaselpina Spinosa*. Fuente: los autores

Composición Química	Resultado (%)
Óxido de Potasio (K_2O)	64,735
Óxido de Calcio CaO	16,065
Óxido de Fosforo (P_2O_5)	7,163
Óxido de Magnesio (MgO)	6,183
Óxido de Azufre (SO_3)	2,029
Óxido de Silicio (SiO_3)	1,548
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	1,200
Óxido de Zinc (ZnO)	0,770
Óxido de Estroncio (SrO)	0,098
Óxido de Manganeseo (MnO)	0,080
Óxido de Rubidio (Rb_2O)	0,059

En la Figura 4 Los compuestos químicos obtenidos en el ensayo de rayos X son representativos de acuerdo con la muestra extraída, dando como resultado que el 64,74% es de óxido de potasio (K_2O), seguido por el óxido de calcio (CaO) en un 16,07%, y 7,16% de óxido de fósforo (P_2O_5), además el 6,18% es del óxido de magnesio (MgO) y menor al 5% son los otros componentes que se presentan en la Figura 4.

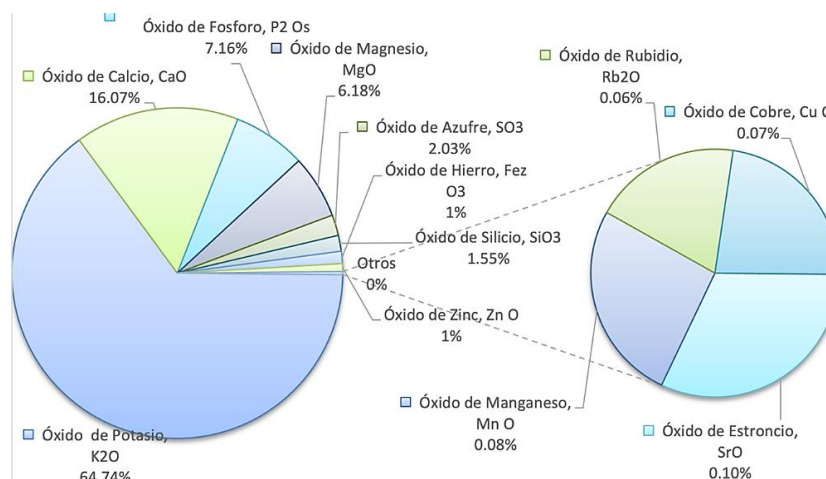


Figura 4. Representación de óxidos de *Caesalpina Spinosa*. Fuente: los autores

4.3. Análisis al Fibrocemento

La caracterización de este elemento se realizó mediante la trituration del mismo, el método empleado fue el post-aplastamiento manual con un martillo, seguido de la separación de residuos de papel y fibrocemento. Una vez extraída la fibra, se continuó tritutando hasta alcanzar un tamaño mínimo de 750 μm , conforme a lo indicado en la norma ASTM-D420 [15] para relleno mineral. La Tabla 7 evidencia el orden en como el laboratorio presenta los óxidos, este ensayo se realiza con la metodología fluorescencia de rayos x, el barrido se realiza con Na a U y con un límite de detección de 0,001%.

Tabla 7. Composición química del Fibrocemento. Fuente: los autores

Composición Química	Resultado (%)
Óxido de Calcio (CaO)	41,582
Óxido de Azufre (SO_3)	35,964
Óxido de Fosforo (P_2O_5)	0,902
Óxido de Silicio (SiO_3)	0,811
Óxido de Estroncio (SrO)	0,417
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	0,298
Óxido de Potasio (K_2O)	0,204
Óxido de zirconio (ZrO_2)	0,022
Perdida por calcinación	19,800

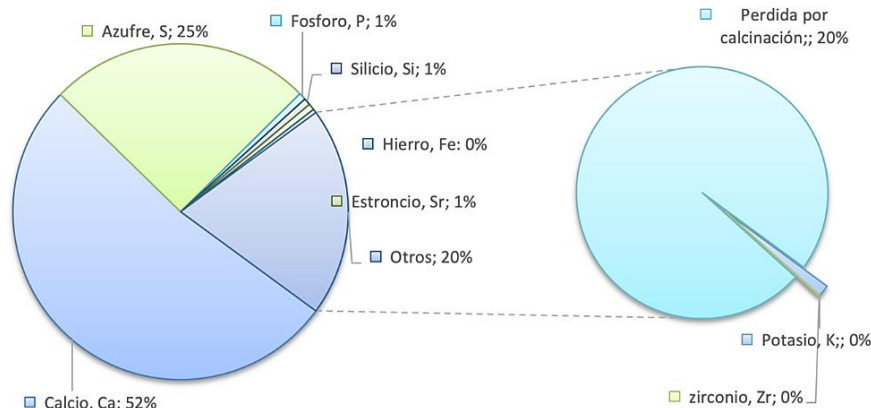


Figura 5. Representación de la composición de óxidos de Fibrocemento. Fuente: los autores

En la Figura 5 los análisis químicos del Fibrocemento demuestran que, al realizar la calcinación para obtener la cantidad de los resultados de los elementos químicos, se ve que pierde proporciones, es decir pierde peso a lo de su estado de llegada. Pero al realizar el ensayo las cantidades que prevalecen en la muestra son el calcio con 52% y azufre con 25%, entre los demás elementos como; fosforo, silicio, hierro, estroncio, potasio y zirconio, que son menores al 1%.

En la Tabla 8 se muestra la experimentación

para el diseño de la mezcla, se consiguió determinar el porcentaje óptimo de Cemento Asfáltico (CA), obteniendo así que el 5,65% de CA es la cantidad con la que se procederá la experimentación. Estos valores cumplen de forma efectiva con los parámetros establecidos en la Norma Manual de Ensayo de Materiales [16]. Para cumplir con estos parámetros se tiene que tener en cuenta que tanto en la estabilidad y el flujo Marshall cumplan con los valores estándares; siendo que con el 5,65% de CA, su estabilidad es 1289,8 kg, flujo 3,5 mm y % de vacíos el 3,4.

Tabla 8. Diseño de mezcla asfáltica para % de cemento asfáltico óptimo. Fuente: los autores

Ítems	% Cemento asfáltico (CA)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Peso específico de Bulk de la briqueta (g/cm ³)	2,348	2,361	2,386	2,401	2,386
% vacíos	7,07	5,70	3,89	2,72	2,33
% vacíos agregado mineral	15,99	15,97	15,53	15,46	16,43
Relación betún vacíos (%)	55,79	64,30	74,94	82,41	85,84
Estabilidad (Kg)	1245	1302	1286	1303,5	1245,7
Flujo (mm)	2,91	3,26	3,40	3,67	3,80

4.4. Resultados de Diseño de Mezcla Asfáltica Modificada

Los valores obtenidos al sustituir el

Fibrocemento y Ceniza de tara en 1,0%, 1,5%, 2,5%, a la mezcla asfáltica para determinar su estabilidad, flujo y el daño producido por la humedad, se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del ensayo de Marshall con adición de Fibrocemento y Ceniza de tara. Fuente: los autores

Ítems	Porcentaje de CA según diseño			
	5,65% de CA			
	0,0% (P)	1,0%	1,5%	2,5%
Peso específico de Bulk	2,388	2,405	2,413	2,433
% vacíos	3,4	3,16	2,81	2,01
% vacíos agregado mineral	15,5	15,87	15,99	16,17
Relación betún vacíos (%)	76,7	80,11	82,46	87,58
Estabilidad (Kg)	1289,8	1271,9	1198,0	1256,0
Flujo (mm)	3,5	3,26	3,08	2,93

En la Figura 6, a gráfica de barras indica que los valores de estabilidad Marshall que tiene una variación cuando se mezcla con fibrocemento y ceniza de tara; al añadir los porcentajes de 1%, 1,5% y 2,5% la estabilidad

es 1271,9 kg, 1198,0 kg, 1256,0 kg respectivamente, siendo el valor máximo de la estabilidad patrón (P).

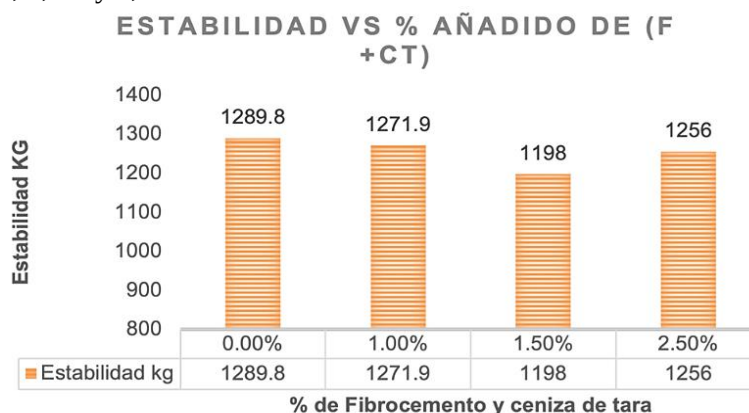


Figura 6. Diagrama de curva granulométrica. Fuente: los autores

En la Figura 7, la gráfica de barras indica los valores del flujo Marshall de los especímenes fabricados, al añadir el Fibrocemento y Ceniza de tara en los porcentajes de 1%, 1,5% y 2,5%;

los flujos son 3,26 mm, 3,08 mm y 2,93 mm respectivamente, siendo mayor el flujo de la muestra patrón (P).

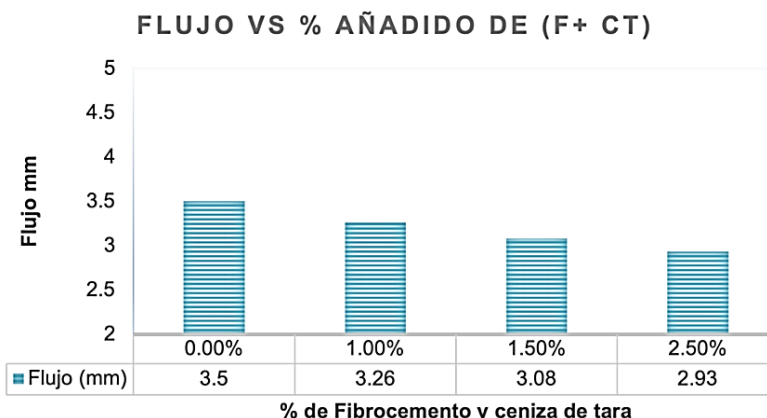


Figura 7. Resultados de Flujo Marshall y % de Fibrocemento y Ceniza de tara Fuente: los autores

De acuerdo con la Tabla 10, el ensayo inicial demuestra un valor de TSR en 82,7%, lo que indica que a partir de ello se analizaran los cambios con los nuevos aditivos.

Al realizar la 1era adición de fibrocemento y Ceaselpina Spinosa en 1% se observa que su resistencia húmeda disminuye en 3,6 kg/cm² y en el TSR 81,2%, según se puede apreciar la Tabla 11.

Tabla 10. Ensayo de Lotman TSR para el daño producido por la húmeda. Fuente: los autores

Ensayo TSR; patrón		
Ítems	Grupo Saturado	Grupo seco
% vacíos	7,30	7,20
Saturación (%)	63,7	--
Resistencia seca (kg/cm ²)	--	4,4
Resistencia húmeda (MPa)	3,6	--
TSR %	82,7	

Tabla 11. Prueba de TSR con 1,0% (F+CS).
Fuente: los autores

Ensayo de Lotman resistente al daño por humedad (TSR)		
1%: 0,5 % fibrocemento – 0,5% ceniza de tara		
Ítems	Grupo Saturado	Grupo seco
% vacíos	6,3	6,9
Saturación (%)	61,9	--
Resistencia seca (kg/cm ²)	--	3,9
Resistencia húmeda (kg/cm ²)	3,1	
TSR %	81,2	

En la segunda modificación de la mezcla con el 1,5% de fibrocemento y Ceaselpina Spinosa, que se logra preciar en la Tabla 12 con una disminución más brusca en la resistencia húmeda con un 3,1 kg/cm² y en el TSR 79,6%.

Tabla 12. Prueba TSR con 1,5% (F+CS). *Fuente: los autores*

ENSAYO DE LOTMAN RESISTENTE AL DAÑO POR HUMEDAD (TSR) 1.5%: (0.75 % F – 0.75% CT)		
Ítems	Grupo Saturado	Grupo seco
% vacíos	6,0	6,1
Saturación (%)	79,7	--
Resistencia seca (kg/cm ²)	--	3,9
Resistencia húmeda (kg/cm ²)	3,1	
TSR %	79,6	

En la Tabla 13 se registra ultima adición de 2,5% de fibrocemento y ceniza de Ceaselpina

Spinosa demuestra que añadiendo estos componentes su resistencia húmeda reduce en un 2,6 kg/cm² y el TSR 76,7%. Los ensayos con respecto al daño producido por la humedad demostraron que al utilizar el fibrocemento y ceniza de tara cuando las briquetas fueron sometidas a la saturación con agua, los valores de TSR en el patrón es de 82,7%, mientras que con el 1% de (F + CT) es de 81,2%, con 1,5 % de (F + CT) es de 79,6% y 76,7% cuando se añade el 2,5% de (F + CT).

Tabla 13. Ensayo de Lotman, TSR para el daño producido por la húmeda. *Fuente: los autores*

ENSAYO DE LOTMAN RESISTENTE AL DAÑO POR HUMEDAD (TSR) 2,5%: (1,25 % F – 1,25% CT)		
Ítems	Grupo Saturado	Grupo seco
% vacíos	5,2	5,0
Saturación (%)	94,2	--
Resistencia seca (kg/cm ²)	--	3,4
Resistencia húmeda (kg/cm ²)	2,6	
TSR %	76,7	

En la Figura 8 indica que la resistencia a la Tracción Indirecta (TSR) de la briqueta va disminuyendo cuando incrementa el porcentaje de los modificadores, en el ensayo de TSR la muestra patrón dio resultado de 82,75, al añadir el 1,0%, 1,5% y 2,5% los valores de TSR son 81,2%, 79,6% y 76,7% respectivamente.

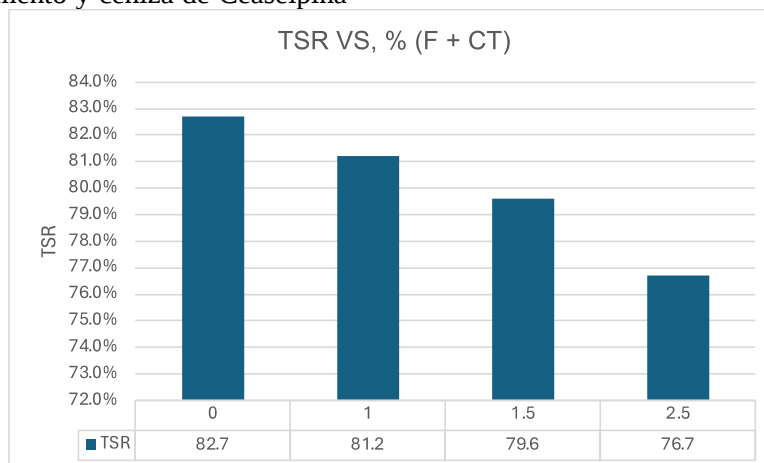


Figura 8. Relación de la Tracción Indirecta (TSR) de briqueta con % de F + CT, mezcla modificada. *Fuente: los autores*

5. CONCLUSIONES

Estos resultados subrayan la importancia de la composición de la mezcla asfáltica para optimizar su rendimiento y resistencia a condiciones ambientales adversas. Los ensayos de gravedad específica y absorción del agregado grueso y fino, junto con el análisis granulométrico, proporcionan información importante sobre la calidad y adecuación de los agregados para la elaboración de mezclas asfálticas. La baja absorción y la distribución granulométrica dentro de los límites establecidos indican que los agregados cumplen con los requisitos necesarios para asegurar una compactación y resistencia mecánica adecuadas en la mezcla asfáltica final.

Los resultados obtenidos en los ensayos de gravedad específica de la mezcla asfáltica, absorción y asfalto efectivo muestran que la absorción de los agregados en la mezcla es superior al 2% en todas las variaciones de cemento asfáltico. Esta mayor absorción puede influir negativamente en la resistencia y durabilidad de la mezcla, ya que aumenta la susceptibilidad a la humedad y reduce la adherencia entre los agregados y el ligante asfáltico. Por lo tanto, es fundamental ajustar las proporciones de los materiales y seleccionar cuidadosamente el tipo de ligante para garantizar un rendimiento óptimo de la mezcla asfáltica en servicio.

La adición de aditivos como la Ceaslpina Spinosa puede mejorar las propiedades mecánicas y químicas del asfalto. Los óxidos en la ceniza de tara, como el de potasio, calcio y fosfato, mejoran la adherencia, cohesión y resistencia al desgaste, prolongando la vida útil del pavimento y reduciendo costos de mantenimiento.

El uso de modificadores como el Fibrocemento también mejora las propiedades del asfalto. Los óxidos en el fibrocemento, especialmente el de calcio, aumentan la resistencia al desgaste y permiten un endurecimiento rápido, lo que extiende la durabilidad del pavimento.

6. RECOMENDACIONES

Investigación adicional sobre aditivos y tecnologías emergentes: se sugiere explorar el potencial de otros aditivos y tecnologías emergentes que puedan complementar o mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica. Esto podría incluir el estudio de aditivos naturales o sintéticos que mejoren la durabilidad, resistencia y sostenibilidad de la mezcla, así como el uso de tecnologías innovadoras de producción y colocación de pavimentos.

Optimización de la dosificación de fibrocemento y ceniza de tara: se sugiere realizar análisis adicionales para delimitar la dosificación óptima de ambos aditivos, que maximice las propiedades mecánicas deseadas de la mezcla asfáltica. Esto podría implicar la realización de pruebas adicionales con diferentes niveles de dosificación para identificar la combinación más eficiente en términos de la fluencia, estabilidad y la susceptibilidad al daño por humedad.

Para asegurar la implementación efectiva de prácticas de control de calidad en la elaboración de la mezcla asfáltica, es crucial establecer y adherirse estrictamente a estas prácticas durante todo el proceso de construcción. Esto implica capacitar al personal adecuadamente, calibrar los equipos de medición de manera regular, y realizar pruebas tanto en el laboratorio como en el campo. De esta manera, se garantiza que la mezcla cumpla con las especificaciones técnicas y de rendimiento establecidas.

7. FINANCIAMIENTO

Propio de los autores.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Laboratorio Slab, (Sistema de servicios y análisis químicos S.A.C.) por brindar los recursos para la realización de los ensayos de laboratorio en los agregados.

9. CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

10. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

VRAE: definición del problema de investigación, recopilación de teórica, desarrollo de métodos de investigación, diseño y aplicación de experimentos, realización de pruebas de laboratorio, procesamiento de datos experimentales, análisis y redacción del manuscrito principal. LCF: apoyo en la definición del problema de estudio, recopilación de información, asistencia en la elaboración de la metodología experimental, análisis estadístico de resultados, elaboración de gráficos y tablas, contribución en la redacción y revisión del manuscrito principal.

11. REFERENCIAS

- [1] O. Oyedepo, E. Olukami, A. Alalade, A. Amuko, G. Oluwadare y O. Oyanda, "Evaluation of the Strength Properties of Asphalt Concrete using Natural Fibers as Reinforcing Additives" *Nigerian Journal of technological development*, vol. 18, n° 4, pp. 302-3011, 2021.
- [2] K. Kikut, A. Elizondo y A. Baldi, "Beneficio del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas" *Infraestructura Vial*, vol. 22, n° 39, p. 1219, 2020
- [3] M. A. Haddad y T. S. Khedaymi, "Moisture resistance of olive husk ash modified asphalt mixtures" *Annales de Chimie- Science des Materiaux*, vol. 47, n° 3, pp. 141-149, 2023
- [4] O. Aladegboye, D. Oguntayo, A. Lhekwaba, T. E. Daniel, P. C. Chiadighikaobi y P. Ngandu, "Evaluation of volumetric properties of cassava peel ash modified asphalt mixtures" *Civil Engineering Journal*, vol. 8, n° 10, pp. 2110-2124, 2022
- [5] C. Chaira y T. Bambang, "Performance evaluation of asphalt concrete wearing coarse with a mixture of coal fly ash brick powder as filler" *AIP conference Proceeding*, vol. 2629, 2023
- [6] S. Min, J. Shou, W. Haibo, Z. Jun, Y. Yungfu, Z. Ye y X. Qingpeng, "Preparation scheme optimization of thermosetting polyurethane modified asphalt" *Polymers*, vol. 15, n° 10, 2023
- [7] A. Padilla Rodriguez, "Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista", Trabajo de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2004.
- [8] Association of Asphalt Paving Technologists, "Marshall Procedures for Design and Quality Control of Asphalt Mixtures" *Asphalt Paving Technology: Proceedings*, vol. 54, Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, 11-13. San Antonio, TX. pp. 265-284, 1985
- [9] R. P. Lottman, "The moisture mechanism that causes asphalt stripping in asphaltic pavement mixtures" 1971
- [10] ASPHALT WAQTC, "Sampling of bituminous paving mixtures" Fop for AASHTO T 168, IDAHO FOP AASHTO T 168 (10), *T168_short_10.docx Asphalt 11-1 Pub*, Disponible en: <https://apps.itd.idaho.gov/apps/manuals/QA/Archive/files/2013Jan/2013FILES/files/2013Jan/570/asphalt/t168wpr10.pdf>. 2012
- [11] ASTM, "Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures" ASTM D2172-05, West Conshohocken, PA, EUA, 2010
- [12] ASPHALT WAQTC, "Mechanical analysis of extracted aggregate, fop for AASHTO T30" ASPHALT WAQTC FOP AASHTO T 30 (24), *52_T30_short_24_errata Asphalt 20-1 Pub*, 2024
- [13] ASTM, "ASTM D6926-20. Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus" West Conshohocken, PA, EUA, 2020
- [14] ASTM, "ASTM D6927-15. Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures" West Conshohocken, PA, EUA, 2022
- [15] ASTM, "ASTM D420-18, Standard

Guide for Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes”, West Conshohocken, PA, EUA, 2018

- [16] CP12-025 – MTC, “*Manual de Ensayo de Materiales*”, Ministerio de Transporte y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Transporte, Perú, 2016