



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE UN ASFALTO
MODIFICADO CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Civil

AUTORA: Brithany Melissa Lombeida Naranjo

TUTOR: Sandri Germanico Castro Angulo

Quito - Ecuador
2024

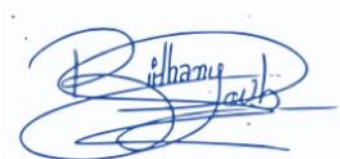
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Brithany Melissa Lombeida Naranjo con documento de identificación N° 1752152114 manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 26 de febrero del 2024

Atentamente,



Brithany Melissa Lombeida Naranjo

1752152114

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Brithany Melissa Lombeida Naranjo con documento de identificación N° 1752152114, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Artículo Académico: “Evaluación del comportamiento físico-mecánico de un asfalto modificado con ceniza de cascarilla de arroz”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de febrero del 2024

Atentamente,



Brithany Melissa Lombeida Naranjo

1752152114

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Sandri Germanico Castro Angulo con documento de identificación N° 0802550301, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE UN ASFALTO MODIFICADO CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ**, realizado por Brithany Melissa Lombeida Naranjo con documento de identificación N° 1752152114, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. Sandri Germanico Castro Angulo, MSc.
0802550301

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE UN ASFALTO MODIFICADO CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

EVALUATION OF THE PHYSICAL-MECHANICAL BEHAVIOR OF AN ASPHALT MODIFIED WITH RICE HUSK ASH

Melissa Lombeida-Naranjo¹, Sandri Castro-Angulo²

Resumen

La tasa de crecimiento vehicular y biodiversidad de climas presentes en el Ecuador influyen en el desgaste del pavimento flexible, incitando a explorar nuevos mecanismos de acción para mejorarlos. Por esta razón, esta investigación se centra en utilizar la ceniza de cascarilla de arroz (RHA) al cemento asfáltico AC20, con el objetivo de evaluar sus propiedades físico-mecánicas, mediante ensayos de laboratorio. Con base al suministro de cascarilla de arroz (desperdicio), de la producción nacional de arroz, cuantificado en un 20%, que puede ser aprovechado. El análisis de la idoneidad de uso del RHA se realizó en tres etapas: obtención y verificación de los materiales pétreos, ensayos al AC20 sin y con la adición del 6.00%, 6.50%, 7.00% de RHA y el método Marshall para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. Los resultados indican que la adición de 6.50% RHA confirió mejor desempeño al ligante, generando aumento en la penetración, viscosidad, punto de inflamación y punto de reblandecimiento en porcentajes del 4.00%, 20.00%, 9.00% y 10.00% respectivamente, en comparación a las mismas propiedades del AC20 sin la adición. Sin embargo, se evidenció una disminución en la ductilidad, teniendo un decremento del 70.00%. Por otra parte, la estabilidad, flujo y densidad del pavimento en porcentajes del 12.00%, 13.00% y 0.51% respectivamente, por ende, se afirma que adicionar el 6.50% RHA es beneficioso para el pavimento.

Palabras Clave: Ceniza de cascarilla de arroz, Cementante asfáltico, Propiedades mecánicas.

Abstract

The rate of vehicular growth and biodiversity of climates present in Ecuador influence the wear of flexible pavement, prompting to explore new mechanisms of action to improve them. For this reason, this research focuses on the use of rice husk ash (RHA) in AC20 asphalt cement, with the objective of evaluating its physical-mechanical properties, through laboratory tests. Based on the supply of rice husk (waste), from national rice production, quantified at 20%, which can be used. The analysis of the suitability of the use of RHA was carried out in three stages: obtaining and verification of the stone materials, AC20 tests without and with the addition of 6.00%, 6.50%, 7.00% of RHA and the Marshall method for the preparation of hot asphalt mixtures. The results indicate that the addition of 6.50% RHA conferred better performance to the binder, generating increases in penetration, viscosity, flash point and softening point in percentages of 4%, 20%, 9% and 10% respectively, compared to the same properties of AC20 without the addition. However, a decrease in ductility was evidenced, with a decrease of 70%. On the other hand, the stability, flow and density of the pavement in percentages of 12%, 13% and 0.51% respectively, therefore, it is affirmed that the addition of 6.50% RHA is beneficial for the pavement.

Keywords: Rice husk ash (RHA), Asphalt cement, mechanical properties.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

² Docente de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: blombeida@est.ups.edu.ec; scastroa@ups.edu.ec

1. Introducción

El Ecuador al ser un país que se encuentra en vías de desarrollo, la movilidad nacional es de suma importancia ya que permite el crecimiento económico. La tasa de crecimiento vehicular y biodiversidad de climas presentes en el Ecuador tiene una directa influencia en el desgaste de la capa asfáltica del pavimento flexible, lo que incita a explorar nuevos mecanismos de acción para mejorar los pavimentos en el país.

Por lo antes mencionado, los asfaltos modificados han surgido como una alternativa innovadora para mejorar las propiedades físico-mecánicas de la industria del pavimento, considerando su aplicación, ventajas y desventajas.

Como lo menciona Rondón y Reyes, las mezclas asfálticas modificadas son objeto de extenso estudio y aplicación a nivel mundial. Al añadir polímeros u otros productos al asfalto, se alteran las características físicas-mecánicas, químicas y reológicas de estas mezclas. El propósito de utilizar esta tecnología es mejorar el comportamiento de las mezclas tradicionales bajo diversas condiciones de carga y en entornos ambientales variados [1].

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo proponer un modificador para evaluar las propiedades físico-mecánicas de un cemento asfáltico AC20 con y sin la adición de dicho modificador.

Uno de los modificadores que se usa desde hace algunos años atrás es la ceniza de la cascarilla de arroz (RHA). [2] realizó un estudio donde los resultados demostraron una eficacia en las propiedades mecánicas al incluir porcentajes de RHA en las briquetas de pavimento, obteniendo mayor estabilidad y fluidez.

De la misma manera [3], llevó a cabo un estudio para evaluar el desempeño del asfalto modificado con RHA, donde los resultados mostraron una ligera mejora en las propiedades físicas y reológicas del ligante asfáltico al trabajar con adiciones del 4.00%, 4.50%, 5.00%, 5.50% y 6.00% de RHA. Observando que el mejor rendimiento se obtuvo con el porcentaje más alto de 6.00%.

De igual forma [4], ejecuto un diseño de pavimento flexible empleando RHA con la finalidad de mejorar la estabilidad y flujo vial. Ellos señalan que una menor adición de ceniza conlleva a una mayor estabilidad, para lo cual trabajaron con adiciones del 1.00% al 5.00%.

Por otra parte, se ha identificado que la producción arrocerera en el Ecuador, según [5] bordea 1,60 millones de toneladas anuales, lo que genera un 20.00% de desperdicio (cascarilla); es decir, 320000.00 toneladas de cascarilla que se pueden aprovechar.

Por tales razones, la industria del pavimento se encuentra ante una oportunidad prometedora para aprovechar este subproducto y emplearlo como un material para la elaboración tanto de ligantes asfálticos y pavimentos modificados.

Con base a lo antes expuesto, se planteó utilizar RHA como agente modificador del AC20, adicionándolo como filler en porcentajes de 6.00%, 6.50% y 7.00% con relación al peso del AC20 para determinar el porcentaje óptimo de RHA para las mezclas de pavimento.

En tal virtud, esta investigación se enfocó en proporcionar una visión integral y actualizada sobre la implementación de asfaltos modificados con RHA en el Ecuador, para mejorar la infraestructura vial de manera sostenible y su contribución al proponer nuevos materiales ecoamigables para el desarrollo en la industria de la construcción de carreteras en el país.

2. Materiales y Métodos

El estudio se estructuró en tres etapas distintas. La primera y segunda etapa se enfocaron en la obtención de los materiales y la determinación de las propiedades físico-mecánicas de los agregados, y del AC20 sin y con adición de RHA. Finalmente, la tercera etapa se centró en la preparación y ejecución del diseño del pavimento asfáltico por el método Marshall, subdividiéndose esta etapa en dos partes: la primera en un diseño práctico (establecer el % óptimo de AC20) y la segunda un diseño con la modificación del AC20 óptimo modificado con RHA.

2.1. Obtención del RHA

La cascarilla de arroz fue quemada en muflas a 350°C en un período de 35 min, después de un enfriamiento a temperatura ambiente, con un mortero ágata se trituro hasta tener partículas menores a 0.75 mm o 75 micras.

Se analizó el tamaño de las partículas de la ceniza o análisis granulométrico por hidrómetro acorde a la American Society for Testing and Materials (ASTM D-422-63) [6].

La figura 1 muestra la distribución de los tamaños de partículas del RHA, teniendo un D50=0.03 mm.

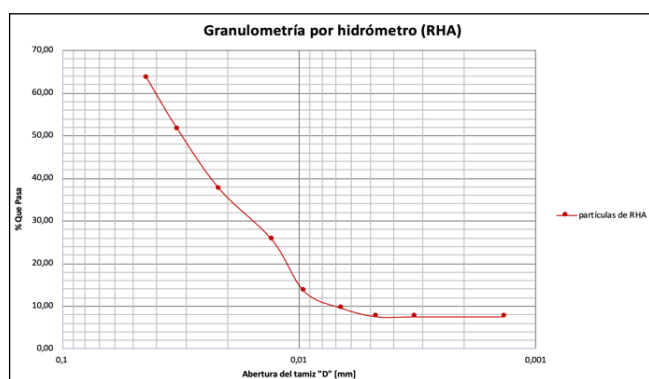


Figura 1. Distribución del tamaño de las partículas de RHA

2.2. Agregados pétreos

Se emplearon 3 tamaños de agregados: grava gruesa de 3/4", grava de tamaño medio de 3/8" y arena fina, obtenidos de una cantera ubicada en Pifo.

2.2.1. Propiedades físico-mecánicas de los agregados

Cada uno de los agregados fueron reducidos al tamaño de ensayo conforme a lo establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 2566) [7], por el método A.

2.2.2. Ensayo de análisis granulométrico

A continuación, la muestra se introduce en un horno y se mantiene a una temperatura de 110°C ± 5°C durante un período de 24h, con una variación aceptable de ±4h.

Según la norma (NTE INEN 696) [8], se introduce una cantidad del material seco en un tamizador

mecánico, por un lapso de 10 min ± 2 min. Al final se debe pesar el material retenido en cada malla y la suma de todos los valores retenidos debe ser igual a la masa inicial, se elabora la curva granulométrica de cada agregado como se muestra en la figura 2.

2.2.3. Ensayo de determinación de la densidad, densidad Relativa (gravedad específica) y absorción del árido

Como lo indica la norma (NTE INEN 857) [9], se sumerge en agua una muestra de agregado (seco) por 24h ± 4h, después se toma el peso en las tres condiciones: sumergido, saturado y seco. En el caso del agregado fino, se trabajó con la norma (NTE INEN 856) [10], por el método volumétrico, teniendo una densidad relativa de 2.60 y % absorción de 3.05.

2.2.4. Ensayo de determinación del valor de la degradación del árido

Se somete una muestra representativa a un proceso controlado en la máquina Los Angeles, el cual simula las condiciones de desgaste a las que esta expuesto el agregado. Para este método se trabajo con la norma (NTE INEN 860)[11]. Dando un porcentaje de 22,94.

2.3. Ensayos bituminosos al AC20

Se realizaron ensayos al cementante asfáltico para establecer si el AC20 tiene las propiedades requeridas por la norma (NTE INEN 2515) [12]. (Ver tabla 1) que presenta los requisitos específicos de este material.

Tabla 1. Requisitos de un cementante asfáltico AC20

REQUISITOS AC20		
ENSAYOS	MIN	MAX
Punto de inflación (°C)	232	–
Viscosidad a 135 °C (CentiStokes)	210	–
Penetración a 25 °C, 100g, 5s (1/100cm)	40	–
Ductilidad, 25 °C, 5 cm por minuto (cm)	100	–
Punto de reblandecimiento (°C)	40	–

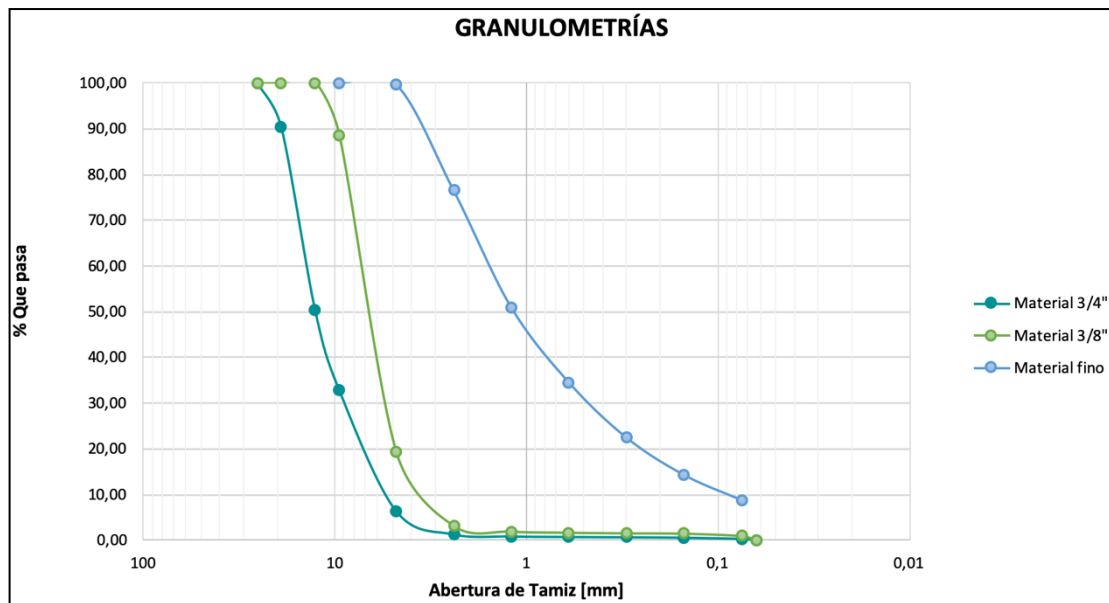


Figura 2. Análisis de granulométrico (3 agregados)

2.3.1. Ensayo de viscosidad rotacional

Bajo la norma (ASTM D4402-06) [13], se utilizó la máquina “Viscosímetro Symbol Brookfield” aplica un torque con un husillo a una muestra AC20, a una velocidad de rotación constante (20 rpm) a temperatura fija de 135°C. La medición del torque se convierte en unidades de viscosidad, proporcionando información en términos de fluidez y cohesión del ligante.

2.3.2. Ensayo de penetración

Con el penetrómetro digital se coloca la aguja estándar bajo condiciones específicas de peso, tiempo y temperatura en el espécimen de AC20. Conforme lo establecido en la norma (NTE INEN 917) [14]. Entonces, cuanto menor sea la penetración mayor será la dureza y consistencia del betún.

2.3.3. Ensayo de punto de inflamación

La norma (NTE INEN 0808) [15], explica el proceso de evaluación del punto de ignición mínimo de un asfalto en la copa Cleveland, determinando la temperatura mínima a la cual estos materiales desprenden suficientes vapores para formar una mezcla inflamable en contacto con una fuente de ignición.

2.3.4. Ensayo de reblandecimiento

Conforme la norma (NTE INEN 920) [16], se utilizó el método anillo y bola, para determinar la temperatura a la que cambia de estado sólido a uno blando el AC20. Este indicador, representa la temperatura máxima de empleación para las mezclas asfálticas.

2.3.5. Ensayo de reblandecimiento

De acuerdo con la norma (NTE INEN 916) [17], durante el ensayo se estira una muestra de betún a una velocidad constante y temperatura de 25°C, determinando la capacidad de deformación del AC20.

2.4. Método Marshall

2.4.1. Mezcla asfáltica AC20

Se aplicó el método Marshall [18], es una práctica tradicional para desarrollar mezclas asfálticas en caliente

Con los agregados ya analizados (Ver tabla 2), mediante la mezcla del material granular, representado en la figura 3 la combinación granulométrica de los agregados pétreos, siendo así el material 3/4” con 40%, el 3/8” un 15% y el fino 45%, este entre los límites permitentes por la norma (ASTM D3515) [19].

Tabla 2. Mezcla asfáltica AC20

Mezcla												
Tamiz	1	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200	
Abertura [mm]	25,4	19,1	12,7	9,5	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	0,075	
% Pasa Material A	100,00%	90,32%	50,21%	32,74%	6,38%	1,28%	0,84%	0,73%	0,66%	0,57%	0,30%	
% Pasa Material B	100,00%	100,00%	100,00%	88,48%	19,42%	3,14%	1,90%	1,65%	1,53%	1,44%	0,91%	
% Pasa Material C	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,70%	76,54%	50,97%	34,56%	22,49%	14,34%	11,10%	
% Mat A	40,00%	40,00%	36,13%	20,08%	13,09%	2,55%	0,51%	0,33%	0,29%	0,23%	0,12%	
% Mat B	15,00%	15,00%	15,00%	13,27%	2,91%	0,47%	0,29%	0,25%	0,23%	0,22%	0,14%	
% Mat C	45,00%	45,00%	45,00%	45,00%	44,86%	34,44%	22,94%	15,55%	10,12%	6,45%	5,00%	
Mezcla [Σ]	100,00%	100,00%	96,13%	80,08%	71,37%	50,33%	35,43%	23,56%	16,09%	10,61%	6,90%	5,25%
Ret. Acomulado	0,00	3,87	19,92	28,63	49,67	64,57	76,44	83,91	89,39	93,10	94,75	5,25
Ret. Parcial	0,00	3,87	16,04	8,72	21,04	14,90	11,87	7,46	5,48	3,72	1,64	
Peso (g)	0,00	46,48	192,52	104,61	252,49	178,80	142,44	89,54	65,76	44,60	19,73	63,04
Peso Acumulado (g)	0,00	46,48	239,00	343,60	596,09	774,89	917,34	1006,88	1072,64	1117,23	1136,96	1200,00

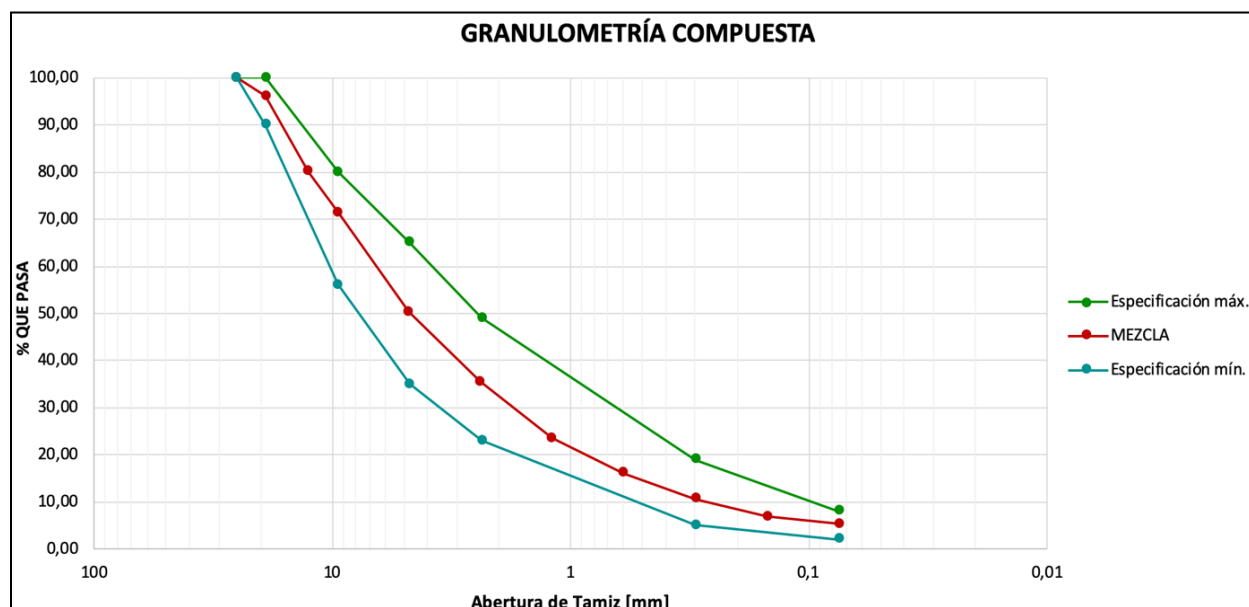


Figura 3. Combinación granulométrica

El método determina la superficie específica de los agregados que se envolverán con el asfalto, se basa en la información del análisis granulométrico de la curva compuesta, utilizando la siguiente relación (Ver ecuación 1) [20].

$$S = 0.17 G + 0.33 g + 2.30 A + 12a + 135f \quad (1)$$

Después, de realizar la formulación arrojó un valor de $S=7.50$ para la superficie, entonces, para un contenido óptimo de partida de asfalto se trabajó (Ver ecuación 2) [20].

$$P = M * S^{\frac{1}{5}} \quad (2)$$

El coeficiente de tráfico se utilizó 4. Por lo tanto, $P=6$; por consiguiente, el método Marshall establece la elaboración 15 briquetas, 3 por cada porcentaje de asfalto, siendo así que del 6% dos porcentajes encima de este y dos porcentajes por debajo de este, con incrementos y decrementos de 0,50%, por lo tanto, quedaron de la siguiente manera: 5.00%, 5.50%, **6.00%**, 6.50%, 7.00%.

Determinados los datos necesarios para la ejecución de las briquetas, definido por la norma (ASTM D1559) [19], se procede:

1. Los materiales pétreos se colocan en el horno por $24h \pm 4h$ al fin de secarlos y eliminar la humedad, después, se separan todos los materiales por tamaños de tamiz para, con base

a los porcentajes de la mezcla, obtener el peso correspondiente a tres briquetas (3600g).

2. Tanto como los agregados pétreos y el AC20 se debe dejar en el horno a temperatura $120^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por un período de $24\text{h} \pm 4\text{h}$.
3. Se mezclan homogéneamente los agregados con el porcentaje de asfalto hasta que se caliente todo el material a 150°C , tener calentado el equipo (Molde, collar, placa).
4. Se separa la mezcla 1200g para compactarlo con el martillo compactador, para esta investigación se trabajó con el criterio de tráfico alto, entonces, se requirió 75 golpes por lado de cada briqueta.
5. Desmoldar a las 24h, se pesa las briquetas en seco, saturado y agua. Finalmente se calienta una tina de baño maría a una temperatura $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, se coloca todas las briquetas por un tiempo de 30 min, se procede ha ensayar por la máquina de Estabilidad y Flujo Marshall.
6. Las briquetas ya ensayadas son segregadas hasta tener 2000g de material y hacer el ensayo RICE [21],

Posteriormente, se comenzó a procesar todos los datos arrojados por el ensayo Marshall para determinar las propiedades volumétricas de la mezcla, con el fin de identificar el porcentaje óptimo para las modificaciones con RHA. En la figura 4, se mostrará la curva del % Volumen de Vacíos.

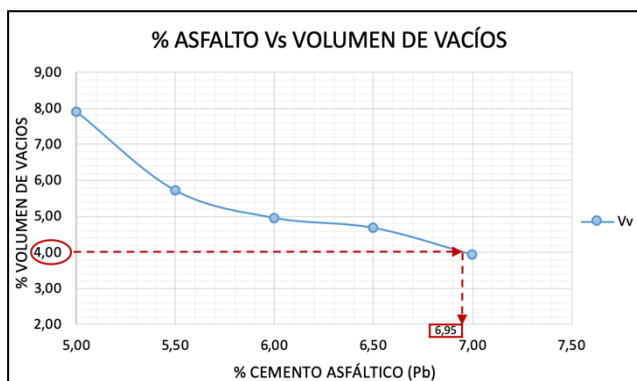


Figura 4. Porcentaje de Asfalto Óptimo

Como se puede evidenciar en la figura el porcentaje óptimo de AC20 es de 6,95 para tener un porcentaje de vacíos 4. Se verifica los valores

obtenidos en el cálculo con las diferentes curvas Gmb, %VAM, %VAE. En la figura 5, 6 se muestra los datos obtenidos por el ensayo Marshall, respectivamente. Para al final presentar los datos tabulados de las curvas junto con los requisitos de las propiedades establecidas por la MOP-001-F-2002 [22] (Ver tabla 3).

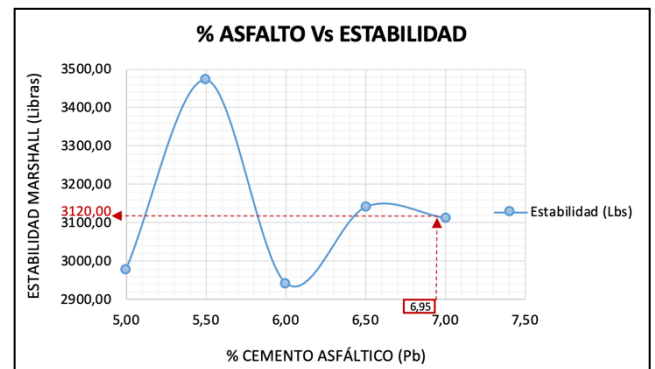


Figura 5. Estabilidad Marshall

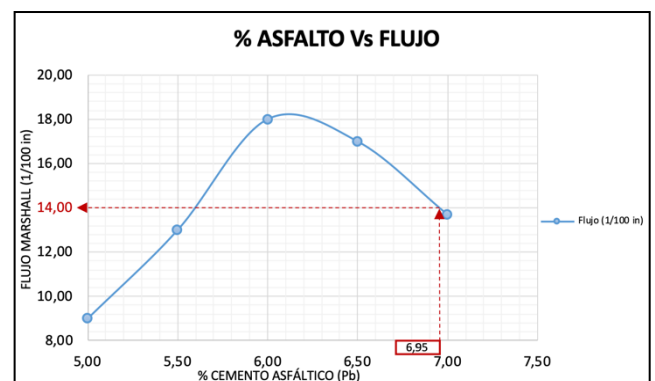


Figura 6. Flujo Marshall

Tabla 3. Tabulación de todos los datos de las curvas

Propiedades	Valor	Especificación	Unidad
Vv	4.00	3-5	%
Gmb	2.29	—	Adim
VAM	12.00	≥ 11	%
VAE	66.80	—	%
Estabilidad	3120.00	≥ 2000	Lbs
Flujo	14.00	8-14	1/100in
Filler/Betún	0.80	0.8-1.2	Adim

En relación con la tabla anterior, se tiene una verificación en las propiedades. Por lo tanto, la mezcla asfáltica con RHA trabajara con 6,95% de AC20. La relación filler/betún es fundamental, porque, es en esta correlación donde se va a colocar la ceniza, el peso final del pasante No. 200 se muestra en la siguiente relación (Ver tabla 4).

Tabla 4. Relación filler/betún

Relación Filler/ Betún (AC20)		
Filler (g)	Mezcla (g)	Filler / Betún (Adim)
63.04	1200	63,04
Betún (%)	Betún (g)	Betún (%)
6.95	83.4	6,95
Relación (Filler + RHA) / Betún		
RHA (%)	RHA (g)	(Filler+RHA) / Betún (Adim)
6.00	3.78	0.80
6.50	4.10	0.81
7.00	5.84	0.82

Posteriormente, se ejecuta el mismo método, el peso de la ceniza se colocó al momento de la homogeneización de los agregados y el AC20 como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Homogeneización de la mezcla asfáltica con la adición del RHA

3. Resultados y Discusión

Los hallazgos de la investigación revelan que efectivamente hay un incremento de ciertas propiedades físico-mecánicas del AC20 con la adición del RHA. Como se puede evidenciar (Ver tabla 5).

En el caso del AC20, los 5 ensayos coinciden con las propiedades establecidas para dicho cementante asfáltico. De manera similar, en el AC20 modificado, los ensayos de penetración, reblandecimiento, viscosidad y punto de inflamación muestra valores superiores a las propiedades del AC20 mejorando en un 4.00%, 10.00%, 20.00% y 9.00%, respectivamente.

No obstante, el ensayo de ductilidad presenta valores inferiores decreciendo un 70.00%. Asimismo, al analizar los ensayos modificados con RHA, se observa una relación inversamente proporcional entre los ensayos de ductilidad y penetración.

En otras palabras, a medida que se reduce el porcentaje de ceniza 0.50%, se registra una menor ductilidad del 6.50% y, al mismo tiempo una mayor penetración del 15.00%, lo que sugiere que el material puede volverse más frágil.

Por otra parte, el ensayo de viscosidad señala que a medida que aumenta el porcentaje de RHA, la resistencia también se incrementa 3.20%, lo que implica que el material no fluya en exceso.

Con estos ensayos realizados al cementante asfáltico se puede inferir en los resultados del ensayo Marshall. Es decir, al tener una penetración similar al AC20, tendríamos un valor semejante de estabilidad o una relación inversamente proporcional, en la cual a mayor porcentaje de RHA la penetración decrece y la estabilidad aumenta hasta reemplazos de 6.50% RHA, como se puede evidenciar en la figura 8.

De manera notable, la mezcla con un 6.50% de RHA exhibe la máxima estabilidad, registrando 4479.20 libras, en comparación con la mezcla sin RHA, que muestra 3989.47 libras.

Tabla 5. Ensayos del AC20 y AC20 + RHA

ENSAYOS	ENSAYOS CEMENTANTE ASFÁLTICO AC20 Y MODIFICADO CON RHA				NORMATIVA
	AC20	AC20+6.00% RHA	AC20+6.50%RHA	AC20+7.00%RHA	
Ductilidad	100.00	25.00	31.00	36.00	≥ 100 NTE INEN 916
Penetración	54.30	61.90	52.12	44.03	> 40 NTE INEN 917
Reblandecimiento	42.00	44.00	46.00	48.00	> 40 NTE INEN 920
Viscosidad rotacional	598.20	470.10	480.17	490.60	> 210 ASTM D2170
Punto de inflamación	236.00	250.00	258.00	270.00	> 232 NTE INEN 0808

Dando un incremento del 12% en la estabilidad, sin embargo, para los contenidos de 6.00% y 7.00% de RHA, se observa valores inferiores a lo esperado, alcanzando 3828,96 y 3340,16 libras respectivamente. Esta variación indica que la incorporación de un porcentaje adecuado de RHA puede mejorar las propiedades de resistencia a la carga de la mezcla, siendo la mezcla 6.50% de RHA la que presenta un desempeño destacado en términos de estabilidad bajo carga.

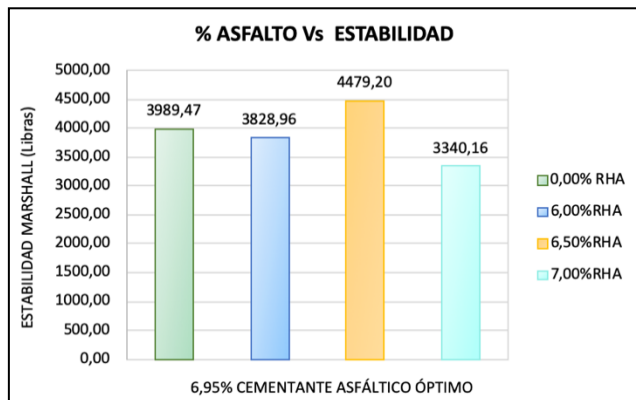


Figura 8. Estabilidad Marshall

Por otra parte, al presentarse una ductilidad menor sugiere un incremento en la estabilidad del pavimento, puesto que el ligante se volvió frágil. Consecuentemente, el flujo subo. Como se puede observar la figura 9.

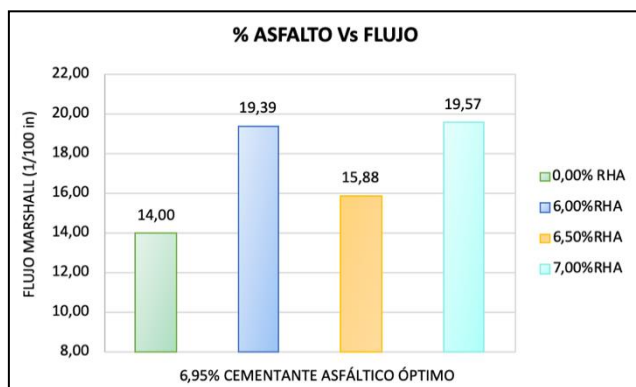


Figura 9. Flujo Marshall

Se evidencia un aumento en el flujo en las mezclas con RHA en comparación al AC20; Por ende, los valores se establecen en 19.57, 15.88, 19.39 y 14.00 en adiciones de 7.00% RHA, 6.50% RHA, 6.00% RHA y 0.00% RHA

consecuentemente.

Estos valores indican una mayor resistencia a la fluencia y deformación en las mezclas con la adición del RHA, se incrementa su deformación plástica en un 13.43%. Además, al adicionar RHA existe un decremento en el porcentaje de vacíos como se muestra en la figura 10, lo que infiere un aumento en la resistencia a la deformación plástica, por lo tanto, incrementa su capacidad de drenaje.

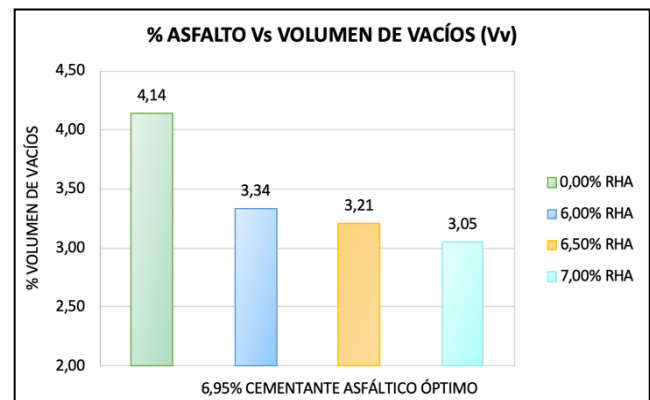


Figura 10. Porcentaje Volumen de Vacíos

Como se puede ver en la figura el porcentaje más alto es de 4.14 del volumen de vacíos corresponde al no adicionar RHA, en cambio, 6.00% RHA, 6.50% RHA y 7.00% RHA se tiene 3.34%, 3.21% y 3.05% respectivamente. Por lo tanto, existe un decremento de 22.43%, siendo así, se deduce que al añadir RHA en la mezcla asfáltica esta tiende a rellenar los vacíos, por ende, mejora la capacidad de resistencia.

En contraste, la gravedad específica Bulk (Gmb) muestra incrementos en las mezclas modificadas de como se puede ver en la figura 11. Teniendo un incremento de 0.60% entre 0.00% de RHA y 6.50% RHA, aunque es un aumento pequeño entre las distintas modificaciones, se demuestra que al tiene un mejor (Gmb), como se evidencio en el ensayo de reblandecimiento, lo que indica que al modificar el asfalto tiene una mayor durabilidad en el pavimento.

De igual manera, se corrobora con la figura 12, que existe un correcto equilibrio entre los agregados, AC20 y los vacíos, lo que infiere a que

al adicionar RHA, mejora las propiedades mecánicas y realza su resistencia.

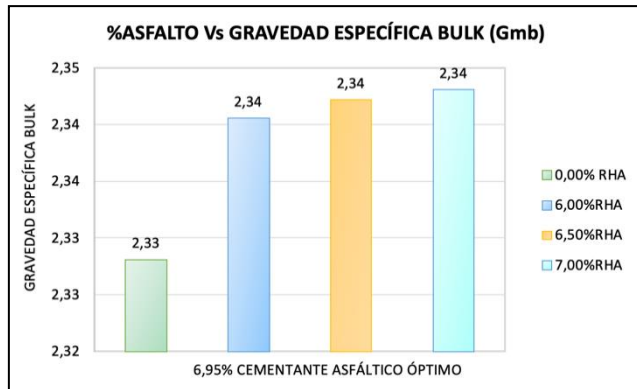


Figura 11. Gravedad Específica Bulk

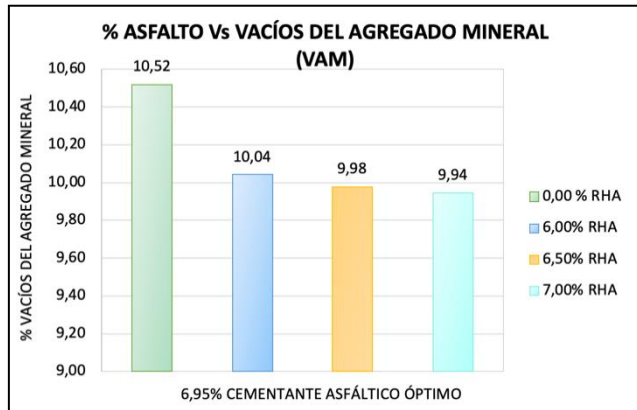


Figura 12. Porcentaje de vacíos del agregado mineral

De manera notable, existe un decremento de 6.00%, comparando 10,52% 10.04%, 9.98% y 9.94% correspondientes al 0.00% RHA, 6.00% RHA, 6.50% RHA y 7.00% RHA. Por lo que se infiere que al agregar RHA contribuye en la reducción % VAM, como se puede observar en la figura 13a y 13b.

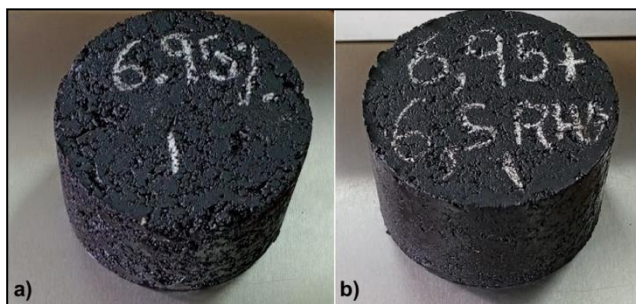


Figura 13. Diferencias de porosidad a) Briqueta 0.00% RHA y b) Briqueta 6.50% RHA

En la figura 14, se muestra la comparación de los porcentajes obtenidos en el criterio de vacíos llenos con asfalto (%VAE) de una mezcla asfáltica sin RHA y con RHA.

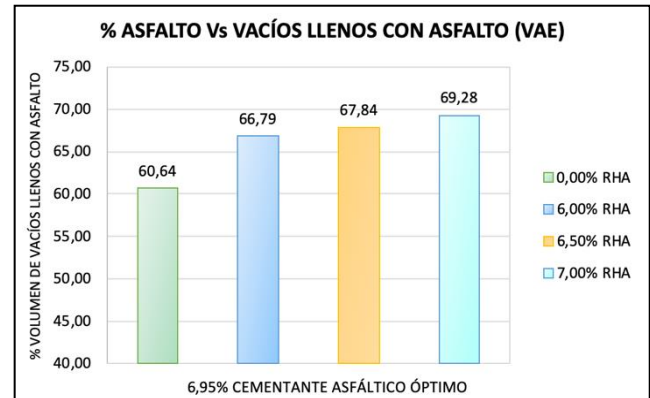


Figura 14. Porcentaje de vacíos llenos con asfalto

Como se evidencia hay un incremento del 12% entre la mezcla tradicional y la modificada por el 6.50% RHA. Observando se tiene que el valor más alto es de 69.28% correspondiente a la modificación 7.00% RHA, mientras que para 6.00% RHA y 6.50% RHA es de 66.79% y 67.84% respectivamente. Dando como dato más bajo de 60.64% sin adicionar RHA.

Al analizar y contrastar los resultados entre la mezcla asfáltica convencional y la que incorpora RHA, se evidencia una notable variación en sus propiedades físico-mecánicas.

De manera destacada, se observa que la adición del 6.50% de RHA a la mezcla asfáltica ha generado mejoras sustanciales, como se detalla en la siguiente (Ver tabla 6). Estos resultados respaldan la inferencia de que la inclusión de ceniza de cáscara de arroz efectivamente potencia las propiedades de Vv, Gmb, VAE, Estabilidad y Filler/Betún conforme a los estándares definidos por la MOP -001-F-2002 [22].

Sin embargo, existe dos criterios que no cumple con lo estipulado, como lo son % VAM y Flujo. Recordar que la ductilidad, también, fallo en los ensayos en el ligante asfáltico, entonces, estas propiedades no se cumplen. Lo que se infiere, al agregar RHA al AC20, le da propiedades de rigidez al cementante, por lo tanto, se vuelve un material más resistente.

Tabla 6. Tabulación de resultados modificados

Propiedades	RESULTADOS 6.95% AC20 y MODIFICADO con RHA				Especificación	Unidad
	6.50%	6.00% RHA	6.50% RHA	7.00% RHA		
Vv	4.14	3.34	3.21	3.05	3-5	%
Gmb	2.33	2.34	2.34	2.34	—	Adim
VAM	10.52	10.04	9.98	9.94	≥11	%
VAE	60.64	66.79	67.84	69.28	—	%
Estabilidad	3989.47	3828.96	4479.20	3340.16	≥2000	Lbs
Flujo	14.00	19.39	15.88	19.57	8-14	1/100 in
Filler/betún	0.80	0.80	0.81	0.82	0.8-1.2	Adim

En el caso del flujo tiene valores mayores a las establecidas por MOP, en comparación, a los ensayos de ductilidad que fueron menores los resultados obtenidos, se infiere que soporta mayores cargas, por lo tanto, su estabilidad mejora.

Comparando los resultados obtenidos de los cementantes asfálticos AC20 modificados con RHA con los hallazgos de Gallo y Parra [3], quienes investigaron el cementante asfáltico 60/70, se observa que, en el ensayo de penetración, no cumplió con los requisitos establecidos por la norma INV E. En contraste, los resultados del AC20 con RHA fueron positivos, mostrando un incremento del 4%.

En cuanto al punto de reblandecimiento, se evidenció un aumento del 6% en el PEN 60/70, equivalente a 48,92°C. En cambio, el AC20 modificado con RHA mostró un incremento del 10%, alcanzando los 46°C.

Estos resultados sugieren que puede haber variaciones significativas en las propiedades según el tipo de cementante asfáltico empleado. Es posible inferir que la elección del cementante asfáltico puede influir de manera considerable en la mejora de las propiedades, como se observa en los diferentes comportamientos registrados en los ensayos.

En contraste los resultados con la investigación de Lizcano y Ramos [2], quienes también se centraron en un cementante asfáltico 60/70 y analizaron los datos a través del ensayo Marshall, se llega a la conclusión de que ambos estudios coinciden en el aumento de los esfuerzos de cohesión y en la disminución del volumen de vacíos.

Estos hallazgos reflejan similitudes con los resultados obtenidos en la presente investigación. Por otro lado, Barzola y Curo señalan que la incorporación de RHA mejora significativamente la estabilidad y flujo, superando las normativas.

Además, identifican que en menores cantidades de ceniza proporcionan mayores beneficios, y la adición de RHA influye positivamente en la resistencia de la capa asfáltica. La presencia de sílice en el RHA, un elemento estabilizador, en la ceniza contribuye a mejorar la capacidad de soporte, por lo cual, el cementante asfáltico se vuelve un material más rígido [4].

No obstante, los resultados obtenidos en este estudio corroboran la eficacia de la utilización de RHA como modificador en mezclas asfálticas, ofreciendo un mejor desempeño en las propiedades físicas-mecánicas.

4. Conclusiones

En conclusión, se determinó que el contenido óptimo de AC20 para una mezcla tradicional es del 6.95%. Este valor se basa en análisis detallados de los agregados y ensayos bituminosos, destinados a verificar las propiedades físicas-mecánicas de los materiales involucrados. Los resultados fueron obtenidos mediante el método Marshall, cumpliendo satisfactoriamente con los requisitos entablados por normas ecuatorianas e internacionales, tales como: INEN, MOP-001-F-2002, ASTM y AASHTO.

En los ensayos bituminosos se confirió mejor desempeño al ligante, generando aumento en la penetración, viscosidad, punto de inflamación y punto de reblandecimiento en porcentajes del

4.00%, 20.00%, 9.00% y 10.00% respectivamente, en comparación a las mismas propiedades del AC20 sin la adición. Sin embargo, se evidenció una disminución en la ductilidad, teniendo un decremento del 70.00%.

Por otra parte, la estabilidad, flujo y densidad del pavimento en porcentajes del 12.00%, 13.00% y 0,51% respectivamente. Estos resultados indican una influencia positiva de la adición en varias propiedades del pavimento, aunque se debe tener en cuenta la contrapartida en términos de ductilidad, al agregar RHA el material se vuelve más rígido, por ende, pierde sus propiedades elásticas.

Al emplear el método Marshall, fue posible llegar a conclusiones significativas sobre las propiedades físicas-mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente. Para el contenido de 6.95% de AC20, se obtuvieron valores de estabilidad y flujo de 3989.47 libras y 14.00 (1/100 in), respectivamente.

Sin embargo, los resultados más destacados se alcanzaron con una mezcla modificada de RHA, específicamente con un contenido del 6.50%, donde se registraron 4479.20 libras para la estabilidad y 15.88 (1/100 in) para el flujo. Esta mezcla modificada exhibió un incremento del 12.00% en la estabilidad y del 13.43% en el flujo en comparación con la mezcla tradicional de AC20.

Estos hallazgos subrayan la idoneidad al incorporar RHA en las mezclas asfálticas, destacando su impacto positivo en la estabilidad y flujo del pavimento, es decir, mejorando sus propiedades.

4.1. Recomendaciones

Se recomienda hacer un análisis químico a las mezclas asfálticas utilizando la técnica de espectroscopia de Fluorescencia de rayos X (XRF), porque puede aportar acerca de la composición química de la mezcla. Al llevar a cabo este análisis, se puede obtener datos específicos sobre la presencia de los componentes, lo que contribuiría a comprender cómo actúa químicamente a la adición de RHA.

Se sugiere continuar investigando el impacto de la ceniza de cascarilla de arroz, en diferentes tipos de asfaltos, con el objetivo de determinar su idoneidad como agente modificador, y si su influencia es beneficiosa para otros cementantes asfálticos.

Referencias

- [1] H. Rondón, F. Reyes, "Pavimentos: Materiales, Construcción y Diseño," 2da ed., Ecoe Ediciones, Bogota, Colombia, 2022, pp. 19.
- [2] O. Lizcano y D. Ramos, "Estudio del comportamiento físico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda de arroz," tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2020.
- [3] M. Parra y J. Gallo, "Evaluación del comportamiento del asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz," tesis de grado, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia, 2018.
- [4] D. Barzola y A. Curo, "Mejoramiento de la Resistencia de la Capa Asfáltica Incorporando Ceniza de Cáscara de Arroz en la Carretera Santa Rosa - Puente Piedra - (12 km)," tesis de grado, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2019.
- [5] G. Zambrano, V. García, C. Cedeño y U. Alcívar, "Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa," Polo del Conocimiento, vol. 6, pp.415-437, 2021.
- [6] ASTM, *STANDARD TEST METHOD FOR PARTICLE-SIZE ANALYSIS OF SOILS (ASTM D422-63)*, Estados Unidos: ASTM, 1998.
- [7] INEN, *ÁRIDOS. REDUCCIÓN DE MUESTRAS A TAMAÑO DE ENSAYO*, Quito: INEN, 2010.

- [8] INEN, *ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS, FINO Y GRUESO*, Quito: INEN, 2011.
- [9] INEN, *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO*, Quito: INEN, 2010.
- [10] INEN, *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO*, Quito: INEN, 2010.
- [11] INEN, *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37,5 MM MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ANGELES*, Quito: INEN, 2011.
- [12] INEN, *PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO (CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD) REQUISITOS*, Quito: INEN, 2010.
- [13] ASTM, *STANDARD TEST METHOD FOR VISCOSITY DETERMINATION OF ASPHALT AT ELEVATED TEMPERATURES USING A ROTATIONAL VISCOMETER*, Estados Unidos, 2012.
- [14] INEN, *MATERIALES BITUMINOSOS. DETERMINACIÓN DE LA PENETRACIÓN*, Quito: INEN, 2013.
- [15] INEN, *PRODUCTOS DE PETRÓLEO. DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN EN VASO ABIERTO CLEVELAND*, Quito: INEN, 1987.
- [16] INEN, *MATERIALES BITUMINOSOS. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE REBLANDECIMIENTO (MÉTODO DE ANILLO Y BOLA)*, Quito: INEN, 1984.
- [17] INEN, *MATERIALES BITUMINOSOS. DETERMINACIÓN DE LA DUCTILIDAD*, Quito, 1983.
- [18] ASTM, *TEST METHOD FOR RESISTANCE OF PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURES USING MARSHALL APPARATUS*, Estados Unidos, 1998.
- [19] ASTM, *STANDARD SPECIFICATION FOR HOT-MIXED, HOT-LAID BITUMINOUS PAVING MIXTURES*, Estados Unidos, 2009.
- [20] M. Córdova, C. Cornejo, “Manual de Laboratorio para los ensayos de vías y pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana Parte I,” tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2019.
- [21] MOP, *Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes*, Quito: MOP, 2002.
- [22] AASHTO, *STANDARD METHOD OF TEST FOR THEORETICAL MAXIMUM SPECIFIC GRAVITY (GMM) AND DENSITY OF ASPHALT MIXTURES*, Washington, 2023.