



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CEMENTANTE ASFÁLTICO AC20  
MODIFICADO CON CENIZA DE CÁSCARA DE PALMA DE ACEITE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniera e Ingeniero Civil

AUTORES: Enríquez Cuesta Ariel Melissa  
Pallasco Cunin Alessandro Nicolas

TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito - Ecuador  
2024

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Enríquez Cuesta Ariel Melissa con documento de identificación N° 1718058074 y Pallasco Cunin Alessandro Nicolas con documento de identificación N° 1751928068; manifestamos que:


Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos 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, 14 de agosto de 2024

Atentamente,



Enríquez Cuesta Ariel Melissa  
1718058074



Pallasco Cunin Alessandro Nicolas  
1751928068

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

Nosotros, Enriquez Cuesta Ariel Melissa con documento de identificación N° 1718058074 y Pallasco Cunin Alessandro Nicolas con documento de identificación N° 1751928068; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Evaluación de las Propiedades del Cementante Asfáltico AC20 Modificado con Ceniza de Cáscara de Palma de Aceite”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 14 de agosto de 2024

Atentamente,



Enriquez Cuesta Ariel Melissa  
1718058074



Pallasco Cunin Alessandro Nicolas  
1751928068

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Francisco Roberto Ortiz Navas con documento de identificación N° 1717631244, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CEMENTANTE ASFÁLTICO AC20 MODIFICADO CON CENIZA DE CÁSCARA DE PALMA DE ACEITE, realizado por Enriquez Cuesta Ariel Melissa con documento de identificación N° 1718058074 y por Pallasco Cunin Alessandro Nicolas con documento de identificación N° 1751928068, 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, 14 de agosto de 2024

Atentamente,



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD

1717631244

# EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CEMENTANTE ASFÁLTICO AC20 MODIFICADO CON CENIZA DE CÁSCARA DE PALMA DE ACEITE

## EVALUATION OF THE PROPERTIES OF OIL PALM HUSK ASH MODIFIED AC20 ASPHALT CEMENTITIOUS BINDER

Melissa Enríquez-Cuesta<sup>1</sup>, Alessandro Pallasco-Cunin<sup>2</sup>

### Resumen

El estudio se centró en evaluar la incorporación de ceniza de cáscara de palma aceitera (CCPA) en la mezcla asfáltica AC20, analizando las propiedades físico-mecánicas y el comportamiento de la mezcla bajo distintas condiciones. Se realizaron ensayos para determinar el porcentaje óptimo de CCPA, observándose mejoras notables al utilizar un 5% de este aditivo, con incrementos en la estabilidad, el volumen de vacíos, la gravedad específica de la mezcla en caliente (Gmb), el flujo y la densificación de los vacíos. Los resultados indican que la adición de CCPA influye significativamente en la estructura y las propiedades del AC20, lo que tiene importantes intervenciones para su comportamiento en aplicaciones prácticas. Se encontró que el aumento óptimo de CCPA en la mezcla para la elaboración de briquetas es de 0.35g. La mezcla modificada con CCPA demostró ser más resistente ya que cumple con las normativas establecidas, lo que sugiere una capacidad para mejorar la durabilidad, la resistencia a la deformación y la vida útil del pavimento. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la dosificación de aditivos como el CCPA al realizar mezclas asfálticas, con el fin de alcanzar las propiedades requeridas y optimizar su desempeño en diversas condiciones de uso.

**Palabras Clave:** Cáscara de Palma, Cementante Asfáltico, Ceniza, Aditivo.

### Abstract

The study focused on evaluating the incorporation of oil palm shell ash (CCPA) in the AC20 asphalt mix, analyzing the physical-mechanical properties and the behavior of the mix under different conditions. Tests were carried out to determine the optimum percentage of CCPA, and significant improvements were observed when using 5% of this additive, with increases in stability, void volume, hot mix specific gravity (Gmb), flow and void densification. The results indicate that the addition of CCPA significantly influences the structure and properties of AC20, which has important interventions for its behavior in practical applications. The optimum increase of CCPA in the briquetting blend was found to be 0.35g. The CCPA-modified mix proved to be stronger as it complies with established regulations, suggesting an ability to improve the durability, deformation resistance and service life of the pavement. These results highlight the importance of considering the dosage of additives such as CCPA when making asphalt mixtures, in order to achieve the required properties and optimize their performance in various conditions of use.

**Key words:** Palm Husk, Asphalt Cementitious, Ash, Additive.

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: [aenriquezc2@est.ups.edu.ec](mailto:aenriquezc2@est.ups.edu.ec); [apallascoc@est.ups.edu.ec](mailto:apallascoc@est.ups.edu.ec)

## **1. Introducción**

Existen investigaciones previas acerca del uso de varios aditivos en el asfalto y han sido necesarios para determinar el comportamiento; la ceniza de cáscara de palma de aceite (CCPA) puede llegar a afectar las propiedades del asfalto, su rendimiento en resistencia mecánica, durabilidad y capacidad de cargas pesadas.

El cemento asfáltico AC-20 es un producto utilizado para preparar mezclas asfálticas; es de color negro, semisólido a temperatura ambiente y líquido por encima de los 100°C. Su componente principal es una mezcla compleja de compuestos orgánicos de alto peso molecular, en particular hidrocarburos, que son residuos del proceso de refinación del petróleo crudo [1].

Es así que, Rindu et. Al [2] en el 2021 evaluaron el desempeño de mezclas asfálticas en capa superior (AC-WC) elaboradas con residuos de cáscara de palma. Observó que la adición del 3% al 6% de residuos de ceniza de palma como relleno mejora las propiedades de estabilidad. Los parámetros de flujo en los objetos de prueba continúan disminuyendo a medida que aumenta la cantidad de relleno de CCPA, lo que corresponde a un aumento en el parámetro del método de Marshall, que endurece la mezcla; lo que indica que, la mezcla puede resistir la deformación causado por las cargas de tráfico e indica que esta CCPA puede ser adecuada como agregado en mezclas asfálticas.

Por otro lado, el estudio de Hoz [3] muestra en el 2017 que el efecto de CCPA y Cenizas Volantes (FA) sobre la reacción del cemento asfáltico determinado mediante ensayos específicos de laboratorio. En comparación con el asfalto original al que se le añadió CCPA de 0% hasta 100%, la temperatura de ablandamiento y la viscosidad aumentaron y la penetración disminuyó después de la adición de FA. Todos los porcentajes de CCPA evaluados en las mezclas asfálticas tuvieron mayor estabilidad y resistencia al ahuellamiento.

Peña [4] indica que la composición química del CCPA [sílice (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)] puede producir mucha adherencia del material debido a la alta actividad puzolánica, se solucionó el inconveniente de las

propiedades mecánicas en la mezcla asfáltica en caliente incorporando distintas cantidades del 0.25% al 1.0% de CCPA, logrando así la estabilización y aumentando la fuerza de adhesión de estos dos materiales. Esto proporcionará propiedades mecánicas mejoradas y evitará daños por destrucción (deformación permanente).

Chacon et. Al [5] en el 2011 establecen que al añadir diferentes porcentajes de CCPA comprobó que la estabilidad de asfalto modificado incremento 2% en un porcentaje de cementante óptimo de 5.5%, el principal método a usar es el método Marshall considerando las propiedades del pavimento, evaluando así su comportamiento mecánico.

Es importante conocer el uso adecuado del asfalto como material ligante, debido a que es el más utilizado en las carreteras de todo el mundo. Además, es necesario realizar un análisis técnico del diseño por mezcla asfáltica, con la finalidad de determinar sus respectivas propiedades físicas y químicas [6].

Según estudios realizados de la CCPA se ha demostrado que mejora las propiedades del asfalto. Por este motivo, se realizarán ensayos para verificar si este componente cumple con su objetivo.

El estudio está enfocado en la modificación del asfalto al adicionar CCPA como filler, donde su proceso y análisis permitirán establecer el comportamiento y la capacidad resistiva del material.

Los resultados de la investigación; si son favorables; beneficiarán a la industria de la construcción, al contar con un material diferente para mejorar el asfalto y permitirá su utilización como base para otras investigaciones.

## **2. Materiales y Métodos**

La investigación se ha estructurado en diferentes fases. Las dos primeras etapas se han centrado en la adquisición de los materiales y en la evaluación de las características físicas y mecánicas de los agregados, así como del AC20 con y sin la incorporación de CCPA. La fase final se ha enfocado en la planificación del diseño del pavimento asfáltico a través del método Marshall,

dividiendo esta etapa en dos secciones: una primera parte destinada a un diseño práctico para determinar el porcentaje óptimo de AC20, y una segunda parte que implica una modificación del AC20 óptimo con la adición de CCPA.

### 2.1. Obtención del CCPA

Se adquirieron dos quintales de cáscara de palma aceitera, los cuales fueron sometidos a un proceso de secado al ambiente durante 24h Fig. (1a). Posteriormente se llevo a cabo su correspondiente incineración en una mufla eléctrica a 650 °C durante una hora Fig. (1b), con el propósito de obtener su respectiva ceniza Fig. (1c).

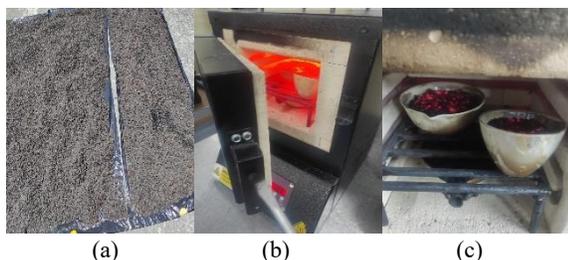


Figura 1 a) Secado al Ambiente. b) Incineración en Mufla. c) Ceniza

Finalmente, se trituró el material usando un martillo metálico Fig. (2a) y triturador eléctrico Fig. (2b) industrial hasta lograr partículas inferiores a 0.75 mm o 75 micras Fig. (2c).

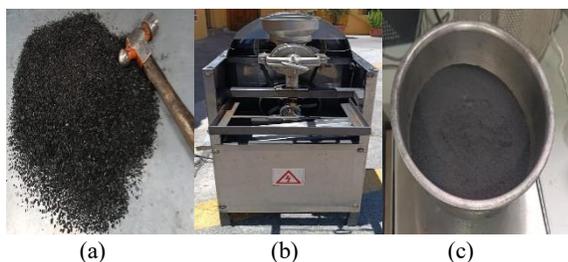


Figura 2 a) Trituración por Martillo Metalizo. b) Molino Eléctrico. c) Partículas

### 2.2. Ensayos bituminosos AC20

Bajo la norma NTE INEN 2515, la cual detalla los requisitos específicos de este material, se realizaron pruebas en el cementante asfáltico con el fin de determinar si el AC20 cumple con las propiedades exigidas y para determinar cuánta ceniza es óptima para su mejoramiento basados en la Tabla 1.

Tabla 1 NTE INEN 2515 AC20 Requisitos

AC20 INEN 2515			
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	-	

En el estudio de las propiedades de los materiales asfálticos, se llevaron a cabo varios ensayos para evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones. Primero, se realizó un ensayo de ductilidad conforme a la norma NTE INEN 916[7], donde se sometió una muestra de betún a un proceso de estiramiento a velocidad constante y a una temperatura específica de 25°C para evaluar su capacidad de deformación Fig. 3.



Figura 3 Ensayo de Ductilidad

Luego, se procedió a evaluar el punto de inflamación según la norma NTE INEN 0808[8], determinando la temperatura mínima de ignición del asfalto en la copa Cleveland Fig. 4.



Figura 4 Ensayo de Punto de Inflamación

Posteriormente, se llevó a cabo el ensayo de punto de reblandecimiento, como indica la norma

NTE INEN 0920[9], depositando una muestra de asfalto en anillos con borde de latón y una bola de acero, registrando la distancia a la que penetra la bola como punto de reblandecimiento.

Además, se evaluó la consistencia del AC20 mediante el ensayo de penetración (NTE INEN 0917)[10], aplicando una aguja con pesos específicos en tres puntos distintos sobre su superficie, lo que proporcionó información sobre su dureza y consistencia Fig. 5.



Figura 5 Ensayo de Penetración

Por último, se determinó la viscosidad del material empleando un viscosímetro rotacional Fig. 6, a una temperatura determinada, conforme a la norma ASTM D4402-06[11], lo que permitió evaluar su resistencia al flujo y capacidad para fluir a altas temperaturas.



Figura 6 Ensayo de Viscosidad

### 2.3. Áridos Pétreos

En la cantera de Pifo se obtuvieron tres tamaños de agregados pétreos: grueso de  $\frac{3}{4}$ ", medio de  $\frac{1}{2}$ " y arena fina para su respectivo análisis y mezcla.

Para adecuar los áridos a las dimensiones especificadas, según la norma NTE INEN 2566 [12], se emplean métodos estandarizados para garantizar la precisión y consistencia, utilizando el método A (separador mecánico).

En cuanto al análisis granulométrico, de acuerdo con las normas técnicas específicas (NTE INEN 0696)[13], se procede a secar el material en un horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante un período de 24 horas  $\pm 4$  horas. Posteriormente, se lleva a cabo la separación del material mediante tamizado y agitación mecánica por un tiempo de 10 minutos  $\pm 2$  minutos, seguido por la suma del peso retenido en cada tamiz para la elaboración de la curva granulométrica del agregado fino y grueso Fig. 7.

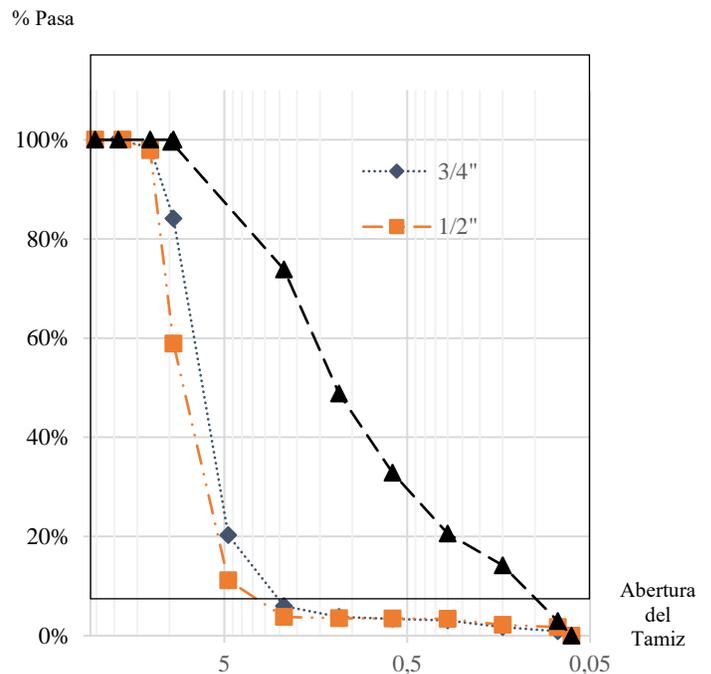


Figura 7 Granulometría de los 3 Agregados

En relación con la determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino, se obtiene una muestra representativa del árido fino y grueso, la cual se seca en un horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas  $\pm 4$  horas Fig. (8a). Para el árido grueso, se realiza la determinación del peso seco, seguido por la inmersión en agua por 24 horas  $\pm 4$  horas. Después de este tiempo, se procede a medir el peso saturado y el peso sumergido Fig. (8b).

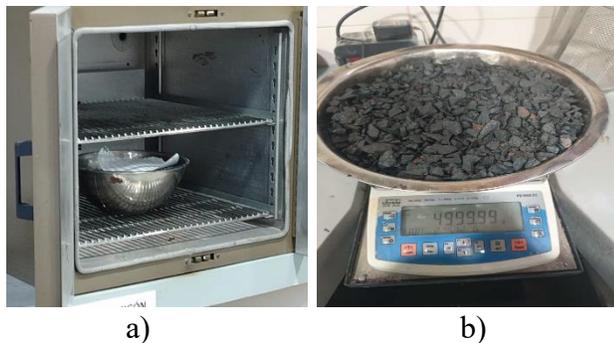


Figura 8 a) Secado Horno 24h. b) Peso Saturado Grueso

En el caso del árido fino, se utiliza una probeta de volumen conocido que se llena con el material, compactándolo cuidadosamente Fig 9(a). Luego se pesa la probeta con el material, y se calcula la densidad dividiendo la masa del material entre el volumen ocupado en la probeta.

Posteriormente, se llena la probeta con agua hasta cierto nivel y se sumerge el árido fino en el agua, permitiendo que el aire atrapado se libere Fig. 9(b). Se pesa la probeta con el agua y el árido fino sumergido, y se calcula la densidad relativa dividiendo la diferencia de masas entre el árido sumergido y el agua desplazada entre el árido y el agua.

Finalmente, se sumerge el árido fino en agua durante un período de tiempo específico, se seca superficialmente y se pesa. La absorción se calcula como el porcentaje de la diferencia entre la masa seca y la masa saturada en relación con la masa seca, según la norma NTE INEN 0857[14].

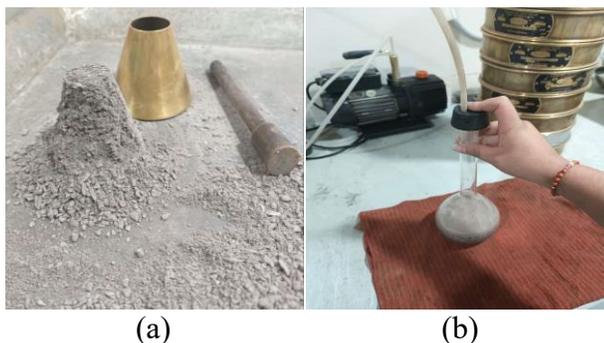


Figura 9 a) Compactación Árido Fino. b) Densidad Relativa árido fino

Por último, en la determinación de la degradación del árido grueso, se obtiene una muestra representativa que se seca en un horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta alcanzar un peso constante. Luego,

se coloca una cantidad específica de la muestra en el tambor de la Máquina de Los Ángeles, siguiendo la gradación tipo B. Después de hacer girar el tambor con 11 esferas a una velocidad determinada durante un número específico de revoluciones, se detiene la máquina y se retira la muestra para su análisis. Se compara el peso inicial con el peso de la muestra, utilizando la diferencia para calcular la degradación del árido grueso, según la norma NTE INEN 0860[15].

## 2.4. Mezcla AC20

Se comienza con la selección de los agregados pétreos, el asfalto y otros aditivos de acuerdo con las especificaciones del proyecto. A continuación, se establece la proporción de los materiales que conformarán la mezcla asfáltica los cuales serán determinados por una curva mediante granulometría como se muestra en la Eq. 1 obteniendo así un contenido de asfalto óptimo mediante la Eq. 2, teniendo en cuenta las características de resistencia y durabilidad requeridas. Posteriormente, se procede a mezclar los agregados pétreos, el asfalto y otros aditivos en una planta de mezclado para obtener una mezcla homogénea y uniforme.

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.20A + 12a + 135 \quad (1)$$

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

**S:** Superficie específica de los áridos.

**G:** %material retenido en el 3/8".

**g:** % material que pasa T. 3/8" y retiene el T. No. 4

**A:** %material que pasa T.No. 4 y retiene en el T. No. 50

**a:** % material que pasa T.No. 50 y retiene en el T.No. 200

**f:** % material que pasa T.No. 200

**M:** Coeficiente del tráfico (3.75-4.25)

Una vez que se ha preparado la mezcla, se procede a llenar los moldes Marshall con el asfalto y compactarlos utilizando una compactadora Marshall para formar las briquetas Fig. 10. Estas briquetas se compactan hasta alcanzar un peso de

1200 gr, aplicando un número específico de golpes, generalmente 75, para asegurar una compactación adecuada de acuerdo con la norma ASTM D5581 [16].



Figura 10 Fabricación de Briquetas

Posteriormente, se realiza el ensayo Bulk, que consiste en medir el espesor y el diámetro de las briquetas Fig. 11 para determinar el volumen de la mezcla asfáltica, siguiendo la norma ASTM D1559 [17].



Figura 11 Obtención de Pesos

Además, se realiza el ensayo Rice sumergiendo una porción de las briquetas trituradas en agua a una temperatura específica para calcular el volumen respectivo Fig. 12, que indica el espacio ocupado por el asfalto y el aire en la mezcla, de acuerdo con los ensayos rice establecidos en la normativa correspondiente (ASTM D2041)[18].



Figura 12 Ensayo Rice

Se analiza el método Marshall obtenido en datos de laboratorio con el fin de obtener el porcentaje óptimo de AC20, observando su variación al ser añadido CCPA y sin él, bajo la especificación del MOP (Tabla 2).

Tabla 2 Comparación Especificaciones MOP con y sin CCPA

PROPIEDADES	ESPECIFICACIÓN
VV	3-5 (%)
VAM	-(Adim)
VAE	>11 (%)
GMB	-(Adim)
ESTABILIDAD	>2000 (Lbs)
FLUJO	8-14 (1/100in)

**Vv:** Volumen de vacíos

**VAM:** Volumen de agregado mineral

**VAE:** Vacíos llenos con asfalto

**GMB:** Gravedad específica Bulk

### 3. Resultados y Discusión

Se comparan las propiedades físico-mecánicas del AC20 con y sin ceniza en distintos porcentajes, observándose una mejora al agregar un 5% (Tabla 3). Estos ensayos posibilitan el análisis para determinar la cantidad de CCPA que se emplea en el método Marshall.

A través de los ensayos, se ha determinado que a medida que se aumenta el CCPA, sus propiedades disminuyen en comparación con la utilización del 5%, que las aumenta, demostrando ser óptimo en estos procesos al mejorar la ductilidad con una variación del 1.5%, penetración del 0.2%, viscosidad del 0.2%, ablandamiento del 2.2% y punto de inflamación del 0.2%. Tras analizar los resultados de laboratorio, se ha determinado que el aumento óptimo de CCPA en el AC20 para la elaboración de briquetas es de 0.35g.

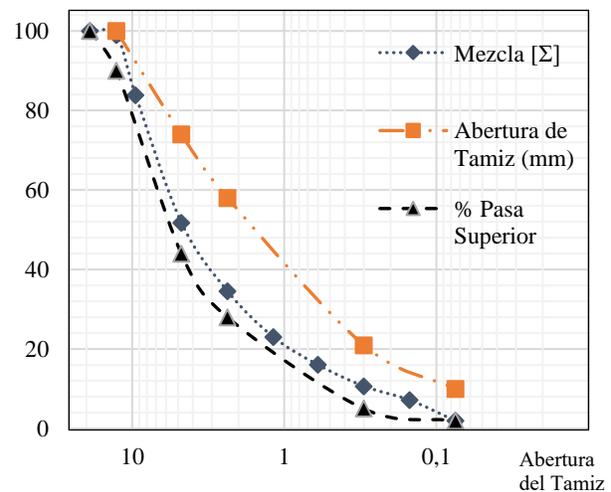
**Tabla 3** Ensayos AC20 modificado CCPA y AC20 sin modificar

	%	CCPA (gr)	Punto Inflamación	Ablandamiento	Viscosidad (25%)	Penetración	Ductilidad
Ensayo N°1			269°	47	625,8	56,2	92
	0%	0			624	61,4	109
					621,2	61,6	125
Ensayo N°2			267°	46	623,2	58,3	98
					625,4	63,2	104,5
					626,3	64,5	119,5
<b>Ensayo N°1</b>			<b>268°</b>	<b>48</b>	<b>628,6</b>	<b>60,5</b>	<b>100</b>
	5%	0,35			<b>619,8</b>	<b>61,7</b>	<b>125</b>
					<b>625,3</b>	<b>60,9</b>	<b>112</b>
					627,1	60,6	99
Ensayo N°2			269°	47	625,7	62	97,5
					626,9	60,3	124
					649,5	55	88
Ensayo N°1			269°	42	649	56,4	92
	5.5%	0,45			648,8	55,9	125
					650,1	57,8	88
Ensayo N°2			269°	44.4	650,3	58,5	92
					651,2	56,2	125
					633,1	49,9	83
Ensayo N°1			268	40	635,5	50,7	82
	6%	0,5			635,9	51,3	85
					632,3	50,1	86
Ensayo N°2			266°	40	637,5	51,6	80
					633,2	49,6	86
Limites			>232	>40	>210	>40	>100
			NTE INEN 808	NTE INEN 920	ASTMD 2170	NTE INEN 917	NTE INEN 916

### 3.1. Método Marshall

Mediante curvas granulométricas de los áridos se determinó que se es necesario un 29%, 28% y 43% correspondientemente a al material de ¾”, ½” y fino como se muestra en la Fig. 3, cumpliendo con la normativa (ASTM D315)[20] obtenido en los límites permitidos Fig 13.

Mezcla (Σ)



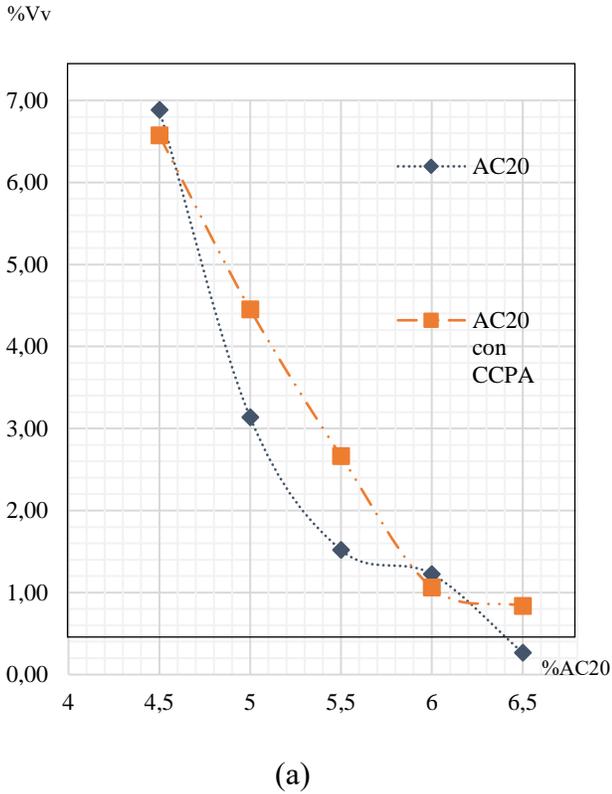
**Figura 13** Faja Granulométrica MOP 001F2002

El texto analizado sigue los requisitos establecidos por MOP-001-F-2002 para determinar el porcentaje óptimo de AC20, como se evidencia en la Tabla 4, donde se muestra que en su estado natural y con CCPA gracias a los siguientes resultados [21].

**Tabla 4** Resultados Óptimos Pruebas Marshall

Propiedades	Valor sin CCPA (5%)	Valor con CCPA (5%)
Vv (%)	3,14	4,45
VAM	14,6	15,9
VFA (%)	78,46	71,97
Gmb	2,26	2,22
Estabilidad (Lbs)	2956,55	3062,062
Flujo (1/100in)	9	9

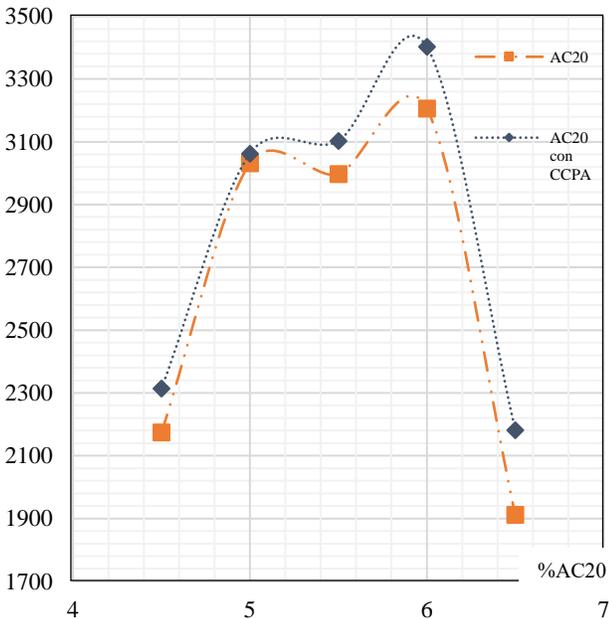
Se presentan las distintas curvas del volumen de vacíos, indicando que para un porcentaje del 4% en la muestra AC20 natural es del 4.88%, mientras que con CCPA es del 5.23% (Fig. 14a).



(a)

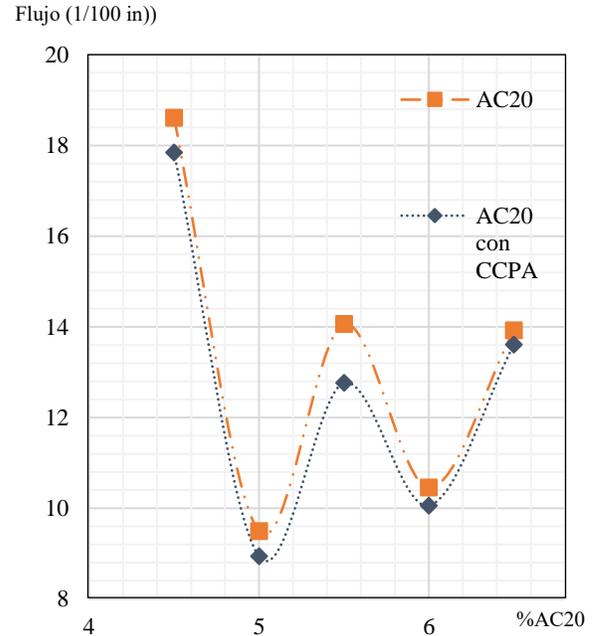
Posteriormente, se generan las curvas de estabilidad (Fig. 14c) y flujo (Fig. 14b) para la obtención de resultados de la tabla anteriormente mencionada [19].

Estabilidad (Lbs)



(b)

Estabilidad, Flujo y Volumen de Vacíos las cuales nos permiten observar la variación por añadir CCPA a comparación de una mezcla natural



(c)

Figura 14 Comparación de Curvas y Obtención de Datos a) Volumen de Vacíos, b) Estabilidad, c) Flujo

Después de realizar análisis del comportamiento del volumen de vacíos en muestras de AC20 natural y con la adición de CCPA, se ha observado una variación significativa. En el caso del AC20 natural, el volumen de vacíos ha oscilado entre un 6.89% y un 0.27%, mientras que con la presencia de CCPA, esta variación se sitúa entre un 6.57% y un 1.53%. Este rango de variación indica que la adición de CCPA tiene un impacto notable en las propiedades del material, especialmente en lo que respecta al volumen de vacíos.

A través del análisis de los datos obtenidos, se ha determinado que la modificación óptima para lograr un equilibrio en el volumen de vacíos es del 5%. Estos resultados sugieren que la adición de CCPA puede influir de manera significativa en la estructura y las propiedades del AC20, lo que tiene implicaciones importantes para su comportamiento en aplicaciones prácticas.

Este hallazgo resalta la importancia de considerar cuidadosamente la dosificación de aditivos como el CCPA en la formulación de mezclas asfálticas, con el fin de alcanzar las propiedades deseadas y optimizar su desempeño en diversas condiciones de uso. Fig. 15.

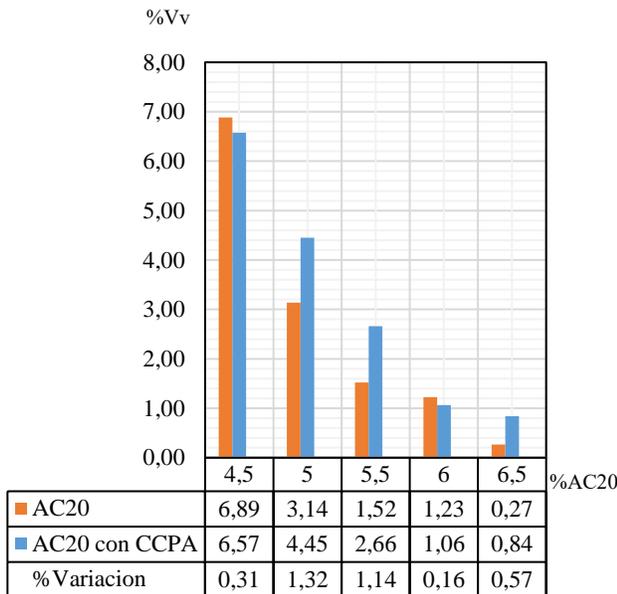


Figura 15 Análisis de Variación de Vacíos

La estabilidad de la mezcla asfáltica se ve significativamente influenciada por la adición de distintos porcentajes de CCPA, como se ha observado al obtener notables incrementos al utilizar un 5.5% y un 6% de este aditivo. Los valores medidos se sitúan entre 3102,903 Lb y 3402,649 Lb Fig. 16 para estos porcentajes respectivamente, lo que refleja un impacto positivo en la resistencia y comportamiento de la mezcla.

Estos resultados resaltan la importancia de encontrar el equilibrio adecuado entre el contenido de CCPA y el tipo de mezcla asfáltica (en este caso, AC20), ya que esta combinación óptima puede beneficiar en gran medida las propiedades físico-mecánicas del material. La mejora en la estabilidad sugiere que la mezcla modificada con CCPA puede presentar una mayor resistencia a las cargas y deformaciones, lo que a su vez conduce a un mejor desempeño y durabilidad en aplicaciones reales, como carreteras y pavimentos.

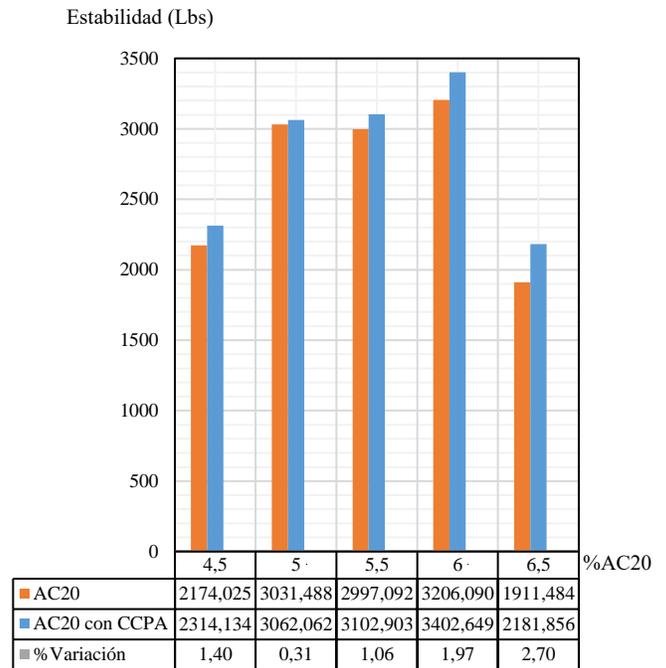


Figura 16 Estabilidad Marshall

Una baja estabilidad en la mezcla asfáltica puede resultar en una menor resistencia a las cargas y a la deformación, lo que conlleva a agrietamientos prematuros y una vida útil reducida de la superficie de rodadura, teniendo flujos altos Fig. 17.

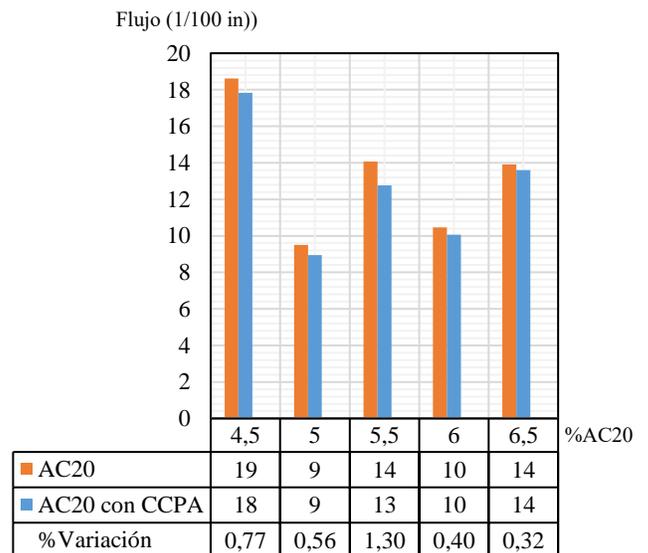


Figura 17 Flujo Marshall

Por otra parte, el análisis del Gmb (gravedad específica de la mezcla en caliente) revela decaimientos ligeros en la modificación, como se observa en la Figura 18, llegando hasta un 0.4%.

Sin embargo, estos resultados indican deterioro en el ensayo de reblandecimiento, lo que sugiere una menor durabilidad del asfalto cuando se incorporan porcentajes de CCPA que van desde el 0% hasta el 6.5%.

Este hallazgo es significativo, ya que el reblandecimiento es un indicador clave de la susceptibilidad del asfalto a ablandarse y deformarse bajo condiciones de carga y temperatura, y una mejora en este aspecto puede tener implicaciones negativas en la resistencia y durabilidad de la mezcla asfáltica en el tiempo.

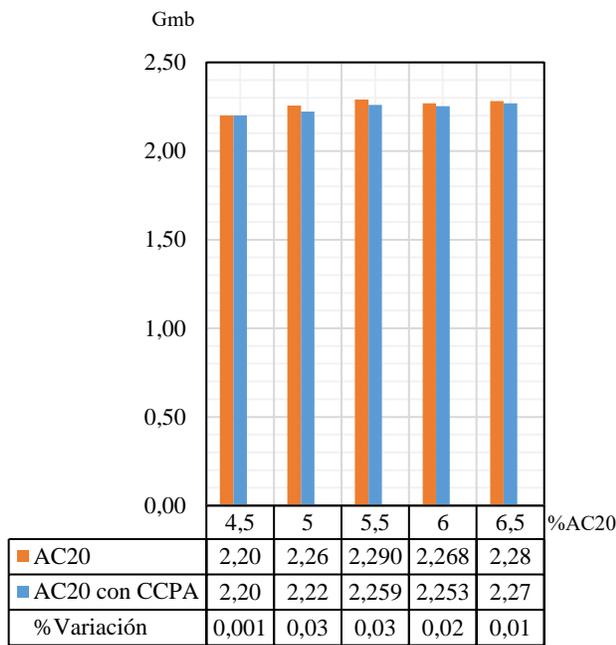


Figura 18 Gravedad Específica de Bulk

En relación con los vacíos en el agregado, se observa que en ciertos casos se mantuvieron estables, a excepción de los casos con un 0% y 6.5% de CCPA Fig. 19, donde se registró un aumento del 1%. Estos resultados sugieren que, en general, el porcentaje de vacíos se mantiene constante en la mayoría de los casos los que sugiere se apto en todos los casos.

El contenido de vacíos en la mezcla asfáltica puede influir en sus propiedades, y el aumento observado en los casos con mayores porcentajes de CCPA podría tener implicaciones en la compactabilidad y la resistencia a la deformación de la mezcla.

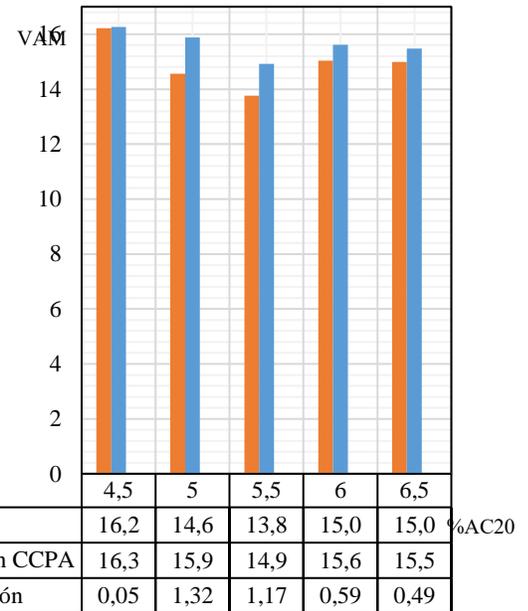


Figura 19 Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral

Al analizar los vacíos llenos con asfalto, se han identificado variaciones significativas que difieren entre la mezcla modificada con CCPA y la convencional. Se observa una reducción en los casos con un 5%, 6% y 6,5% de adición de CCPA, mientras que en los demás casos se registra un aumento considerable Fig. 20.

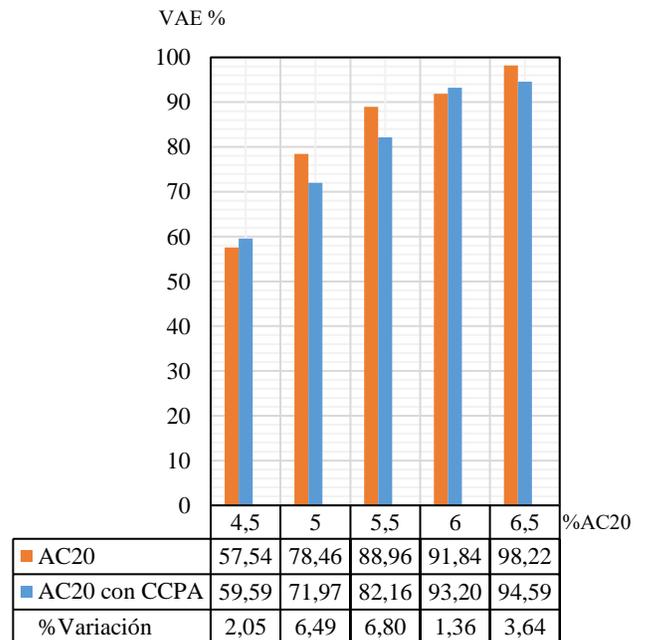


Figura 20 Porcentaje de Vacíos Llenos con Asfalto

Estos hallazgos indican que la adición de CCPA resulta más favorable en términos de la densificación de los vacíos en la mezcla asfáltica. Al contrastar los resultados entre la mezcla convencional y la que incorpora CCPA, se evidencia una notable variación en sus propiedades físico-mecánicas.

Se observa una mejora significativa en la densificación de los vacíos, la gravedad específica de la mezcla en caliente (Gmb), el flujo, la estabilidad y el volumen de vacíos (Vv) en la mezcla que contiene un 5% de CCPA, en comparación con la mezcla convencional.

Estos resultados cumplen con las especificaciones requeridas, lo que sugiere que la mezcla modificada con CCPA es un material más resistente y cumple con las normativas establecidas.

#### 4. Conclusiones

Se observa que al incluir el 0,35% de ceniza en el asfalto, demuestra ser óptimo en estos procesos al mejorar la ductilidad con una variación del 1.5%, penetración del 0.2%, viscosidad del 0.2%, ablandamiento del 2.2% y punto de inflamación del 0.2%.

Se concluyó que el volumen de vacíos óptimos y el volumen de agregado mineral en el 5%, cumple con el rango requerido de 3-5 por la MOP, en el caso del AC20 natural, el volumen de vacíos ha oscilado entre un 6.89% y un 0.27%, mientras que con la presencia de CCPA, esta variación se sitúa entre un 6.57% y un 1.53%.

Concluimos que la estabilidad y el flujo en el 5% cumplen con la normativa requerida por la MOP, obteniendo como resultado de estabilidad: sin CCPA=2956,55 lbs y con CCPA=3062,062 lbs; mientras que los resultados de flujo: sin CCPA=9 in y con CCPA=9 in. Lo que nos indica que incorporar ceniza mejorará el comportamiento mecánico a altos tráfico.

Estos resultados demuestran un impacto positivo de la adición de CCPA como filler/betún, ya que sus propiedades físico-mecánicas contribuyen a mejorar las capacidades del AC20, ofreciendo nuevas opciones para la mejora de manera natural e innovadora.

#### Referencias

- [1] PRO-ROAD, “CEMENTO ASFÁLTICO PRO-ROAD® AC-20.” Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.proroadglobal.com/wp-content/uploads/2022/09/Ficha-Te%CC%81cnica-Cemento-Asfa%CC%81ltico-AC-20-Pro-Road.pdf>
- [2] R. T. Bethary, D. E. Intari, W. Fathonah, and S. Andika, “The Evaluation of the use of Palm Shell Ash Waste to Polymer Modified Asphalt Mixture,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Oct. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/830/1/012010.
- [3] L. E. Cotes De La Hoz, “Evaluación de la influencia de la adición de ceniza del cuesco de palma africana en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas fabricadas con material laterítico,” 2017.
- [4] J. C. Peña Ancasí, “Desempeño mecánico de la mezcla asfáltica en caliente incorporando cenizas volantes provenientes de la termoeléctrica de Ilo.”
- [5] L. Eduardo, D. Chacon, J. Sebastian, and R. Santos, “UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA ESCUELA DE INGENIERÍAS FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL BUCARAMANGA 2011.”
- [6] S. Z. M. Asri, F. H. Khairuddin, C. P. Ng, N. A. Misnon, N. I. M. Yusoff, and A. N. H. Ibrahim, “Palm kernel shell as partial coarse aggregate replacement in asphalt mixture: Optimum binder content and volumetric properties investigation,” in *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2021, pp. 179–185. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1047.179.

- [7] Norma Ecuatoriana, “Materiales Bituminosos Determinación de la Ductilidad INEN 916”.
- [8] A. Cleveland, “Norma Técnica Ecuatoriana PRODUCTOS DE PETROLEO. DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTION EN VASO.”
- [9] “NTE INEN 0920\_ Materiales bituminosos. Determinación del punto”.
- [10] “NTE INEN 0917\_ Materiales bituminosos. Determinación”.
- [11] A. S. for T. and Materials, “ASTM D4402-06 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer,” *Annual Book of ASTM Standards*, vol. i, no. C, 2006.
- [12] “NTE INEN 2566\_ Áridos. Reducción de muestras a tamaño de ensayo”.
- [13] I. Ecuatoriano de Normalización, “NTE INEN 0696 (2011): Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.”
- [14] I. Ecuatoriano de Normalización, “NTE INEN 0857 (2010): Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.”
- [15] “470369163-NTE-INEN-0860-Aridos-Determinacion-del-valor-de-la-degradacion”.
- [16] “astm-d5581-resistance-to-plastic-flow-of-bituminous-mixtures-using-marshall-apparatus-pdf\_compress”.
- [17] “Astm D 1559 \_ ILIDE.INFO Platform PDF Viewer”.
- [18] Yrene, “Práctica N° 38 Ensayo Rice,” 2014.
- [19] “Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (G mm ) and Density of Asphalt Mixtures,” 2023.
- [20] “Astm D 3515 PDF \_ ILIDE.INFO Platform PDF Viewer”.
- [21] D. Consulting, “THEORETICAL MAXIMUM SPECIFIC GRAVITY (Gmm) AND DENSITY OF ASPHALT MIXTURES FOP FOR AASHTO T 209,” 2023.